



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO DE
RECUBRIMIENTOS PRODUCIDOS POR
PROYECCIÓN TÉRMICA PARA APLICACIONES
NAVALES.**

WILDER GUTIERREZ QUINTERO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, COLOMBIA

2014

RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO DE RECUBRIMIENTOS PRODUCIDOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA PARA APLICACIONES NAVALES.

Wilder Gutiérrez Quintero

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister Ingeniería Mecánica

Director (a):

PhD. MSc. Ing. John Jairo Olaya

Línea de Investigación:

Ingeniería de superficies

Grupo de Investigación:

AFIS (Análisis de fallas e ingeniería de superficies)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, COLOMBIA

2014

DEDICATORIA

A Pilar, mi dulce esposa, compañera y confidente por brindarme su ayuda y apoyo incondicional durante este retornar a la Universidad.

Agradecimientos

Al profesor John Jairo Olaya por su apoyo y guía durante el desarrollo de este trabajo.

A PROYMET por su colaboración durante el proceso de deposición de recubrimientos.

A los técnicos del laboratorio de soldadura, metalografía y tratamientos térmicos por su valiosa contribución en la realización de los ensayos.

A Msc. María del Pilar Torres por su constante apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A COTECMAR por proporcionar herramientas para el desarrollo del proyecto.

Resumen

El presente trabajo estudia la resistencia al desgaste abrasivo de dos tipos de recubrimientos a base níquel. El primero, Metaceram 23075 con agregados cerámicos de carburo de tungsteno y cobalto WC/Co y el segundo, Nitec 10224 con adiciones de hierro, boro y silicio; aplicados sobre los sustratos de fundición gris y bronce fosforado, mediante la técnica de proyección térmica a la llama. En la primera etapa se muestra la construcción y puesta a punto del equipo para ensayos de desgaste abrasivo con arena seca y rueda de caucho, según norma ASTM G-65. Allí se describen los componentes del equipo, de los cuales algunos fueron adquiridos comercialmente y otros fueron contruidos. Enseguida se realizó la calibración de variables como diámetro y dureza del recubrimiento de caucho, tamaño de grano, humedad y flujo del abrasivo, velocidad del motor y fuerza ejercida sobre la probeta. En la segunda etapa se depositaron los recubrimientos Metaceram y Nitec sobre los dos sustratos preparados superficialmente por los tres métodos: granalla, arena y pulido; y se les realizó un análisis morfológico y microestructural.

En la tercera etapa se validó el funcionamiento del equipo según procedimiento B de la norma en mención, realizando los ensayos de desgaste abrasivo, sobre los dos sustratos y los dos recubrimientos, presentándose repetitividad en los resultados para cada material. Posteriormente fueron aplicados métodos estadísticos para determinar el coeficiente de variación, el cual estuvo por debajo del límite máximo permitido en la norma (6%). Finalmente se efectuó el análisis de las huellas de desgaste obtenidas por microscopía electrónica de barrido y por Microscopía Laser Confocal. Los resultados mostraron que para los dos recubrimientos aplicados sobre la fundición gris se obtuvo una capa homogénea y con buena adherencia, mientras que para el caso del sustrato en bronce, se presentó desprendimiento de la capa y una adherencia muy pobre. La mayor resistencia al desgaste abrasivo se obtuvo con el Metaceram depositado sobre la fundición gris y el mecanismo de desgaste para este revestimiento fue una combinación de microarado, microfatiga y microagrietamiento. Para el Nitec, el mecanismo fue mucho más agresivo, presentándose el microarado y microcorte.

Palabras clave: Desgaste abrasivo, Norma ASTM G-65, tribología, máquina de desgaste, proyección térmica.

Abstract

Abrasive wear resistance of coatings produced by thermal spray for naval applications.

This work studies the abrasive wear resistance of two types of nickel-based coatings. The first ceramic aggregate Metaceram 23075 with tungsten carbide and cobalt, WC / Co and the second additions Nitec 10224 with iron, boron and silicon; applied on the substrates of cast iron and phosphor bronze, using the technique of thermal flame spraying. In the first phase the construction and startup of equipment for abrasive wear tests with dry sand rubber wheel is shown, according to ASTM G-65. There the Parts, some of which were purchased commercially and others were constructed are described. Then the calibration variable as the diameter and hardness of the rubber coating, particle size, moisture and abrasive flow, engine speed and force applied to the probe was performed. In the second phase, Nitec and Metaceram coatings on both substrates surface prepared by the three methods were deposited: grit, sand and polish; and its a morphological and microstructural was studied.

Below the operation of the equipment was validated according to procedure B of the standard references, performing on the two substrates and the two coatings, abrasive wear testing repeatability presenting the results for each material. They were then applied statistical methods to determine the coefficient of variation, which was under maximum limit allowed in the standard (6%). Finally, the analysis of scars wear obtained by Scanning Electron Microscopy and Confocal Laser Microscopy was performed. The results showed that for both coatings on the cast iron and a homogeneous layer with good adherence was obtained, while for the case of the bronze substrate, release layer and showed low adhesion. Most abrasive wear resistance was obtained with Metaceram deposited on gray cast iron and wear mechanism for this coating was a combination of plowing, microfatiigue, and microcracking. For Nitec, the mechanism was much more aggressive presenting plowing and cutting,

Keywords: Abrasive wear, ASTM G-65 Standard, tribology, wear machine, thermal spraying.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XII
Introducción	1
1. Marco teórico	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Desgaste.....	7
1.3 Desgaste abrasivo.....	9
1.3.1 Clasificación de desgaste abrasivo.....	10
1.3.2 Mecanismos de desgaste abrasivo.....	12
1.3.3 Ecuaciones para el cálculo de desgaste abrasivo.....	14
1.3.4 Efectos del sistema sobre el desgaste abrasivo [33]	16
1.3.5 Norma ASTM G-65.....	20
1.3.6 Descripción de la máquina	22
1.4 Proyección térmica.....	23
1.4.1 Generalidades	23
1.4.2 Principios de la proyección térmica.....	24
1.4.3 Técnicas de proyección térmica [67].	25
2. Desarrollo experimental	37
2.1 Diseño, construcción y puesta a punto del equipo	38
2.1.1 Materiales y dispositivos	38
2.1.2 Cálculo de diseño	46
2.1.3 Calibración de variables del equipo	47
2.2 Obtención de recubrimientos por proyección térmica a la llama	51
2.2.1 Fabricación de las probetas (sustratos).....	51
2.2.2 Preparación de la superficie del sustrato.....	52
2.2.3 Deposición de los recubrimientos	52
2.3 Ensayos de desgaste abrasivo	53
2.3.1 Número de ensayos	53
2.3.2 Procedimiento para el ensayo de desgaste abrasivo.....	54
2.4 Técnicas de caracterización.....	57
2.4.1 Análisis microestructural	57
2.4.2 Morfología y rugosidad.....	57
2.4.3 Microdureza	57

3. Resultados y análisis	59
3.1 Variables calibradas	59
3.2 Sustrato.....	59
3.3 Recubrimiento metaceram 23075	61
3.3.1 Análisis por difracción de rayos X.....	61
3.3.2 Análisis por microscopía electrónica de barrido	64
3.4 Recubrimiento Nitec 10224	67
3.4.1 Análisis por difracción de rayos X.....	67
3.4.2 Análisis por microscopía electrónica de barrido	69
3.5 Pruebas de desgaste abrasivo.....	72
3.6 Análisis de la huella de desgaste.....	75
3.6.1 Huella de desgaste de los sustratos	76
3.6.2 Huella de desgaste sobre el recubrimiento Metaceram	77
3.6.3 Huella de desgaste sobre el recubrimiento Nitec	79
4. Conclusiones	83
5. Recomendaciones	85
6. Bibliografía	87
A. Anexo: Planos del equipo	93
B. Anexo: Características del caucho	103
C. Anexo: Manual de operación y mantenimiento	104

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Tipos de desgaste (a) Abrasivo. (b) Adhesivo (c) Fatiga superficial. (d) Corrosivo o químico. (e) Erosivo. (f) Cavitación [12, 13,14].	9
Figura 1-2: Desgaste por abrasión. a) Desgaste de dos cuerpos. (b) Desgaste de tres cuerpos [20].	10
Figura 1-3: Micrografías desgaste abrasivo. a) Desgaste de dos cuerpos. (b) Desgaste de tres cuerpos.	11
Figura 1-4: Clases de desgaste abrasivo [24].	12
Figura 1-5: Mecanismos de desgaste por abrasión [14].	12
Figura 1-6: Mecanismos de desgaste en función del rango de penetración.	13
Figura 1-7: Modelo para el desgaste abrasivo [18].	14
Figura 1-8: Resistencia al desgaste Vs. la dureza del material [19].	17
Figura 1-9: Efecto de la dureza del abrasivo, relativa a la dureza del material, sobre el desgaste abrasivo [40].	19
Figura 1-10: Fractura de un recubrimiento.	20
Figura 1-11: Esquema general maquina DSRW normalizada por la ASTM G65.	22
Figura 1-12: Diagrama esquemático de una capa rociada térmicamente [63].	24
Figura 1-13: Elementos de la proyección térmica [66].	25
Figura 1-14: Clasificación de las técnicas de proyección térmica.	26
Figura 1-15: Esquema del proceso de proyección térmica por llama convencional. Material consumible: a) polvos b) alambre [66].	28
Figura 1-16: Equipo de proyección térmica en forma de polvos. a) Esquema general y b) Pistola de aspersion [20, 63].	29
Figura 1-17: Equipo de proyección de polvos a alta temperatura. a) Esquema general y b) Pistola de aspersion [20, 63].	30
Figura 2-1: Descripción del desarrollo experimental.	37
Figura 2-2: Equipo de desgaste abrasivo construido.	38
Figura 2-3: Despiece del equipo de desgaste abrasivo norma ASTM G-65.	39
Figura 2-4: Tolva.	40
Figura 2-5: Cubierta y bandeja de recolección.	40
Figura 2-6: Boquilla.	41
Figura 2-7: Motorreductor.	41
Figura 2-8: Eje y chumaceras.	42
Figura 2-9: Rueda motriz.	42
Figura 2-10: Portaprobeta.	43
Figura 2-11: Brazo mecánico.	43

Figura 2-12: Juego de pesas.....	44
Figura 2-13: Chasis.....	44
Figura 2-14: Sistema de control (a) Vista externa (b) Detalle de componentes y cableado.	45
Figura 2-15: Diagrama de cuerpo libre para brazo mecánico.	46
Figura 2-16: Micrografía SEM arena Ottawa.	49
Figura 2-17: (a) Trozo de tubería en bronce fosforado. (b) Probeta.	51
Figura 2-18: a) Probetas en fundición gris. (b) Probetas en bronce fosforado:	52
Figura 2-19: Forma de la Huella de desgaste abrasivo según ASTM G 65 (a) Huellas de desgaste correctas (b) Huellas de desgaste incorrectas.....	55
Figura 3-1: Micrografías SEM. Sección transversal del sustrato en fundición gris, preparado con: a) granalla b) arena c) pulido.....	60
Figura 3-2: Micrografías SEM. Sección transversal del sustrato en bronce, preparado con: a) granalla b) arena c) pulido.....	60
Figura 3-3: Morfología del sustrato en fundición gris, preparado con: a) granalla b) arena c) pulido.....	60
Figura 3-4: Morfología del sustrato en bronce, preparado con: a) granalla b) arena c) pulido.....	61
Figura 3-5: Espectro XRD: Sustrato Fundición gris, Recubrimiento Metaceram. Preparación: pulido, arena y granalla.....	62
Figura 3-6: Recubrimientos de Metaceram sobre bronce preparado con: a) Granalla b) arena y c) pulido.	63
Figura 3-7: Espectro XRD: Sustrato bronce, Recubrimiento Metaceram. Preparación: granalla.	63
Figura 3-8: SEM a 200X. Morfología del material de aporte Metaceram 23075 en polvo.64	
Figura 3-9: Micrografías SEM a 1000X: Sustrato Fundición gris, Recubrimiento Metaceram. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.	65
Figura 3-10: Micrografías SEM a 500X. Sección transversal Sustrato Fundición gris, Recubrimiento Metaceram. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.....	65
Figura 3-11: Caracterización química por EDS del Metaceram 23075.....	66
Figura3-12. Micrografías SEM. Sustrato bronce, Recubrimiento Metaceram, preparación: a) Granalla a 500X, b) arena a 2500 X y c) pulido a 500 X.	66
Figura 3-13: Espectro DRX: Sustrato Fundición gris, Recubrimiento Nitec. Preparación: pulido, arena y granalla.	68
Figura3-14: Espectro DRX: Sustrato bronce, Recubrimiento Nitec. Preparación: pulido, arena y granalla.	68
Figura 3-15: SEM a 200X. Morfología del material de aporte Nitec 10224 en polvo.....	69
Figura 3-16: Micrografías SEM a 1000X: Sustrato fundición gris, Recubrimiento Nitec, preparación: a) Granalla b) arena c) pulido.	69
Figura 3-17: Micrografías SEM a 200X. Sección transversal Sustrato Fundición gris, Recubrimiento Nitec. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.....	70
Figura 3-18: Caracterización química por EDS del Nitec 10224.....	70
Figura 3-19: Micrografías SEM a 1000X: Sustrato bronce, Recubrimiento Nitec, preparación: a) Granalla b) arena c) pulido.	71

Figura 3-20: Micrografías SEM a 100X. Sección transversal del recubrimiento de Nitec sobre Bronce preparados con: a) granalla b) arena c) pulido	71
Figura 3-21: Coeficiente de desgaste abrasivo K contra recubrimientos aplicados sobre la fundición gris.	73
Figura 3-22: Coeficiente de desgaste abrasivo K contra recubrimientos Nitec aplicados sobre bronce.	74
Figura 3-23: Volumen desgastado contra dureza del material.	75
Figura 3-24: Huellas de desgaste abrasivo obtenidas en el equipo construido. (a) Bronce, (b) Fundición gris, (c) Nitec (d) Metaceram (e) Huella según norma ASTM G-65.	75
Figura 3-25: Huellas de desgaste del sustrato fundición gris. (a) Micrografías SEM a 500x. (b) Microscopía Laser Confocal.	76
Figura 3-26: Huellas de desgaste del sustrato bronce. (a) Micrografías SEM a 100x. (b) Microscopía Laser Confocal.	77
Figura 3-27: Micrografías SEM a 500x. Huellas de desgaste del recubrimiento Metaceram, sustrato fundición gris. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.	77
Figura 3-28: Microscopía Laser Confocal. Huellas de desgaste del recubrimiento Metaceram, sustrato fundición gris. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.	78
Figura 3-29: Micrografías SEM a 100X. Huella de desgaste del recubrimiento Metaceram sobre bronce, preparado con granalla.	79
Figura 3-30: Micrografías SEM a 500X. Huellas de desgaste del recubrimiento Nitec, sustrato fundición gris. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.	79
Figura 3-31: Microscopía Laser Confocal. Huellas de desgaste del recubrimiento Nitec, sobre sustrato de fundición gris. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.	80
Figura 3-32: Micrografías SEM a 100x. Huellas de desgaste del recubrimiento Nitec, sustrato bronce. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.	80
Figura 3-33: Micrografías SEM a 100 X. Huellas de desgaste del recubrimiento Nitec, sustrato bronce preparado con granalla.	81
Figura 3-34: Microscopía Laser Confocal. Huellas de desgaste del recubrimiento Nitec sobre bronce, preparado con granalla.	81

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Tipos de ensayos estandarizados por la ASTM	21
Tabla 1-2: Procedimientos para ensayos de desgaste abrasivo, Norma ASTM G-65.....	21
Tabla 1-3: Características de los recubrimientos aplicados por proyección térmica	27
Tabla 1-4: Propiedades de recubrimientos obtenidos por proyección térmica.....	27
Tabla 1-5: Características de los recubrimientos Metaceram 23075 y Nitec 10224	33
Tabla 2-1: Valores obtenidos de velocidad del motor.	48
Tabla 2-2: Datos de dureza del recubrimiento de caucho	48
Tabla 2-3: Datos obtenidos de humedad del abrasivo.....	49
Tabla 2-4: Datos obtenidos de distribución granulométrica del abrasivo.	50
Tabla 2-5: Datos obtenidos de flujo de arena.....	50
Tabla 2-6: Parámetros de proyección para recubrimientos a base de níquel.	53
Tabla 2-7: Número de ensayos a realizar.	54
Tabla 3-1: Parámetros para calibración de variables del equipo.....	59
Tabla 3-2: Rugosidad superficial de los sustratos en fundición gris y bronce, con las tres preparaciones superficiales.....	61
Tabla 3-3: Resultados de los ensayos de desgaste abrasivo.....	72

Introducción

El desgaste abrasivo en componentes de máquinas es un fenómeno que se presenta constantemente a nivel industrial, lo que genera pérdidas de eficiencia, aumento en el consumo energético, reemplazo de piezas desgastadas, tiempos muertos en los procesos, entre otros. Razón por la cual ha tomado gran importancia la ingeniería de las superficies, tras la búsqueda de alternativas que incrementen la vida útil de las máquinas, aumenten su eficiencia y reduzcan los costos de producción y de mantenimiento.

Para la aplicación de revestimientos se han desarrollado varios métodos, a saber, deposición química de vapor (CVD), deposición física de vapor (PVD), electrodeposición, soldadura y rociado térmico; los cuales son considerados como películas gruesas, ya que se alcanzan capas mayores a 10 μm . La técnica de proyección térmica ha tenido una evolución significativa en los últimos años debido a sus grandes ventajas, ya que es un proceso relativamente económico, rentable, de fácil aplicación y muy versátil.

La proyección térmica por llama, es una técnica que consiste en depositar un material en forma de polvo o alambre fundido o semifundido, a alta velocidad, sobre una superficie previamente preparada; formando una capa de estructura laminar, acompañada de algunos defectos como: porosidad, inclusiones de óxidos y grietas. El equipo empleado es una antorcha que genera calor por combustión de gases, que utiliza oxígeno como comburente y acetileno, hidrógeno o propano como combustible.

Uno de los ensayos empleados para evaluar el comportamiento de un material cuando se encuentra en una situación específica de desgaste, es la norma ASTM G-65, que corresponde a una prueba estándar de desgaste abrasivo con arena seca y rueda de caucho "DSRW", el cual simula el desgaste de materiales por medio de partículas abrasivas de tamaño controlado, en condiciones de bajo esfuerzo y de abrasión por tres cuerpos. Es importante notar que el éxito de los resultados de este tipo de pruebas depende del control de los parámetros indicados en la norma.

Por lo anterior, este trabajo tiene como objetivo, evaluar el coeficiente de desgaste abrasivo de recubrimientos producidos por proyección térmica con aplicaciones en la industria naval, utilizando la norma ASTM G-65; para lo cual fue necesario construir y poner a punto un equipo de desgaste por abrasión, siguiendo los parámetros especificados en la norma. Posteriormente fueron aplicados los recubrimientos a base de níquel; Metaceram 23075 y Nitec 10224 sobre los sustratos en fundición gris y bronce fosforado, mediante las técnicas de proyección térmica por llama; luego se efectuó un

análisis microestructural y morfológico de los revestimientos obtenidos. Enseguida se evaluó la resistencia al desgaste abrasivo realizando pruebas en el equipo construido, utilizando el procedimiento B. Por último, se caracterizaron las huellas de desgaste mediante microscopía electrónica de barrido y microscopía laser confocal, identificando los diferentes mecanismos de desgaste.

1. Marco teórico

1.1 Antecedentes

- **RODRÍGUEZ, Daniel Felipe**[1], efectuó el diseño y la construcción de una máquina de desgaste abrasivo basándose en la norma ASTM G-65, para ello utilizó programas de elementos finitos así como teoría de resistencia de materiales, donde logró obtener las dimensiones, materiales y geometrías más apropiadas para los diferentes componentes del equipo,

Una vez construido el equipo realizó la calibración de las variables más importantes del equipo, como son: dureza del recubrimiento de caucho, humedad y flujo de arena, fuerza ejercida sobre la probeta y velocidad del ensayo. Luego realizó ensayos de desgaste bajo el procedimiento B de la norma ASTM G 65, utilizando probetas de acero AISI 1020. Finalmente obtuvo las siguientes conclusiones: El control de las variables del equipo, la dureza y el acabado superficial de las muestras a ensayar es un factor muy importante en la repetitividad de los resultados de desgaste abrasivo.

- **SOTO, José L.** [2], Realizó el diseño de una máquina que simula el desgaste abrasivo en seco, según los parámetros de la norma ASTM G-65 y el desgaste por abrasión húmeda expuesto en la norma ASTM G-105. El autor fusionó ambos métodos y expuso una configuración que permite cumplir a cabalidad dichos procedimientos; para ello realizó un análisis para el cálculo y evaluación de las resistencias mecánicas, cargas y esfuerzos para determinar la geometría de diseño; así como parámetros mecánicos y físicos utilizando teorías de cálculo de resistencia de materiales. Luego, determinó los materiales y dimensiones más apropiados, valiéndose de herramientas de simulación y utilizando un factor de seguridad que aumentara el grado de confiabilidad del equipo.

- **ECHEVERRI, S., VARGAS, F. y BEDOYA, J.**[3], estudiaron la resistencia al desgaste de los recubrimientos WC y Ni – W- Co, depositados por la técnica de proyección térmica a la llama sobre sustratos de acero al carbono. Estos se obtuvieron con un equipo Eutalloy que utiliza como combustible una mezcla de oxígeno-acetileno. Una vez obtenidos los recubrimientos, se analizaron en un equipo de absorción atómica, donde se obtuvo su composición química, además se realizó análisis EDS y difracción de rayos X.

Para el estudio morfológico utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido, luego procedió a evaluar la resistencia al desgaste, utilizando la técnica de desgaste abrasivo de dos cuerpos según norma ASTM G-99, sobre una superficie de SiC con tamaño de grano aproximado de 600 “mesh”, la velocidad de ensayo fue de 550 rpm con una

duración de 20 minutos y una carga constante de 9,19 N aplicada en dirección perpendicular al recubrimiento.

Los autores concluyeron que la aplicación de este tipo de recubrimientos mejoró la resistencia al desgaste abrasivo del material utilizado como sustrato, atribuyendo esta mejora a la combinación obtenida por la baja sinterización de las partículas y la morfología irregular y puntiaguda de éstas.

- **GONZÁLEZ, R.** y sus colaboradores [4], en su trabajo realizaron análisis a un recubrimiento de Ni-Cr-B-Si depositado por proyección térmica a la llama, utilizando sustratos en fundición gris. Para desarrollar dicho estudio realizaron la preparación de la superficie con un granallado de acero al carbono para así poder construir un buen perfil de anclaje y eliminar impurezas o contaminantes de la superficie; luego con la ayuda de un equipo de proyección térmica tipo pistola (PB7-G METCO) depositaron el material utilizando una distancia de proyección de 125 a 150 mm y presiones de 1.7 bar para el oxígeno y 1 bar para el acetileno. Una vez depositado el material realizaron un tratamiento de refusión llevando la capa termo rociada a 1025°C, utilizando dos modalidades de producción de energía: en la primera emplearon la llama oxiacetilénica directa de la pistola y en la segunda mediante laser. El espesor de la capa inicial fue de 1.3 mm aproximadamente con una microestructura laminar que contenía porosidades, óxidos y partículas sin fundir, características de la técnica de deposición; además el recubrimiento presentó adherencia netamente mecánica. Luego obtuvieron micrografías del recubrimiento con las dos modalidades de refusión, observándose lo siguiente; para la primera hecha mediante llama, encontraron que la fusión del recubrimiento no llegaba a la interfase entre el sustrato y capa. Por otro lado, para el tratamiento con laser, género una fusión total de la capa depositada con la superficie del sustrato, creando una unión netamente metalúrgica.

En ambos casos se evidencia una disminución significativa de la porosidad y mayor homogeneidad en la microestructura. Luego del análisis microscópico, realizaron un análisis de microdureza, donde se muestra una disminución de la dureza en la superficie del recubrimiento inicial; sin embargo hacia el interior de la capa, el valor de microdureza aumenta hasta alcanzar el valor inicial de la capa depositada.

- **GUILEMANY, J.M.**, y colaboradores [5], Evaluaron la resistencia a la fricción, al desgaste abrasivo y a la corrosión de tres mezclas en volumen de WC-12Co (Metco 72-FNS) y NiCrBSi (Amdry 4724) depositados por la técnica de proyección térmica HVOF con un equipo SultzerMetco CDS 100; utilizando como combustible una mezcla de propileno y oxígeno sobre sustratos de acero. Los ensayos de desgaste abrasivo se realizaron en un equipo de abrasión de tres cuerpos con rueda de caucho bajo la norma ASTM G-65-91, utilizando una carga de 50N, con corindón de grado 32 como abrasivo y un flujo constante de 32 g/min. El desgaste fue expresado en velocidad de desgaste, dando como resultado que, al aumentar la proporción de WC-12Co disminuía la velocidad de desgaste. La resistencia al desgaste abrasivo de las mezclas fue siempre menor que la del WC-12Co depositado en forma individual, dado en parte a que la resistencia del NiCrBSi es tan pequeña que se alcanza el sustrato antes de terminar el ensayo.

Los autores concluyeron que la adherencia entre sustrato y recubrimiento es excelente con un anclaje netamente mecánico, dado a que no se evidencia difusión entre las fases presentes o entre el sustrato. Para todos los casos se evidencia una microestructura bastante compacta con una baja porosidad (inferior al 2%). Respecto a la microdureza encontraron que en todas las mezclas se produce un aumento entre el 15 y el 37 % respecto a los materiales de inicio, debido a procesos de endurecimiento de la matriz por impacto. Un aumento en la proporción WC-12Co conlleva a un aumento a la resistencia al desgaste abrasivo, y, un mayor contenido en WC-12Co en los sistemas aumenta la resistencia al desgaste por fricción. Finalmente la profundidad de la huella y el coeficiente de fricción aumentan con el volumen de NiCrBSi sobre todo al pasar de un 20%.

- **WANG, Y.-Y.** y sus colaboradores [6], estudiaron el efecto que tiene la rugosidad en la adherencia y espesor de los recubrimientos obtenidos por proyección térmica, mediante la técnica HVOF, utilizando como sustrato acero dulce. Los recubrimientos utilizados fueron Ni-Cr-B-Si y WC-Co. Las superficies se prepararon por granallado, con arena de varias granulometrías y por pulido con disco abrasivo; obteniéndose rugosidades de 59nm hasta 9.0 μ m y espesores de 60-70 μ m de 120-130 μ m y de 200-220 μ m. El ensayo de adherencia se realizó bajo la norma ASTM C633-79.

Los ensayos revelaron que la adherencia de los recubrimientos de NiCrBSi fue pobre en las probetas pulidas y se agrietaron, mientras que las capas de WC-Co anclaron de manera eficaz en los sustratos pulidos, aunque la fuerza de adhesión disminuía drásticamente con el aumento del espesor. Además se pudo determinar que para el caso del NiCrBSi, cuando la rugosidad del sustrato fue inferior a 1,7 μ m, la fuerza de adhesión fue similar a la de los sustratos pulidos. Por otro lado, cuando las rugosidades excedían de 5,8 μ m, la fuerza de adherencia se incrementó proporcional al grado de rugosidad. Finalmente encontraron que la fuerza de adhesión de los recubrimientos depositados con partículas totalmente fundidas no mejoraba la adherencia con el incremento de la rugosidad.

Los autores concluyeron que para los recubrimientos hechos por esta técnica, el mecanismo de anclaje es también el principal mecanismo de adhesión en la interfase, dado a esto, la adherencia se mejora al aumentar la rugosidad de la superficie, así como la cantidad de partículas fundidas durante la proyección; pero se debe tener en cuenta que el aumento progresivo del espesor disminuye la fuerza de adhesión dado a la gran acumulación de tensiones residuales producidas durante el proceso de fusión de las partículas.

- **KUMARI, Kanchan** y sus colaboradores [7], depositaron polvos de WC-10Co-4Cr sobre sustratos de acero 4340, utilizando las técnicas HVOF y combustión por pulso. Ellos evaluaron el efecto que tenía la microestructura obtenida por estas técnicas sobre la resistencia al desgaste abrasivo; explicando el mecanismo de desgaste obtenido. Los autores seleccionaron este tipo de recubrimiento, ya que su interés era utilizarlos en compresores de gases, más exactamente en los anillos de los pistones. El método aplicado fue abrasión de tres cuerpos, según la norma ASTM G-65. Los parámetros como la carga y la duración del ensayo, se variaron hasta obtener una pérdida de peso medible, llegando a una carga de 210N y una duración de 10 minutos. Aunque la norma utiliza como medio de desgaste arena Ottawa, los autores utilizaron alúmina con un

tamaño de grano de 50 μ m. La razón fundamental del uso de ésta, fue la presencia de este abrasivo en los gases que manejan los compresores; aunque la alúmina en los gases se encuentra en un menor tamaño fue imposible utilizarla así, ya que se producía obstrucción en la boquilla.

El flujo del abrasivo fue de 134 g/min; es decir que para cada prueba se utilizó 1,34kg de alúmina, provocando desgaste severo en cada recubrimiento. No se recicló el abrasivo y las pruebas se repitieron de 3 a 4 veces. Las probetas se limpiaron por medio ultrasónico en acetona, luego se secaron, pesaron y se determinó el volumen perdido. Una vez realizadas las pruebas de desgaste las superficies fueron examinadas mediante SEM. Además, se utilizó un perfilómetro para estudiar la rugosidad de la superficie desgastada y la profundidad máxima de la huella. Con el fin de comprender mejor los mecanismos de desgaste, se realizaron algunas pruebas con una dosis muy baja (alrededor de 7g) de abrasivo, estos ensayos fueron muy útiles para la comprensión de los mecanismos de desgaste presentes.

Los autores concluyeron que los recubrimientos estudiados tienen muy baja porosidad, pero la microestructura de cada recubrimiento es muy diferente. Parámetros microestructurales como: tamaño de grano de WC y la fracción de volumen de la matriz se calcularon por el método de intersección lineal. Aquí se encontró que los recubrimientos obtenidos por HVOF (pistola JP5000) presentan una alta retención de granos de WC de tamaño muy fino, dando lugar a una baja fracción volumétrica de la matriz, mientras que los recubrimientos obtenidos por combustión de impulsos muestran una descomposición significativa de los carburos de tungsteno primarios, dando lugar a la presencia de fases secundarias.

La dureza de los recubrimientos obtenidos por HVOF es de 1300 a 1370HV, mientras que los obtenidos por combustión de impulsos está en el rango de 1000-1100HV, esto se debe a la mayor presencia de WC encontrados en los depósitos realizados por el proceso HVOF.

La resistencia al desgaste abrasivo fue mayor para los recubrimientos obtenidos por el proceso HVOF que para los de combustión por impulsos. Esto es debido a una fuerte relación lineal entre la pérdida de volumen y la cantidad de matriz libre; además la baja porosidad es requisito fundamental para lograr una buena resistencia a la abrasión de los recubrimientos.

Finalmente, para mejorar la resistencia al desgaste abrasivo de la familia de recubrimientos de WC-Co se debe obtener una microestructura con alta retención de WC, tamaño de grano muy fino y uniforme y una mínima descarburación, lo que resulta en una microestructura mas compacta. Esto se puede lograr durante la proyección del material fundido mediante el uso de polvos optimizados, efectuando una mejor elección de la pistola de proyección y optimizando los parámetros de deposición.

- **LIAO, H.** y colaboradores [8] en su trabajo estudiaron la influencia del tamaño de grano del abrasivo sobre la resistencia al desgaste de recubrimientos obtenidos por proyección térmica de WC-Co "cermet". Los recubrimientos fueron hechos por tres procesos de proyección: APS, HVOF y VPS. La prueba al desgaste abrasivo fue llevada a cabo bajo la norma ASTM B611-85 con una fuerza de 10N, 250 revoluciones y utilizando alúmina de tres granulometrías. Finalmente se realizó una caracterización microestructural por SEM y DRX y un análisis de microdureza.

Para la resistencia al desgaste es claro que la dureza y la cohesión de los materiales desempeñan un rol muy importante, ya que en este tipo de películas las partículas de WC aumentan la dureza, y la matriz de cobalto toma la función de aglomerante, uniendo las partículas de carburo e incrementando la tenacidad.

Los autores pudieron concluir que para incrementar la resistencia a la abrasión de estos materiales es muy importante incrementar la cohesión entre las partículas de carburo y la matriz de cobalto; esta cohesión está relacionada con la interacción de las fases amorfas o nanocristalinas en los recubrimientos, específicamente en la interfase matriz-carburo. Respecto a los ensayos de desgaste, cuando las partículas abrasivas son pequeñas, los recubrimientos presentan menor desgaste sin importar su microestructura. En contraste, si el tamaño de grano es mayor que las partículas de carburo, el desgaste aumenta y la mejor resistencia se obtiene con el proceso HVOF. Así como la baja porosidad de la matriz, la dureza de los carburos y las interacciones matriz-carburo, juegan un papel importante en la cohesión de la estructura y por lo tanto en su resistencia a la abrasión. Finalmente, los esfuerzos residuales también tienen una influencia, porque ellos interactúan con las exigencias mecánicas de la película; así mismo, los esfuerzos de tracción son desfavorables para la resistencia a la abrasión. Ellos concluyen que al controlar de manera más eficaz las condiciones de deposición, dan como resultado una reducción significativa de los esfuerzos residuales y así un incremento en la resistencia al desgaste.

1.2 Desgaste

La Tribología es la ciencia y tecnología que estudia las superficies que están en contacto y movimiento relativo, así como los fenómenos que de ellos se derivan. Por lo que la fricción, desgaste y lubricación son tópicos fundamentales de esta ciencia [9].

De acuerdo a la norma DIN 50320, el desgaste se define como la pérdida progresiva de material de la superficie de un cuerpo sólido. Esta pérdida de material es ocasionada por fenómenos mecánicos y químicos, el material removido puede ser expulsado, transferido a la otra superficie o quedar atrapado dentro del sistema [10].

El desgaste en la industria no ocasiona fallas violentas, pero genera consecuencias funcionales, tales como:

- Reducción de la eficiencia
- Mayor consumo de energía
- Pérdidas de potencia y la generación de calor en los componentes, debido al aumento de los coeficientes de fricción.
- Incremento del consumo de lubricantes
- Reemplazo de componentes desgastados.

Si se agrupan los items mencionados anteriormente, se pueden determinar los tiempos muertos de la maquinaria y su gran impacto económico; por ello, en la actualidad la

industria en general, se ha interesado en el estudio de los fenómenos y beneficios tribológicos, que se pueden tener, si son bien aplicados [11].

▪ Tipos de desgaste

Un gran número de términos son utilizados en relación a las características de superficies desgastadas y a las clases de desgaste. Según Zum Gahr[10], Stolarsky[12] y de acuerdo con la norma DIN 50320 los cuatro principales tipos de desgaste o alguna combinación de ellos, son los siguientes:

- **Desgaste por abrasión:** Remoción de material debido al rayado u otra acción, generalmente ocasionado por las duras asperezas de una superficie o partículas libres duras que se deslizan sobre una superficie más blanda. Ver figura 1.1(a).
- **Desgaste por adhesión:** En los puntos de contacto de dos superficies en deslizamiento, puede ocurrir una adhesión momentánea entre las asperezas de cada superficie, y con el movimiento, los contactos son cortados [13]. Este mecanismo se basa en la formación y rompimiento de uniones adhesivas en las interfases. Ver figura 1.1(b).
- **Desgaste por fatiga superficial:** Fatiga y formación de grietas en regiones de la superficie debido a esfuerzos cíclicos que posteriormente ocasionan la separación del material. Ver figura 1.1(c).
- **Desgaste por Corrosión o químico:** También conocido como desgaste triboquímico; consiste en la formación de productos de reacciones químicas como un resultado de interacciones químicas entre los elementos del tribosistema o cuando ocurre el deslizamiento de dos superficies en ambientes corrosivos. Ver figura 1.1(d). Algunos expertos en este tema afirman que este campo no hace parte de la tribología, ni del desgaste, cuestión que no se entrará a discutir.

La deformación plástica generalmente no es clasificada como un tipo de desgaste, pero ésta juega un papel importante en muchos procesos de desgaste.

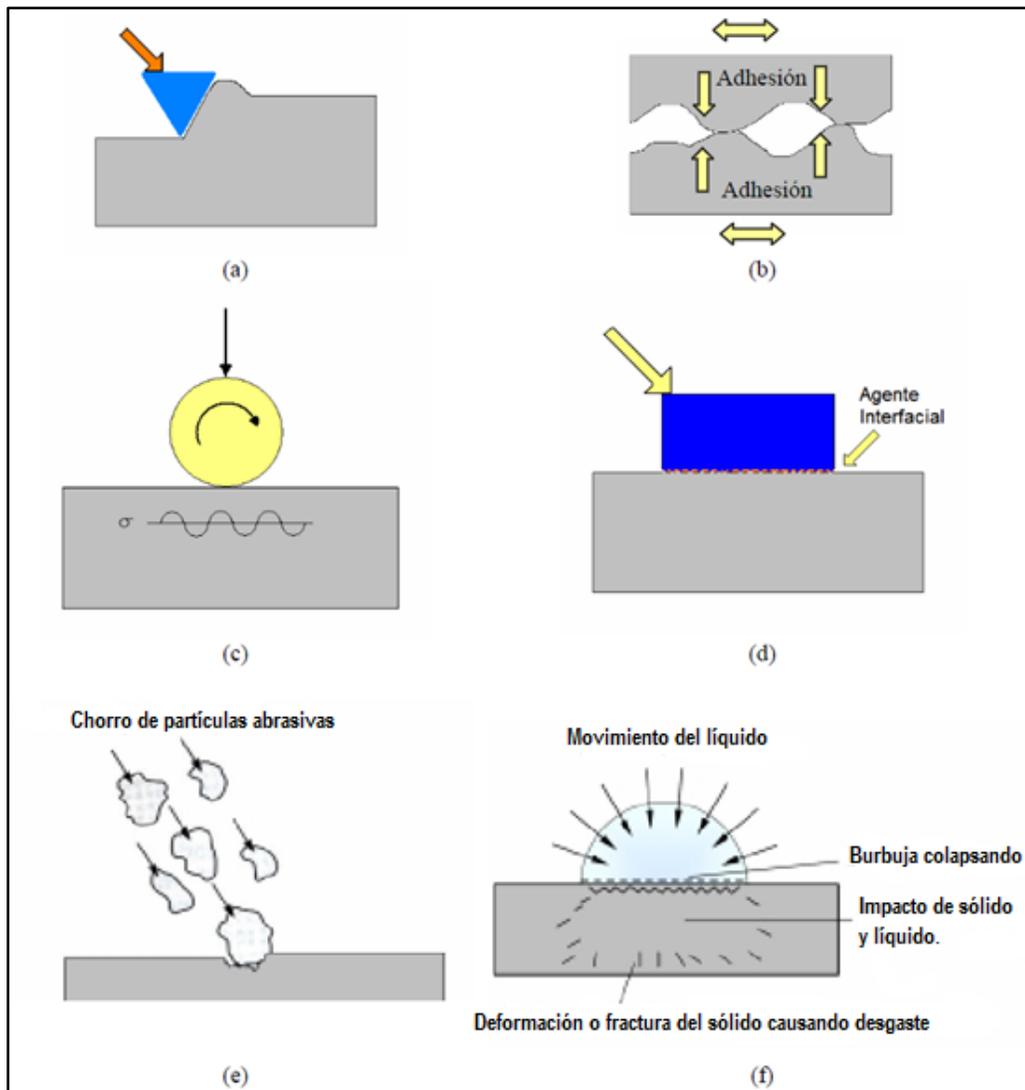
Otras clasificaciones de los mecanismos de desgaste son mucho más amplios, en las que adicionalmente se incluyen las siguientes categorías:

- **Desgaste por impacto o erosión:** Comprende dos tipos de fenómenos de desgaste; el erosivo y el de percusión. La erosión puede ocurrir por chorros y flujos de partículas sólidas pequeñas transportadas dentro de un fluido, en general aire o agua, y todo este conjunto golpea la superficie como se observa en la figura 1.1(e). La percusión ocurre por impactos repetitivos de cuerpos sólidos de mayor tamaño [13].
- **Desgaste por cavitación.** Ocurre cuando pequeñas cantidades de vacíos (burbujas) se forman en un fluido sometido a grandes velocidades u ondas de gran energía y golpean a la superficie provocando su erosión debido a grandes presiones transitorias especialmente durante el colapso de las burbujas. Ver figura 1.1 (f).

- **Desgaste por vibración:** Sucede cuando hay movimiento oscilatorio de baja amplitud en la dirección tangencial entre las superficies de contacto que están nominalmente en reposo [13].

Algunas de estas categorías son incluidas en los cuatro principales tipos de desgaste.

Figura 1-1: Tipos de desgaste (a) Abrasivo. (b) Adhesivo (c) Fatiga superficial. (d) Corrosivo o químico. (e) Erosivo. (f) Cavitación [12, 13,14].



Debido a que el presente trabajo se centra en el estudio del comportamiento del desgaste abrasivo, se hará énfasis en este tipo de desgaste.

1.3 Desgaste abrasivo

La Norma ASTM G40-92 define el desgaste abrasivo como la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella [15]. Las partículas abrasivas pueden ser las propias asperezas de la superficie o bien el producto del desgaste de las mismas; que tienden a cortar y/o arrancar material de la superficie, generando virutas y/o causando deformación plástica severa (superficial y subsuperficial) [16, 17, 18, 19].

1.3.1 Clasificación de desgaste abrasivo

Al entrar en contacto dos superficies ambas sufren desgaste, generándose mayor daño en alguna de ellas, la que sufrió un menor daño se le denomina superficie abrasiva. La magnitud del daño producido depende de la cantidad de partículas abrasivas en ambas superficies, la velocidad de contacto, condiciones ambientales, temperatura y fuerza ejercida en ambas superficies.

El desgaste se puede clasificar en dos categorías, de acuerdo al tipo de contacto y al nivel de daño sufrido, así [1]:

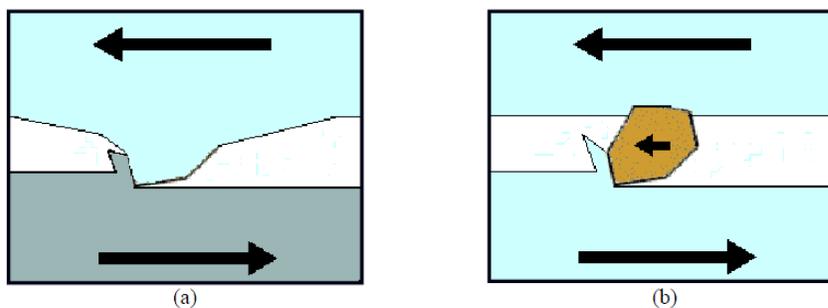
- **De acuerdo al tipo de contacto.**

Puede ser abrasión de dos y tres cuerpos, tal como se especifica a continuación [21, 22, 23].

- **Abrasión de dos cuerpos.** Ocurre cuando una superficie irregular de un material es presionada contra otra con menor dureza.

- **Abrasión de tres cuerpos.** Se presenta cuando existen partículas con una dureza superior atrapadas en medio de dos superficies. La fuerza aplicada se transmite a través de las partículas abrasivas. Ver figura 1.2.

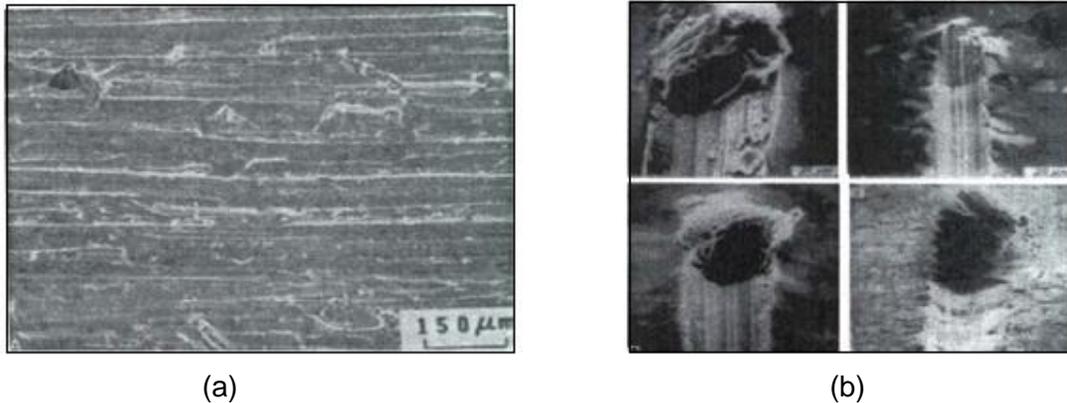
Figura 1-2: Desgaste por abrasión. a) Desgaste de dos cuerpos. (b) Desgaste de tres cuerpos [20].



El daño en la superficie del material es generado por el rayado o el desprendimiento del material, lo cual se observa en la figura 1.3. De cualquiera de estas formas, se considera

que la superficie no es la misma, razón que obliga a determinar el cambio de forma y la pérdida de volumen para poder tener una medición del desgaste [11].

Figura 1-3: Micrografías desgaste abrasivo. a) Desgaste de dos cuerpos. (b) Desgaste de tres cuerpos.



El desgaste abrasivo de tres cuerpos es de 2 a 10 veces menos intenso que el de dos cuerpos, debido a que solamente una pequeña porción de las partículas abrasivas entre las superficies causa el desgaste y debido a las variaciones en el ángulo de ataque de las partículas libres [10].

▪ De acuerdo al nivel de daño sufrido:

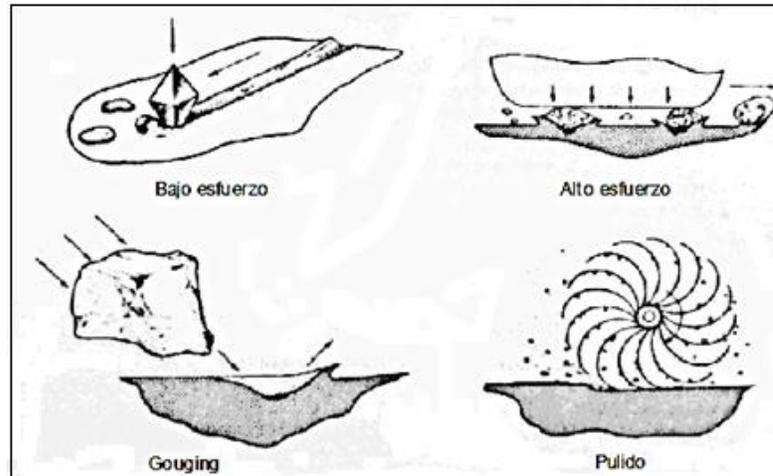
- **Abrasión de bajo esfuerzo o rayado.** Desgaste que ocurre debido a un frotamiento relativamente suave de partículas abrasivas contra superficies o elementos metálicos. Las cargas son lo suficientemente bajas de tal modo que las partículas no se desintegran o se rompen. Generalmente el daño se presenta en forma de rayado y la deformación de la superficie es mínima.

- **Abrasión de alto esfuerzo o desbaste.** Es aquella donde la fuerza ejercida entre las dos superficies es lo suficientemente alta como para triturar las partículas; en este tipo de abrasión aparece la deformación plástica, así como el rayado y el picado del material, debido a las partículas presionadas sobre el cuerpo.

- **Abrasión por surcos o ranuración (Gouging).** Se refiere a la remoción de material debido a la acción repetitiva de altas cargas compresivas producidas por partículas grandes como rocas, dejando a su paso grandes surcos en la superficie gastada.

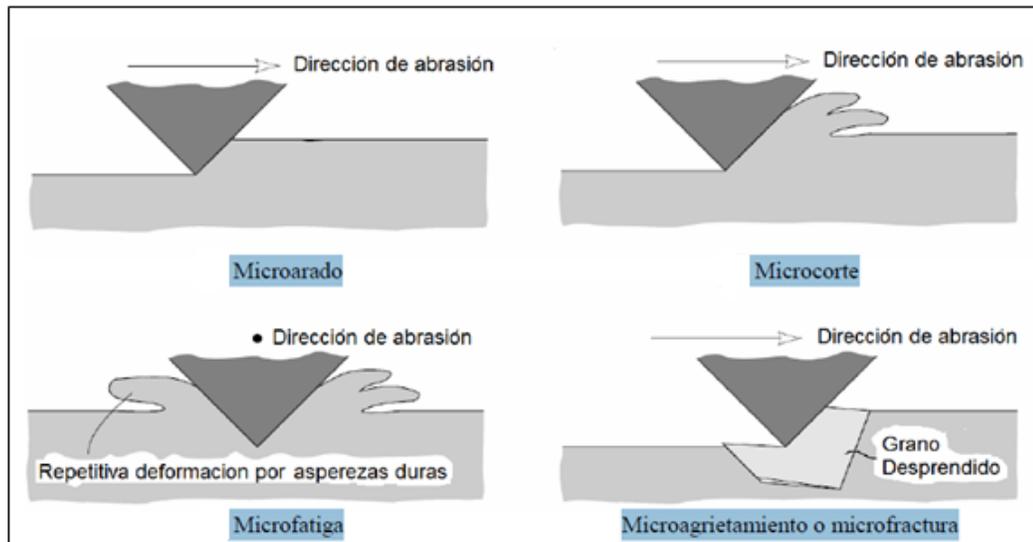
- **Abrasión por pulido.** Es un desgaste muy suave donde la abrasión es muy fina, el material se remueve por medio de frotamientos contra otras superficies, el rayado es poco visible y no hay fractura ni deformación plástica.

La figura 1.4 muestra los cuatro tipos de desgaste mencionados anteriormente.

Figura 1-4: Clases de desgaste abrasivo [24].

1.3.2 Mecanismos de desgaste abrasivo

La forma en que es arrancado el material o deformada la superficie de una pieza, se conoce como mecanismo de desgaste. Inicialmente se pensó que el desgaste abrasivo por partículas o asperezas duras sobre una superficie blanda, se asemeja al proceso de corte que realiza una herramienta a un material. Sin embargo, exámenes microscópicos revelan que dicho proceso de desgaste se aproxima y puede ser simulado por el corte que realiza la aspereza más afilada de la superficie dura sobre la superficie blanda. Es así, como este desgaste conforme a la interacción de las asperezas duras con el material blando se subdivide en los siguientes mecanismos: microarado, microcorte, microfatiga y microagrietamiento [14, 25], ilustrados en la figura 1.5.

Figura 1-5: Mecanismos de desgaste por abrasión [14].

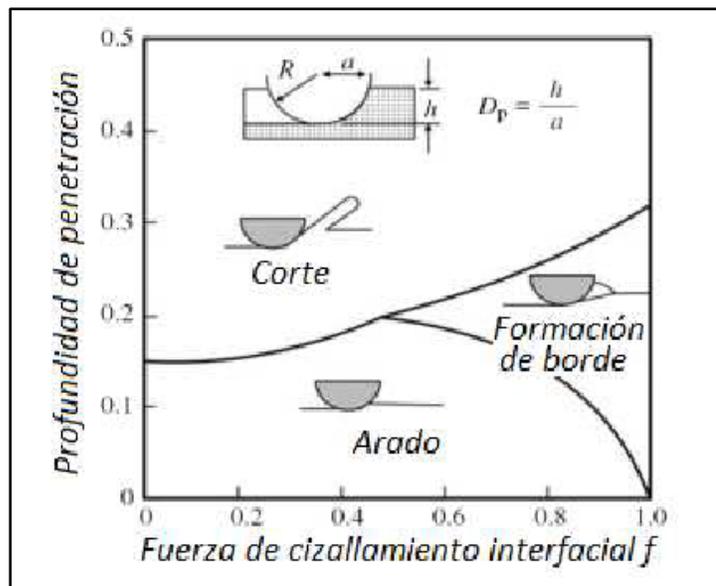
El microarado se debe al paso de una partícula abrasiva que no produce desprendimiento de material de una superficie desgastada, el material desplazado se acumula delante de la partícula formando un surco [26].

La superficie puede ser arada en repetidas ocasiones por las partículas que se encuentran en la superficie produciendo desprendimiento de material; este fenómeno se conoce como microfata. Si la partícula abrasiva o aspereza penetra la superficie liberando material de igual volumen que la ranura se presenta el microcorte. Las microgrietas pueden ocurrir por las altas concentraciones de tensión de la superficie frágil cuando se desliza una partícula produciendo desprendimiento de material en la superficie[10].

El microarado y el microcorte son los fenómenos fundamentales en la mayoría de los metales dúctiles y dependen principalmente del ángulo de ataque de las partículas abrasivas. De acuerdo con los investigadores Mulhearn y Sedriks[15], el material es liberado de la superficie por microcorte cuando el ángulo de ataque (α_c) de la partícula erosiva es mayor que un valor crítico. Ese valor crítico del ángulo de ataque es función del material que está siendo desgastado y de las condiciones de ensayo. Experimentalmente α_c describe una transición más gradual de microarado o microcorte. Autores como Stroud[27], Buttery[28] y Moore [29], discutieron el hecho que sólo una parte del surco producido por partículas duras, es removido como partículas de desgaste fuera del material, el resto se localiza en el borde.

El mapa de la figura 1.6 muestra los mecanismos de desgaste en función del rango de penetración y la resistencia al corte. Entre los mecanismos observados se identifican el corte, formación de cuña o borde y arado cuando se desliza un indentador esférico contra una superficie metálica sin lubricación. En pequeñas profundidades de penetración y fuerzas de corte, ocurre principalmente el arado desplazando el material al borde de la ranura.

Figura 1-6: Mecanismos de desgaste en función del rango de penetración.



Las crestas a lo largo del surco llevan a la fatiga con los pasos subsiguientes de la aspereza en contacto antes de desprenderse como partícula de desgaste; para este tipo de desgaste arado / fatiga, el coeficiente de fricción es relativamente bajo, comparado con otros mecanismos de desgaste abrasivo. Cuando la resistencia cortante es

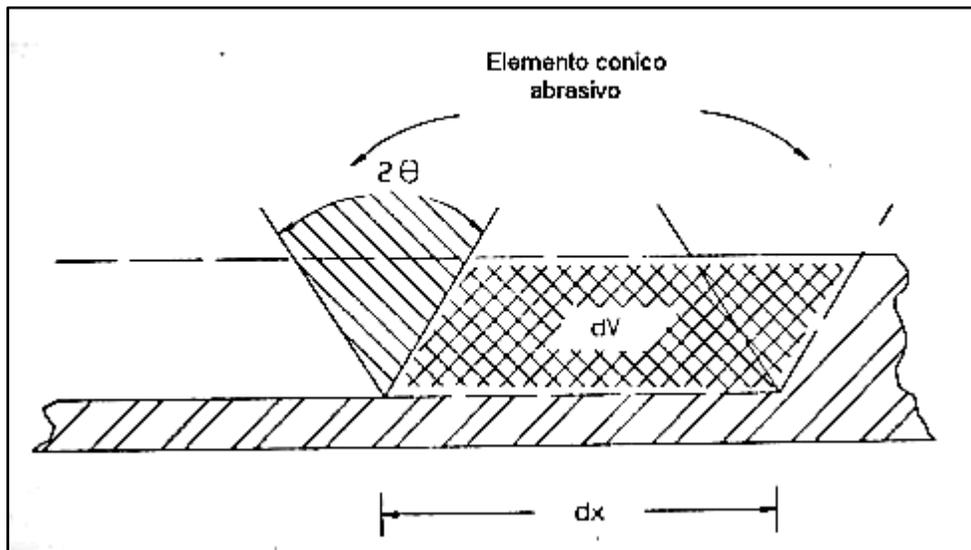
relativamente grande, las fuerzas de fricción en la zona de contacto empuja el material blando hacia el frente del indentador generando formaciones tipo cuña y el material eventualmente se remueve por propagación de grietas. Para grados de penetración mayores al 20%, los mecanismos de corte dominan donde el desplazamiento del material forma micro-obleas en frente del indentador que son fácilmente removidas como partículas de desgaste.

1.3.3 Ecuaciones para el cálculo de desgaste abrasivo

En aplicaciones de ingeniería lo más importante está relacionado con la pérdida de dimensiones o el cambio en la geometría del elemento, por tal razón, la unidad más utilizada para cuantificar el daño a la superficie, es el volumen. Estos cambios y la pérdida de volumen se relacionan a través de la geometría del surco, teniendo en cuenta que no siempre la relación entre volumen y dimensión de desgaste es necesariamente lineal. En algunos casos sólo se utiliza la pérdida de masa por su facilidad de medición [30, 31].

Las ecuaciones utilizadas para el desgaste abrasivo de dos y tres cuerpos se pueden desarrollar a partir del desgaste producido por un sólo grano o partícula abrasiva. Para estas ecuaciones se considera una partícula cónica, como la ilustrada en la figura 1.7, la cual es presionada contra una superficie más suave, de tal manera que al comenzar un movimiento relativo el grano produce un surco en la otra superficie, cuyo volumen es el área seccional de la indentación por la distancia de deslizamiento [1].

Figura 1-7: Modelo para el desgaste abrasivo [18].



Asumiendo que la carga sobre la partícula de sección transversal circular es suficiente para que el material experimente deformación plástica, se asume que la carga L está dada por la ecuación 1-1:

$$L = \frac{H\pi r^2}{2} \quad (1-1)$$

Donde H es la dureza del material y se divide sobre dos ya que sólo la mitad de la partícula abrasiva está en contacto con el material. Por consideraciones geométricas, el área seccionada del surco ilustrado en la figura 1-7 es:

$$As = r^2 \tan \theta \quad (1-2)$$

Por lo tanto el volumen de desgaste (dv), producido en una distancia de deslizamiento (x) se obtiene de la siguiente forma:

$$dV = r^2 \tan \theta dx \quad (1-3)$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se obtiene;

$$V = 2 \tan \theta \left(\frac{L}{\pi H} \right) x \quad (1-4)$$

Esta ecuación describe el volumen de desgaste abrasivo (V) producido por un sólo grano en una distancia de deslizamiento x. En estados actuales de desgaste se encuentra una mayor cantidad de granos en el proceso, por lo tanto, el volumen desgastado estará dado por la suma de cada uno de éstos; en situaciones reales, es posible que la carga aplicada no sólo esté soportada por las partículas abrasivas sino también por otro tipo de uniones como las protuberancias de las superficies en contacto, en este caso sería:

$$mL'' = kL \quad (1-5)$$

Donde m es la cantidad de partículas, L'' es la carga equivalente en cada grano y k es la fracción de la carga total soportada por el abrasivo. De esta manera el volumen desgastado es:

$$V = \frac{2K \tan \left(\frac{\theta}{\pi} \right) Lx}{H} \quad (1-6)$$

Existen algunas situaciones en donde el área seccional de la partícula no es igual al área seccional del surco, ya que esta zona puede ser más grande o más pequeña que el área de indentación, este fenómeno depende tanto del material utilizado como de las partículas abrasivas. Si el material tiene un comportamiento dúctil, el área del surco es menor que el área de indentación, debido a que existe mayor deformación elástica que plástica, de esta manera el material recupera parte de su forma original al retirarse la carga, si por el contrario el material tiene un comportamiento frágil, el surco puede ser mayor debido a posibles grietas que se pueden generar durante el deslizamiento y la fuerza aplicada. En estos casos se introduce un factor ϵ , el cual se define como:

$$\varepsilon = \frac{\text{Area} \cdot \text{del} \cdot \text{surco}}{\text{Area} \cdot \text{indentada}}$$

$$V = \frac{2\varepsilon K \tan\left(\frac{\theta}{\pi}\right) Lx}{H}$$

$$V = \frac{K * L * x}{H} \quad (1-7)$$

La ecuación (1-7) comúnmente se conoce como Ecuación de Archard, la cual se dedujo del desgaste adhesivo, pero se ha demostrado también que es muy útil para el desgaste abrasivo [32].

Donde K es un factor que depende de la forma de la partícula, de la naturaleza del proceso y de las propiedades del material. Generalmente los valores de K para desgaste abrasivo de dos cuerpos son mucho mayores a los obtenidos en el desgaste abrasivo de tres cuerpos, esto se debe principalmente a que las partículas están libres dentro del sistema de deslizamiento, de tal manera que pueden moverse fácilmente sobre la superficie y puede que no siempre desgasten la pieza, el abrasivo puede rodar por la superficie en vez de deslizarse y formar un surco.

En cuanto al tamaño de las partículas se puede decir que entre más grande el abrasivo mayor el valor de K, puesto que los granos de gran tamaño están menos influenciados por la rugosidad del material y por los escombros que se puedan interponer, así mismo estas partículas se pueden romper generando granos más puntudos y afilados, los cuales generan aún más daño superficial que las partículas anteriores [1].

Comúnmente, los materiales se describen como aquellos que tienen buena o mala resistencia al desgaste, R, la cual se define simplemente como el inverso del volumen de desgaste, así:

$$R = \frac{1}{v} \quad (1-8)$$

1.3.4 Efectos del sistema sobre el desgaste abrasivo [33]

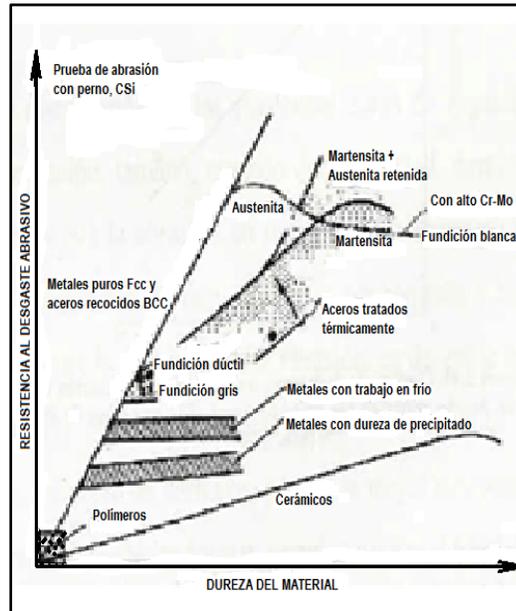
▪ Efectos de las propiedades del material.

Las principales propiedades de los materiales que tienen una influencia directa sobre el comportamiento del desgaste abrasivo son: dureza, tenacidad a la fractura, estructura cristalina, microestructura, elementos de aleación, formación de precipitados (segunda fase) y tamaño de las partículas [34].

- **Dureza:** La dureza de un material se relaciona con su velocidad de abrasión [35, 36]. Khrushchov[37], encontró una relación inversa entre la velocidad de abrasión y la dureza para materiales puros. Si la dureza de la partícula abrasiva es mayor a la de la superficie de contacto, el grano es capaz de penetrar el material y formar un surco sobre éste. El

abrasivo se considera duro, cuando su dureza es mayor a la del material en contacto. Por el contrario, una partícula se considera blanda si su dureza es menor a la del material en contacto, en este caso, el abrasivo no es capaz de penetrar la superficie, pero si puede desgastarlo por medio de fatiga superficial.

Figura 1-8: Resistencia al desgaste Vs. la dureza del material [19].



De acuerdo a la figura 1.8, la resistencia al desgaste de los componentes se incrementa al aumentar la dureza de la superficie de contacto. La dureza es aumentada por trabajo en frío, por tratamientos térmicos en los metales o tratamientos superficiales, que al depositar, difundir o alterar la microestructura superficial se obtiene una capa con mayor dureza que en el sustrato.

- **Estructura cristalina:** Se ha encontrado que el desgaste abrasivo depende de la estructura cristalina y de su orientación. Alison [38], demostró que el desgaste en los metales cúbicos es casi el doble de la velocidad de los metales hexagonales, lo cual se atribuye a una más baja velocidad del endurecimiento por acritud de los metales hexagonales.

- **Microestructura:** En un acero, la austenita y la bainita de igual dureza son más resistentes a la abrasión que la ferrita, la perlita y la martensita, debido a que las primeras son dúctiles y tienen una más alta capacidad de endurecimiento por deformación. Los mecanismos de desgaste abrasivo para los aceros austeníticos son el microcorte y el microarado, mientras que para los aceros martensíticos frágiles son microcorte, microarado y microagrietamiento.

Dentro de la microestructura de un material, la presencia de inclusiones contribuye al desgaste, ya que la mayoría de éstas son concentradoras de esfuerzos que aceleran la formación de grietas [39].

- **Tenacidad a la fractura:** La resistencia a la propagación de grietas es de gran utilidad en materiales frágiles (cerámicos y fundiciones de hierro blancas), en donde el mecanismo de desgaste más común es el de microgrietas. Entre mayor sea la tenacidad a la fractura menor será la probabilidad de que los materiales sufran desgaste por este mecanismo [18].

- **Elementos de aleación:** Al agregarle elementos de aleación a un material, éste mejora su desempeño. Dichas adiciones pueden ocupar lugares intersticiales o sustitucionales, como por ejemplo, en la fabricación del acero, al adicionar carbono al hierro, éste ocupa espacios intersticiales, permitiendo de esta forma mejorar la resistencia a la abrasión.

- **Formación de precipitados:** Una forma común de modificar las propiedades de un material es producir una segunda fase. Los tratamientos que causan la formación de precipitados pueden generar incrementos más grandes en la dureza y el esfuerzo de fluencia. Los precipitados duros o partículas tales como carburos pueden ser útiles para la disminución del desgaste abrasivo. En algunos metales, tales como fundiciones blancas, la segunda fase es más dura que la matriz, por tal razón protege la matriz. Para este tipo de fundiciones, investigaciones indican que aproximadamente el 30% del volumen de los carburos proporcionan la mejor resistencia a la abrasión [40].

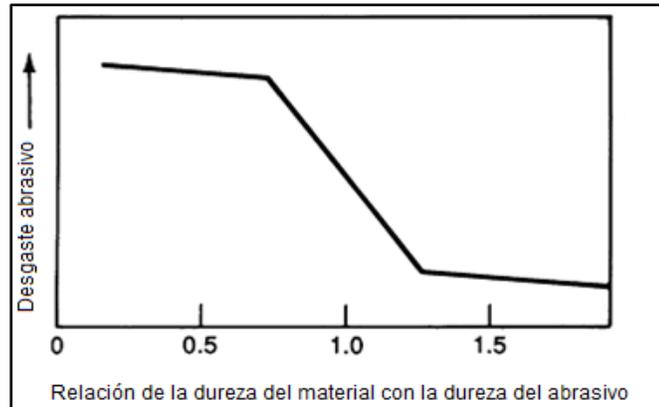
- **Tamaño de las partículas:** La relación entre el tamaño de las partículas y el tamaño de grano del abrasivo es importante. Los granos abrasivos más grandes tienden a crear astillas de desgaste más grandes. Cuando las partículas incoherentes son pequeñas, relativas a los granos abrasivos y a las astillas de desgaste, ellas pueden cortarse con la matriz, sumando una pequeña resistencia a la abrasión en el material. Si los granos abrasivos son muy pequeños, relativos a las partículas duras, y los espacios entre partículas son grandes, entonces los granos son capaces de socavar las partículas duras, consiguiendo que ellas falten o sean desalojadas por el grano abrasivo ocasional grande.

▪ Efecto del medio

Además de las propiedades del material, el medio o el entorno también afecta el desgaste. Dentro de los factores ambientales que actúan sobre el desgaste abrasivo se destacan: el tipo de abrasivo, la velocidad de contacto, la carga aplicada sobre el material y los efectos corrosivos.

- **Abrasivo.** El tipo de abrasivo y sus características como la dureza, la tenacidad y el tamaño del abrasivo afectan el desgaste abrasivo. La dureza de las partículas abrasivas es importante por la velocidad de abrasión del material [41]. Cuando dicha dureza excede la del material, el desgaste será más crítico ya que podrá penetrar la superficie y cortar/remover el material sin tener sus filos de corte angulares o redondeados. Ver figura 1. 9.

Figura 1-9: Efecto de la dureza del abrasivo, relativa a la dureza del material, sobre el desgaste abrasivo [40].



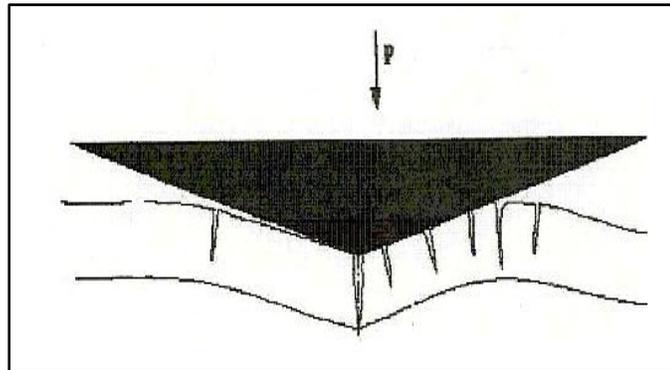
La forma de la partícula también es importante, debido a su influencia en la forma de la ranura producida en el material. También influye la carga de contacto y la transición desde el contacto elástico al plástico. Datos experimentales han confirmado que ocurre menos desgaste cuando los materiales son desgastados por partículas redondeadas que por partículas angulares.

Otro factor importante, es la tenacidad de las partículas abrasivas, ya que se incrementa la pérdida del material cuando la tenacidad del abrasivo aumenta.

- **Velocidad de contacto.** Se ha encontrado que la velocidad del desgaste abrasivo se incrementa lentamente con el aumento de la velocidad de contacto en el rango de 0 a 2.5 m/s y es atribuido al calentamiento friccional. El efecto es pequeño, debido a que toda la abrasión ocurre en un proceso adiabático próximo, el cual podría originarse aproximadamente en el mismo pico de la elevación de la temperatura, independiente de la velocidad, para un volumen diminuto de material donde las asperezas remueven el material [33].

- **Carga.** El desgaste abrasivo ha mostrado ser proporcional a la carga, siguiendo la Ecuación de Archard (Ecuación 1-7). Sin embargo, este efecto proporcional se interrumpe cuando la carga es lo suficientemente alta para aplastar y fracturar las partículas abrasivas. Al descomponerse los granos, pueden aparecer dos situaciones, dependiendo de la nueva forma de las partículas. Si éstas son de tipo angular, el desgaste se puede incrementar y si las puntas de la partícula abrasiva son redondeadas, el desgaste disminuirá.

Es importante tener en cuenta que los materiales que han sido sometidos a tratamientos superficiales, tienen dos módulos de elasticidad, uno para la capa y otro para el sustrato; al aplicarles una carga sobre éstos, se generan esfuerzos en la interfase, haciendo que sufra agrietamientos o la fractura del recubrimiento, dependiendo de la intensidad de la misma; lo que aumenta la posibilidad de desprendimiento del material con mayor facilidad e incrementando la tasa de desgaste del material [11], tal como lo muestra la figura 1.10.

Figura 1-10: Fractura de un recubrimiento

- **Efectos corrosivos.** El desgaste abrasivo frecuentemente se incrementa por las condiciones corrosivas, particularmente a pH bajo. A menudo ocurre una sinergia entre el desgaste abrasivo y la corrosión, ya que la abrasión crea nuevas superficies que rápidamente corroe, y la capa de corrosión protectora normalmente se remueve por abrasión. Usando aparatos de laboratorio con abrasivos de taladrina, Madsen[42] demostró que el sinergismo de un componente abrasivo y corrosivo puede ser el doble que el de componentes individuales agregados juntos. En un estudio de rectificado, Tylezack[43] mostró que la velocidad de desgaste se incrementó cerca del doble, rectificando con agua residual ácida, más que con agua limpia.

1.3.5 Norma ASTM G-65

En la actualidad se emplean diferentes pruebas de laboratorio, desarrolladas por la ASTM, para evaluar la respuesta del material cuando se encuentra en una situación específica de desgaste, de tal manera que se pueden estudiar y simular las distintas situaciones de este proceso. Adicionalmente investiga la naturaleza del daño superficial. En la tabla 1-1 se muestran diferentes tipos de ensayos estandarizados por la ASTM [31, 44].

Tabla 1-1: Tipos de ensayos estandarizados por la ASTM

NORMA	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO
D-4172	Prevención del desgaste, características de fluidos lubricantes.
D-4170	Protección al desgaste por rozamiento mediante grasas lubricantes.
G-32	Prueba de erosión por cavitación.
G-65	Ensayo de desgaste abrasivo con arena seca y rueda de caucho.
G-73	Prueba de erosión por choque de líquidos.
G-75	Abrasión en medio húmedo (lodos).
G-76	Erosión por el choque de partículas sólidas mediante chorros de gas.
G-77	Clasificación de la resistencia al desgaste de los materiales, utilizando la prueba de block-on-ring.
G-81	Ensayo de abrasión por ranurado.
G-83	Desgaste por cilindros cruzados.
G-98	Prueba de rozamiento.
G-99	Ensayo Pin on disk.
G-105	Ensayo de desgaste abrasivo con arena húmeda y rueda de caucho.
G-132	Ensayos de abrasión por pin.
G-133	Prueba de desgaste por deslizamiento recíprocante.
G-134	Prueba de erosión por cavitación con chorros de líquido.

El presente estudio se centra en la norma ASTM G-65, la cual es una prueba estándar de desgaste abrasivo con arena seca y rueda de caucho “DSRW” con siglas en inglés (*dry sand rubber wheel*) [45]. Este ensayo simula el desgaste de materiales por medio de partículas abrasivas de tamaño controlado, en condiciones de bajo esfuerzo y de abrasión por tres cuerpos [46, 47].

La tabla 1-2 muestra los cinco procedimientos especificados en la norma G-65 para ensayos de desgaste abrasivo; allí se clasifican de acuerdo a los grados de resistencia al desgaste o a los espesores de los recubrimientos [46]. Adicionalmente, la tabla indica los parámetros a tener en cuenta para efectuar los ensayos, a saber: fuerza ejercida sobre la probeta, revoluciones de la rueda y abrasión lineal (distancia de desgaste). Dichos valores son constantes para cada procedimiento.

Tabla 1-2: Procedimientos para ensayos de desgaste abrasivo, Norma ASTM G-65.

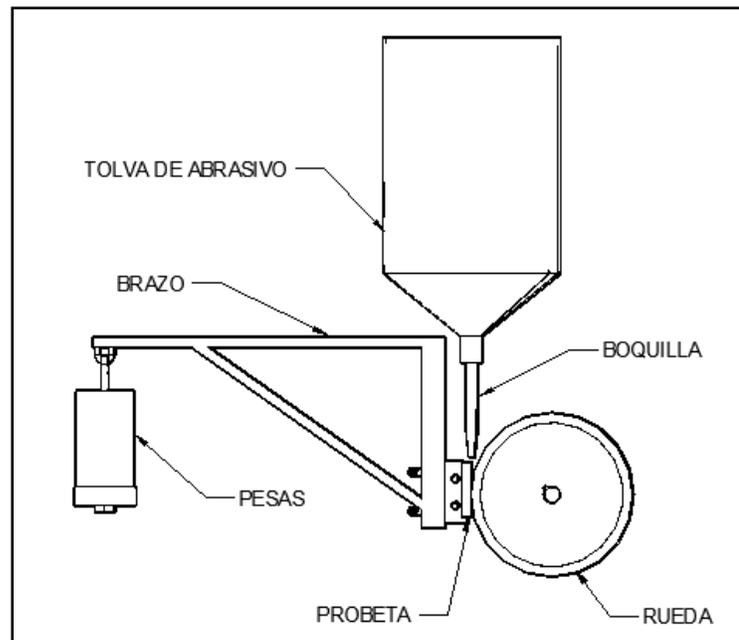
PROCEDIMIENTO ASTM	FUERZA EJERCIDA / PROBETA		REVOLUCIONES DE LA RUEDA	DISTANCIA DE DESGASTE	USOS
	N	Lbf			
A	130	29	6.000	4.309	Materiales con media a extrema resistencia a la abrasión.
B	130	29	2.000	1.436	Materiales altamente resistentes a la abrasión, pero es usado en materiales de media a baja resistencia a la abrasión. Se aplica cuando la pérdida de volumen desarrollados por el procedimiento A exceden los 100 mm ³ .
C	130	29	100	71,8	Para uso en capas delgadas.
D	45	10	6.000	4.309	Se utiliza en materiales con baja resistencia a la abrasión.
E	130	29	1.000	718	Materiales con media o baja resistencia a la abrasión.

En esta norma también se indican las características del material abrasivo, las dimensiones de la probeta, la descripción de la máquina de ensayo; donde se especifican los componentes más importantes del equipo. Además, las variables a tener en cuenta para la calibración del equipo y los cálculos para expresar los resultados de las pruebas de desgaste [45].

1.3.6 Descripción de la máquina

De acuerdo a la norma ASTM G-65, el equipo utilizado para las pruebas de desgaste abrasivo consta principalmente de una tolva y una boquilla para el paso de la arena seca, una rueda de acero recubierta con caucho vulcanizado, una palanca para control de la carga, un porta-probeta, un motor, un contador de revoluciones y un sistema de control. Entre el disco y la probeta se mantiene un flujo laminar y constante de abrasivo (arena) a través de la boquilla que deja pasar las partículas [48]. El abrasivo es presionado por medio de la palanca con una fuerza constante y definida. La dirección de rotación del disco tendrá el mismo sentido que el flujo de arena [49, 50, 51, 52, 53]. Ver figura 1-11.

Figura 1-11: Esquema general maquina DSRW normalizada por la ASTM G65.



El desgaste abrasivo generado en DSRW puede ser clasificado como arado y rodadura [54, 55, 56]. En el primer caso de desgaste las partículas de arena se embeben en el caucho y aran la superficie ensayada; mientras que en la rodadura las partículas de arena simultáneamente ruedan y deslizan entre el caucho y la superficie ensayada, los bordes irregulares de la arena ejercen elevada presión sobre la muestra causando indentación, deformación plástica y desprendimiento de material [57]. Estos dos

fenómenos son principalmente gobernados por la velocidad, la fuerza de contacto entre la rueda y la muestra, así como la dureza relativa de estos dos. Con fuerza reducida y/o bajas durezas en la muestra se genera rodadura [58] debido a que el caucho no se deforma lo suficiente como para embeber las partículas de arena, éstas ruedan y se deslizan entre las dos superficies.

Respecto a la influencia de las variables de ensayo sobre las tasas de desgaste, se ha establecido que cuando la fuerza y velocidad de deslizamiento se incrementan ocurre lo mismo con la tasa de desgaste, sin embargo la dureza de la muestra tiene el efecto contrario [35, 36]. No debe olvidarse que el calentamiento por fricción puede generar endurecimiento por deformación y además favorece la formación de películas de óxido generalmente frágiles [55]; la formación de éstas también es favorecida por elevada velocidad relativa y humedad en la arena [59]; otras variables que influyen en el ensayo son la rugosidad de la muestra, la granulometría y morfología de la arena.

El ensayo de desgaste ha sido realizado sobre diversos recubrimientos obtenidos por proyección térmica, en algunos de ellos, cuando contienen óxidos entre splats y si el régimen de desgaste es severo, se ha llegado a generar deslizamiento de splats en dirección del desgaste, este fenómeno es conocido como delaminación, y puede estar acompañado tanto de arado como de rodadura [60-61]. Ensayos realizados con depósitos de acero AISI/SAE 1020 han demostrado que el fenómeno de delaminación depende de la fuerza, velocidad del ensayo, así como de la estructura del recubrimiento [60].

1.4 Proyección térmica

1.4.1 Generalidades

El desgaste de componentes metálicos es un fenómeno que se presenta constantemente en el sector industrial; razón por la cual, ha tomado gran importancia la búsqueda de alternativas que mejoren las propiedades mecánicas y el desempeño de los diversos tipos de materiales [61].

Dentro de la gama de técnicas para aplicar recubrimientos protectores (galvanoplastia, soldadura, deposición física y química de vapor, etc), se destaca la tecnología de proyección térmica (thermal spray) [61], la cual es utilizada para aumentar la vida útil de componentes de máquinas y dispositivos que están sometidos a altas exigencias en ambientes de desgaste, corrosión y temperaturas elevadas [62].

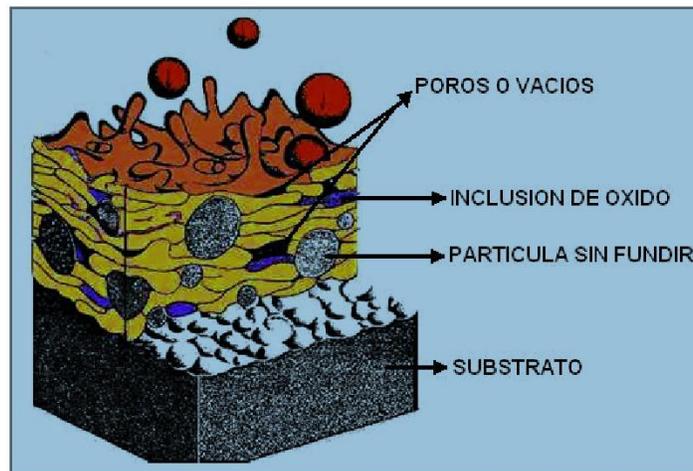
Las necesidades primordiales de los recubrimientos rociados térmicamente comprenden: restaurar medidas, obtener tolerancias precisas, así como modificar las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas de los diferentes componentes industriales, con el fin de prolongar la vida del producto, aumentar el funcionamiento y reducir costos de producción y de mantenimiento. Adicionalmente se consigue, alta productividad y bajo impacto ambiental.

Esta tecnología se destaca mundialmente por los adelantos conseguidos en diferentes campos como la medicina, la industria naval y aeroespacial, entre otras, además del crecimiento de las aplicaciones en las últimas décadas. A pesar de eso, no ha encontrado un buen desarrollo en Colombia, muy probablemente en función del desconocimiento de la propia tecnología y sus potencialidades [63].

1.4.2 Principios de la proyección térmica

La técnica consiste alimentar, calentar y proyectar un material como partícula individual en forma de gotas sobre una superficie (atomización). El equipo de proyección térmica genera el calor necesario mediante gases combustibles o arco eléctrico. Los materiales son calentados, fundidos y acelerados hacia el sustrato usando gas comprimido. Las partículas proyectadas impactan en el sustrato de superficie fría, aplastándose y formando placas delgadas de geometría lenticular “*splats*” que se adhieren a las irregularidades de la superficie preparada y entre ellas mismas (deposición), produciendo un recubrimiento de estructura laminar, que no es homogéneo y típicamente contiene cierto grado de porosidad y óxidos en el caso de proyección de metales, tal como se observa en la figura 1-12[63].

Figura 1-12: Diagrama esquemático de una capa rociada térmicamente [63]



La proyección térmica se caracteriza por ser un proceso con el que se logran depósitos con espesores que van desde pocas micras hasta varios milímetros, además se alcanzan temperaturas medias de trabajo que no comprometen al sustrato, ésto comparado con procesos como los depósitos como soldadura, que involucran elevadas temperaturas, dilución y distorsiones geométricas [64].

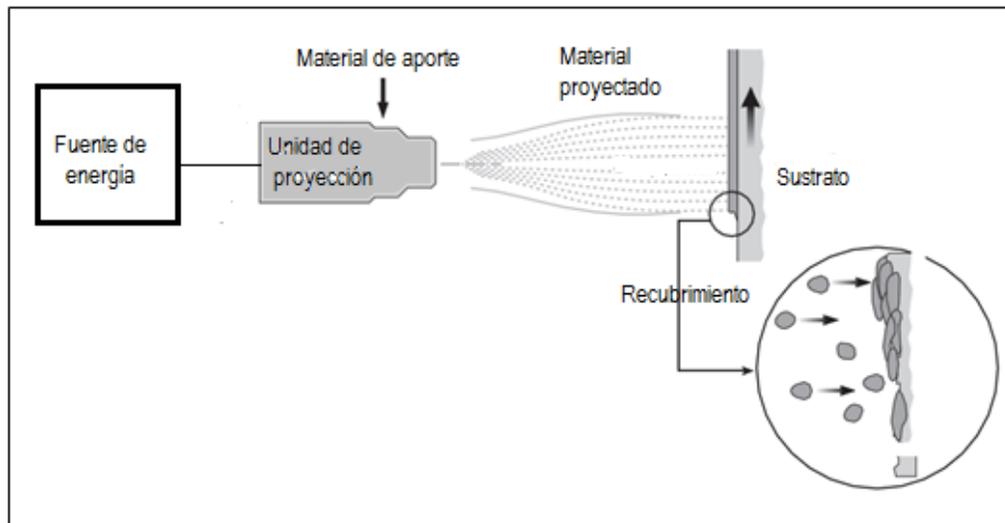
▪ Elementos de la proyección térmica [65].

Todo proceso de proyección térmica cuenta con un conjunto de elementos fundamentales, a saber:

- **Fuente de energía:** Gases y energía eléctrica necesarios para la fusión y transporte del material de aporte hacia el sustrato.
- **Material de aporte:** Materiales metálicos, cerámicos, polímeros o compuestos, presentados usualmente en forma de polvos, alambres o barras; éstos se pueden aplicar bajo condiciones atmosféricas normales o especiales.
- **Unidad de proyección:** Unidad que procesa la energía emitida por la fuente de energía para generar la fuente de calor (llama o arco), y en donde se incorpora y se funde el material a depositar.
- **Sustrato:** Material en donde se deposita el recubrimiento, luego de ser preparado mediante una serie de pasos para lograr limpiar la superficie y darle la rugosidad requerida.

La figura 1-13 muestra un esquema de los elementos de la proyección térmica.

Figura 1-13: Elementos de la proyección térmica [66].



1.4.3 Técnicas de proyección térmica [67].

Los procesos de proyección térmica pueden ser agrupados en tres grupos básicos, de acuerdo con su método de generación de calor.

▪ Por combustión.

- Llama (Flame spray). Utiliza como material de aporte polvo o alambre.
- Proyección a partir de oxígeno combustible a alta velocidad HVOF (High Velocity Oxy-Fuel).
- Antorcha de Detonación o D-Gun TM (Detonation spray).

▪ Eléctrico.

- Arco eléctrico
- Arco eléctrico con propulsión (Jet)

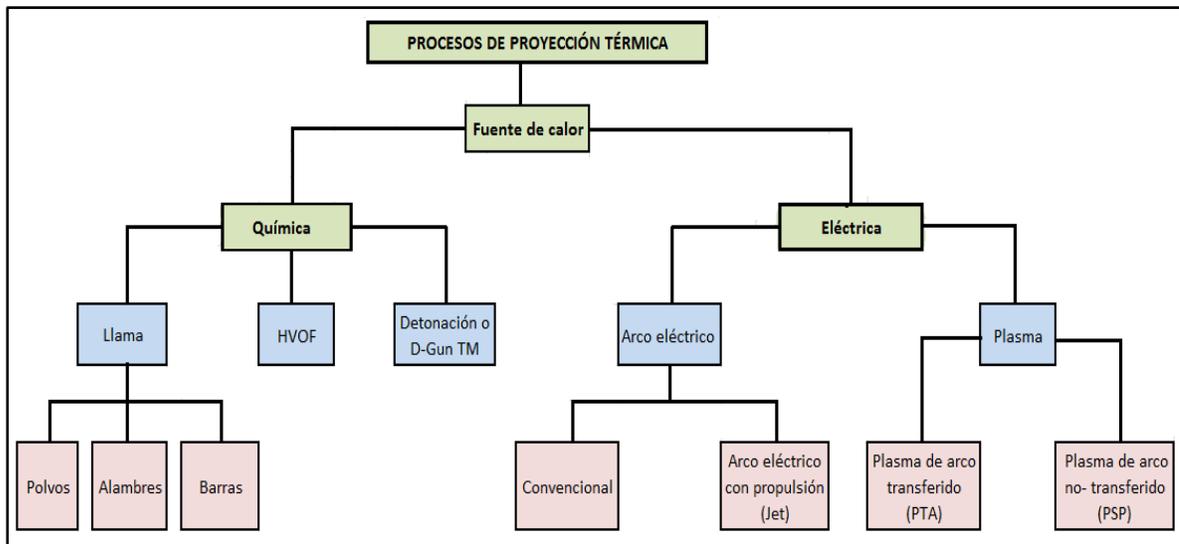
▪ Por plasma.

- Plasma de arco no- transferido (PSP o Plasma Spray)
- Plasma de arco transferido (PTA, Plasma Transferred Arc).

El grupo I utiliza gases combustibles como fuente de calor. El segundo y el tercer grupo lo constituyen los procesos que utilizan energía eléctrica como fuente de calor. Los consumibles utilizados son en forma de polvo, varilla o alambre.

En la figura 1-14 se presenta un diagrama de los procesos de proyección térmica de acuerdo a la energía empleada.

Figura 1-14: Clasificación de las técnicas de proyección térmica.



La selección de la técnica más apropiada está determinada por el material deseado en el recubrimiento, requerimientos de desempeño y sitio de aplicación del mismo, tamaño de la pieza y factores económicos [20].

La relación existente entre la fuente de energía, el material de aporte y el sustrato, determina los parámetros que inciden en el resultado de la técnica. La cantidad de energía térmica y de energía cinética, el suministro de las cantidades apropiadas de material de aporte y la distancia entre la unidad de proyección y el sustrato [68], son variables del proceso que deben ser controladas para obtener recubrimientos adecuados. Establecer la temperatura correcta del punto de fusión y la cantidad de material requerido, garantizan en buena parte el éxito de la técnica. Sin embargo se debe considerar el hecho de que grandes distancias de proyección, significan un rápido

enfriamiento de las partículas fundidas en el trayecto hacia el sustrato, lo cual genera baja adherencia de la capa y presencia de poros. Por su parte, pequeñas distancias de proyección pueden generar alteraciones en el sustrato por su proximidad a la fuente de energía térmica, aparte de deformidad en las capas y oxidación del recubrimiento por alta temperatura [63].

En la tabla 1-3 se muestran las características generales de los recubrimientos obtenidos por las diferentes técnicas de proyección térmica [20, 63].

Tabla 1-3: Características de los recubrimientos aplicados por proyección térmica

Tipo de Proyección	Velocidad de impacto de la partícula (m/s)	Contenido de óxidos %	Porosidad %	Espesor recubrimiento (mm)
Llama	30-180	10 - 15.	10 - 15.	0,2 - 10
Jet HVOF	500-800	1 - 2.	1 - 2.	0,2 - 2
Detonación D-GUN	800-1000	0,1 - 1.	0,1 - 1.	0,2 - 2
Arco	240	10 - 20.	5 - 10.	0,2 - 10
Plasma	200-600	1 - 3.	5 - 10.	0,2 - 2

La tabla 1-4 muestra una comparación de las propiedades que pueden obtenerse en los recubrimientos en función de los procesos de proyección térmica y del material empleado [20].

Tabla 1-4: Propiedades de recubrimientos obtenidos por proyección térmica

Tipo de Recubrimiento	PROYECCIÓN TÉRMICA				
	Por Combustión (Alambre)	Por Combustión (Polvo)	HVOF	Por Arco Eléctrico (Alambre)	Plasma
Temperatura de la Fuente de Calor, 10 ³ °C					
Toda Clase de Recubrimientos	3	3	2-3	N/A	12-16
Adherencia MPa					
Metales Ferrosos	14-28	14-21	48-62	28-41	22-34
Metales No-Ferrosos	7-34	7-34	48-62	14-28	14-28
Cerámicos	-----	14-32	-----	-----	21-41
Carburos	-----	34-48	+83	-----	55-69
Densidad, % equivalente al material sólido					
Metales Ferrosos	85-90	85-90	95-98+	85-95	90-95+
Metales No-Ferrosos	85-90	85-90	95-98+	85-95	90-95+
Cerámicos	-----	80-95	-----	-----	90-95+
Carburos	-----	85-90	95-98+	-----	90-95+
Dureza					
Metales Ferrosos	84R _v -35R _c	80R _v -35R _c	90R _v -45R _c	80R _v -40R _c	80R _v -40R _c
Metales No-Ferrosos	90R _v -40R _c	30R _v -20R _c	100R _v -55R _c	40R _v -35R _c	45R _v -55R _c
Cerámicos	-----	40-65R _c	-----	-----	45-65R _c
Carburos	-----	45-55R _c	55-72R _c	-----	50-65R _c

De los procesos de proyección térmica, la técnica que utiliza la combustión (flame spray) es la más seleccionada, versátil y económica [69], a pesar de las desventajas que tiene como el % de poros y adherencia con respecto a los otros sistemas de proyección térmica.

Debido a que en el desarrollo del presente proyecto, se aplican recubrimientos utilizando la técnica de proyección térmica por llama, con consumible en forma de polvos, se hará énfasis en este proceso.

2.4.4 Proyección térmica a la llama (Flame Spray o FS)

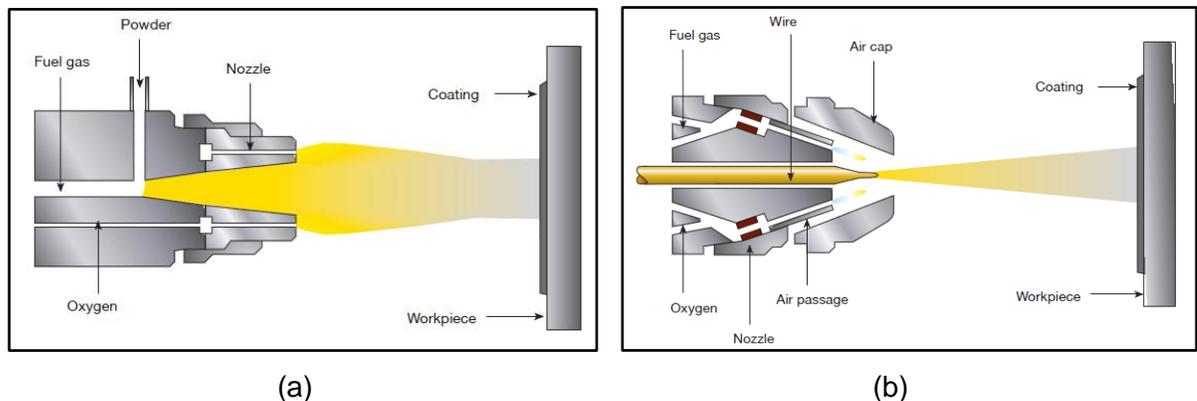
Esta técnica fue el primer proceso de proyección térmica desarrollado en 1910 y aún sigue siendo usado. Las modernas antorchas han cambiado un poco, desde el año de 1950, pero siguen conservando su principio de funcionamiento [68].

Esta técnica es también llamada proceso frío dado a que el material fundido es proyectado hacia la superficie sin cambios metalúrgicos, distorsiones, ni afectación térmica del sustrato. En este proceso, el material es alimentado en forma de polvo o alambre y llevado a una fuente de producción de calor que utiliza una mezcla de oxígeno como comburente y acetileno, hidrógeno o propano, como combustible. Al llegar a este punto, el material es fundido y las gotas son arrastradas por los gases de combustión hacia el sustrato y deformadas por el impacto. Estas adaptan la rugosidad que tenga la superficie y se entran mecánicamente entre sí, formando una estructura laminar con cierto grado de porosidad e inclusiones de óxido [70].

En muchos casos, las partículas fundidas poseen suficiente energía, tanto térmica como cinética, para producir una difusión metalúrgica con el metal base, provocando una red de finas micro-soldaduras a lo largo de la interfase recubrimiento-metal base [68].

En la figura 1-15 se muestra el esquema de la técnica de proyección térmica a la llama, utilizando polvos (a) y alambre (b) como material de aporte.

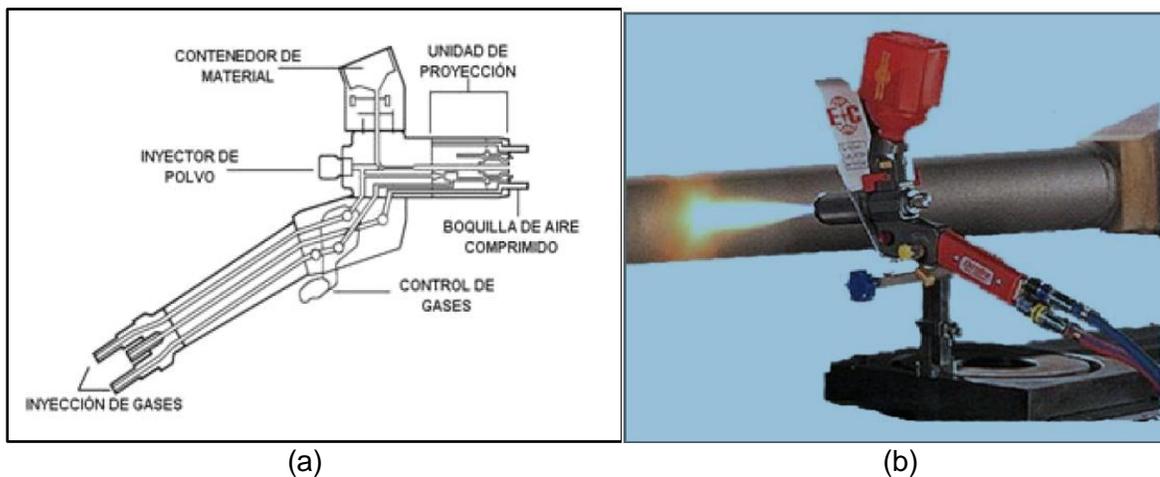
Figura 1-15: Esquema del proceso de proyección térmica por llama convencional. Material consumible: a) polvos b) alambre [66].



Esta técnica se puede clasificar de acuerdo al equipo de proyección utilizada en dos grupos:

- **Proyección a baja temperatura.** Esta técnica se lleva a cabo con equipos de llama oxiacetilénica y material de aporte en forma de polvo que es suministrado y alimentado a la antorcha desde el contenedor ubicado en la parte superior de ésta, luego es aspirado por la succión que forma el oxígeno al pasar por un venturi, o desde un alimentador externo. El polvo es transportado hacia la llama donde es fundido y proyectado hacia el sustrato por los gases de combustión. En algunos casos, se utilizan aceleradores o jets de aire para aumentar la velocidad de las partículas [68]. La figura 1-16 muestra el equipo de proyección por llama en forma de polvos.

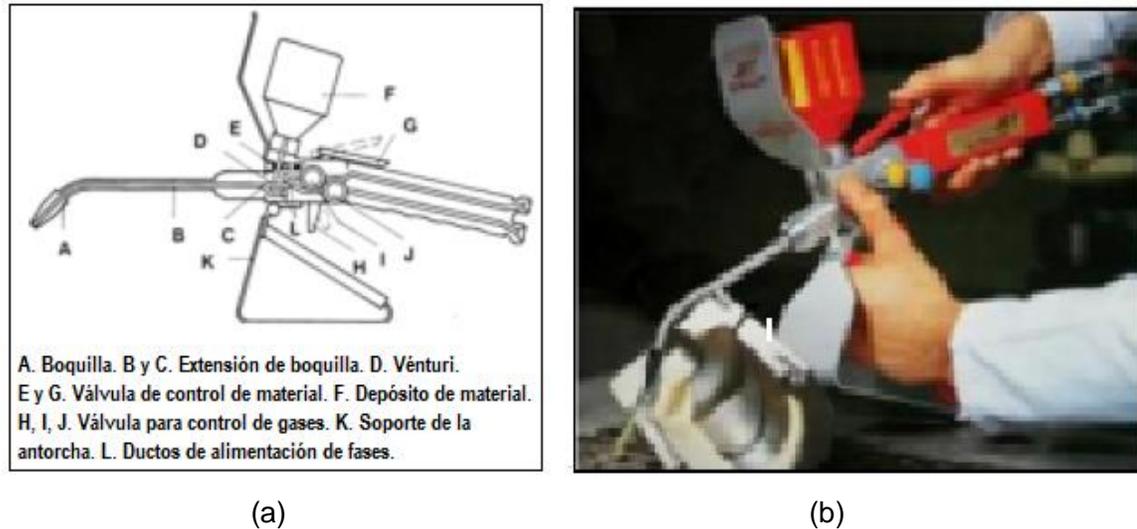
Figura 1-16: Equipo de proyección térmica en forma de polvos. a) Esquema general y b) Pistola de dispersión [20, 63].



- **Proyección a alta temperatura.** Ésta se realiza con un equipo cuya operación es similar al anterior, la diferencia se presenta en que la alimentación del material de aporte es controlada por una válvula manual, luego es arrastrado por los gases hasta la boquilla, donde alcanza el cono de la llama y se funde gracias a su tamaño (malla 140 ó menor); finalmente las partículas proyectadas alcanzan la pieza, que es precalentada por la misma llama produciéndose una unión fuerte entre el sustrato y la capa base, en algunos casos, al seguir proyectando se forma un baño de metal líquido sobre el sustrato, provocando una unión de tipo metalúrgico y con unas características muy similares a las de la soldadura a gas [66].

La figura 1-17 indica el equipo de proyección de polvos a alta temperatura.

Figura 1-17: Equipo de proyección de polvos a alta temperatura. a) Esquema general y b) Pistola de aspersion [20, 63].



▪ Preparación de la superficie.

La adherencia de la película depositada depende en gran parte de la correcta preparación superficial de la pieza o sustrato que se esté trabajando, dado a que los mecanismos de anclaje entre el recubrimiento y el sustrato son completamente mecánicos. Los factores más importantes a tener en cuenta para una buena preparación que conlleven a una buena calidad de recubrimiento son [63, 68]:

- **Limpieza.** Para obtener una buena adherencia es importante que la superficie donde se aplicará la capa, esté limpia y libre de humedad, capas de óxido, grasa, aceites y pintura; para ésto se pueden utilizar métodos químicos como decapados ácidos, detergentes, disolventes o limpieza mecánica con abrasivos.
- **Rugosidad.** Un factor crítico en la adherencia de capas depositadas por este método es el área superficial. Al aumentar la rugosidad, crecen las fuerzas de adhesión entre la película y el material base, así como las propiedades de ésta.

Para aumentar el área superficial es necesario aumentar la rugosidad de la superficie, ésto se logra utilizando métodos mecánicos, tales como: sandblasting, granallado, rectificado o pulido con disco abrasivo de grano grueso. En ocasiones, cuando la geometría de la pieza a recubrir lo permite, o simplemente se requiere una capa de gran espesor, la superficie puede ser preparada utilizando roscados bastos para las geometrías redondas o ranurados para las planas [68,71].

- **Utilización de capa base o liga.** Es una capa muy delgada (de 5 a 12,5 μm) generalmente de Ni-Al que se aplica a algunos materiales para mejorar la adherencia de la capa a depositar. Esta capa puede ser utilizada en materiales extremadamente duros, donde darle rugosidad por métodos mecánicos es bastante difícil, o por el contrario, materiales extremadamente blandos donde la preparación superficial ocasiona gran deformación plástica. También se utiliza cuando el material de la capa presenta

reacciones de tipo térmico, químico o metalúrgico con el sustrato, o simplemente cuando la geometría de la pieza es compleja y la preparación es bastante complicada.

- **Pre calentamiento del sustrato.** Los estudios han mostrado que precalentar la superficie del metal base aumenta significativamente la adhesión del revestimiento; ya que previene la condensación del vapor de agua, retarda el enfriamiento de la partícula depositada y mejora el contacto partícula-metal, promoviendo así la unión térmica [72]. Se recomienda temperaturas entre los 120 a 300°C dado a que una temperatura mayor puede generar capas gruesas de óxido [68].

▪ Características de las partículas de proyección.

Las propiedades de los polvos influyen considerablemente en la calidad de los recubrimientos obtenidos, por tal razón deben controlarse adecuadamente. Las características más influyentes son físicas, químicas y térmicas.

Las características físicas y térmicas de los polvos a tener en cuenta son: Granulometría, morfología, densidad aparente, puntos de fusión, calor latente de fusión. En cuanto a las características químicas, el tipo de enlace químico es un determinante muy importante en las propiedades de los materiales que hacen parte de las películas y recubrimientos; adicionalmente, juega un papel muy importante, la composición química, las fases cristalinas y la distribución de los elementos presentes [73].

La eficiencia de la transferencia del calor de la llama a la partícula dependerá del tamaño y la forma de ésta. La partícula debe tener un diámetro nominal preestablecido para el tipo de sistema que se va a usar. Para un sistema de alto poder calorífico una partícula de diámetro nominal inferior al requerido, implicará una excesiva transferencia de calor por unidad de área superficial, produciéndose oxidación por alta temperatura. A la inversa, partículas de diámetro nominal mayor al requerido no absorberán suficiente calor y no lograrán plastificarse, menos aún fundirse, impidiendo el entramamiento mecánico.

Es por ello que a partir de la década de los 50 el rociado térmico logro afianzarse y ser aceptado industrialmente, ya que fue posible fabricar aleaciones micro pulverizadas con granulometría y formas consistentes, minimizando así los defectos propios de distribuciones de tamaño de partícula y geometrías no adecuadas [63].

Algunos tipos de polvos frecuentemente usados por la técnica de proyección térmica, son:

- Metales: molibdeno o níquel.
- Aleaciones autofundentes de Ni + 16wt% Cr+3.5wt%B+3.5wt% Si+4.5wt% Fe+1wt% C.
- Óxidos cerámicos: Al₂O₃.
- Aleaciones a base de óxidos: ZrO₂+8wt% Y₂O₃.
- Compuestos cerámico + metálico: *cermet*, *clads*: Grafito + 20wt% Ni
- Aglomerados de compuestos cerámicos + metálicos: WC+12wt% Co
- Carburos: Cr₂C₃.
- Compuestos *clads*: AlSi+47 wt% polimida y 6wt% aglomerante orgánico[73].

A continuación se muestran las especificaciones de los recubrimientos utilizados para el desarrollo de la investigación.

Recubrimientos a base níquel. Las aleaciones de níquel se caracterizan por su excelente resistencia a la corrosión y al desgaste, por su buen comportamiento a bajas y altas temperaturas y por poseer un amplio rango de propiedades magnéticas y electrónicas. Los aleantes como el cobalto y el hierro aumentan la resistencia mecánica, el cromo forma una aleación de alta resistencia a la corrosión; con la presencia de una pequeña cantidad de carbono, se forman carburos con otros elementos, que aumentan la dureza de las aleaciones de níquel y su resistencia al desgaste a elevadas temperaturas [68]. Los dos tipos de polvos empleados para la aplicación de los recubrimientos fueron el Metaceram 23075 y el Nitec 10224, los cuales se explican a continuación.

- **Recubrimiento Metaceram 23075.** Es una aleación que consta de una matriz de níquel con agregado cerámico de carburo de tungsteno y cobalto, lo que proporcionan buena resistencia a la erosión y corrosión. Presenta un buen comportamiento como recubrimiento de barrera térmica y permite ser maquinado por herramientas estándar. Pese a su carácter cerámico, está configurado como un polvo fusible para ser depositado por la técnica de proyección en dos pasos [74,75].

- **Recubrimiento Nitec 10224.** Aleación de níquel con adiciones de hierro, boro y silicio, ideal para la protección por capas en aplicaciones en metales tales como aceros, fundiciones de hierro y aleaciones de níquel. Pertenece a la línea de los llamados autofundentes debido a la presencia de boro y silicio en su composición química. Es fácilmente mecanizable con herramientas estándar, y debido a su bajo coeficiente de fricción, es ideal para la protección de piezas metálicas en contacto con otros metales. Posee excelente resistencia al desgaste, a la corrosión y a altas temperaturas. La técnica de proyección térmica para la deposición de este recubrimiento, proporciona resultados superiores a los procesos de reparación convencionales, y un ahorro significativo en los costos de mantenimiento, incluyendo los procesos de mecanizado. La presencia de níquel como elemento predominante, proporciona buena resistencia a la corrosión en medios salinos como el agua de mar [74,75].

La tabla 1-5 muestra las principales características de estos dos recubrimientos.

Tabla 1-5: Características de los recubrimientos Metaceram 23075 y Nitec 10224

CARACTERÍSTICAS	RECUBRIMIENTOS	
	METACERAM 23075	NITEC 10224
Composición química	A base de níquel con agregados cerámicos de carburo de tungsteno y cobalto WC/Co	A base de níquel con adiciones de hierro, boro y silicio
	44Ni + 40WC/Co + 9.3Cr + 1.9B 2.1Fe + 2.3Si + 0.4C	Ni+ 4%Fe, B, Si
Dureza (HV)	690	200 - 240
Densidad (g/cm ³)	9,1	8,1
Gases de proyección	Oxígeno y acetileno	Oxígeno y acetileno
Aplicaciones	Troqueles, cuchillas agrícolas, barras de corte, impulsores, pistones de bombas, aplicaciones navales.	Engranajes, bloques de motor, moldes, cuerpos de válvulas, carcasas, aplicaciones navales.

▪ Evaluación de los revestimientos [63].

Para la obtención de revestimientos de calidad, con el desempeño deseado en servicio, es necesario un control riguroso de las diversas etapas del proceso. Las propiedades de un revestimiento efectuado por proyección térmica van a depender directamente de la adhesión entre la capa y el sustrato, así como de la cohesión entre las partículas depositadas. Estas propiedades están directamente influenciadas por la cantidad de defectos presentes en el revestimiento, tales como: [64]

- **Partículas sin fundir:** Se presentan en el caso en que lleguen al sustrato partículas sólidas o semisólidas producto del enfriamiento o pobre calentamiento.

- **Óxidos e inclusiones:** En esta técnica las partículas son proyectadas a través de atmósferas sin protección, esto contribuye a la formación de óxidos e inclusiones entre los splats; debido a que durante el transporte, las gotas de material reaccionan superficialmente con el ambiente [30], cuando arriban al sustrato las gotas se aplastan y quedan separadas unas de otras por diferentes compuestos.

- **Poros:** Son producto de temperaturas bajas de depósito y se observan como cavidades que quedan cuando los splats no se deforman completamente unos sobre otros, el caso más crítico ocurre con las partículas sin fundir, que generan cavidades de gran tamaño en sus alrededores.

- **Esfuerzos residuales:** Durante el enfriamiento se producen esfuerzos residuales de tensión debido a las elevadas tasas de enfriamiento que dependen de la conductividad térmica del material, temperatura inicial y factores ambientales. Los esfuerzos se generan cuando una gota proyectada se aplasta, se convierte en splat y solidifica, este proceso se

inicia en la interfase con el sustrato o splats precedentes ya que el flujo de calor es mayor en esta dirección [31-33], debido a que esta superficie de contacto solidifica primero que la superficie en contacto con el ambiente, el volumen que ocupa la masa que solidifica en último lugar es mayor que el que debería ocupar, ello genera los esfuerzos residuales de tensión.

- **Grietas y micro grietas:** Los recubrimientos hechos por proyección térmica se componen de pequeños splats, cada uno de ellos sufre un rápido enfriamiento cuya tasa es del orden de 1×10^7 K/s, la contracción por dilatación térmica y los cambios alotrópicos al interior de en cada splat generan gran cantidad de esfuerzos, que se traducen en microgrietas.

Entre las propiedades usadas para caracterizar revestimientos rociados térmicamente, las más comunes son:

- Adhesión/Cohesión: Ensayo de tracción, Cinta, Doblamiento y Cizallamiento.
- Dureza: Micro y macrodureza.
- Desgaste: Ensayos resistencia al desgaste.
- Análisis metalográfico.
- Ensayos No destructivos.

▪ **Ventajas y desventajas de la proyección térmica.**

Entre las ventajas más destacables del proceso de proyección térmica se encuentran [63, 67]:

- Pueden ser proyectados gran diversidad de materiales (metales, cerámicos, polímeros o compuestos).
- Se puede recubrir cualquier tipo de material, piezas de tamaños y formas muy diferentes.
- Obtención de capas finas de recubrimiento.
- El sustrato no sufre modificaciones de forma ni de propiedades mecánicas, salvo un aumento de su dureza cerca a la superficie (aprox. $125 \mu\text{m}$).
- Es un proceso altamente rentable, económico, versátil y fácilmente automatizable.

-
- La técnica es flexible en cuanto a su posición de operación y el medio en el que se aplica. Estos procesos son fácilmente reproducibles.
 - Pueden recuperarse componentes desgastados, aumentar el funcionamiento y reducir costos de producción y de mantenimiento.
 - La proyección térmica es una tecnología respetuosa con el medio ambiente.

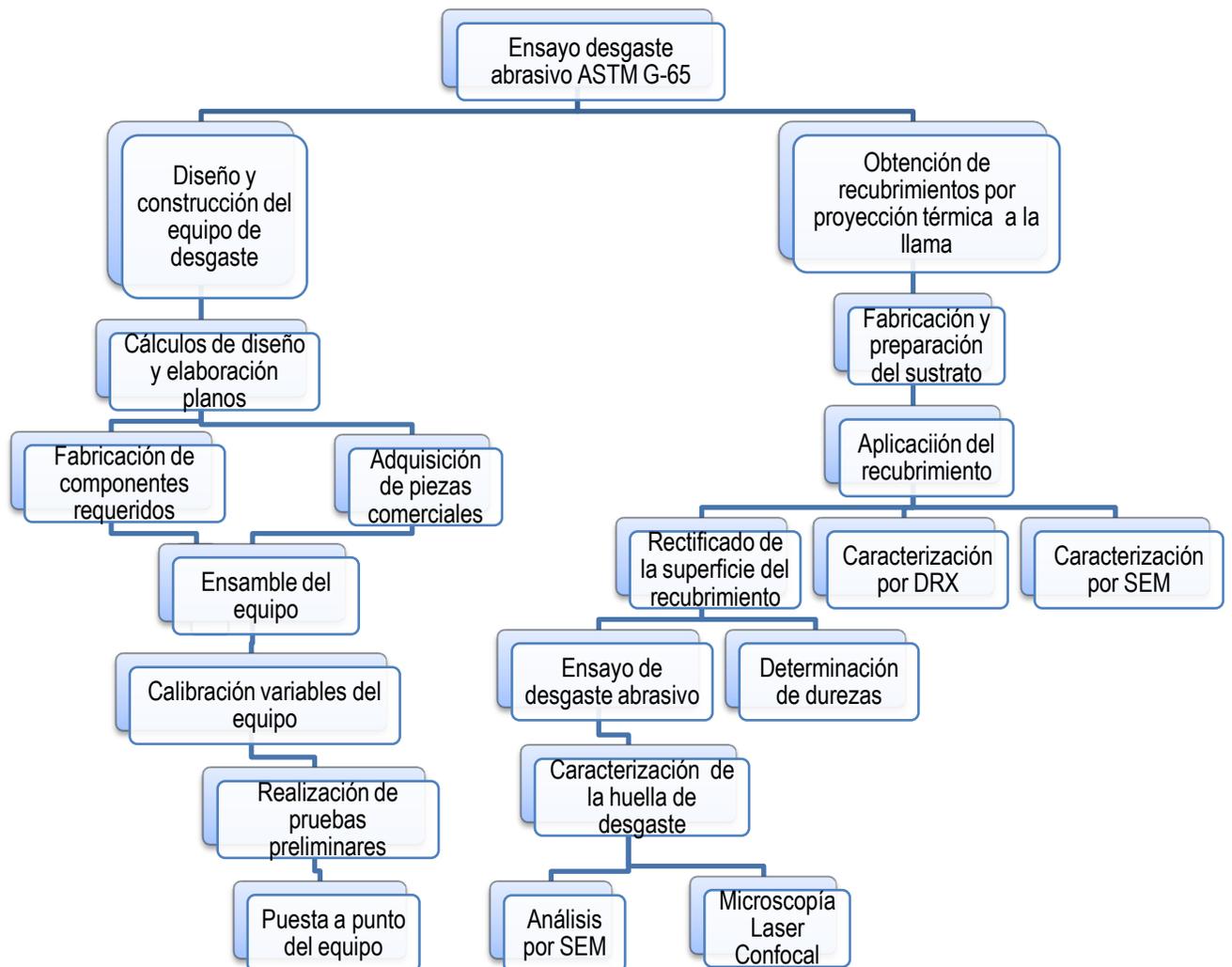
Dentro de las desventajas se tienen [20, 68]:

- Limitación en los materiales que se funden a temperaturas más altas que la proporcionada por la llama o para materiales que se descomponen durante el calentamiento.
- Debido a la temperatura relativamente baja de la llama y la velocidad de la partícula, las capas son generalmente de menor calidad, tienen alta porosidad, baja adhesión, baja resistencia y espesor limitado, comparado con las demás técnicas.
- La proyección térmica no restaura la resistencia a los esfuerzos de tensión, de flexión o de torsión de los elementos mecánicos y no se recomienda en aplicaciones de impacto severo.

2. Desarrollo experimental

Este trabajo se divide en dos etapas. La primera corresponde al diseño, construcción y puesta a punto del equipo de desgaste abrasivo y la segunda fase a la obtención de los recubrimientos por la técnica de proyección térmica de polvos a la llama, ensayos de desgaste abrasivo bajo norma ASTM G-65 y caracterización de los mismos. La figura 2-1 presenta el diagrama de flujo del desarrollo experimental.

Figura 2-1: Descripción del desarrollo experimental



2.1 Diseño, construcción y puesta a punto del equipo

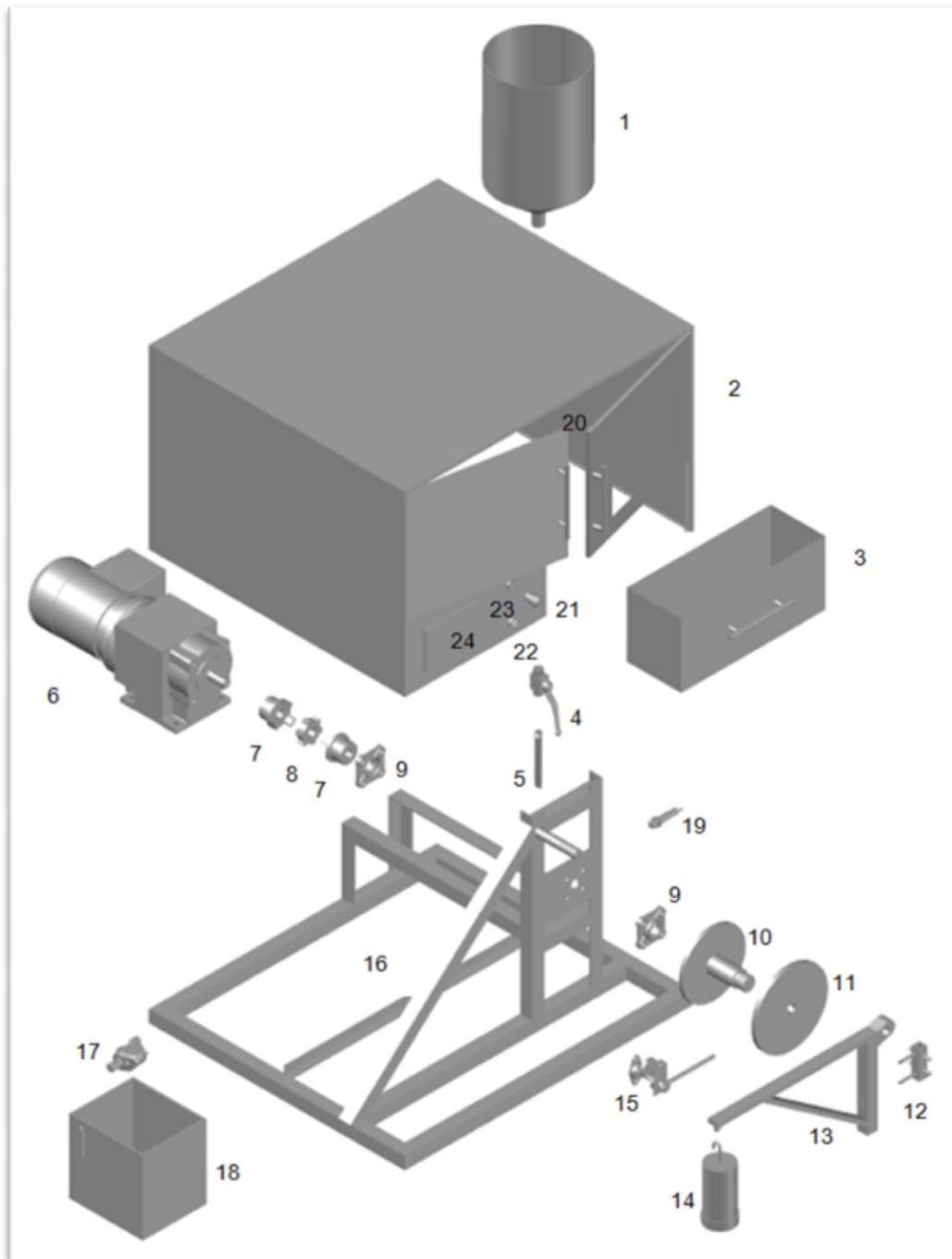
2.1.1 Materiales y dispositivos

Para el diseño y la construcción del equipo de desgaste abrasivo se tuvo en cuenta los parámetros especificados en la norma ASTM G-65, indicados en el numeral 1.3.5. De acuerdo a ésta, se efectuaron los cálculos de diseño y la elaboración de planos de los componentes que así lo ameritan.

En la figura 2-2 se muestra un esquema general del equipo de desgaste abrasivo; el despiece de la máquina se observa en la figura 2-3 y los componentes fabricados durante el desarrollo del proyecto se especifican en los planos 1 al 9 ubicados en el anexo A.

Figura 2-2: Equipo de desgaste abrasivo construido.



Figura 2-3: Despiece del equipo de desgaste abrasivo norma ASTM G-65.

- | | | |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1. Tolva | 9. Chumacera | 17. Electrobomba |
| 2. Cubierta | 10. Eje | 18. Tanque de agua |
| 3. Bandeja de recolección | 11. Rueda motriz | 19. Sensor de rpm |
| 4. Llave de paso | 12. Portaprobeta | 20. Lámpara interna |
| 5. Boquilla | 13. Brazo mecánico | 21. Parada de emergencia |
| 6. Motorreductor | 14. Juego de pesas | 22. Botón de encendido |
| 7. Acople. | 15. Mecanismo de liberación | 23. Testigo de encendido |
| 8. Estrella | 16. Estructura o chasis | 24. Control digital |

• Descripción de los componentes

1. Tolva: Recipiente donde se almacena el material abrasivo; está construida en lámina de acero cold roll calibre 18 y tiene una capacidad de 20 litros, su geometría y dimensiones se especifican en el plano No. 1 y figura 2-4.

Figura 2-4: Tolva.



2. Cubierta: Construida en lámina de acero cold roll calibre 18, su función principal es albergar y proteger los componentes de la máquina. Ver plano No. 2 y figura 2-5.

Figura 2-5: Cubierta y bandeja de recolección.

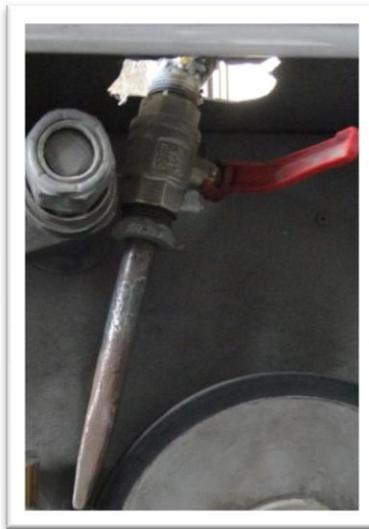


3. **Bandeja de recolección:** Este compartimento recoge la arena del ensayo y tiene la capacidad de almacenar hasta 13 kg de arena. La bandeja se puede extraer con las puertas abiertas o cerradas; está fabricada en lámina de acero cold roll calibre 18. Se muestra en la figura 2-5.

4. **Llave de paso:** Permite la alimentación o interrupción del flujo de arena durante el ensayo. Debido a que la boquilla está diseñada para un flujo constante es necesario abrir la válvula completamente. Conocida comercialmente como válvula de bola de $\frac{3}{4}$.

5. **Boquilla:** Está fabricada en acero galvanizado; su geometría garantiza un flujo laminar constante de abrasivo. Las dimensiones se especifican en el plano No. 3 y figura 2-6.

Figura 2-6: Boquilla.



6. **Motorreductor:** Motor trifásico marca Bauer de 0,75 Hp a 1700 Rpm con un consumo de 0.87 A en carga, reductor de engranajes helicoidales; provee una velocidad final de 217 RPM y un torque de 38.5 N*m. Su función principal es hacer girar la rueda motriz. Ver figura 2-7.

Figura 2-7: Motorreductor



7. **Acople:** Comercialmente se encuentra como acople araña de 3", está fabricado en acero al carbono AISI 1040 y su función es minimizar el impacto durante los arranques y paradas del equipo.

8. **Estrella:** Componente comercial de 6 patas para acople de 3", fabricado en caucho.

9. **Chumacera:** Componente comercial con referencia F205 cuyo diámetro de rodamiento es de 25 mm. Las chumaceras están ubicadas detrás de la rueda de caucho y delante del motor, tal como se muestra en la figura 2-8.

10. **Eje:** Fabricado en acero al carbono AISI 1045. Encargado de transmitir el movimiento del reductor al disco. Ver Plano No. 4 y figura 2-8.

Figura 2-8: Eje y chumaceras.



11. **Rueda Motriz:** Está fabricada en acero al carbono AISI 1045, tiene un diámetro de 8 1/2" y un espesor de 1/2", se encuentra recubierta de un caucho de 1/2" de espesor cuya dureza oscila entre los 58 a 62 shore. La función principal es arrastrar y dirigir la arena contra la muestra, actuando como un disco abrasivo. Ver plano No.5 y figura 2-9.

El recubrimiento en caucho es una combinación de isopreno con estireno polibutadieno, cuyas especificaciones se encuentran en el anexo B.

Figura 2-9: Rueda motriz.



12. **Portaprobeta:** Se fabricó a partir de un tubo de acero galvanizado. Es un dispositivo de sujeción de la muestra a analizar que se encuentra equipado con una termocupla; por ser un componente hueco permite el paso del líquido refrigerante y mantiene la temperatura de la probeta constante. Ver plano No.6 y figura 2-10.

Figura 2-10: Portaprobeta.



13. **Brazo mecánico:** Dispositivo que actúa en forma de palanca; sostiene en un extremo las pesas del sistema y en el otro la muestra de análisis. Al presionar la probeta contra el caucho de la rueda asegura una fuerza constante durante todo el ensayo. El brazo se construyó con platinas de acero estructural, ensambladas por medio de soldadura y elementos mecánicos de sujeción. Se muestra en el plano No.7 y figura 2-11.

Figura 2-11: Brazo mecánico.



14. **Juego de pesas:** Está Compuesto por dos unidades de pesas y un eje soporte. La pesa pequeña aplica una fuerza de 45N sobre la muestra y las dos en conjunto producen una fuerza de 130N. Ver figura 2-12.

Figura 2-12: Juego de pesas



15. **Palanca de liberación:** Esta permite presionar o liberar la muestra de análisis contra la rueda de caucho.

16. **Chasis:** Estructura construida en tubo cuadrado y ángulo de 1" en acero cold roll, cuya función es soportar todos los componentes del equipo. Ver plano No. 8 y figura 2-13.

Figura 2-13: Chasis.



17. Electrobomba: Referencia comercial HJ 1541 con tensión de 110V, potencia 28 W y caudal máximo de agua de 1400 l/h; su función es impulsar el refrigerante desde el tanque hasta el porta probeta.

18. Tanque de refrigerante: Construido en lámina de acrílico de 7mm de espesor, posee una capacidad de 5,5 litros. Su geometría y dimensiones se especifican en el plano No. 9.

19. Sensor de rpm: Instrumento encargado de medir la velocidad del eje en rpm.

20. Lámpara interna: Bombillo de 7W a 110V que aumenta la visibilidad de la probeta durante el ensayo.

21. Parada de emergencia: Botón de color rojo, que se utiliza cuando se presenta alguna emergencia. Al presionarlo el equipo se desenergiza, para volverlo a encender debe girarse en sentido horario.

22. Botón de encendido: Perilla negra de dos posiciones, éste energiza o des-energiza completamente el equipo.

23. Testigo de encendido: Bombillo de color amarillo, indica que el equipo esta energizado y se mantiene encendido durante todo el ensayo.

24. Sistema de control: Dispositivo electrónico marca Delta, compuesto por un PLC de 4 salidas, un display de control, un variador de velocidad, un contactor, un transformador y una fuente. Este conjunto es capaz de guardar y mantener bajo norma los parámetros de velocidad, temperatura, tiempo y número de revoluciones del ensayo, según sea el procedimiento que se esté ejecutando. Fue diseñado para que su manipulación fuese lo más sencilla posible, está conformado por dos menús principales; uno de operación y otro de ajuste de parámetros o programación. Ver figura 2-14.

Figura 2-14: Sistema de control (a) Vista externa (b) Detalle de componentes y cableado.



(a)

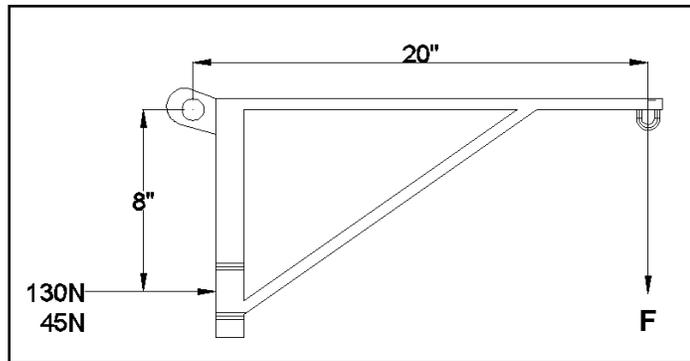
(b)

Las características de los componentes mencionados anteriormente, la operación de la máquina y sus características eléctricas, el procedimiento detallado para las pruebas de desgaste, las recomendaciones de uso y el mantenimiento del equipo; se encuentran especificadas en el Anexo C Manual de operación equipo de desgaste abrasivo.

2.1.2 Cálculo de diseño

Se requiere calcular el peso necesario para poder ejercer una presión normal y constante sobre la probeta; para ello, se realizó una sumatoria de momentos en el brazo mecánico partiendo del diagrama de cuerpo libre ilustrado en la figura 2-15, donde las distancias y fuerzas son parámetros establecidos en la norma ASTM G-65.

Figura 2-15: Diagrama de cuerpo libre para brazo mecánico.



Para el procedimiento más severo, especificado en la norma, la fuerza sobre la probeta es de 130 N, entonces se tiene:

$$\sum M_o = (130N * 8in) - (F * 20in) = 0$$

Donde F es la fuerza necesaria para producir 130N en la probeta, despejando se tiene,

$$F = \frac{(130N * 8in)}{20in} = 52N$$

Teniendo en cuenta que:

$$F = m * g$$

Donde m es la masa de la pesa y g es la gravedad, entonces:

$$m = \frac{(52N)}{9.8 \frac{m}{s^2}} = 5.3kg$$

Para los 45N se repite el procedimiento anterior.

$$\sum M_o = (45\text{N} * 8\text{in}) - (F * 20\text{in}) = 0$$

$$F = \frac{(45\text{N} * 8\text{in})}{20\text{in}} = 18\text{N}$$

$$m = \frac{(18\text{N})}{9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 1.83\text{kg}$$

De esta forma se determina el peso necesario para poder ejercer una fuerza normal sobre la probeta de 130 N y de 45 N respectivamente.

2.1.3 Calibración de variables del equipo

De acuerdo a norma ASTM G-65, las variables que se deben tener en cuenta para el desarrollo de las pruebas de desgaste abrasivo son:

- Velocidad del motor
- Dureza y diámetro del recubrimiento de caucho
- Fuerza ejercida sobre la probeta.
- Humedad, tamaño y flujo del abrasivo

Los procedimientos realizados para la calibración de cada una de estas variables, se especifican a continuación.

- **Velocidad del motor.** Para calibrar el sistema de control diseñado, se utilizó un contador de revoluciones digital y se ajustaron los parámetros del variador, efectuando 15 repeticiones, tal como se observa en la tabla 2-1.

Tabla 2-1: Valores obtenidos de velocidad del motor.

TIEMPO (s)	RPM
60	201
60	202
60	204
60	205
60	201
60	200
60	201
60	201
60	203
60	205
60	204
60	201
60	199
60	205
60	200
TOTAL	202

- **Dureza del recubrimiento de caucho.** La dureza del recubrimiento se tomó en cuatro puntos distintos, cada uno separado 90° sobre la periferia de la rueda. Los resultados se muestran en la tabla 2-2. El valor promedio concuerda con el certificado de calidad de la empresa fabricante. Ver anexo B.

Tabla 2-2: Datos de dureza del recubrimiento de caucho

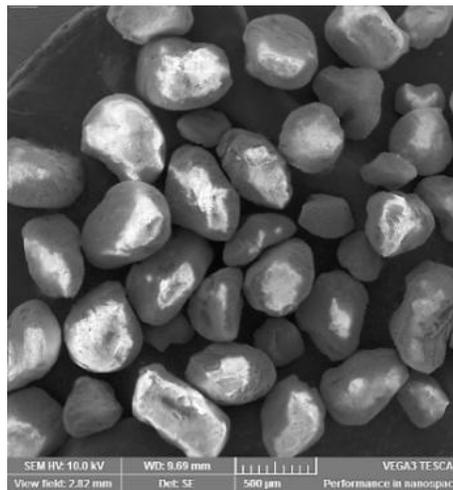
PUNTO	GRADOS	DUREZA SHORE
1	90°	61
2	180°	60
3	270°	61
4	360°	59
Promedio		60,25

- **Diámetro del recubrimiento de caucho.** Se midió el diámetro utilizando un calibrador Vernier para asegurar que estuviese dentro de los parámetros establecidos. Adicionalmente se verificó la concentricidad del recubrimiento con un comparador de caratula.

Es importante tener en cuenta que se debe reemplazar el caucho de la rueda motriz cuando el diámetro del recubrimiento de caucho es inferior a 8 ½". Si la rueda se deforma o su concentricidad aumenta a valores $\leq 0,05\text{mm}$ (0,002") es necesario rectificar la goma con herramienta de corte.

- **Fuerza ejercida sobre la probeta:** La fuerza ejercida sobre la probeta se aplica por medio de dos pesas que ejercen una fuerza de 130 y 45 N, ubicadas en el extremo del brazo mecánico. Para verificar que estos valores estuviesen dentro del rango permitido por la norma, se ubicó en el portaprobeta un dinamómetro de 0 a 25 kg, efectuando varias mediciones.
- **Abrasivo.** Se utilizó arena Ottawa sílica, en la figura 2-16 se observa que este abrasivo posee granos regulares de forma redondeada.

Figura 2-16: Micrografía SEM arena Ottawa.



- **Humedad del abrasivo.** Se determinó sometiendo 100g de arena a una temperatura de 105°C durante una hora. Se efectuaron 10 repeticiones, ver tabla 2-3.

Tabla 2-3: Datos obtenidos de humedad del abrasivo.

MUESTRA	HUMEDAD %
1	0,23
2	0,24
3	0,34
4	0,15
5	0,12
6	0,14
7	0,25
8	0,16
9	0,32
10	0,21
Promedio	0,22

- **Tamaño de grano del abrasivo.** Para determinar el tamaño de arena óptimo, se utilizaron tamices de la serie Tyler. La tabla 2-4 indica la distribución granulométrica obtenida.

Tabla 2-4: Datos obtenidos de distribución granulométrica del abrasivo.

No. Tamiz U.S.	Abertura μm	% Retenido ASTM G-65	% Retenido obtenido
40	425	0	0
50	300	5 máx.	3 máx.
70	212	95 mín.	97 mín.
100	150	0	0

- **Flujo de arena.** Este factor es muy importante, ya que el flujo laminar constante de arena asegura que la zona de la probeta a desgastarse se encuentre totalmente rodeada de arena y a la vez se distribuya uniformemente sobre el recubrimiento de caucho.

Para calibración de este parámetro, se dejó pasar arena por la boquilla durante un minuto y posteriormente se pesó. Se efectuaron 15 repeticiones, obteniéndose los datos indicados en la tabla 2-5.

Tabla 2-5: Datos obtenidos de flujo de arena.

MUESTRA	FLUJO DE ARENA g/min.
1	302,8
2	305,5
3	305,2
4	303,6
5	308,4
6	302,1
7	301,4
8	304,6
9	303,8
10	305,8
11	306,8
12	305,8
13	301,2
14	301,8
15	302,2
Promedio	304,1

Luego de haber efectuado la calibración de las variables del equipo, se realizaron ensayos preliminares de desgaste abrasivo de acuerdo a la norma con el fin de poner a punto la máquina. Posteriormente se efectuaron las pruebas planteadas en el proyecto.

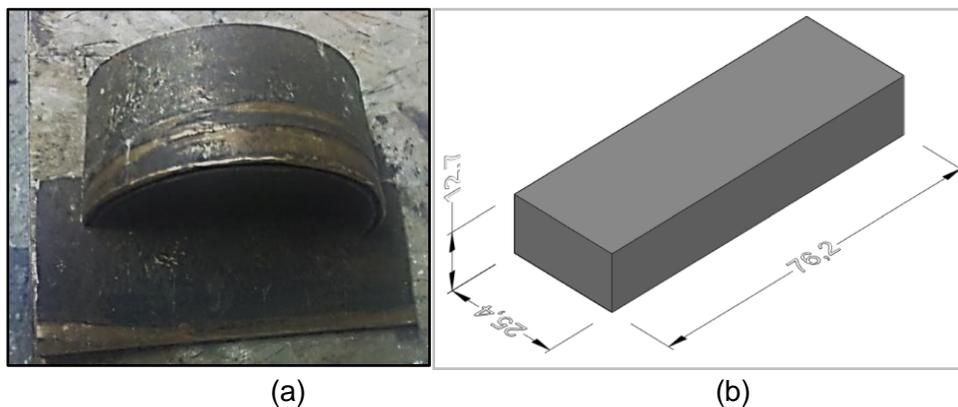
2.2 Obtención de recubrimientos por proyección térmica a la llama

2.2.1 Fabricación de las probetas (sustratos)

Para la realización de los ensayos de desgaste abrasivo se fabricaron probetas de 3" (76,2 mm) de largo por 1" (25,4 mm) de ancho y 0,5" (12,7 mm) de espesor. Ver figura 2-17; posteriormente los recubrimientos se depositaron en las instalaciones de la empresa PROYNET.

Los materiales en que se fabricaron las probetas fueron en fundición de gris y en bronce fosforado. En el primer caso, se obtuvieron las probetas a partir de una lámina de $\frac{1}{2}$ " de espesor, fabricado por moldeo en arena en un taller de fundición; y en el segundo caso, se obtuvieron a partir de un trozo de tubería proveniente de la empresa Cotecmar, tal como se observa en la figura 2-17. Los dos tipos de materiales tienen aplicaciones navales.

Figura 2-17:(a) Trozo de tubería en bronce fosforado. (b) Probeta.



Las probetas así obtenidas, fueron rectificadas para garantizar sus dimensiones y geometría, tal como se observa en la figura 2-18. Dado a que estos dos parámetros juegan un papel importante en los ensayos de desgaste.

Figura 2-18: a) Probetas en fundición gris. (b) Probetas en bronce fosforado:



2.2.2 Preparación de la superficie del sustrato

Debido a que la preparación del sustrato juega un papel importante en la adherencia del recubrimiento, los sustratos fueron preparados superficialmente empleando los tres (3) métodos de preparación superficial relacionados a continuación.

- **Arena fina:** Corresponde a arena comercial, cuyo tamaño de partícula es de 200 μm aproximadamente. Se proyecta sobre la superficie de los sustratos con una presión de 100 psi por un lapso de 1 minuto. Se prepararon 12 probetas por este método.
- **Granalla gruesa:** Compuesta por alúmina con tamaño de partícula de 500 μm , dirigida sobre la superficie de los sustratos por un lapso de 1 minuto aproximadamente. Se prepararon 12 probetas por este método.
- **Pulido:** Se utilizó una pulidora de mano Black and Decker con disco abrasivo de carburo de silicio SiC, cuyo tamaño de partícula fue de 700 μm aproximadamente. Se prepararon 12 probetas por este método.

2.2.3 Deposición de los recubrimientos

La técnica empleada fue la proyección térmica por llama a alta temperatura, utilizando el equipo Superjet Eutalloy mostrado en la figura 1-17. Los materiales de aporte a base de níquel para la aplicación de los recubrimientos fueron Metaceram 23075 y Nitec 10224, en forma de polvo.

Para efectuar la deposición de los recubrimientos sobre los sustratos previamente preparados, se ensambló el equipo, utilizando la lanza estándar B3 y se conectaron las mangueras de alimentación de los gases de oxígeno y acetileno. Se instaló el módulo de alimentación del polvo de aporte y se verificó el paso de gas a través de la lanza.

El procedimiento para la aplicación de los recubrimientos fue el siguiente:

- Preparación de la superficie del sustrato por los tres métodos mencionados.
- Ignición de la llama en la boquilla de la lanza.
- Ajuste de la llama a estado carburante (tonalidad azul) con los reguladores de paso de gases.
- Pre calentamiento del sustrato, utilizando un pirómetro laser (Bronce 450°C, hierro gris 600°C)
- Apertura de la válvula de alimentación del material de aporte y verificación del paso de material por la boquilla.
- Aplicación y fusión del material de aporte en un sólo paso, por medio del contacto localizado de la llama carburante con la superficie del recubrimiento hasta obtener una capa de espesor entre 1,5 a 2 mm, de tonalidad grisácea típica de estos recubrimientos.

Los parámetros que se utilizaron durante el proceso de proyección térmica se muestran a continuación en la tabla 2-6.

Tabla 2-6: Parámetros de proyección para recubrimientos a base de níquel.

PARÁMETROS	RECUBRIMIENTOS	
	Nitec 10224	Metaceram 23075
Presión de oxígeno [bar]	2	2
Presión de acetileno [bar]	0.5	0.5
Distancia de proyección [mm]	10	10

2.3 Ensayos de desgaste abrasivo

2.3.1 Número de ensayos

Teniendo en cuenta lo anterior, se trabajaron dos tipos de sustratos: Bronce fosforado y fundición gris. Dichos sustratos fueron preparados superficialmente por tres métodos diferentes: granalla, arena y pulido y posteriormente se les aplicó dos recubrimientos (Metaceram 23075 y Nitec 10224) por la técnica de proyección térmica a la llama. Efectuando las posibles combinaciones entre los tratamientos, da como resultado 14 pruebas, las cuales se repiten tres veces, para un total de 42 ensayos de desgaste abrasivo, tal como se indica en la tabla 2-7.

Tabla 2-7: Número de ensayos a realizar.

No. ENSAYOS	SUSTRATO	RECUBRIMIENTO	PREPARACIÓN SUPERFICIAL	No. REPETICIONES	TOTAL DE ENSAYOS
1	Fundición gris	N/A	N/A	3	3
2	Bronce Fosforado	N/A	N/A	3	3
3	Bronce Fosforado	Nitec 10224	Granallado	3	9
4			Arena		
5			Pulido		
6	Fundición gris	Nitec 10224	Granallado	3	9
7			Arena		
8			Pulido		
9	Bronce Fosforado	Metaceram 23075	Granallado	3	9
10			Arena		
11			Pulido		
12	Fundición gris	Metaceram 23075	Granallado	3	9
13			Arena		
14			Pulido		
TOTAL ENSAYOS DE DESGASTE ABRASIVO A REALIZAR					42

2.3.2 Procedimiento para el ensayo de desgaste abrasivo.

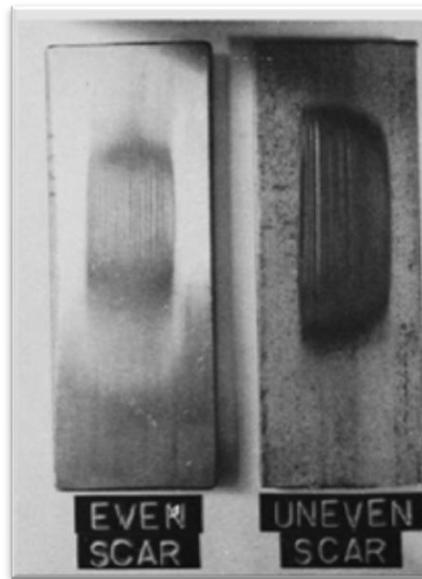
Los ensayos de desgaste abrasivo se llevaron a cabo de acuerdo a la norma ASTM G-65 según el procedimiento B, utilizando la máquina de rueda de caucho-arena seca construida para tal fin, ubicada en el laboratorio de fundición de la Universidad Nacional, sede Bogotá.

El procedimiento efectuado para llevar a cabo las pruebas de desgaste se especifica a continuación:

- Preparar la muestra, de acuerdo a numeral 2.2.
- Limpiar la muestra con disolvente o limpiador para eliminar completamente material extraño o suciedad presente y secar con aire caliente.
- Pesar la muestra para conocer su masa inicial. Se utilizó una balanza analítica con 0,0001g de precisión.
- Colocar la muestra en el porta-probeta y fijarla
- Colocar el peso adecuado al brazo mecánico según el procedimiento B, indicado en la tabla 1-2.
- Encender el equipo y verificar que el sistema de refrigeración cargue completamente.
 - Programar el control digital introduciendo número de revoluciones de acuerdo a tabla 1-2.
- Iniciar el flujo de arena a través de la boquilla.
- Acercar la muestra hacia la rueda girando la palanca de liberación.
- Iniciar el giro de la rueda. En este momento se inicia la prueba.
- El equipo se apaga en el momento que cumpla con el número de revoluciones programadas.
- Limpiar la muestra.

- Pesar la muestra.
- Examinar la huella de desgaste obtenidas y compararlas con las indicadas en la norma ASTM G-65 (ver figura 2-19). Verificar que la huella esté centrada y sea uniforme. Un patrón no uniforme indica una incorrecta alineación de la rueda o que la geometría de la probeta no es uniforme.

Figura 2-19: Forma de la Huella de desgaste abrasivo según ASTM G 65 (a) Huellas de desgaste correctas (b) Huellas de desgaste incorrectas



(a) (b)

- A partir de la pérdida de peso, reportar el índice de desgaste abrasivo como pérdida de volumen en mm^3 .

Un procedimiento más detallado para realización de pruebas de desgaste abrasivo se encuentra en el anexo C. Manual de operación del equipo de desgaste abrasivo ASTM G-65.

• Cálculos de desgaste abrasivo

El parámetro principal para determinar el desgaste abrasivo, es la pérdida de masa, tal como se muestra en la ecuación 2-1[45].

$$V_p = \frac{(P_i - P_f)}{\delta} * 1000 \quad (2-1)$$

Donde;

V_p = Volumen perdido en mm^3

P_i = Peso inicial de la probeta en g

P_f = Peso final de la probeta en g

δ = Densidad del material en g/cm^3

Utilizando esta ecuación, se obtienen los resultados de desgaste abrasivo expresados como volumen perdido en mm^3 .

• Precisión y exactitud.

Para comprobar la precisión y la exactitud de los datos arrojados por el equipo, se utilizan métodos estadísticos, donde a partir del volumen perdido se calcula el promedio y la desviación estándar, de acuerdo a la ecuación 2-2 y posteriormente se determina el coeficiente de variación con base en la ecuación 2-3.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x)^2}{n - 1}} \quad (2-2)$$

$$C_V = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \cdot 100 \quad (2-3)$$

Donde;

- σ = Desviación estándar
- \bar{x} = Media aritmética del volumen perdido en mm^3
- x = Volumen perdido en mm^3
- n = Número de ensayos
- C_V = Coeficiente de variación.

Aunque la precisión y exactitud de las pruebas depende de los parámetros de ensayo (flujo de arena, fuerza sobre la probeta, tamaño de las partículas, distancia de deslizamiento y humedad del abrasivo), el grado de concordancia con otros ensayos dependerá fuertemente de la homogeneidad del material y de la interacción del equipo. El coeficiente de variación de los resultados es uno de los datos más importantes de esta prueba ya que ayuda a identificar qué tan óptimos son los resultados obtenidos; este coeficiente debe ser máximo de 6% para el procedimiento B indicado en la norma ASTM G-65 [45], que será utilizado para el desarrollo de esta investigación.

• Cálculo del coeficiente de desgaste.

Para calcular el coeficiente de desgaste K , es necesario efectuar pruebas de microdureza a los diferentes recubrimientos depositados, ya que dicho coeficiente relaciona los resultados obtenidos de pérdida en volumen con la dureza, carga y abrasión lineal. El coeficiente K se calcula de acuerdo a la ecuación 1-7, finalmente despejando se obtiene:

$$K = \frac{V * H}{L * X} \quad (2-4)$$

Dónde:

K : Coeficiente de desgaste.

V: Volumen de desgaste del material más blando en mm³.
H: dureza en GPa
L: Fuerza ejercida sobre la probeta en N.
X: Abrasión lineal en m.

2.4 Técnicas de caracterización

2.4.1 Análisis microestructural

- **Difracción de rayos X.** El análisis microestructural de las fases presentes en los dos recubrimientos Metaceram 23075 y Nitec 10224, fue realizado utilizando el equipo de difracción de rayos X (DRX) X-pert Pro Panalytical en el modo Bragg-Brentano. Los picos fueron hallados empleando el software X'PertHighScore junto con sus cartas características. Las mediciones de DRX fueron realizadas con línea monocromática K α del cobre, longitud de onda de 1.540998 Å, intensidad de corriente de 40 mA y una diferencia de potencial de 45 kV. El rango de barrido fue de 20° a 90°, con tamaño de paso de 0.02° en modo continuo.
- **Microscopía electrónica de barrido.** Para el análisis microestructural y morfológico se utilizó un microscopio electrónico de barrido SEM FEI QUANTA 200 operando a 30 Kv. El análisis se realizó a lo siguiente:
 - Sustratos en fundición gris y bronce fosforado
 - Recubrimientos Metaceram 23075 y Nitec 10224
 - Huellas de desgaste abrasivo.

2.4.2 Morfología y rugosidad

La rugosidad y morfología de las superficies se determinó empleando el Microscopio laser confocal marca Zeiss referencia LSM 700 con un poder de resolución máximo de 250 nm, proporcionando imágenes con un aumento máximo de 100X.

2.4.3 Microdureza.

La microdureza se determinó mediante un microindentador Leco en escala Knoop con carga de 1000 gf para el recubrimiento Metaceram y 300 gf para el Nitec.

3. Resultados y análisis

3.1 Variables calibradas

En la tabla 3-1 se indican las variables que se tuvieron en cuenta en la calibración del equipo, los valores requeridos por la norma y los valores obtenidos durante el desarrollo de pruebas.

Tabla 3-1: Parámetros para calibración de variables del equipo.

VARIABLES	VALORES	
	Norma ASTM G-65	Obtenidos
Velocidad del motor	200 rpm \pm 10 rpm	202 rpm
Dureza del recubrimiento de caucho	58 a 62 shore A	60,25 shore A
Diámetro del recubrimiento de caucho	9" concentricidad \leq 0,002".	9" concentricidad 0,001".
Humedad del abrasivo	\leq 0,5%.	0,22%.
Tamaño de grano del abrasivo AFS 50/70	Tamiz 50: 5% máx. Tamiz 70: 95% min.	Tamiz 50: 3% Tamiz 70: 97%
Flujo de arena.	250 – 350 g/min	304,1 g/ min.
Fuerza ejercida sobre la probeta	130 N 45 N	130 N 45 N

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores obtenidos durante la calibración del equipo, están dentro de los parámetros establecidos en la norma, lo que permite efectuar las pruebas de desgaste abrasivo con alto grado de confiabilidad.

3.2 Sustrato

Morfología y rugosidad

El análisis morfológico y de rugosidad de los dos sustratos, se realizó por microscopía electrónica de barrido y microscopía laser confocal. Las figuras 3-1 y 3.2 muestran las micrografías SEM de la sección transversal de los sustratos en fundición gris y bronce, preparados por los tres métodos.

Figura 3-1: Micrografías SEM. Sección transversal del sustrato en fundición gris, preparado con: a) granalla b) arena c) pulido.

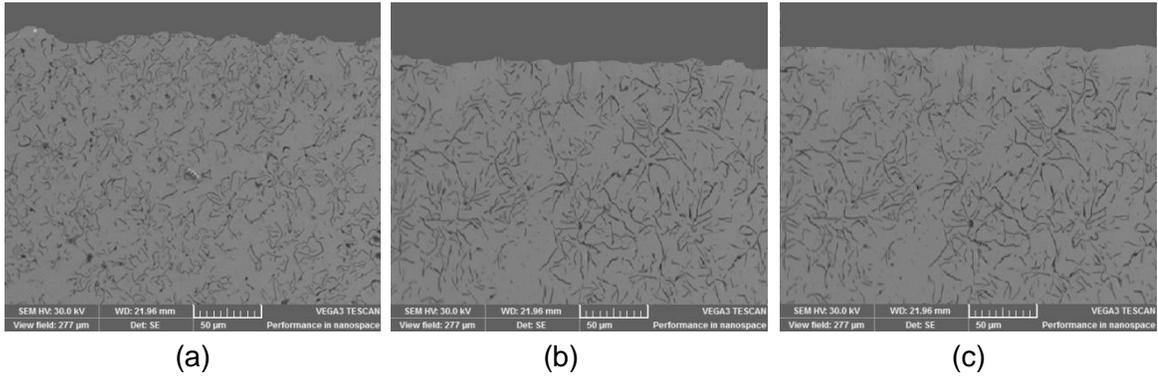
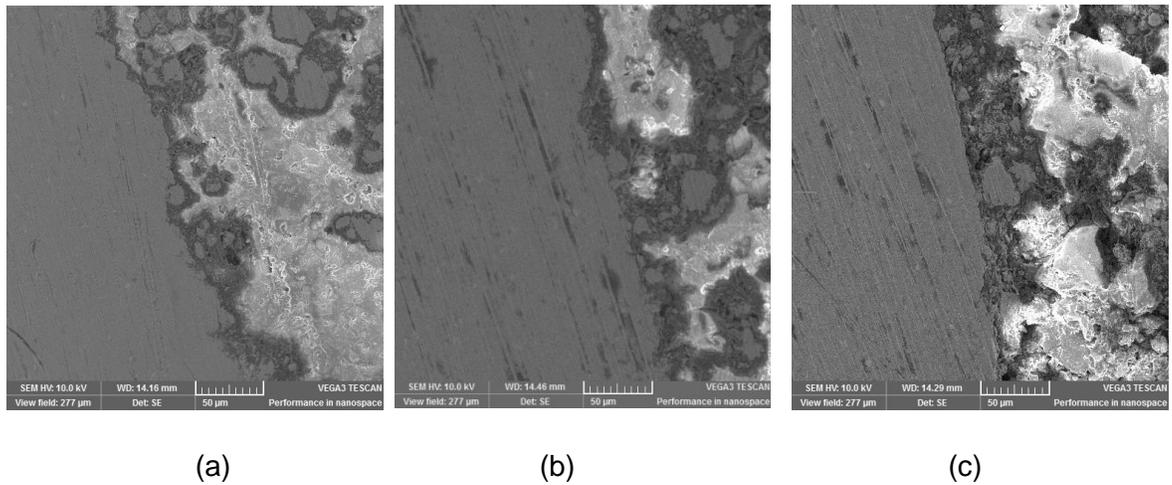


Figura 3-2: Micrografías SEM. Sección transversal del sustrato en bronce, preparado con: a) granalla b) arena c) pulido.



Las figuras 3-3 y 3-4 muestran las imágenes topográficas de las superficies de los sustratos en fundición gris y bronce, preparados por los tres métodos: las cuales fueron tomadas con el microscopio laser confocal.

Figura 3-3: Morfología del sustrato en fundición gris, preparado con: a) granalla b) arena c) pulido.

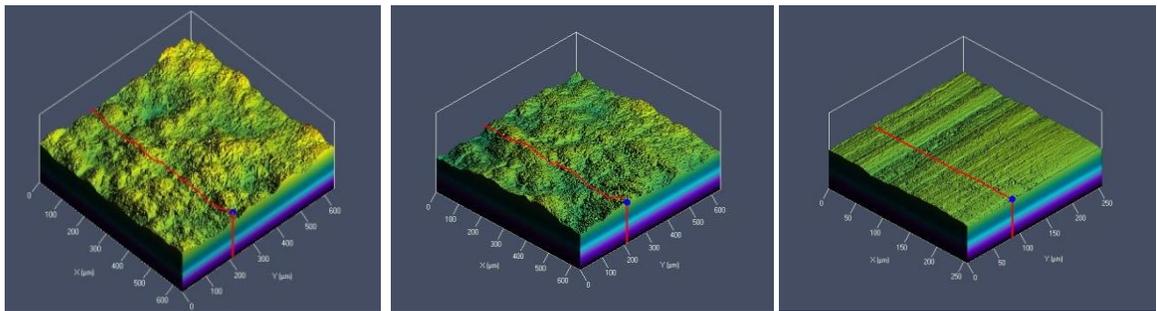
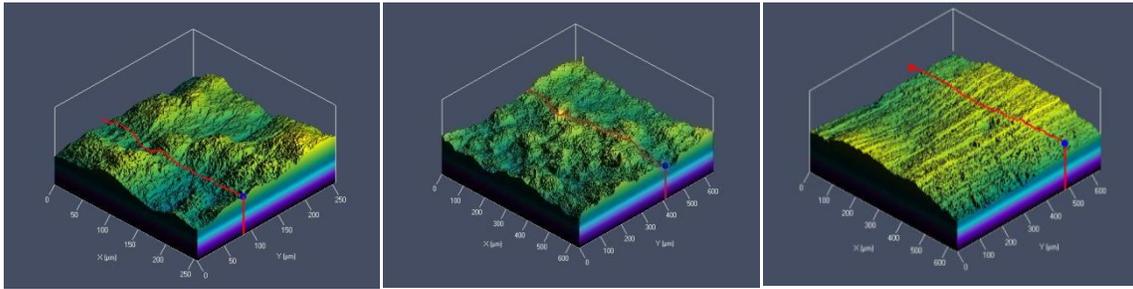


Figura 3-4: Morfología del sustrato en bronce, preparado con: a) granalla b) arena c) pulido.

Adicionalmente con la técnica de microscopía laser fue posible tomar los valores de rugosidad de los dos sustratos preparados superficialmente por los tres métodos. Los resultados se relacionan en la tabla 3-2.

Tabla 3-2: Rugosidad superficial de los sustratos en fundición gris y bronce, con las tres preparaciones superficiales.

Sustrato	Rugosidad superficial [μm]		
	Granalla	Arena	Pulido
Fundición gris	10.21	8.22	4,15
Bronce	15.95	9.85	6,74

Efectuando un análisis de las imágenes obtenidas por las dos técnicas de caracterización mencionadas anteriormente, para ambos sustratos, se puede observar que la preparación con granalla proporciona una superficie con grandes variaciones en su perfil, presentando mayor rugosidad y por lo tanto una mayor capacidad de anclaje, lo que facilita la formación de la película del recubrimiento. El procedimiento de preparación con arena también produce variaciones en el perfil, pero con menor intensidad que las producidas por la granalla lo que indica que también puede llegar a generar una buena adhesión del recubrimiento, finalmente el método de preparación con pulidora presenta una superficie lisa y poco rugosa que no genera variaciones significativas en el perfil, arrojando la posibilidad de una adherencia pobre o nula del recubrimiento. Estas observaciones concuerdan con los valores de rugosidad superficial obtenidos en la tabla 3-2.

3.3 Recubrimiento metaceram 23075

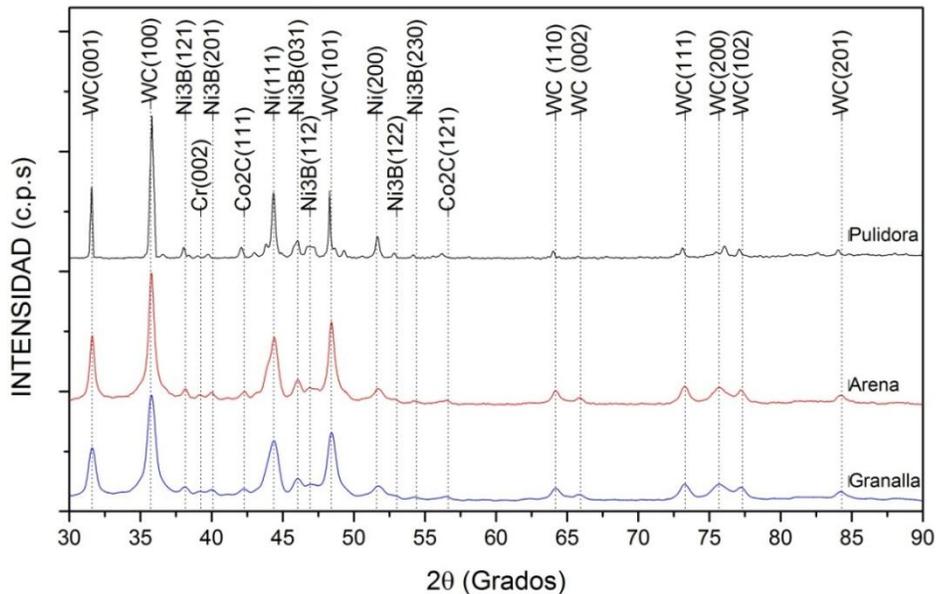
3.3.1 Análisis por difracción de rayos X

El análisis por difracción de rayos X del recubrimiento Metaceram 23075 depositado sobre los sustratos de fundición gris y bronce, se muestra en las figuras 3-5 y 3-7,

respectivamente. Allí se puede observar similitud en los espectros para ambos sustratos, debido a que esta técnica toma lecturas solamente de la capa superficial, sin llegar a tomar información del sustrato. Los resultados obtenidos para los dos casos, revelaron la presencia de fases de los elementos constituyentes del polvo aplicado, tales como: compuestos de níquel y boro, cromo, carburos de tungsteno y cobalto. La presencia de estos elementos está acorde a la composición química del Metaceram suministrada por el fabricante (ver tabla 1-5).

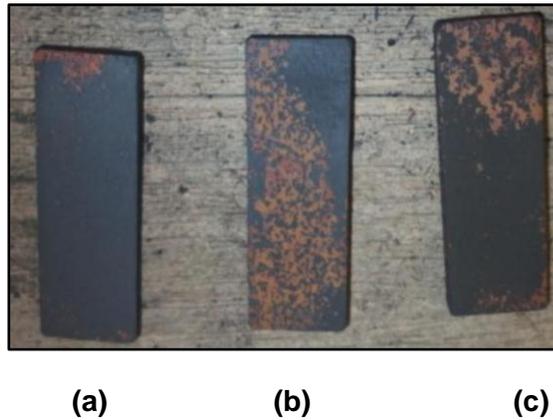
Para el caso de la fundición gris (figura 3-5), se pueden observar los espectros correspondientes a cada método de preparación, donde se evidencia similitud en los picos obtenidos para los tres casos.

Figura 3-5: Espectro XRD: Sustrato Fundición gris, Recubrimiento Metaceram. Preparación: pulido, arena y granalla.



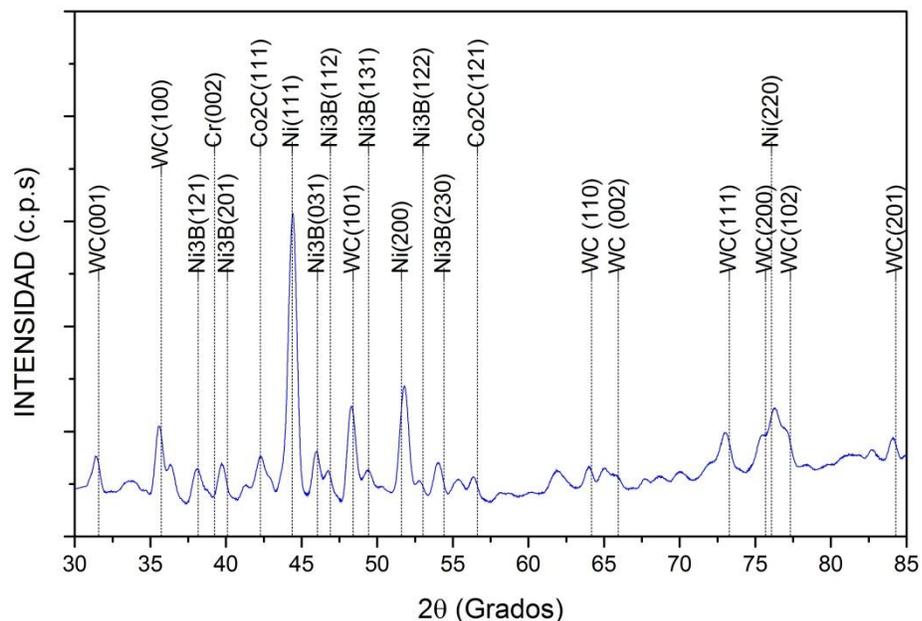
La figura 3-6 muestra las probetas en bronce con recubrimiento metaceram, preparadas superficialmente por los tres métodos. Allí se puede observar que la adherencia de los recubrimientos sobre el sustrato fue deficiente y por lo tanto no hubo crecimiento de la película; las zonas de color gris corresponden al recubrimiento y las de color naranja rojizo al sustrato.

Figura 3-6: Recubrimientos de Metaceram sobre bronce preparado con: a) Granalla b) arena y c) pulido.



Debido a lo anterior, no fue posible realizar la comparación de las fases presentes, ya que la adherencia del revestimiento fue nula para las preparaciones con arena y pulidora, mientras que para la preparación con granalla fue bastante deficiente. Por esta razón, la figura 3-7 muestra el espectro obtenido con el método de preparación con granalla solamente.

Figura3-7: Espectro XRD: Sustrato bronce, Recubrimiento Metaceram. Preparación: granalla.



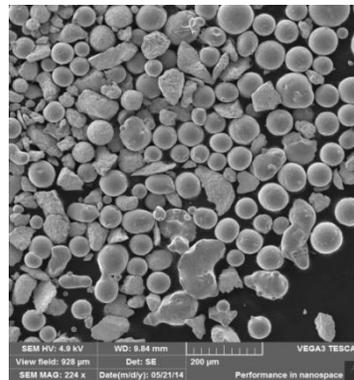
Mediante esta técnica se lograron obtener fases del elemento Ni, con estructura cristalina FCC, ubicado en las posiciones y direcciones 44.37° y $[1\ 1\ 1]$, 51.596° y $[2\ 0\ 0]$, 76.084° y $[2\ 2\ 0]$, parámetro de red a $3.54\ \text{\AA}$, de acuerdo a la carta 00-001-1258. Estos datos concuerdan con los resultados obtenidos por González et al [4]. El compuesto

Ni_3B de estructura ortorrómbica, ubicados en las posiciones y direcciones: 38.152° y $[1\ 2\ 1]$, 40.093° y $[2\ 0\ 1]$, 41.095° y $[0\ 0\ 2]$, 46.062° y $[0\ 3\ 1]$, 46.914° y $[1\ 1\ 2]$, 49.419° y $[1\ 3\ 1]$, 53.016° y $[1\ 2\ 2]$ y 54.404° y $[2\ 3\ 0]$, parámetro de red $a = 5.232\ \text{\AA}$, $b = 6.609\ \text{\AA}$ y $c = 4.3894\ \text{\AA}$, de acuerdo a la carta 01-082-1699. Cr con estructura cúbica y parámetro de red $4.5880\ \text{\AA}$, con posición y dirección 39.241° y $[2\ 0\ 0]$, de acuerdo a la carta 03-065-3316. Co_2C de estructura ortorrómbica con posición y dirección 56.628° y $[1\ 2\ 1]$, 42.281° y $[1\ 1\ 1]$ parámetro de red $a = 4.4465\ \text{\AA}$, $b = 4.3707\ \text{\AA}$ y $c = 2.8969\ \text{\AA}$, de acuerdo a la carta 03-065-1457. Por último se encontraron compuestos de WC de estructura atómica hexagonal, los parámetros de red son a y $b=2.90\ \text{\AA}$ $c=2.8310\ \text{\AA}$, los picos y direcciones encontrados en el espectro fueron 31.578° y $[0\ 0\ 1]$, 35.722° y $[1\ 0\ 0]$, 48.411° y $[1\ 0\ 1]$, 64.179° y $[1\ 1\ 0]$, 65.939° y $[0\ 0\ 2]$, 73.292° y $[1\ 1\ 1]$, 75.675° y $[2\ 0\ 0]$ y 77.316° y $[1\ 0\ 2]$ 84.298 y $[2\ 0\ 1]$ de acuerdo con la carta 03-065-4539. La presencia de estos elementos, algunas posiciones y direcciones coinciden con los resultados obtenidos por los estudios de Wang [76] y Stroumbouli [77].

3.3.2 Análisis por microscopía electrónica de barrido

- **Material de aporte.** La figura 3-8 muestra la morfología del material de aporte Metaceram 23075 en forma de polvo, donde es posible apreciar su calidad de compuesto, identificando las partículas esféricas como níquel y las puntiagudas como agregados cerámicos de carburo de tungsteno y cobalto WC/Co.

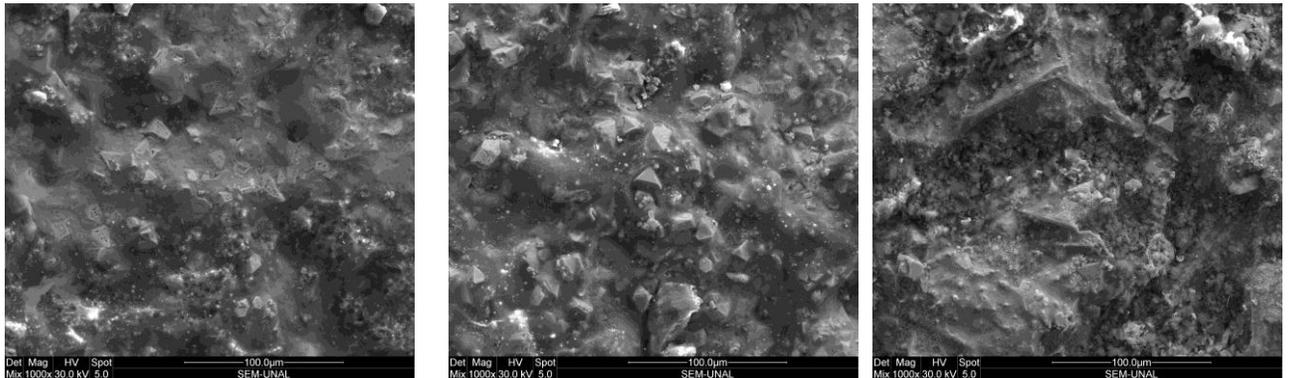
Figura 3-8: SEM a 200X. Morfología del material de aporte Metaceram 23075 en polvo.



- **Metaceram 23075 sobre Fundición gris.** La figura 3-9 muestra las micrografías SEM del recubrimiento Metaceram 23075 depositado sobre el sustrato de fundición gris. Este revestimiento fue posible aplicarlo en un paso, se proyectó y se fundió el material de aporte sobre la superficie del sustrato, lo que facilitó la formación de una capa completamente homogénea.

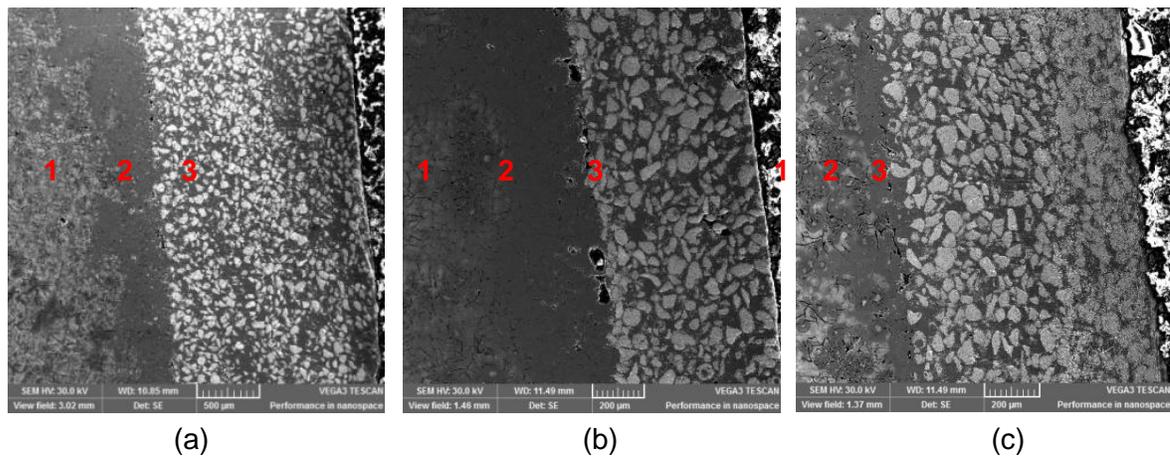
En las tres figuras se observan partículas bien definidas de WC/Co sin fundir, embebidas en una matriz de níquel, también aparecen porosidades e inclusiones de óxidos características de la técnica de deposición.

Figura 3-9: Micrografías SEM a 1000X: Sustrato Fundición gris, Recubrimiento Metaceram. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.



La figura 3-10 indica la sección transversal de los recubrimientos Metaceram. En las micrografías se aprecian tres zonas; a la izquierda se observa la microestructura típica de la fundición gris con presencia de grafito laminar **(1)**, en el medio se identifica una zona de color gris oscura donde se evidencia una difusión del material de aporte por unión metalúrgica entre el sustrato y el recubrimiento **(2)**, por último, a la derecha se aprecia la microestructura típica del recubrimiento de estructura laminar, con cierto grado de porosidad e inclusiones de óxidos **(3)**.

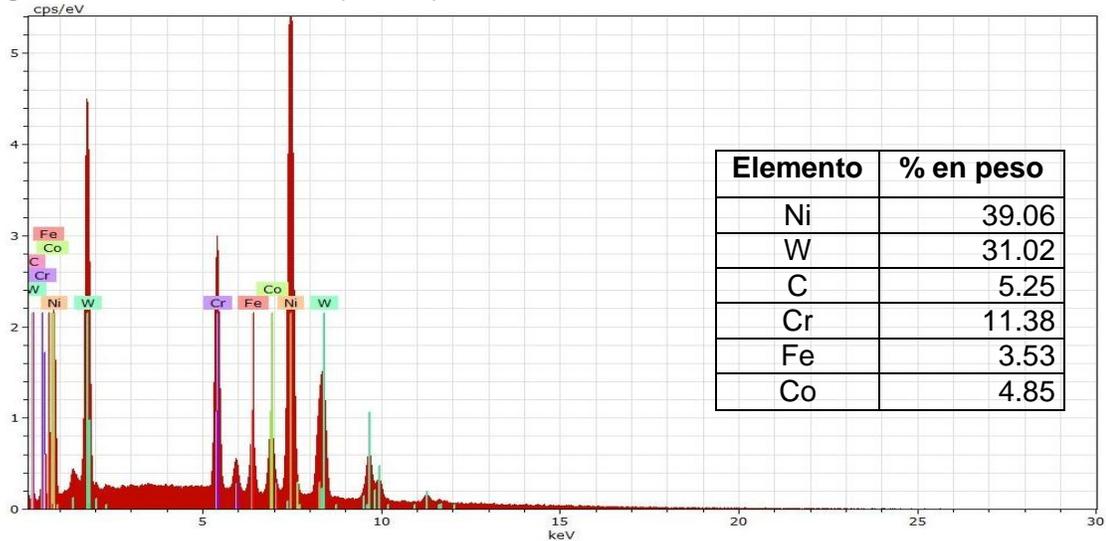
Figura 3-10: Micrografías SEM a 500X. Sección trasversal Sustrato Fundición gris, Recubrimiento Metaceram. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.



Debido a que se alcanzó una fusión total del recubrimiento sobre el sustrato y que los resultados obtenidos muestran una capa completamente adherida y homogénea, se puede confirmar que el perfil de anclaje obtenido por los tres métodos de preparación de las superficies, no tiene influencia en la adherencia del recubrimiento para las películas depositadas sobre la fundición, ya que al alcanzar la fusión, la unión es metalúrgica y no un enlace mecánico.

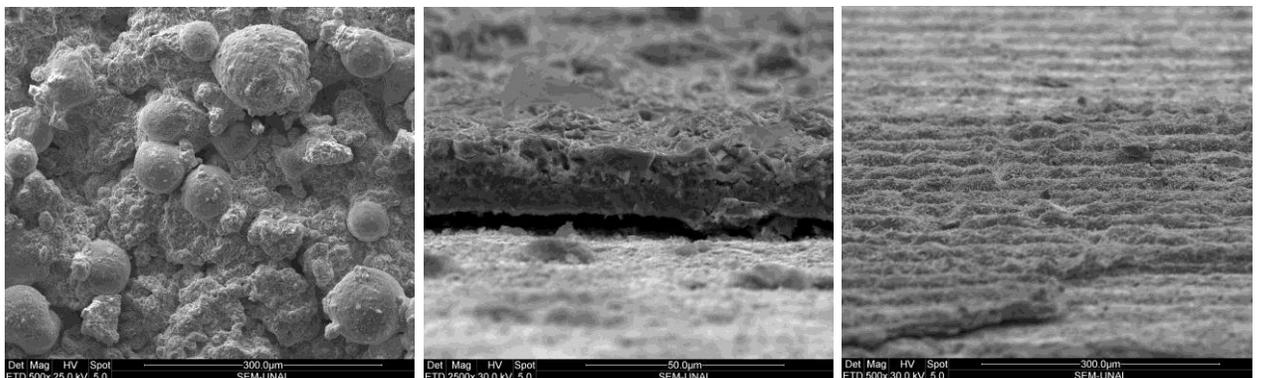
Adicionalmente, la figura 3-11 muestra la composición química semicuantitativa del recubrimiento Metaceram tomada por espectroscopía de energía dispersa (EDS). Por medio de este microanálisis, se logró establecer la presencia de los elementos constituyentes de este tipo de revestimiento.

Figura 3-11: Caracterización química por EDS del Metaceram 23075.



- **Metaceram 23075 sobre bronce.** Este tipo de recubrimiento depositado sobre bronce no fue posible aplicarlo en un paso, tal como lo indica la técnica de proyección térmica a alta temperatura; ya que el material de aporte se proyectó pero no se fundió sobre la superficie del sustrato, debido a la diferencia que existe entre los puntos de fusión del sustrato y el polvo cerámico. Lo anterior impidió la formación de una capa homogénea. En la figura 3-12 se aprecian las micrografías SEM correspondientes.

Figura3-12. Micrografías SEM. Sustrato bronce, Recubrimiento Metaceram, preparación: a) Granalla a 500X, b) arena a 2500 X y c) pulido a 500 X.



Como se puede ver en la figura 3-12 (a), en el sustrato preparado superficialmente con granalla, se logró formar una capa muy delgada de recubrimiento ($10\mu\text{m}$ aproximadamente en el centro de la probeta), con una adherencia pobre. Allí se pueden identificar algunos poros y partículas superpuestas en estado semifundido y sin fundir, correspondientes a los dos componentes del polvo de aporte: Ni y WC/Co, cuya forma conserva su estado original. En los sustratos preparados con arena (b) y pulidora (c) hubo desprendimiento del recubrimiento.

Estos resultados se deben a que el sustrato preparado con granalla presentó mayor rugosidad y por lo tanto una mayor capacidad de anclaje; lo que permitió la formación de una película por unión mecánica de las partículas del recubrimiento sobre el sustrato.

Para este recubrimiento no fue posible tomar micrografías SEM de la sección transversal, por tal razón no se presentan.

3.4 Recubrimiento Nitec 10224

3.4.1 Análisis por difracción de rayos X

Por medio de la técnica de difracción de rayos X, fue analizada la microestructura del recubrimiento Nitec depositado sobre fundición gris y bronce, las cuales son mostradas en las figuras 3-13 y 3-14. Al igual que para el recubrimiento metaceram los espectros obtenidos para ambos sustratos son similares, debido a que esta técnica toma lecturas solamente de la capa superficial, sin llegar a tomar información del sustrato. Los resultados obtenidos para los dos casos, revelaron la presencia de fases de los elementos constituyentes del polvo aplicado, tales como: fases de níquel y compuestos de níquel y boro; allí no se observan más fases debido a que este recubrimiento está compuesto por un 96% base Ni y un 4% B, Si, Fe. La presencia de estos elementos está acorde a la composición química del Nitec suministrada por el fabricante (ver tabla 1-5).

Para los dos casos, el de la fundición gris y el del bronce, se pueden observar los espectros correspondientes a cada método de preparación, donde se evidencia similitud en los picos obtenidos para los tres casos. El método de preparación superficial es inherente para los resultados microestructurales de esta técnica.

Figura 3-13: Espectro DRX: Sustrato Fundición gris, Recubrimiento Nitec. Preparación: pulido, arena y granalla.

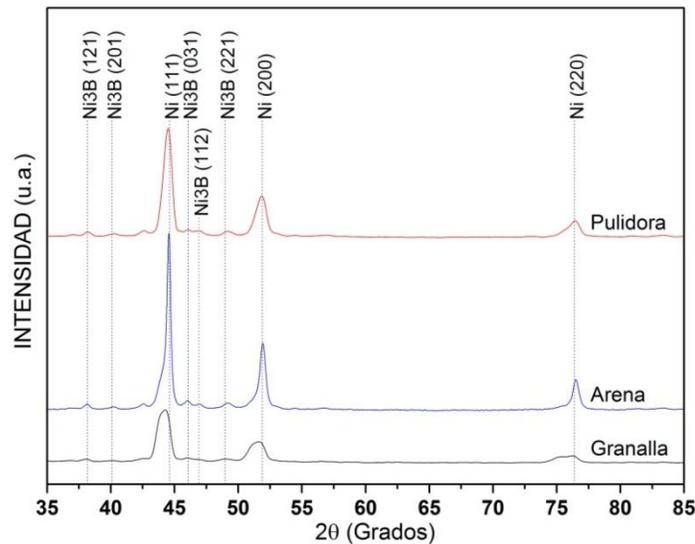
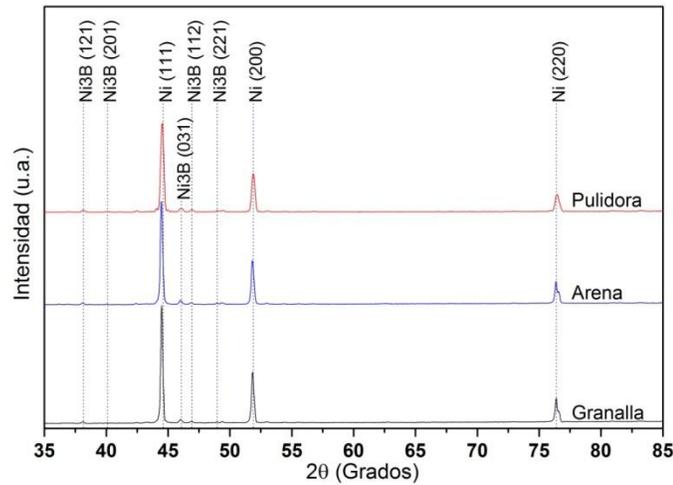


Figura3-14: Espectro DRX: Sustrato bronce, Recubrimiento Nitec. Preparación: pulido, arena y granalla.

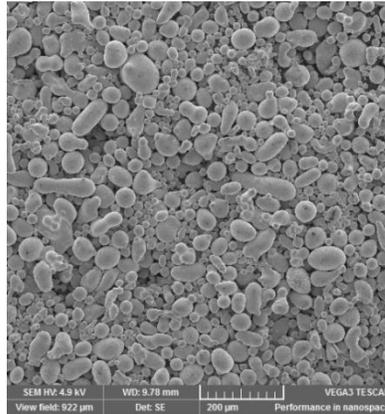


Al observar las gráficas 3-13 y 3-14 se aprecian fases de Ni, ubicadas en las posiciones y direcciones 44.497° y $[1\ 1\ 1]$, 51.851° y $[2\ 0\ 0]$, y 76.383° y $[2\ 2\ 0]$, con estructura cristalina FCC y parámetro de red $a = 3.5238\ \text{Å}$, de acuerdo a la carta 01-087-0712, acorde con lo encontrado por González et al [4]. El compuesto Ni_3B de estructura ortorrómbica, ubicados en las posiciones y direcciones: 38.152° y $[1\ 2\ 1]$, 40.093° y $[2\ 0\ 1]$, 46.062° y $[0\ 3\ 1]$, 46.914° y $[1\ 1\ 2]$, 48.98° y $[2\ 2\ 1]$, parámetro de red $a = 5.232\ \text{Å}$, $b = 6.609\ \text{Å}$ y $c = 4.3894\ \text{Å}$, de acuerdo a la carta 01-082-1699. La presencia de estos elementos, posiciones y direcciones coinciden con los resultados obtenidos en los estudios de Wang [76] y de Stroumbouli [77].

3.4.2 Análisis por microscopía electrónica de barrido

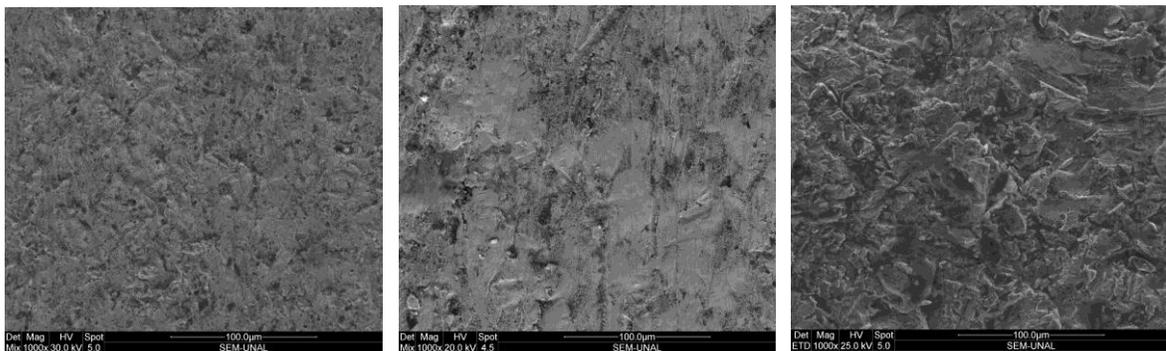
- **Material de aporte.** La figura 3-15 muestra la morfología del material de aporte Nitec 10224 en forma de polvo, donde se puede apreciar la geometría de las partículas esféricas y alargadas.

Figura 3-15: SEM a 200X. Morfología del material de aporte Nitec 10224 en polvo.



- **Nitec 10224 sobre fundición gris.** La figura 3-16 muestra las micrografías SEM del recubrimiento Nitec depositado sobre el sustrato de fundición gris, con los tres métodos de preparación.

Figura 3-16: Micrografías SEM a 1000X: Sustrato fundición gris, Recubrimiento Nitec, preparación: a) Granalla b) arena c) pulido.

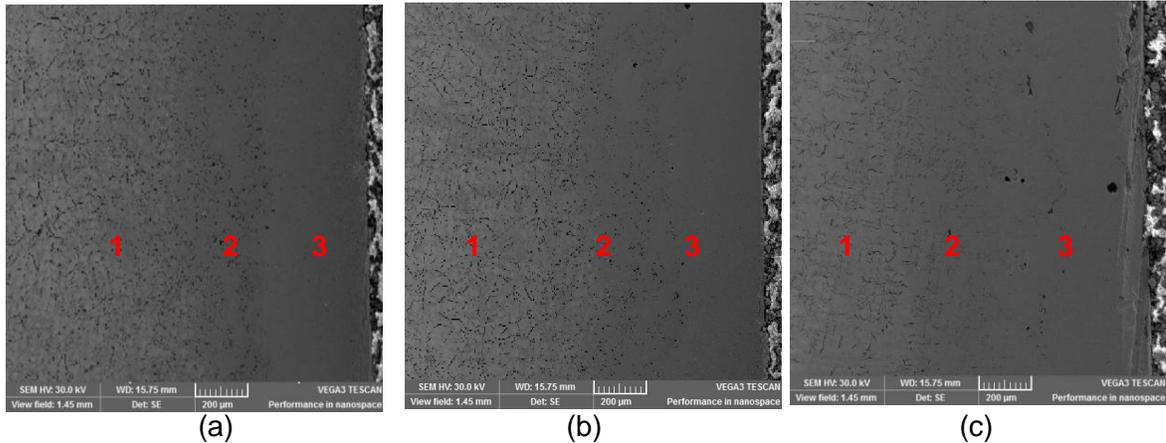


Como se puede apreciar en las micrografías presentadas en la figura 3-16, éste revestimiento fue posible aplicarlo en un paso; proyección y fusión del material de aporte sobre el sustrato, lo que facilitó la formación de una capa completamente homogénea y compacta, compuesta por las partículas fundidas del recubrimiento en forma de splats alargados, superpuestas y acumuladas en una estructura laminar, con presencia de algunas inclusiones no metálicas y poros en pequeña cantidad.

La figura 3-17 indica la sección transversal de los recubrimientos Nitec. En las micrografías se aprecian tres zonas; a la izquierda se observa la microestructura típica de la fundición gris con presencia de grafito laminar **(1)**, en el medio se identifica una zona

de color gris oscura donde se evidencia una difusión del material de aporte por unión metalúrgica entre el sustrato y el recubrimiento **(2)** y a la derecha se aprecia la microestructura típica del recubrimiento **(3)**.

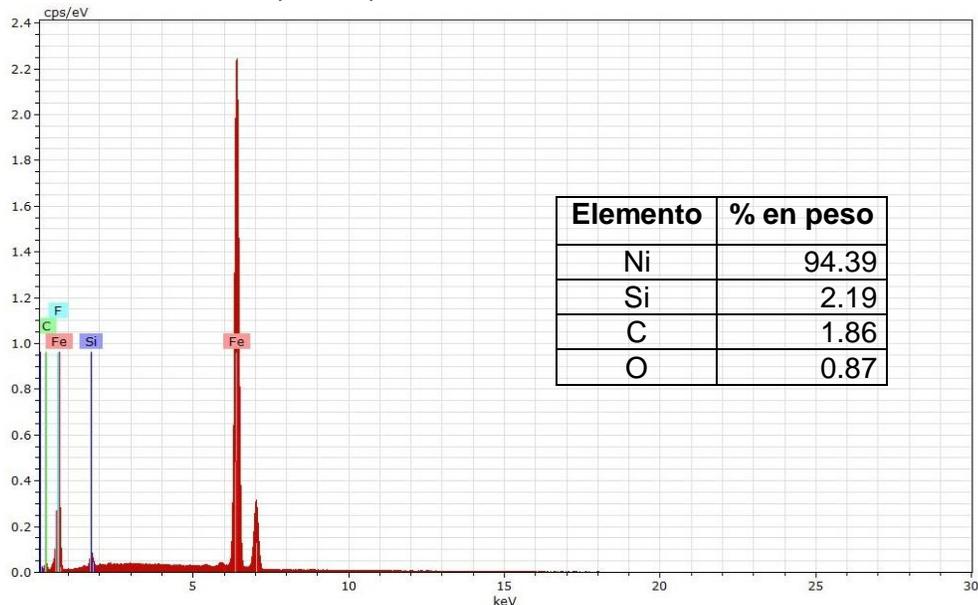
Figura 3-17: Micrografías SEM a 200X. Sección transversal Sustrato Fundición gris, Recubrimiento Nitec. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.



En las tres micrografías no se identifica con total claridad la zona de interfase que separa el sustrato del recubrimiento; esto se debe a que la fusión del material de aporte, generó una difusión de buena parte del recubrimiento en el sustrato, por ser elementos con puntos de fusión y coeficientes térmicos afines. En general, la morfología no muestra efectos en los tres métodos de preparación del sustrato.

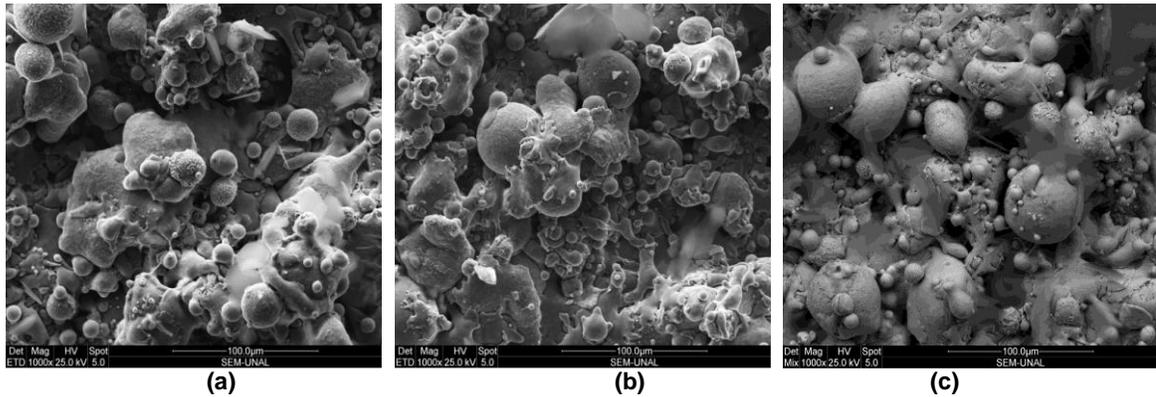
Adicionalmente, la figura 3-18 muestra la composición química semicuantitativa del recubrimiento Nitec tomada por espectroscopia de energía dispersa (EDS). Allí se observan los espectros de los elementos constituyentes de este tipo de revestimiento y a la vez, se evidencia la presencia oxígeno que contribuye a la formación de inclusiones de óxidos; esto puede ser causado por el uso de la llama oxiacetilénica durante el proceso de proyección térmica.

Figura 3-18: Caracterización química por EDS del Nitec 10224.



- **Nitec 10224 sobre bronce fosforado.** La figura 3-19 muestra las micrografías SEM del recubrimiento Nitec 10224 depositado sobre el sustrato de bronce, con los tres métodos de preparación.

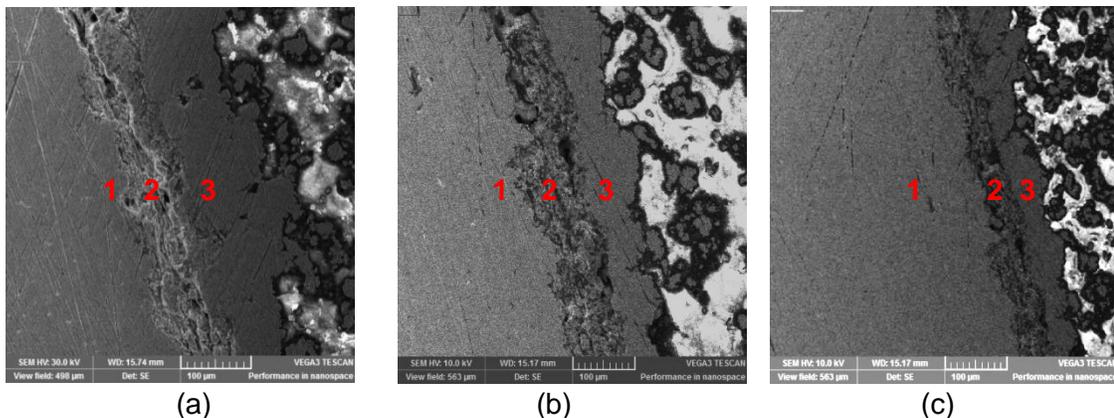
Figura 3-19: Micrografías SEM a 1000X: Sustrato bronce, Recubrimiento Nitec, preparación: a) Granalla b) arena c) pulido.



Este tipo de recubrimiento tuvo comportamiento similar al obtenido con el Metaceram sobre bronce, y al igual que éste, la diferencia en los puntos de fusión entre el recubrimiento y el sustrato, impidió la formación de una capa homogénea, ya que hubo proyección del material de aporte sin posterior fusión; por tal razón, el recubrimiento obtenido presenta gran cantidad de partículas no fundidas superpuestas sobre algunas fundidas; partículas semifundidas, cavidades y poros.

La figura 3-20 indica la sección transversal de los recubrimientos Nitec para los tres métodos de preparación. En las micrografías se aprecian tres zonas; a la izquierda se observa la microestructura típica del bronce (1), en el medio se identifica una zona de color gris oscura donde se evidencia una adherencia débil entre el sustrato y el recubrimiento, por acción de fuerzas mecánicas, no metalúrgicas (2) y a la derecha se aprecia la microestructura típica del recubrimiento (3).

Figura 3-20: Micrografías SEM a 100X. Sección trasversal del recubrimiento de Nitec sobre Bronce preparados con: a) granalla b) arena c) pulido



Adicionalmente se tomaron medidas del espesor de la capa del recubrimiento; para la preparación con granalla, el espesor fue de 162,91 μm , para la arena de 90,45 μm y para pulido fue de 59,16 μm . Esto se puede corroborar con las micrografías, donde se

evidencia un mayor espesor de la capa y con mayor adherencia del recubrimiento para la preparación superficial con granalla, seguido el de arena y por último el de pulido. Lo anterior se puede atribuir a la rugosidad propiciada por la preparación del sustrato con granalla, la cual favoreció la adhesión del polvo a la superficie. En todas estas imágenes del análisis del bronce, se distingue de forma clara el límite de contacto entre el recubrimiento y el sustrato.

3.5 Pruebas de desgaste abrasivo

Los ensayos de desgaste abrasivo aplicados a los dos sustratos: fundición gris y bronce fosforado y a los dos recubrimientos: Metaceram 23075 y Nitec 10224 se realizaron teniendo en cuenta el número de ensayos establecidos en el numeral 2.3.1. En la tabla 3-3 se muestran los resultados del desgaste abrasivo, los coeficientes de variación del equipo y el coeficiente de desgaste para los diferentes materiales.

Tabla 3-3: Resultados de los ensayos de desgaste abrasivo.

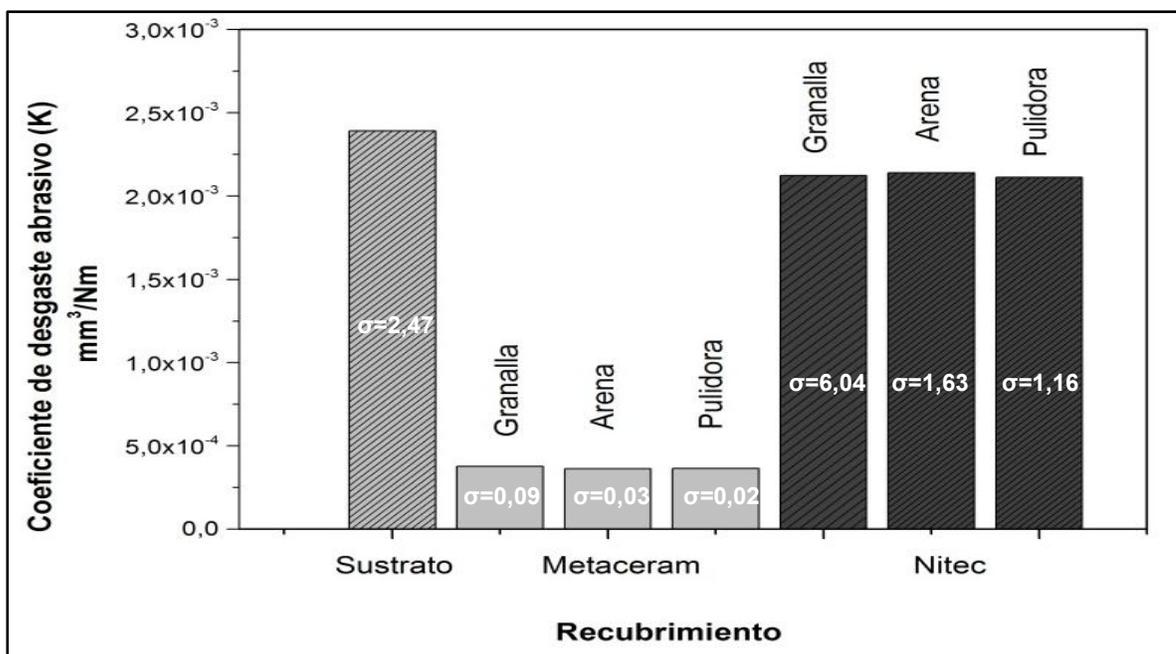
No. ENSAYO	MUESTRA	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	PESO PERDIDO (g)	DESGASTE ABRASIVO VOLUMEN (mm ³)	MEDIA (mm ³)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	DUREZA DE LA SUPERFICIE (HK)	COEFICIENTE DE DESGASTE K
1	Sustrato Fundición gris	113,7012	112,5393	1,1620	161,38	159,14	2,47	1,55	296,32	2,42E-03
2		144,2781	143,1295	1,1486	159,53				297,43	2,41E-03
3		106,7513	105,5776	1,1737	156,49				295,32	2,34E-03
4	Sustrato Bronce	107,0116	103,4696	3,5420	426,75	427,34	0,52	0,12	93,50	1,77E-03
5		124,4572	120,9076	3,5496	427,66				93,32	1,77E-03
6		106,1237	102,5744	3,5493	427,63				92,95	1,77E-03
7	Fundición gris Granalla	157,0863	157,0233	0,0630	7,00	7,09	0,09	1,33	959,49	3,70E-04
8	153,0278	152,9638	0,0640	7,10	960,00				3,76E-04	
9	Metaceram 23075	122,9277	122,8630	0,0647	7,18				961,20	3,80E-04
10	Fundición gris Arena Metaceram 23075	117,8142	117,7494	0,0648	7,19	7,17	0,03	0,39	934,19	3,64E-04
11		121,4211	121,3568	0,0643	7,14				939,20	3,62E-04
12		115,8476	115,7830	0,0646	7,17				937,24	3,63E-04
13	Fundición gris Pulido Metaceram 23075	154,2135	154,1494	0,0641	7,11	7,12	0,02	0,32	940,93	3,64E-04
14		169,6906	169,6266	0,0640	7,10				941,30	3,64E-04
15		135,2870	135,2226	0,0644	7,15				939,20	3,66E-04
16	Bronce Granalla Metaceram 23075	107,0116	104,1646	2,8470	315,98	308,72	21,06	6,82	732,65	1,31E-03
17		123,5583	120,6283	2,9300	325,19				740,00	1,35E-03
18		128,3231	125,7553	2,5678	284,99				729,64	1,18E-03
19	Bronce Arena Metaceram 23075	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20		-	-	-	-				-	-
21		-	-	-	-				-	-
22	Bronce Pulido Metaceram 23075	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23		-	-	-	-				-	-
24		-	-	-	-				-	-
25	Fundición gris Granalla Nitec 10224	118,5940	117,5016	1,0924	134,86	131,23	6,04	4,60	317,63	2,18E-03
26		114,7913	113,7012	1,0900	134,57				317,11	2,18E-03
27		113,5857	112,5791	1,0066	124,27				317,52	2,01E-03
28	Fundición gris Arena Nitec 10224	125,7983	124,7213	1,0770	132,96	134,84	1,63	1,21	311,73	2,11E-03
29		123,9512	122,8503	1,1009	135,91				312,00	2,16E-03
30		122,5521	121,4534	1,0987	135,64				311,54	2,15E-03
31	Fundición gris Pulido Nitec 10224	129,7834	128,7200	1,0634	131,28	131,73	1,18	0,89	315,17	2,10E-03
32		121,7563	120,6785	1,0778	133,06				317,00	2,14E-03
33		122,3411	121,2813	1,0598	130,84				315,00	2,10E-03
34	Bronce Granalla Nitec 10224	118,8644	116,4424	2,4219	299,00	298,24	0,75	0,25	209,30	1,24E-03
35		117,6993	115,2895	2,4098	297,51				210,10	1,31E-03
36		115,7654	113,3498	2,4156	298,22				208,50	1,32E-03
37	Bronce Arena Nitec 10224	120,4399	118,0851	2,3548	290,72	295,17	4,06	1,37	215,00	1,29E-03
38		120,2084	117,8097	2,3987	296,14				214,70	1,31E-03
39		123,0009	120,5817	2,4192	298,66				215,20	1,32E-03
40	Bronce Pulido Nitec 10224	103,8209	101,4088	2,4121	297,79	297,14	0,88	0,30	208,00	1,31E-03
41		123,2701	120,3062	2,3987	296,14				208,90	1,31E-03
42		125,8976	123,4878	2,4098	297,51				207,40	1,31E-03

Para el cálculo de desgaste abrasivo, expresado en volumen perdido (mm^3) se utilizó la ecuación 2-1. Analizando los resultados obtenidos, se puede apreciar que el mayor desgaste abrasivo se logró con el sustrato en bronce, dando un valor promedio de $427,34 \text{ mm}^3$ de volumen perdido, mientras que los recubrimientos de Metaceram depositados sobre la fundición gris, presentaron el mejor comportamiento frente al desgaste, dando valores promedio de $7,13 \text{ mm}^3$.

Para determinar la precisión y exactitud de la máquina de ensayos se utilizaron las ecuaciones 2-2 para la desviación estándar y 2-3 para el cálculo del coeficiente de variación. Estos datos estadísticos obtenidos a partir de la pérdida de volumen, arrojaron valores por debajo del 6%, lo que indica que la máquina construida tiene un alto grado de repetitividad y por consiguiente el ensayo se encuentra bajo control.

Por último, por medio de la ecuación 2-4 se calculó el coeficiente de desgaste K para cada tratamiento [34]. La figura 3-21 muestra la gráfica correspondiente al coeficiente de desgaste abrasivo K contra los recubrimientos aplicados sobre la fundición gris. Allí se observa que los coeficientes de desgaste promedio oscilan entre $2.13 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ para los tratamientos con Nitec, mientras que para los de Metaceram son de $3.68 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, encontrándose tasas de desgaste menores para el recubrimiento Metaceram que para el Nitec, lo que confirma que la adición de carburos de tungsteno en el Metaceram aumenta la dureza y con ello la resistencia al desgaste abrasivo, proporcionando un mejor comportamiento durante su desempeño. Además se observa que el recubrimiento Metaceram aumenta considerablemente la resistencia al desgaste abrasivo de la fundición gris en un mayor porcentaje que el recubrimiento Nitec, cuyos valores de desgaste son muy cercanos a los del sustrato en fundición gris ($2.39 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$). Adicionalmente se muestra las desviaciones estándar (σ) para cada tratamiento.

Figura 3-21: Coeficiente de desgaste abrasivo K contra recubrimientos aplicados sobre la fundición gris.

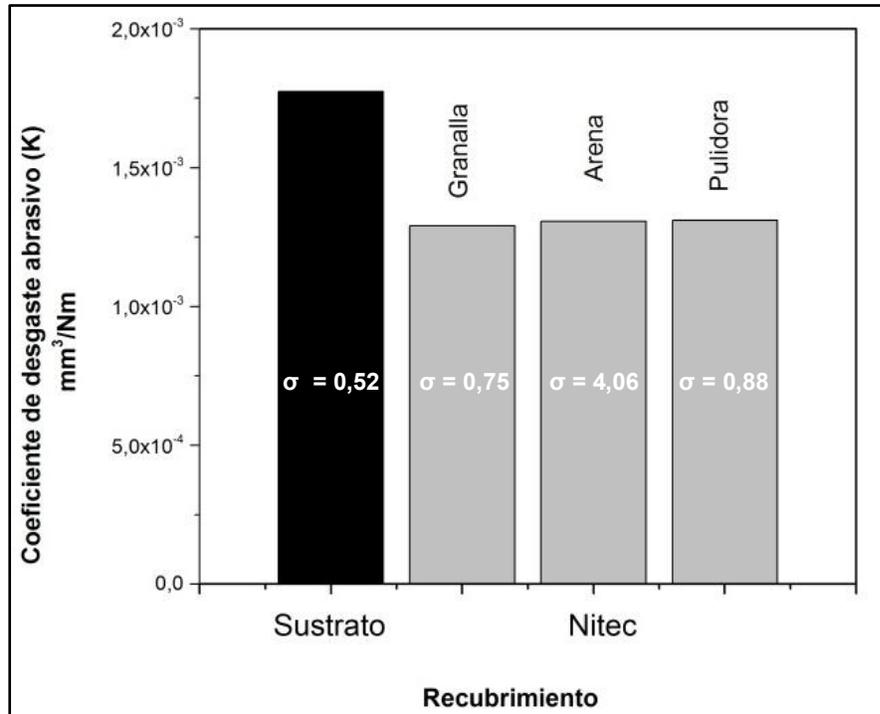


Debido a que la adherencia del recubrimiento Metaceram sobre el bronce fue muy deficiente y no hubo formación de una capa homogénea, no fue posible efectuar el ensayo de desgaste abrasivo para los sustratos preparados con arena y pulido. Para los sustratos preparados con granalla se realizaron ensayos de desgaste, pero los resultados no fueron muy confiables, por tal razón no se tienen en cuenta para el análisis de desgaste.

La figura 3-22 muestra la gráfica de coeficiente de desgaste K contra el recubrimiento Nitec aplicado sobre bronce fosforado, allí también se indican las desviaciones estándar (σ) para cada tratamiento.

Aunque, para los tratamientos bronce-Nitec, preparados por los tres métodos, se obtuvieron películas muy delgadas, los datos registrados de desgaste abrasivo nos arrojaron un error apreciable; ya que durante el desarrollo del ensayo, el disco abrasivo traspasó la película y hubo gran desgaste del sustrato. Por esta razón, para el cálculo del coeficiente de desgaste K , fue necesario utilizar una dureza promedio del sistema sustrato-recubrimiento. Ésta se calculó por aporte volumétrico perdido de la siguiente manera: Primero, a partir del peso perdido del sistema, se determinó el peso perdido correspondiente a la capa y al sustrato, midiendo la huella obtenida con ayuda de un analizador de imágenes; luego teniendo estos valores, se calculó la fracción porcentual proporcionada por la capa y por el sustrato y finalmente se multiplicó dicha fracción por su respectiva dureza, obteniendo de esta forma, la dureza promedio para el sistema.

Figura 3-22: Coeficiente de desgaste abrasivo K contra recubrimientos Nitec aplicados sobre bronce.

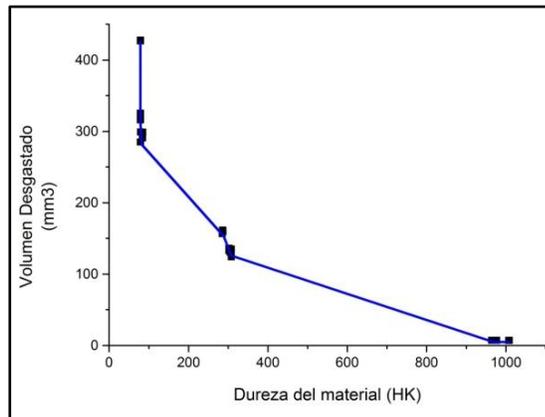


El coeficiente de desgaste promedio para los tratamientos con Nitec fue de $1,30 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ y para el sustrato en bronce fue de $1,77 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Comparando estos dos valores, se puede afirmar que aunque no se logró obtener una película óptima de

recubrimiento, éste mejora en pequeña proporción la resistencia al desgaste abrasivo de los bronce.

La dureza juega un papel importante en la resistencia al desgaste de los materiales; la figura 3-23 muestra la gráfica de volumen desgastado contra dureza del material, donde se puede observar que la dureza es inversamente proporcional a la pérdida de volumen. En este caso, el recubrimiento Metaceram presenta la mayor dureza y por lo tanto el menor índice de desgaste, mientras que el bronce posee una dureza baja y un desgaste mayor.

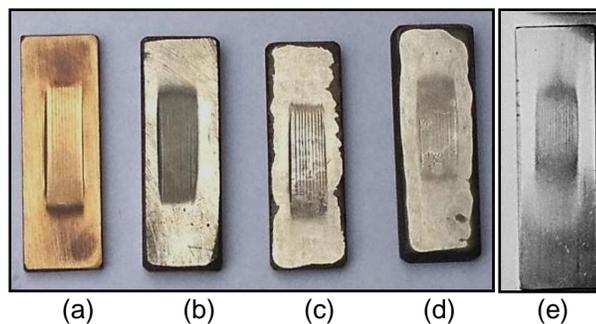
Figura 3-23: Volumen desgastado contra dureza del material.



3.6 Análisis de la huella de desgaste

Una vez realizados los ensayos se obtuvieron las huellas de desgaste de los dos sustratos: fundición gris y bronce fosforado y de los dos recubrimientos: Metaceram 23075 y Nitec 10224, indicadas en la figura 3-24(a-d).

Figura 3-24: Huellas de desgaste abrasivo obtenidas en el equipo construido. (a) Bronce, (b) Fundición gris, (c) Nitec (d) Metaceram (e) Huella según norma ASTM G-65.



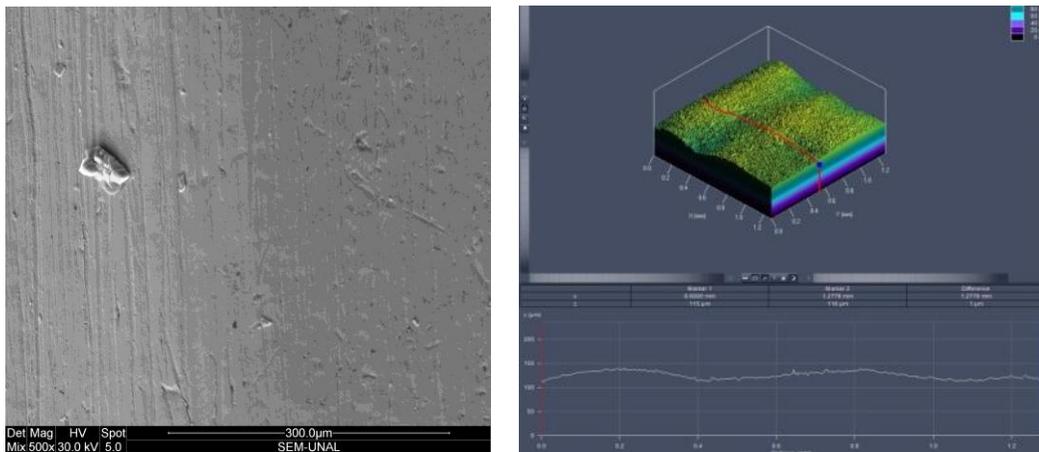
Es importante verificar que la huella sobre la probeta se encuentre centrada y sea uniforme; tal como se observa en figura 3-24 (e), tomada de la norma. Un patrón no uniforme indica una incorrecta alineación de la rueda, variaciones en el flujo de arena o que la geometría de la probeta no es uniforme.

Las huellas de desgaste se analizaron por Microscopía Electrónica de Barrido y microscopía Laser Confocal, efectuando un análisis de los mecanismos de desgaste abrasivo, como sigue a continuación.

3.6.1 Huella de desgaste de los sustratos

- **Fundición gris.** La figura 3-25 muestra la huella de desgaste de la fundición gris, (a) Microscopía electrónica de barrido y (b) Microscopía laser confocal. Allí se pueden apreciar surcos profundos, arranque de material y presencia de microporos en pequeña cantidad. Los mecanismos de desgaste observados son: microarado y microfatiga, típicos de un material frágil. El microarado se produjo por el desplazamiento y acumulación del material delante de la partícula abrasiva, y al repetirse este proceso se presenta desgarre del material provocando microfatiga.

Figura 3-25: Huellas de desgaste del sustrato fundición gris. (a) Micrografías SEM a 500x. (b) Microscopía Laser Confocal.



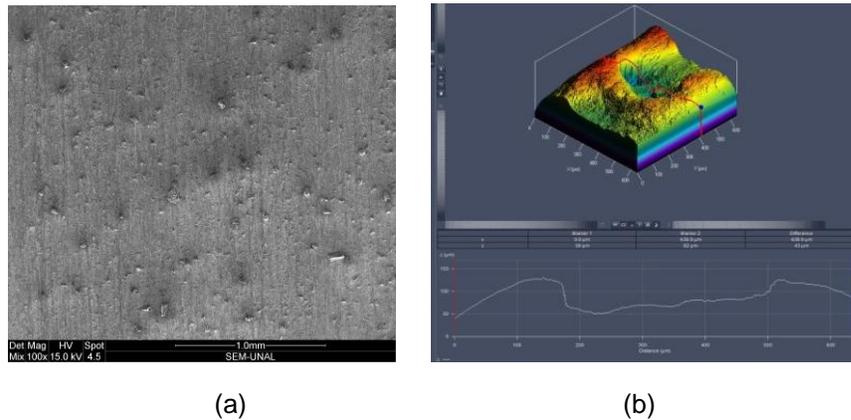
(a)

(b)

Adicionalmente en la imagen (b) se pueden apreciar los picos y valles que se forman en la superficie desgastada. Con la ayuda de esta técnica se tomaron los valores de rugosidad promedio superficial, ésta fue de $1,256\mu\text{m}$.

- **Bronce.** La figura 3-26 muestra la huella de desgaste del bronce, (a) Microscopía electrónica de barrido y (b) Microscopía laser confocal. Allí se puede apreciar los mecanismos de desgaste de microarado y rodadura. Por lo que es un material blando, las partículas de arena se embeben en el caucho y aran la superficie ensayada; en el caso de la rodadura las partículas de arena, simultáneamente ruedan y se deslizan entre el caucho y la superficie ensayada, los bordes irregulares y filosos de la arena ejercen elevada presión sobre la muestra causando indentación, deformación plástica y desprendimiento de material, debido a que el caucho no se deforma lo suficiente como para embeber las partículas de arena, éstas ruedan y deslizan entre las dos superficies[31].

Figura 3-26: Huellas de desgaste del sustrato bronce. (a) Micrografías SEM a 100x. (b) Microscopía Laser Confocal.



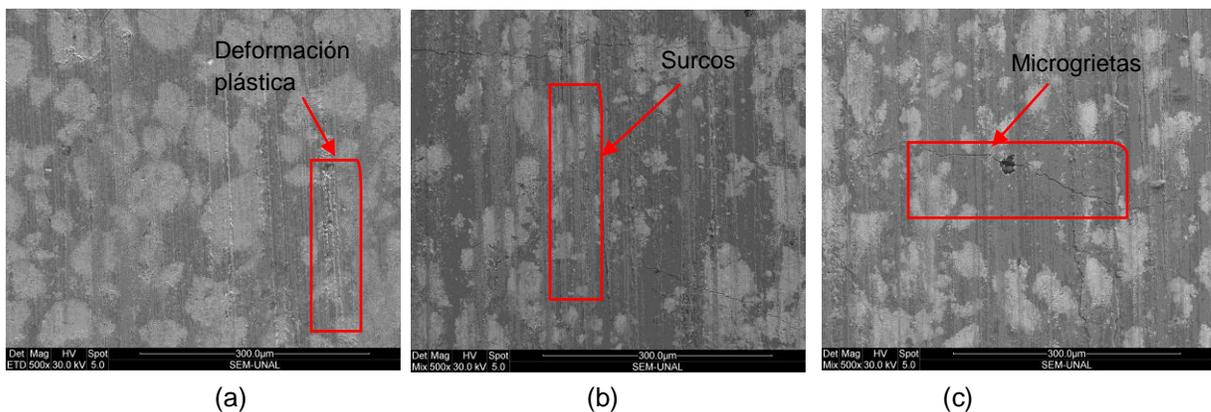
Para este material, la rugosidad promedio superficial obtenida fue de $1,170\mu\text{m}$.

3.6.2 Huella de desgaste sobre el recubrimiento Metaceram

▪ Metaceram sobre fundición gris.

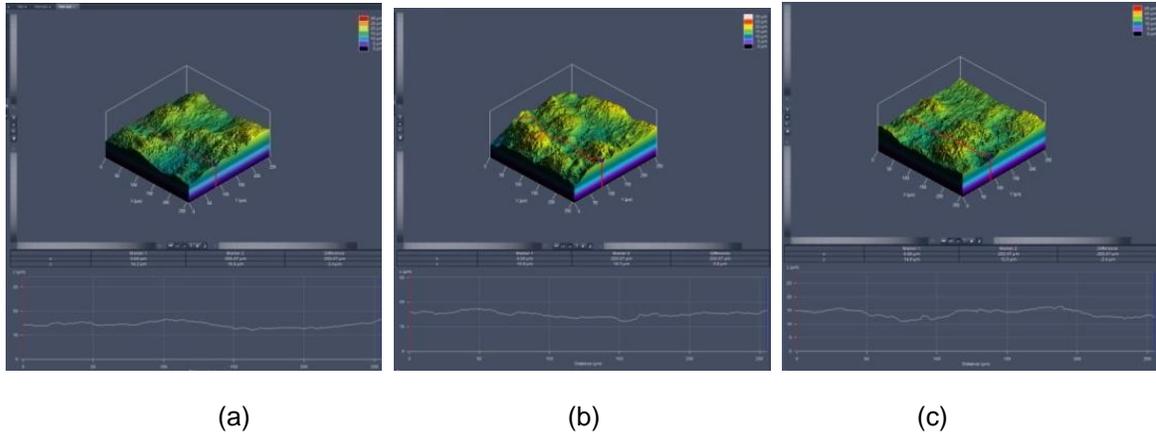
- **Análisis por Microscopía Electrónica de barrido.** En la figura 3-27 se presentan las huellas de desgaste correspondientes. Allí se pueden apreciar dos mecanismos de desgaste; el microarado y microagrietamiento. El microarado se produjo por el desplazamiento y acumulación del material delante de la partícula abrasiva, formando surcos poco profundos acompañados de una ligera deformación plástica a los lados de la huella [26, 29]. Además, dado la naturaleza frágil del recubrimiento, se aprecia la formación de microgrietas producidas por las altas concentraciones de tensión superficial cuando se deslizan las partículas del abrasivo, ocasionando de este modo desprendimiento de material. Esto sucede cuando las fuerzas aplicadas por el grano abrasivo exceden la tenacidad a la fractura del material.

Figura 3-27: Micrografías SEM a 500x. Huellas de desgaste del recubrimiento Metaceram, sustrato fundición gris. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.



-Análisis por Microscopía Laser Confocal. En complemento, la figura 3-28 muestra imágenes de esta técnica, donde se observa desgarramiento del material sin un patrón de surcos definido como se aprecia en las imágenes anteriores, lo que evidencia la presencia de microfátiga. Este fenómeno se debe a que la superficie es arada en repetidas ocasiones por las partículas que se encuentran en contacto con ella, dando lugar a un desprendimiento de material. La rugosidad promedio superficial fue de $478\mu\text{m}$.

Figura 3-28: Microscopía Laser Confocal. Huellas de desgaste del recubrimiento Metaceram, sustrato fundición gris. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.

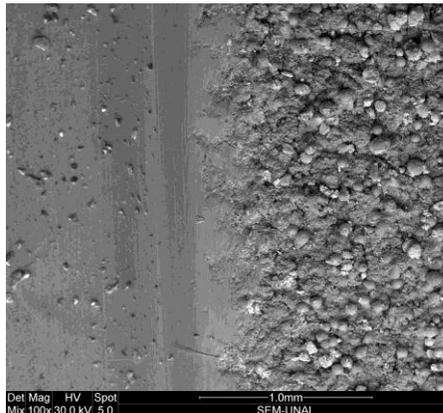


Comparando entre si las imágenes anteriores no se evidencian cambios en la superficie de desgaste por causa del método de preparación.

▪ Metaceram sobre bronce fosforado.

- Análisis por Microscopía Electrónica de barrido. En la figura 3-29 se presenta la huella de desgaste del recubrimiento Metaceram sobre el sustrato en bronce preparado con granalla. En la micrografía se observan dos zonas, al lado izquierdo el sustrato desgastado y al lado derecho el recubrimiento depositado. Como se dijo anteriormente, en este caso, no se formó una capa bien definida del revestimiento sino que hubo una deposición superficial del polvo sin fundir, con una adherencia muy baja. Durante las pruebas de desgaste abrasivo, primero se presentó un desprendimiento rápido de la película formada y luego hubo un desgaste del sustrato de bronce. Por la razón anterior, no se pudo efectuar un análisis de la huella de desgaste.

Figura 3-29: Micrografías SEM a 100X. Huella de desgaste del recubrimiento Metaceram sobre bronce, preparado con granalla.

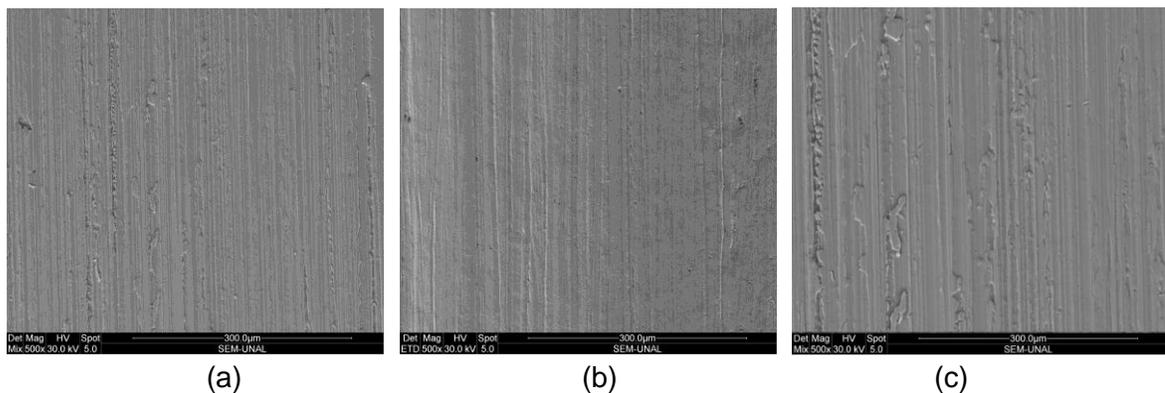


3.6.3 Huella de desgaste sobre el recubrimiento Nitec

▪ Nitec sobre fundición gris.

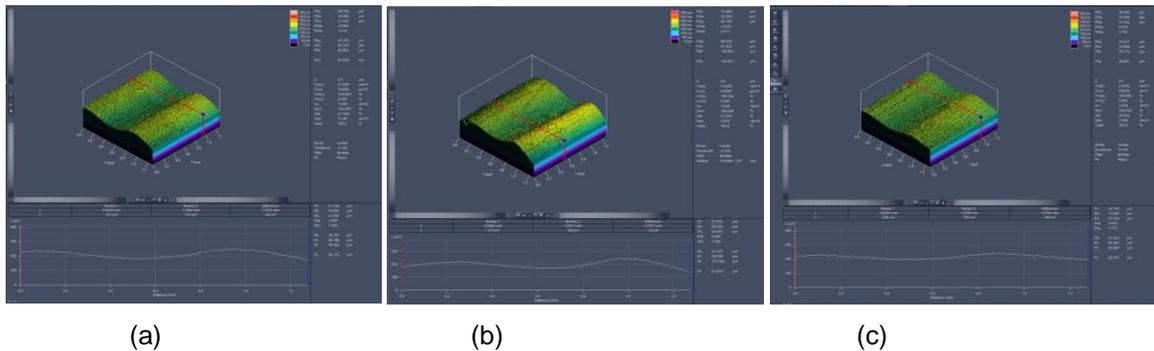
- **Análisis por Microscopía Electrónica de barrido.** En la figura 3-30 se presentan las huellas de desgaste del recubrimiento Nitec sobre el sustrato en fundición gris, para los tres métodos de preparación. Debido a que este recubrimiento tiene un comportamiento dúctil, los mecanismos de desgaste observados son: microarado, formación de cuña y microcorte [34]. Aquí los surcos son mucho más profundos que para el caso del metaceram, presentando desprendimiento de material, ocasionados por el corte y una deformación plástica. Al igual que para el caso anterior no se observan cambios en la superficie desgastada, producto del método de preparación.

Figura 3-30: Micrografías SEM a 500X. Huellas de desgaste del recubrimiento Nitec, sustrato fundición gris. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.



- **Análisis por Microscopía Laser confocal.** En la figura 3-31 se muestran imágenes de esta técnica, donde se evidencia de manera más clara la formación de surcos bien definidos, producidos por las partículas de abrasivo mediante el mecanismo de microcorte. La rugosidad promedio superficial fue de 1.574µm.

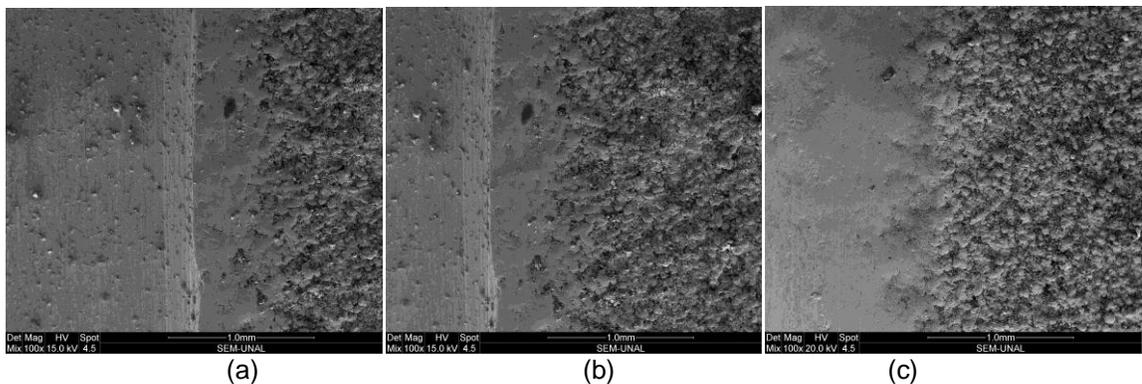
Figura 3-31: Microscopía Laser Confocal. Huellas de desgaste del recubrimiento Nitec, sobre sustrato de fundición gris. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.



▪ Nitec sobre bronce fosforado.

- **Análisis por Microscopía Electrónica de barrido.** En la figura 3-32 se presentan las huellas de desgaste del recubrimiento Nitec sobre el sustrato en bronce, para los tres métodos de preparación. Para este caso, el comportamiento fue muy similar al obtenido con recubrimiento Metaceram aplicado sobre el bronce. Al igual, en la micrografía se observan dos zonas, al lado izquierdo el sustrato desgastado y al lado derecho el recubrimiento depositado. No se formó una capa bien definida del revestimiento sino que hubo una deposición superficial del polvo sin fundir, con una adherencia muy baja. Durante las pruebas de desgaste abrasivo, primero se presentó un desprendimiento rápido de la película formada y luego hubo un desgaste del sustrato de bronce.

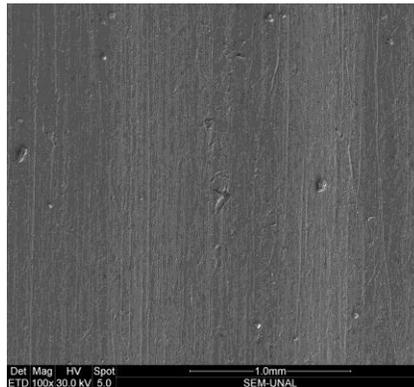
Figura 3-32: Micrografías SEM a 100x. Huellas de desgaste del recubrimiento Nitec, sustrato bronce. Preparación: a) granalla b) arena c) pulido.



Adicionalmente, para poder determinar y comprender un posible mecanismo de desgaste para este caso, se realizó un procedimiento similar al que siguió Kanchan Kumari [7] en su estudio. Teniendo en cuenta los resultados de poca adherencia obtenidos, se realizó una prueba con igual fuerza aplicada sobre la probeta, pero menor número de revoluciones (100), sobre el sustrato preparado con granalla (ya que este presentó mayor espesor de la capa del recubrimiento).

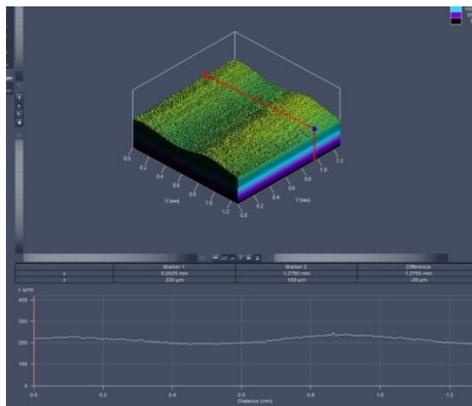
La figura 3-33 muestra la huella de desgaste de Nitec sobre bronce preparado con granalla. Se puede apreciar surcos profundos, arranque de material no fundido y partículas brillantes que corresponden a inclusiones no metálicas. Los mecanismos de desgaste observados son: microarado y microcorte, típicos de un material dúctil.

Figura 3-33: Micrografías SEM a 100 X. Huellas de desgaste del recubrimiento Nitec, sustrato bronce preparado con granalla.



- **Análisis por Microscopía Laser confocal.** La figura 3-34 muestra imágenes de esta técnica, donde se pueden apreciar los picos y valles que se forman en la superficie desgastada. Los valores de rugosidad promedio superficial, que fue de $1.248\mu\text{m}$.

Figura 3-34: Microscopía Laser Confocal. Huellas de desgaste del recubrimiento Nitec sobre bronce, preparado con granalla.



Este comportamiento concuerda con el mecanismo de desgaste obtenido para los tratamientos con Nitec – fundición gris.

4. Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo se logró construir y poner a punto un equipo para ensayos de desgaste abrasivo, cumpliendo con los requisitos exigidos por la Norma ASTM G-65, con el cual se pueden analizar diferentes tipos de materiales por el procedimiento que más convenga.

Se efectuó la calibración de las variables del equipo influyentes en los ensayos, tales como: diámetro y dureza del recubrimiento de caucho, tamaño de grano, humedad y flujo del abrasivo, velocidad del motor y fuerza ejercida sobre la probeta. Dichos parámetros deben controlarse de manera adecuada durante las pruebas de desgaste abrasivo para garantizar de esta forma, la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Se validó el funcionamiento del equipo usando diferentes tipos de materiales: hierro gris, bronce y recubrimientos a base de níquel (Metaceram 23075 y Nitec 10224) según procedimiento B de la Norma ASTM G-65, presentándose repetitividad en los resultados de desgaste abrasivo para cada material. Al aplicar los métodos estadísticos, se determinó el coeficiente de variación, el cual se encontró por debajo del límite máximo permitido en la norma (6%) para este procedimiento, por lo tanto se puede comprobar que éste se encuentra bajo control.

Para los recubrimientos Metaceram y Nitec aplicados sobre los sustratos en fundición gris, se obtuvieron buenos resultados de adherencia, lo que permitió la formación de una capa homogénea. Estos mismos recubrimientos depositados sobre los sustratos en bronce, presentaron una adherencia muy pobre y por tanto se formó una película muy delgada, con posterior desprendimiento del recubrimiento. Lo anterior se debe a la diferencia existente entre los puntos de fusión y los coeficientes térmicos del sustrato y el recubrimiento.

El recubrimiento Metaceram, presentó un coeficiente de desgaste abrasivo promedio de $3.68 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ y el Nitec de $2.13 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, encontrando tasas de desgaste menores para el Metaceram que para el Nitec. Lo anterior se debe a que los carburos de tungsteno que componen el Metaceram, aumentan la dureza y con ello la resistencia al desgaste abrasivo.

Para los recubrimientos depositados sobre sustratos de fundición gris, el perfil de anclaje obtenido por los tres métodos de preparación de las superficies, no tuvo influencia en la tasa de desgaste abrasivo, debido al procedimiento de deposición utilizado donde se alcanzó una fusión total en los dos recubrimientos, dando como resultado una capa bien adherida y completamente homogénea.

Por el contrario, para los tratamientos sobre bronce la preparación con granalla brindó un perfil de anclaje mayor que los otros métodos, esto se evidenció en el espesor de la capa obtenida aunque no se puede afirmar que tenga una influencia directa en la resistencia al desgaste si es claro que juega un papel importante en la adherencia del recubrimiento.

Finalmente se realiza el análisis de las huellas de desgaste por microscopía electrónica de barrido y microscopía laser confocal, encontrándose que el mecanismo de desgaste presente en el recubrimiento Metaceram 23075 fue una combinación de microarado, microfatiga y microagrietamiento, típico de un material frágil; mientras que para el recubrimiento Nitec 10224 fue microarado y microcorte, característico de los materiales dúctiles.

5. Recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda depositar el recubrimiento metaceram 23075 sobre piezas fabricadas en fundición gris para aumentar la resistencia al desgaste abrasivo.

Los recubrimientos Nitec 10224 y Metaceram 23075 aplicados sobre componentes en bronce, presentan muy baja adherencia, por tal razón no se recomiendan para usos industriales, sobre estos sustratos.

Como complemento a este trabajo, se recomienda realizar el estudio del estado de esfuerzos residuales presentes en la superficie de los materiales recubiertos por la técnica de proyección térmica por llama, para poder llegar a una mayor profundidad acerca de los mecanismos de desgaste presentes en este tipo de materiales.

Es importante revisar la concentricidad y el diámetro de la rueda de caucho del equipo construido, cada 50 ensayos, para asegurar la repetitividad y confiabilidad de los resultados.

Solamente se recomienda utilizar la misma arena dos veces y luego desecharla, ya que el grado de contaminación se eleva sustancialmente durante el tercer ensayo.

6. Bibliografía

- [1] RODRÍGUEZ, Daniel Felipe. Construcción y montaje de una máquina para realizar pruebas de desgaste abrasivo según norma técnica ASTM G-65. Universidad de los Andes. Bogotá, febrero 2007.
- [2] SOTO TRINIDAD, José L. Diseño y construcción de una máquina para ensayos de abrasión seca y abrasión húmeda. Instituto Tecnológico de Santo Domingo. 11th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, LACCET. 2013.
- [3] ECHEVERRI, Sergio., VARGAS, Fabio. y BEDOYA, Juliana. Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos depositados mediante proyección térmica sobre acero al carbono. Universidad de Antioquia, Medellín, 2007.
- [4] GONZÁLEZ, R., CADENAS, M., FERNÁNDEZ, R., CORTIZO, J.L. y RODRÍGUEZ, E. Wear behaviour of flames sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser. *Wear* 262, pp. 301–307. 2007.
- [5] GUILLEMANY, J.M., NIN, J., LORENZANA, C., MIGUEL, J. M. y MIGUEL J.R. Tribología de recubrimientos Cermet/NiCrBSi depositados mediante HVOF. *Bol. Soc. Esp. Ceram.* V.43, p. 483-487. 2004.
- [6] WANG, Y.-Y., C.-J. Li., OHMORI, A. "Influence of substrate roughness on the bonding mechanisms of high velocity oxy-fuel sprayed coatings". *Thin Solid Films*. 485, 2005. p.p. 141-147.
- [7] KUMARI, Kanchan, ANANDA, K., BELLACCIB, Michelangelo y GIANNOZZI, Massimo. "Effect of microstructure on abrasive wear behavior of thermally sprayed WC–10Co–4Cr coating". *Wear*. Vol. 268, p. 1309. 2010.
- [8] LIAO, H., NORMAND, B. y CODDET, C. "Influence of coating microstructure on the abrasive wear resistance of WC/Co cermet coatings". *Surface and Coatings Technology* 124, 2000.
- [9] STOLARSKI, T.A. *Tribology in Machine Design*. Edit. Industrial Press Inc, USA, 1991.
- [10] ZUM GAHR, Karl-Heinz. *Microstructure and wear of materials*, Elsevier. Holanda, 1987.

- [11] LÓPEZ L., Edgar Jesús. Estudio experimental del desgaste abrasivo en acero AISI 8620, D-2 y H-13 con y sin tratamiento superficial. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería. México, junio de 2004.
- [12] STOLARSKI, T.A. Tribology in machine design. Butterworth Heinemann. Elsevier. ISBN 0 75063623 8. 2000.
- [13] GOMEZ B. Maryory Astrid. Caracterización de las propiedades de los recubrimientos duros. Universidad de Barcelona, Departamento de Física aplicada y óptica. Diciembre, 2005.
- [14] STACHOWIAK, Gwidon W. & BATCHELOR, Andrew. Engineering Tribology, Butterworth Heinemann. Team LRN. 2001.
- [15] SEDRIKS, A. J. MULHEARN, T. O. Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive process, Wear, vol. 7, pp. 457-466, 1963.
- [16] MARQUEZ, M. A. L. Diseño de una máquina tribológica para pruebas de desgaste abrasivo severo. Tesis de maestría, SEPI ESIME IPN. México, Febrero de 2002.
- [17] NAM P., Suh. Tribophysics, Editorial Prentice Hall, USA 1986.
- [18] BAYER, Raymond G. Mechanical Wear prediction and prevention Fundamentals and Testing. New York, N.J. EEUU. Editorial Marcel Dekker. USA, 1994.
- [19] HUTCHINGS, Ian M. Tribology: Friction and wear of engineering materials. Editorial Great Britain, 1992.
- [20] GONZALEZ H., Andrés Yovanni. Estudio de la influencia de las propiedades físicas y mecánicas en el comportamiento tribológico de recubrimientos duros para herramientas de corte y procesamiento de polietileno. Universidad de Antioquia. Medellín, 2008.
- [21] BHUSHAN, B. Principles and applications of tribology. Ed. Wiley Interscience, New York, 1999.
- [22] LUDEMA, K.C. Mechanism based modeling of friction and wear. Wear 200. Pp. 1-7. 1996.
- [23] HOLMBERG K. Coatings tribology, Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering, Second Edition, Tribology and Interface Engineering Series, 56. 2009.
- [24] DAVIS, Joseph R. Surface engineering for corrosion and wear resistance. Materials Park, OH. ASM International, Institute of Materials, 2001.
- [25] GUTIERREZ, J.C., LEON S., Lisys, MESA G., Dario, TORO, Alejandro. Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo en recubrimientos duros para aplicaciones en la

industria minera. Universidad Tecnológica de Pereira. ScientiaetTechnica, Año X, No 25, ISSN 0122-1701. Agosto 2004.

[26] DEVIA NARVAEZ, Diana Marcela. Mecanismos de desgaste en herramientas de conformado con recubrimientos de TiAlN por medio de sistemas PAPVD. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, Colombia. Pp. 22-23. 2012.

[27] STROUD, W. Hardness Effect. Tribology International, pp. 27, 233. 1944.

[28] BUTTERY, T. C., SHAMMAT, M.A., TRAVERS, D.N. Die wall reaction and friction during compaction of some direct compression base, Proceedings, J Pharm Pharmacol. 1979.

[29] MOORE, M. A. Abrasive Wear: Fundamentals of Friction and Wear of Materials, ASM, pp. 73. 1981.

[30] BORIK, F. Testing for Abrasive Wear. Selection and use of wear tests for metals. ASTM, New Orleans, pp. 38. La. 17 - 21 Nov. 1975.

[31] HINCAPIE CAMPOS, Williams Steve. Resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia. 2013.

[32] SUNDARARAJAN, G. A New model for two-body abrasive wear based on the localization of plastic deformation, wear. Vol. 117, pp 1-35, 1987.

[33] REYES P., J.H., GARZÓN A., D.A., OLAYA F. J.J. Una revisión sobre las características, mecanismos y tipos de desgaste abrasivo en superficies. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Universidad Nacional de Colombia.

[34] ASM INTERNATIONAL, Handbook Friction, Lubrication and Wear Technology, Vol.18, Pág. 337-351, 1992.

[35] GORE, G. Effect of hardness on three very different forms of wear. Wear, 1997. 203-204. p. 544-563.

[36] Fang, L., Q. Zhou, and Y. Li, An explanation of the relation between wear and material hardness in three-body abrasion. Wear, 1991. 151. p. 313-321.

[37] KHRUSHCHOV, M.M. Principles of Abrasive Wear, Wear, Vol. 28, p. 69-88. 1974.

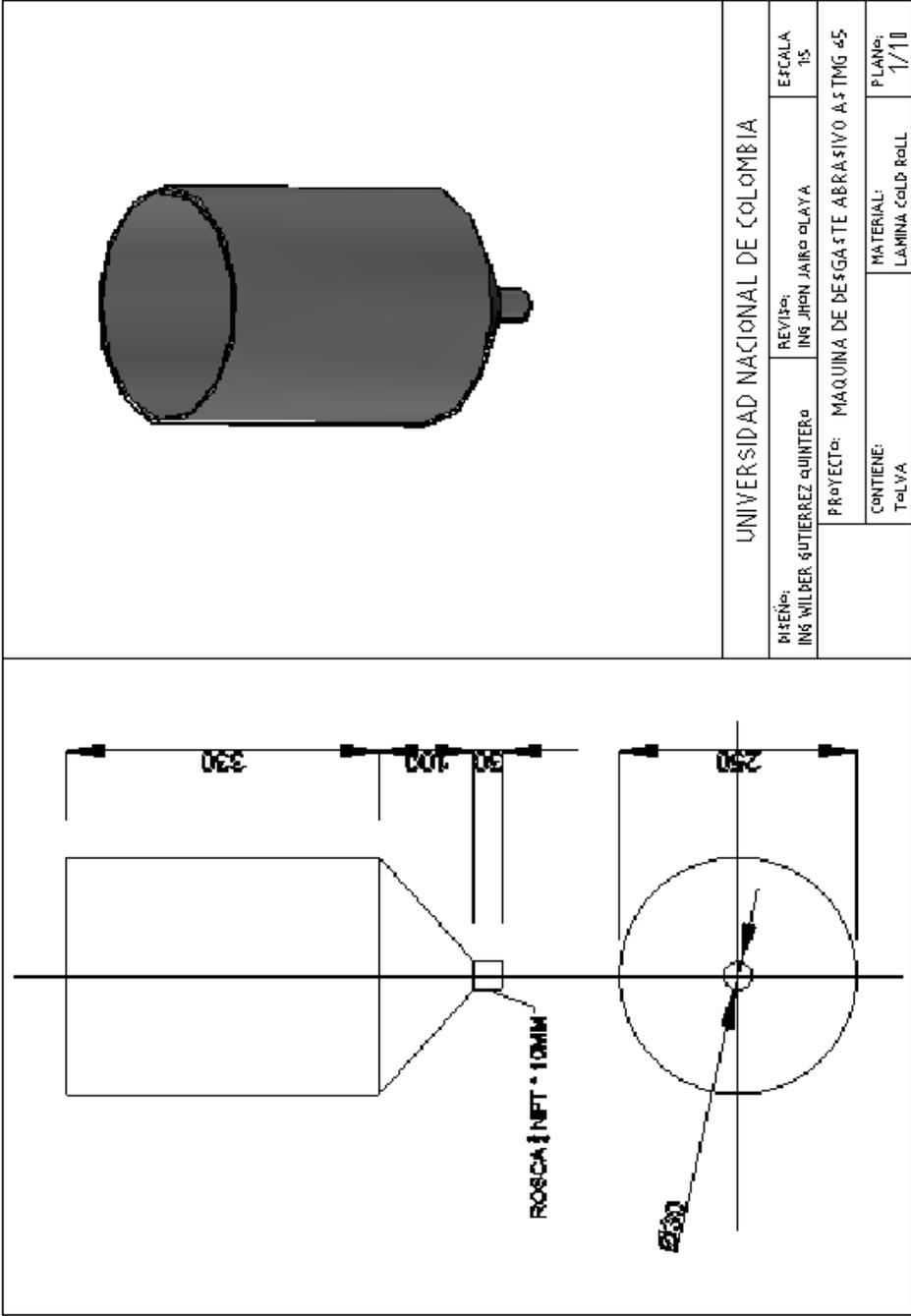
[38] Alison, P.J., and Wilman, H. The different behavior of hexagonal and cubic materials in their friction, wear and work hardening during abrasion. Brit. J. Appl. Phys., Vol 15, p.281-289. 1964.

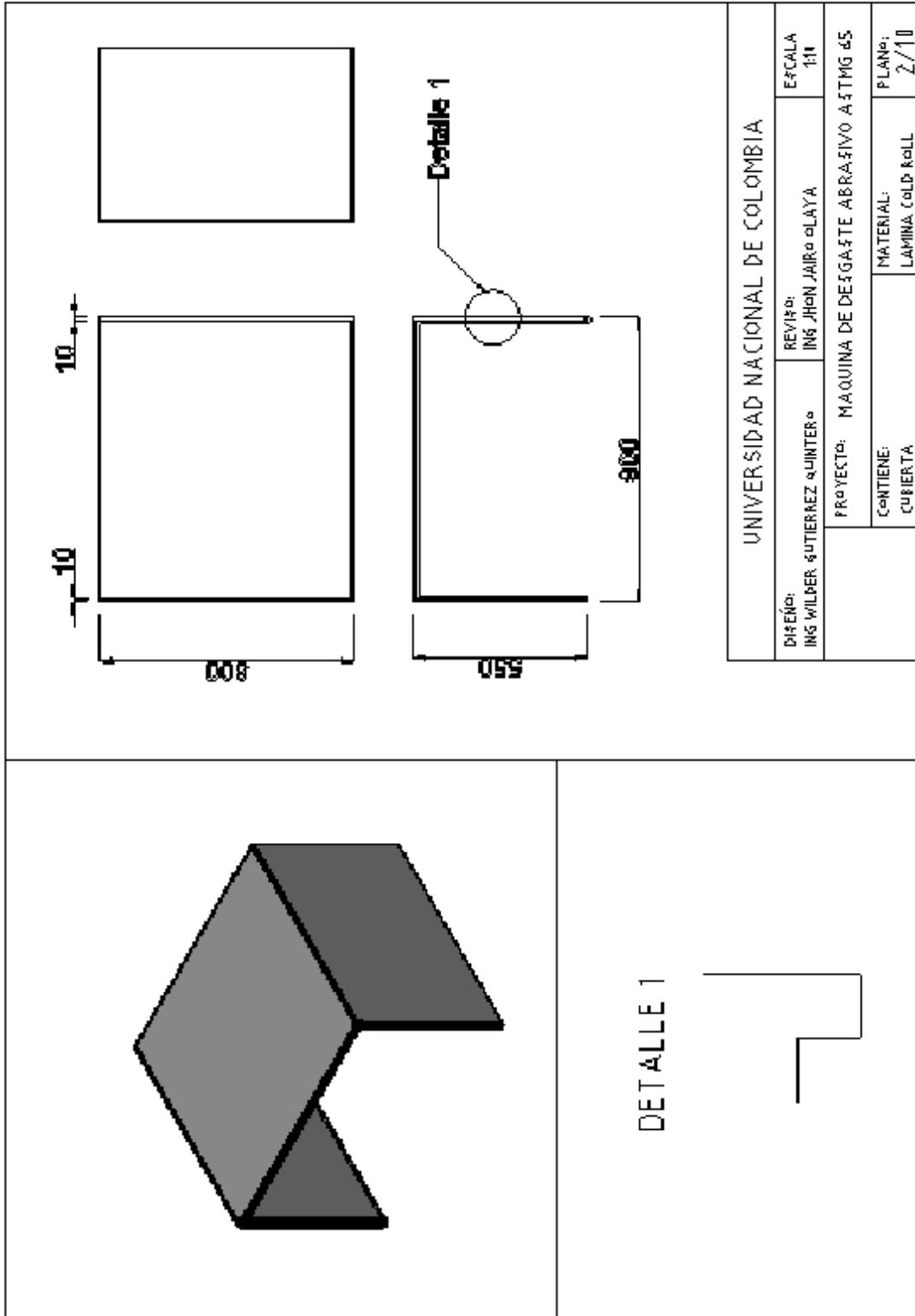
- [39] M.F. Buchely, J.C. Gutiérrez, L.M. León, A. Toro. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. Science direct. Tribology and Surfaces Group, National University of Colombia, Medellin, Colombia 2005.
- [40] A.J. SEDRIKS AND T.O. MULHEARN. The effect of work-hardening on the mechanics of cutting in simulated abrasive processes, *wear*, VOL 7, p. 451. 1964.
- [41] 16. G.K. Nathan and W.J.D. Jones, Influence of the Hardness of Abrasives on the Abrasive Wear of Metals, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol 181 (No. 30), 1966-67, p 215-221.
- [42] B.W. Madsen, Measurements of Erosion-Corrosion Synergism with a Slurry Wear Test Apparatus, *Proceedings of the International Conference on Wear of Materials*, American Society of Mechanical Engineers, 1987, p 777-786
- [43] J.H. Tylczak, D.J. Singleton, and R. Blickensderfer, Wear of 12 Alloys During Laboratory Milling of Phosphate Rock in Phosphoric Acid Waste Water, *Miner. Metall. Process.*, Aug 1986, p 187-190.
- [44] J. Peter et al. Development and use of ASTM standars for wear testing. *Wear* 225–229 _ 1999. pp. 1159–1170.
- [45] Norma ASTM G65 – 04. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. 2010.
- [46] ASM INTERNATIONAL. Handbook. Mechanical Testing and Evaluation. Volumen 8, 2000, p. 694 - 728.
- [47] A.N.J. Stevenson I, I.M. Hutchings, Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test, *Wear* 195, 1996 232-240.
- [48] Norma ASTM G65-80. Standard practice for Conducting dry sand / rubber abrasion test.
- [49] MARULANDA A., José, ZAPATA M. Alberto, ESTRADA, Carlos A. Construcción de una máquina para ensayo en desgaste abrasivo; según norma técnica ASTM G-65. *Scientia et Technica* Año XV, No 41, Mayo de 2009. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [50] Romero Gutiérrez, Hugo, Diseño y construcción de una máquina para pruebas de desgaste abrasivo, Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería, 1987.
- [51] Enrique E. Niebles Núñez, Franz Quesada T., Henry Santamaria D., Daimer José Méndez Muñoz, Andrés Armando Ruiz Rodríguez, Metodología para el diseño y construcción de una máquina para medición del desgaste abrasivo basado en la norma astm g-65, *Prospectiva* Vol. 7, No. 1, Enero - Junio de 2009, p. 53-58.

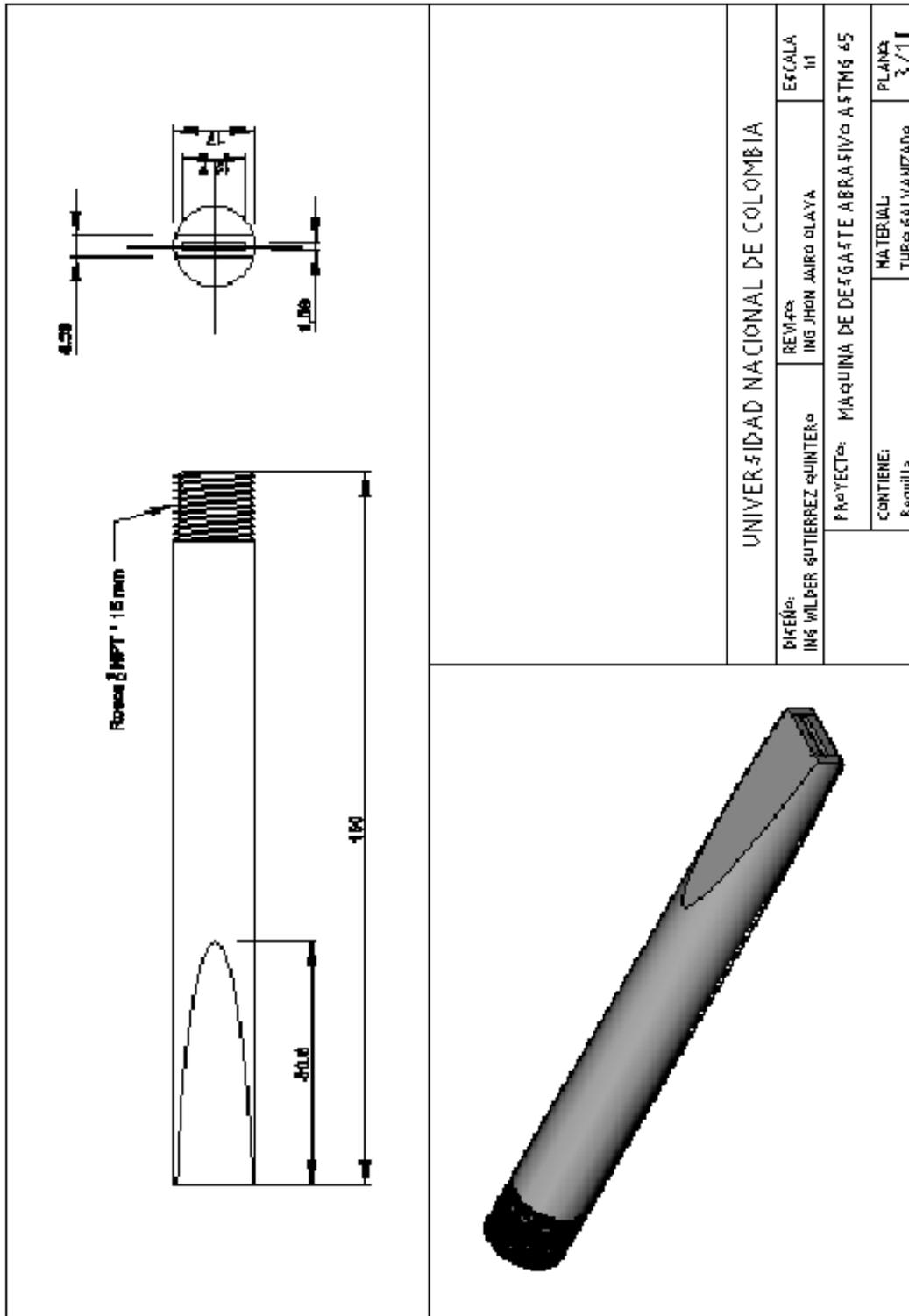
- [52] M. Vite Torres, F. Hurtado Rico, M. de J. Nango Méndez, J. Aguilar Rosales, Diseño de la instrumentación asociada a una maquina tribológica para pruebas de desgaste abrasivo Instituto Politécnico Nacional. SEPI-ESIME. México D.F.
- [53]. Aguilar R. J, Acevec N. V, Camarena J. L.” Diseño y construcción de una maquina tribológica para medir el desgaste abrasivo en especímenes metálicos y cerámicos”. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Universidad de Guadalajara. 1998.
- [54] Hawk, J., Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation. *WEAR*, 1999. 225-229: p. 1031-1042.
- [55] McCartney, S.M.N.P.H.S.D.G., Particle motion and modes of wear in the dry sand-rubber wheel abrasion test. *WEAR*, 2008. 267: p. 9.
- [56] Trezona, R.I., D.N. Allsopp, and I.M. Hutchings, Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *WEAR*, 1999. 225–229, Part 1(0): p. 205-214 U.
- [57] Al-Rubaie, K.S., H. Goldenstein, and J.D. Biasoli de Mello, Three-body abrasion of Al–SiC composites. *WEAR*, 1999. 225–229, Part 1(0): p. 163-173 U.
- [58] Elalem, K.a.D.Y.L., Variations in wear loss with respect to load and sliding speed under dry sand/rubber-wheel abrasion condition: a modeling study. *WEAR*, 2001. 250: p. 6.
- [59] Edrisy, A., et al., The effect of humidity on the sliding wear of plasma transfer wire arc thermal sprayed low carbon steel coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2001. 146-147: p. 571-577.
- [60] Edrisy, A., et al., Wear mechanisms in thermal spray steel coatings. *Tribology and Interface Engineering Series*, 2003. 41: p. 5.
- [61] Edrisy, A., et al., Wear of thermal spray deposited low carbon steel coatings on aluminum alloys. *WEAR*, 2001. 251(1–12): p. 1023-1033 U.
- [62] G. BOLELLI, V. CANNILLO, L. LUSVARGHI, T. MANFREDINI. Wear behavior of thermally sprayed ceramic oxide coatings, *Wear*. Vol. 261, Dic. 2006, p. 1298-1315.
- [63] MARULANDA, José. Libro de proyección térmica, p. 7 – 17, 59.
- [64] LÓPEZ COVALEDA, EDWIN A. Resistencia a la corrosión y al desgaste de recubrimientos de 140 MXC-530AS Y 140MXC-560AS sobre acero AISI-SAE 4340 usando la técnica de proyección térmica por arco. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería, Bogotá, Colombia. 2012.
- [65] STREETER P., Jhon D. Introducción a la tecnología de rociado térmico y sus aplicaciones. Director Técnico para Latinoamérica Eutectic + Castolin. P. 1-5.

- [66] SULTZER METCO. B. Tanner. Thermal spray.Pp. 6 - 8.
- [67] MARTINEZ, Gynna. Resistencia a la corrosión de recubrimientos comerciales Nitec y Metaceram 23075 obtenidos mediante la técnica de proyección térmica por llama para la industria naval. Universidad Nacional de Colombia, Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Bogotá, 2013.
- [68] J.R. DAVIS. Handbook of thermal spray technology.ASM INTERNATIONAL. October 2004. ISBN 0871707950.
- [69] R. GONZALEZ. M. A. GARCIA, I. PEÑUELA, M CARDENAS, M. Fernandez, A. Hernandez Battez and felgueroso, "Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes" Wear, Vol 263, 10 september 2007, pp 619-624.
- [70] LINDE ABELLO. Linspray. Tecnología de superficies.
- [71] STAIA, M.H., RAMOS, E. A., CARRASQUEROA, ROMAN A., LESAGEB,J., CHICOT D., MESMACQUE, G. Effect of substrate roughness induced by grit blasting upon adhesion of WC-17% Co thermal sprayed coatings. Thin Solids Films, pp 377-378. 2000.
- [72] MELLALI ,M., FAUCHAIS,P. GRIMAUD A. Influence of substrate roughness and temperature on the adhesion/ cohesion of alumina coatings.
- [73] PAWLOWISKY, Lech. The science and engineering of thermal spray coatings. Segundaedición. John Wiley & Sons Ltd. 2008, p. 3 - 6.
- [74] EUTECTIC CASTOLIN. Technical Data Book.USA, 2007.
- [75] EUTECTIC CASTOLYN. Powders for hot and cold spray processes. USA, 2008.
- [76] WANG Y., XU Z. Nanostructured Ni–WC–Co composite coatings fabricated by electrophoretic deposition.Surface and coating technology. 2006. P 3896-3902
- [77] STROUMBOULI, M., GYFTOU P., PAVLATOU E.A., SPYRELLIS N. Codeposition of ultrafine WC particles in Ni matrix composite electrocoatings. Surface and coating technology. 2005. P 325-332.

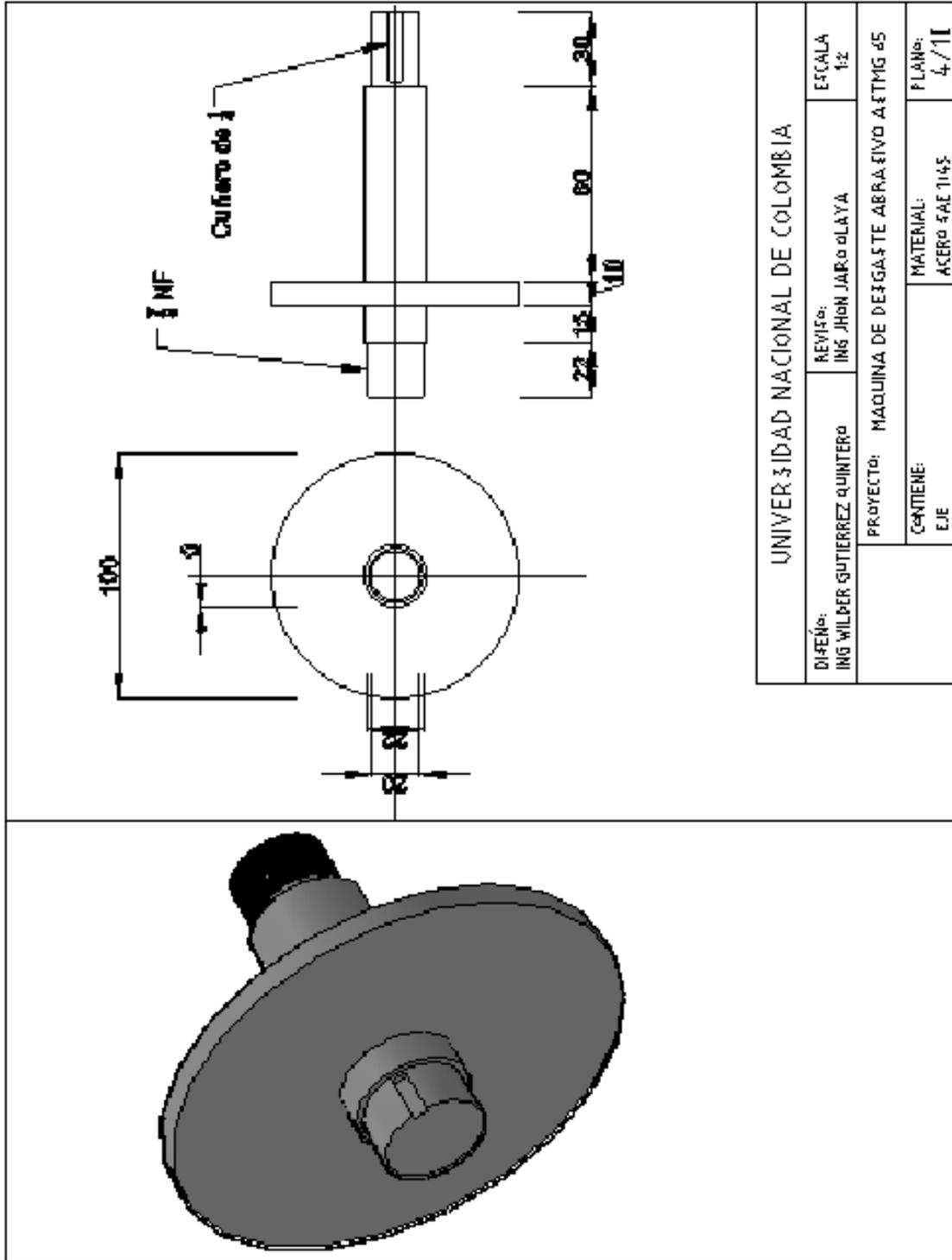
A. Anexo: Planos del equipo

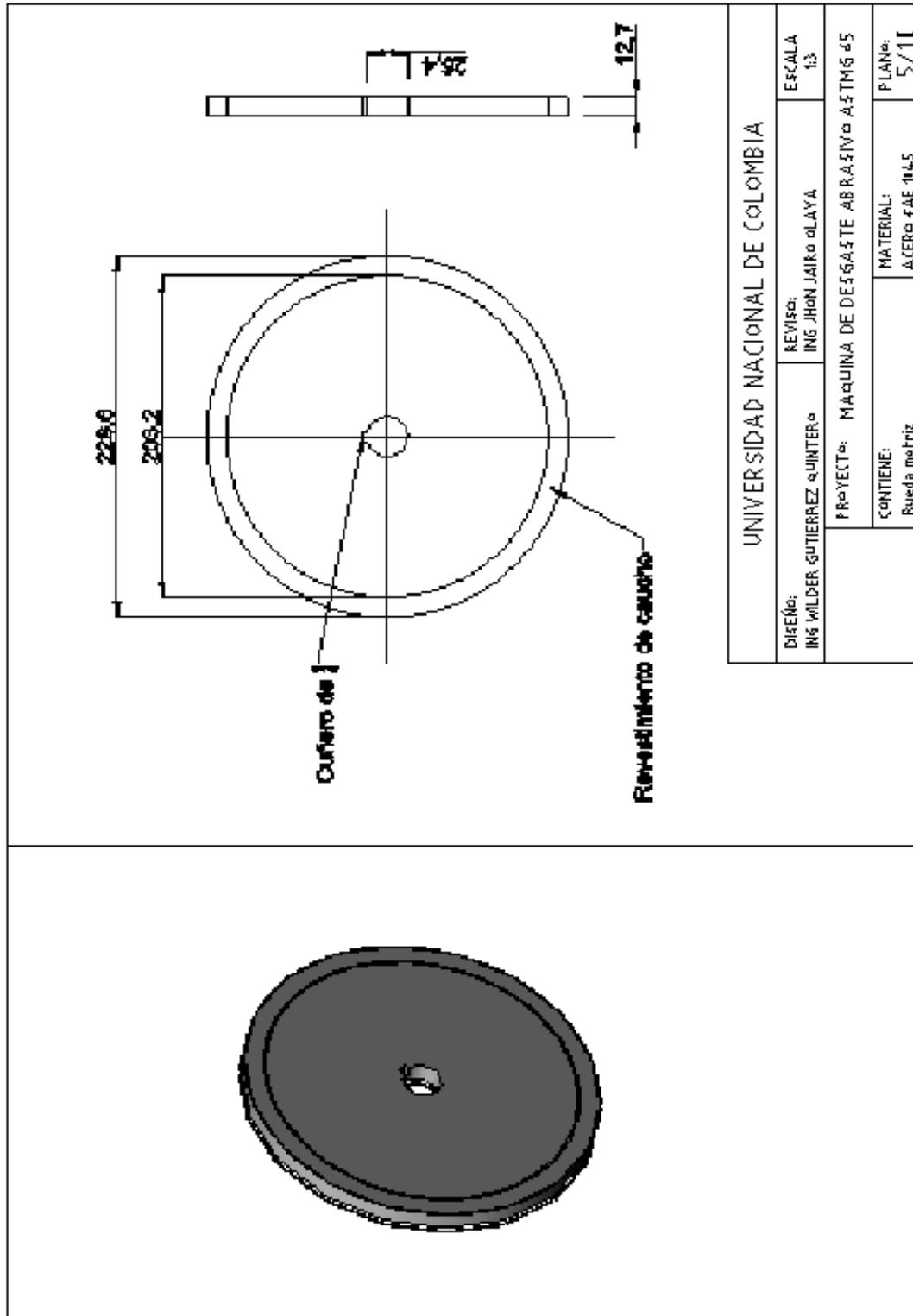




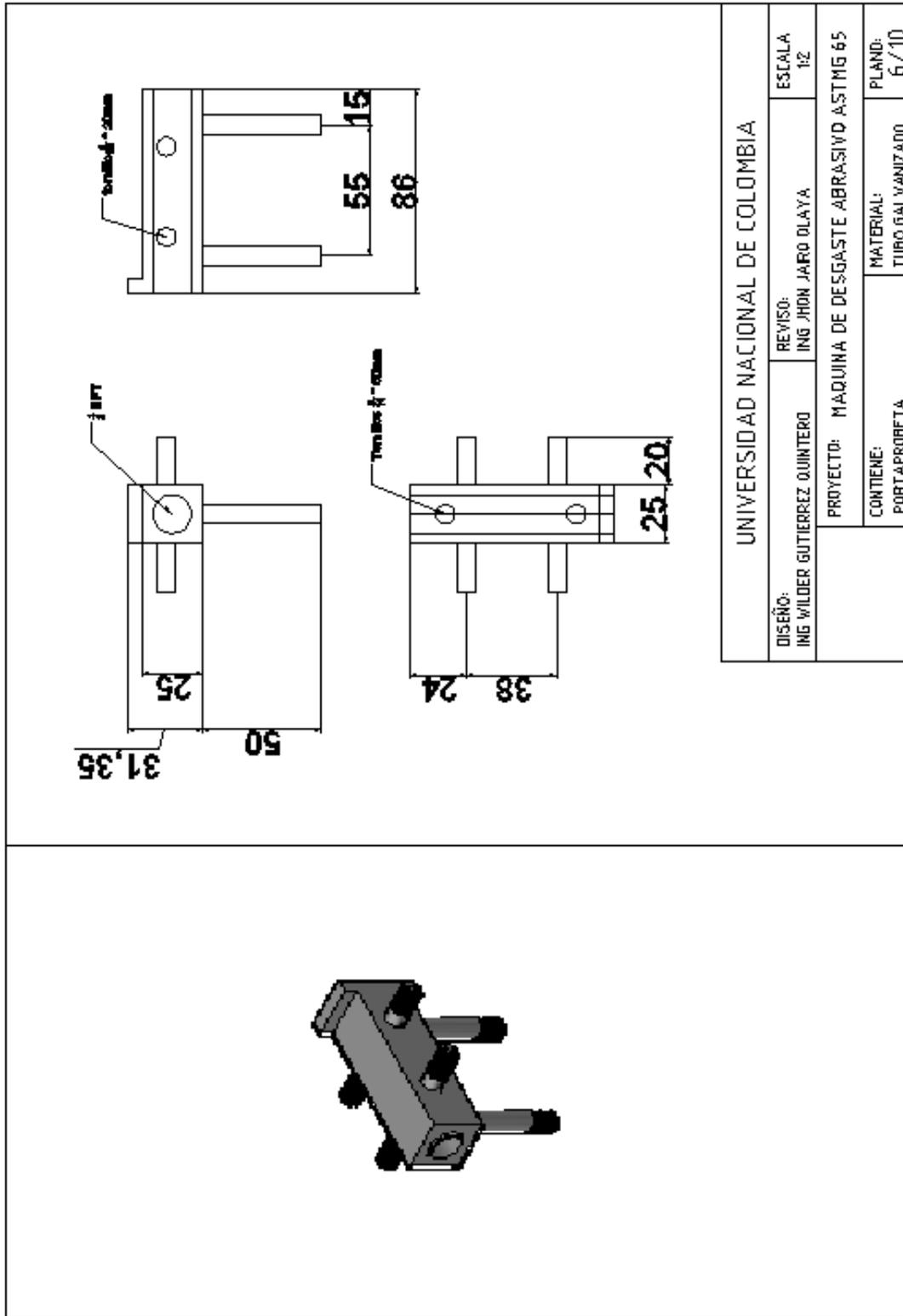


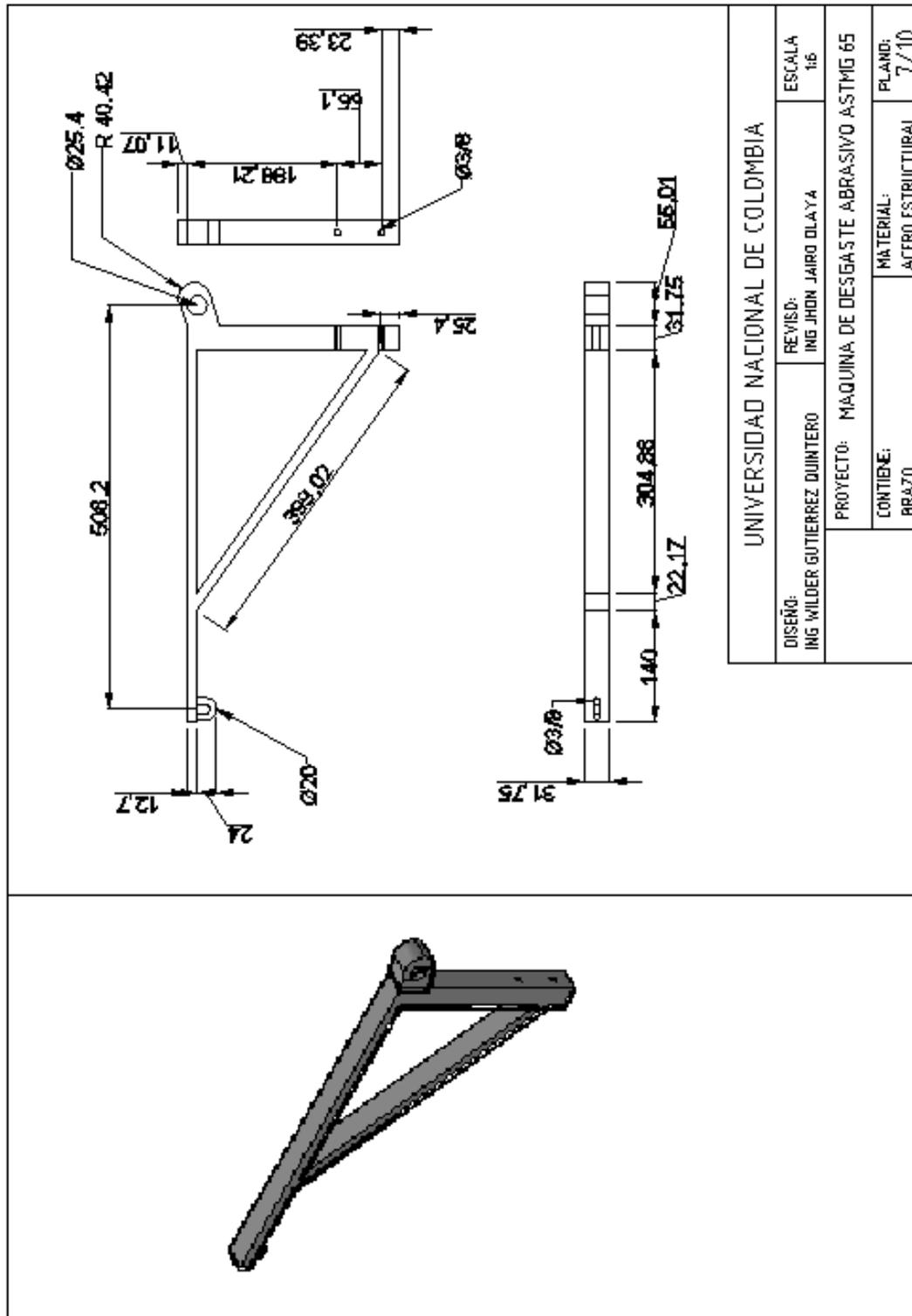
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA			
DISEÑO: ING WILBER SUTIERREZ QUINTERO	REVIZO:	ESCALA	1/1
		ING JHON JAIRA OLAYA	
PROYECTO: MAQUINA DE DESGASTE ABRASIVO ASTM 65		MATERIAL:	PLANO:
		Equilia	Tubo galvanizado 3/11

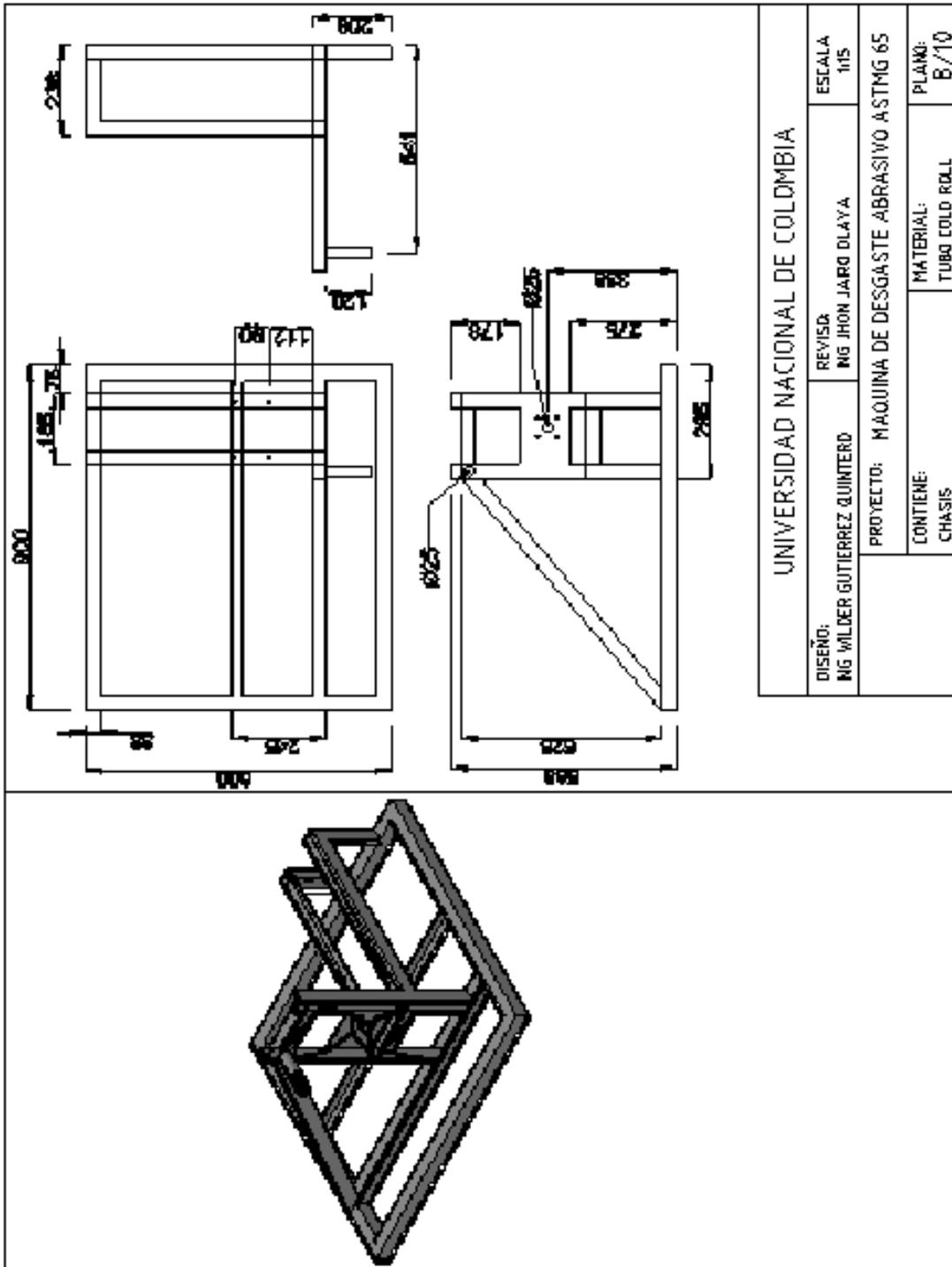


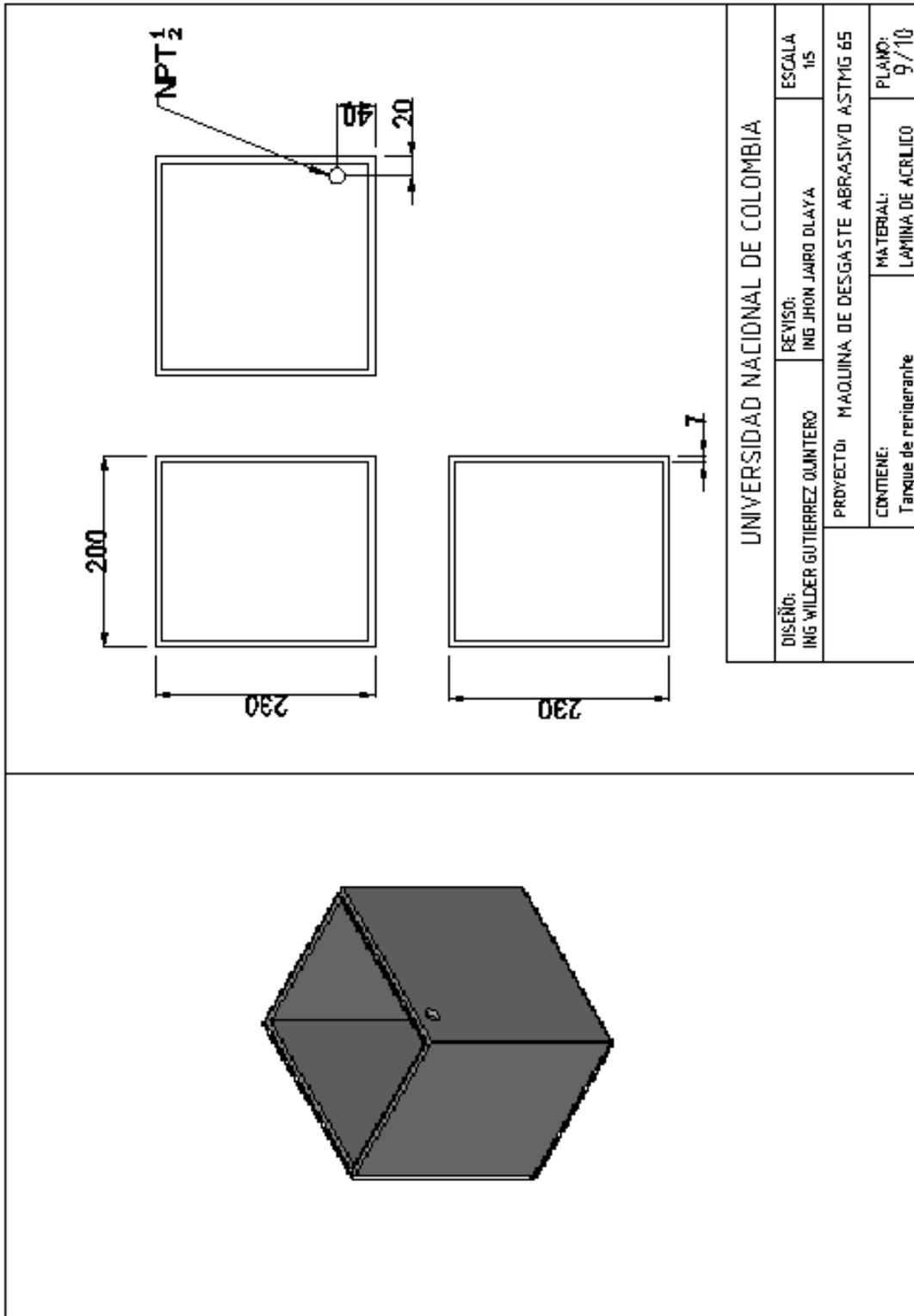


UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
DISEÑO: ING WILDER GUTIERREZ QUINTERO	REVISÓ: ING JHON JAIR OLAJA
PROYECTO: MAQUINA DE DESGASTE ABRASIVO AFTMG 45	ESCALA 1:3
CONTIENE: Rueda matriz	MATERIAL: ACERO 4AE 1045
	PLANO: 5/11









B. Anexo: Características del caucho



EMPAQUETADURAS Y EMPAQUES

AREA CONTROL CALIDAD
SEGÚN NORMA ISO 9001

Medellín, Marzo 20 de 2014

CERTIFICADO

Empaquetaduras y Empaques certifica que la fabricación correspondiente a:

2PR00003 347	4405 9	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	E23291 32	Recubrimiento con elastómero de rueda para ensayo Abrasion	U0 1	1
-----------------	-----------	--	--------------	--	---------	---

Fueron fabricados en caucho Nitrilo dureza 60 shore A, y cumple con las condiciones descritas dentro de la ficha técnica, para su funcionamiento.

Adjunto ficha técnica del material.

EMPAQUETADURAS
Y EMPAQUES S.A.
ESPECIALISTAS EN EL SELLADO DE FLUIDOS

ANA MARIA PUERTA RUIZ

Coordinador de Calidad

EMPAQUETADURAS Y EMPAQUES

Tel: 3505000 Ext: 4612

C. Anexo: Manual de operación y mantenimiento

MANUAL DE OPERACIÓN EQUIPO DE DESGASTE ABRASIVO ASTM G 65



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Ing. Met. WILDER GUTIERREZ QUINTERO

2014

I. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Tensión Nominal: 220 V

Numero de fases: 3

Potencia necesaria: 2 A

II. INSTALACIÓN DEL EQUIPO

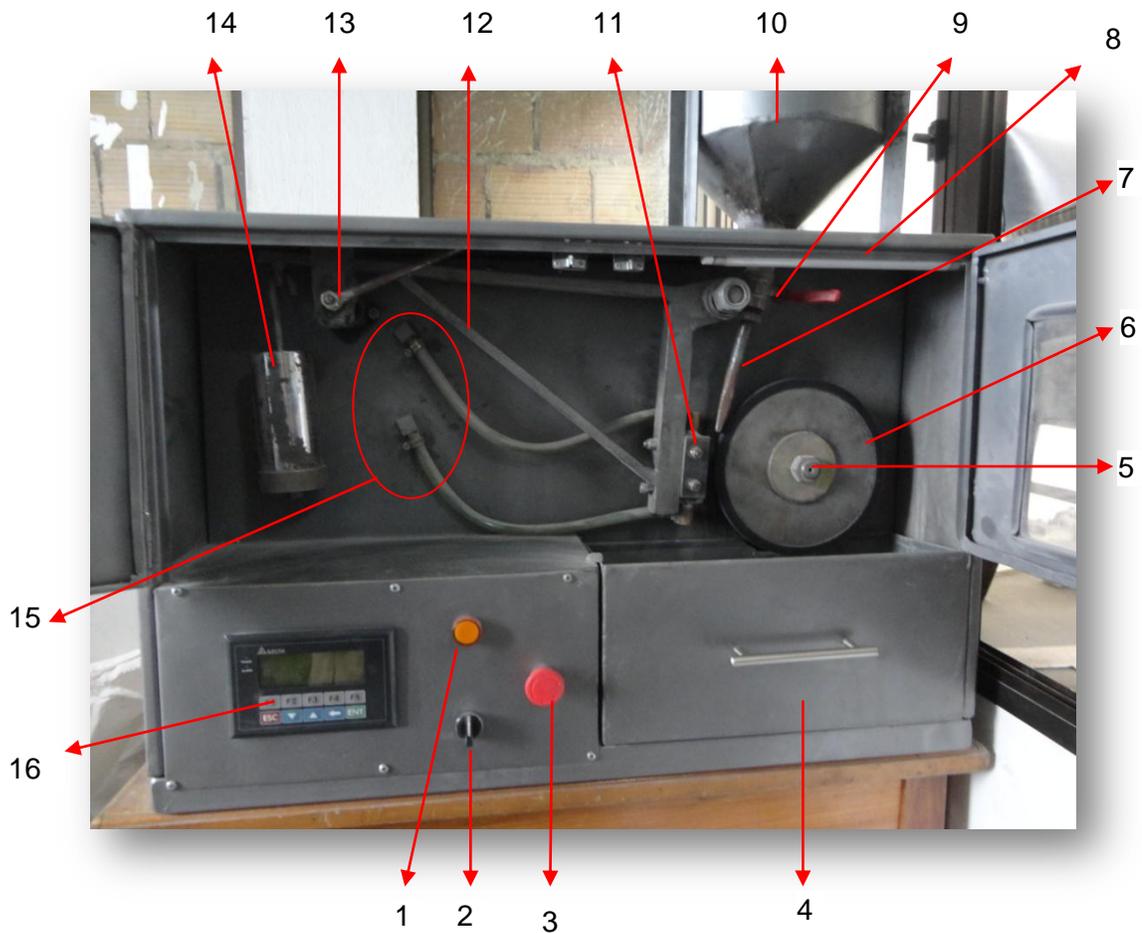
- Coloque el equipo en un lugar libre de humedad y sobre una superficie que se encuentre a nivel.
- Conecte el equipo a un tomacorriente trifásico y verifique que existan las tres líneas.
- Llene de agua hasta la mitad el recipiente que se encuentra en la parte posterior.
- Oprima el botón de encendido del equipo y deje circular el agua a través del sistema de refrigeración.

Nota:

El equipo cuenta con un sistema electrónico que lo hace girar en sentido anti horario, sin importar el orden de conexión.

Cuando se requiera transportar el equipo drene el tanque de refrigerante para evitar ingreso de agua al sistema de control.

III. COMPONENTES DEL EQUIPO



- | | | |
|--------------------------|-------------------|-----------------------------|
| 1 Testigo de encendido | 7 Boquilla | 13 Palanca de liberación |
| 2 Botón encendido | 8 Lámpara interna | 14 Juego de pesas |
| 3 Parada de emergencia | 9 Llave de paso | 15 Sistema de refrigeración |
| 4 bandeja de recolección | 10 Tolva | 16 Control digital |
| 5 Motor | 11 Porta probeta | |
| 6 Rueda motriz | 12 Brazo mecánico | |

Figura 1. Partes de la máquina de desgaste

1. **Testigo de encendido:** Bombillo de color amarillo, indica que el equipo esta energizado y se mantiene encendido durante todo el ensayo.
2. **Botón de encendido:** Perilla negra de dos posiciones, éste energiza o des-energiza completamente el equipo.
3. **Parada de emergencia:** Botón de color rojo, que se utiliza cuando se presenta alguna emergencia. Al presionarlo el equipo se apaga, para volverlo a encender debe girarse en sentido horario.
4. **Bandeja de recolección:** Este compartimento recoge la arena del ensayo, tiene la capacidad de almacenar hasta 13kg de arena. Se puede extraer con las puertas abiertas o cerradas.
5. **Moto reductor:** Motor trifásico marca Bauer de 0,75 Hp a 1700 Rpm con un consumo de 0.87 A en carga, reductor de engranajes helicoidales; provee una velocidad final de 217 RPM.
6. **Rueda Motriz:** Está fabricada en acero al carbono AISI 1045, tiene un diámetro de 8 ½" y un espesor de ½", se encuentra recubierta de un caucho de ½" de espesor cuya dureza oscila entre los 58 a 62 shore. La función principal es arrastrar y dirigir la arena contra la muestra, actuando como un disco abrasivo
7. **Boquilla:** Está encargada de mantener un flujo de arena de 300 a 400 g/min. Su geometría garantiza un flujo laminar constante.
8. **Lámpara interna:** Bombillo de 7W a 110V que aumenta la visibilidad de la probeta durante el ensayo.
9. **Llave de paso:** Permite la alimentación o interrupción del flujo de arena durante el ensayo. Debido a que la boquilla está diseñada para un flujo constante es necesario abrirla válvula completamente. Conocida comercialmente como válvula de bola de ¾.
10. **Tolva:** Recipiente donde se almacena el material abrasivo; tiene una capacidad de 20 litros.

- 11. Porta probeta:** Dispositivo de sujeción de la muestra a analizar. Es un componente hueco que permite el paso del líquido refrigerante y mantiene la temperatura de la probeta constante.
- 12. Brazo mecánico:** Dispositivo que actúa en forma de palanca; sostiene en un extremo las pesas del sistema y en el otro la muestra de análisis. Al presionar la probeta contra el caucho de la rueda asegura una fuerza constante durante todo el ensayo.
- 13. Palanca de liberación:** Esta permite presionar o liberar la muestra de análisis contra la rueda de caucho.
- 14. Juego de pesas:** Está Compuesto por dos unidades. La pesa pequeña aplica una fuerza de 45N sobre la muestra y las dos en conjunto producen una fuerza de 130N.
- 15. Sistema de refrigeración:** Conformado por una electrobomba de 28W con un caudal máximo de agua de 1400 l/h y un depósito ubicado en la parte posterior del equipo. El sistema trabaja en circuito cerrado junto con el porta-probeta.
- 16. Control digital:** Dispositivo electrónico marca delta, capaz de contener y controlar los parámetros de funcionamiento del equipo.

IV. OPERACIÓN DEL CONTROL

El control está formado por dos menús principales; el de operación y el de ajuste de parámetros o programación.

Menú de operación



Figura 2. Menú de operación

Compuesto por 4 líneas de texto horizontales

1. En la parte izquierda se indica la hora del ensayo, en el centro la identificación del ensayo (DESGASTE ABRASIVO) y al final la fecha de realización.
2. En la parte izquierda la opción de encendido o apagado del motor. El círculo se mantiene de color negro cuando el motor está encendido, la tecla para ejecutar este comando es F1 (ya sea para apagar o encender). En la parte izquierda se observa el tiempo real del ensayo.
3. A la izquierda indica la temperatura de la probeta que se está ensayando y a la derecha la revolución de la rueda de caucho, ésta es constante durante todo el ensayo con un valor de 202 RPM.
4. Número de vueltas acumulado que ha dado la rueda; al llegar al valor programado el equipo se detendrá. Al final de esta línea se encuentra una

flecha de color negro que indica que al presionar el botón ENT ingresamos al menú de programación.

Menú de programación

Pulsar **ENT** para ingresar



Figura 3. Menú de Programación

Compuesto por 4 líneas horizontales.

1. Al oprimir **F1** la lámpara interna se enciende, para apagarla basta con pulsar de nuevo **F1**.
2. Al pulsar la tecla **F2**, aparecerá el siguiente menú:



Figura 4. Menú de ajuste de parámetros

En este se debe ingresar el número de revoluciones de ensayo que se va a realizar según el procedimiento a utilizar (Ver tabla 1).

Existen dos formas de ingresar parámetros a este menú:

- Pulsando **F1** y **F5** se posiciona el cursor para ingresar el valor, con las teclas **F2** y **F4** se ubica el número que se desea ingresar y con **F3** se guarda.
- Pulsando la tecla  se posiciona el cursor para ingresar el número y con las teclas   se ubica el número que se desea ingresar.

Finalmente oprimir **ENT** para volver a menú de programación.

3. Al pulsar **F3** se despliega el siguiente menú:



Figura 5. Menú ajuste de parámetros

Este se ingresa el valor de temperatura a la que debe encender la bomba de refrigeración de la muestra a ensayar (ya que el objetivo del sistema de refrigeración es mantener la muestra lo más fría posible se debe fijar un valor de 10 para evitar el daño del caucho de la rueda por calentamiento).

Existen dos formas de ingresar parámetros a este menú:

- Pulsando **F1** o **F5** se posiciona el cursor para ingresar el valor, con las teclas **F2** **F4** se ubica el número que se desea ingresar y con **F3** se guarda.

- Pulsando la tecla  se posiciona el cursor para ingresar el número y con las teclas  se ubica el número que se desea ingresar.

Finalmente oprimir **ENT** para volver a menú de programación.

Pulsar **ENT** para regresar al menu de operación.

V. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL ENSAYO DE DESGASTE

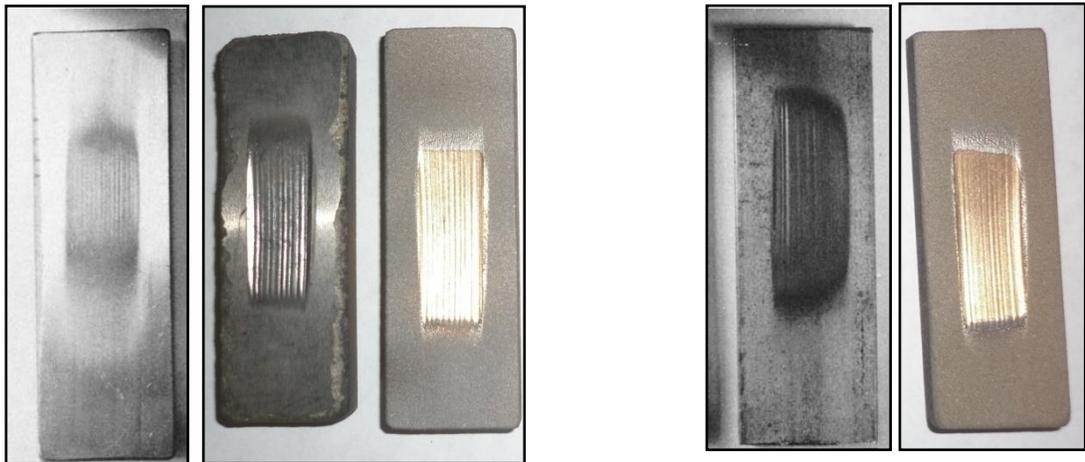
1. Preparar la muestra
2. Limpiar la muestra con disolvente o limpiador para eliminar completamente material extraño o suciedad presente y secar.
3. Pesar la muestra utilizando balanza analítica con 0,0001g de precisión.
4. Verificar el nivel de agua en el tanque ubicado en la parte posterior.
5. Encender el equipo y verificar que el sistema de refrigeración cargue completamente.
6. Oprimir la tecla **ENT**, luego **F1** y nuevamente **ENT** para encender la lámpara interna del equipo
7. Colocar la muestra en el porta-probeta y fijarla
8. Colocar el peso adecuado según el procedimiento a realizar (tabla 1)
9. Programar el control digital introduciendo número de revoluciones de acuerdo al procedimiento a utilizar (Ver tabla 1).

Specified Procedure	Force Against Specimen, ^B N (lb)	Wheel Revolutions	Lineal Abrasion ^A m	(ft)
A	130 (30)	6000	4309	(14 138)
B	130 (30)	2000	1436	(4 711)
C	130 (30)	100	71.8	(236)
D	45 (10.1)	6000	4309	(14 138)
E	130 (30)	1000	718	(2 360)

Tabla 1. Procedimientos para ensayos de desgaste abrasivo según norma ASTM G65

10. Abrir la válvula de paso de arena.
11. Acercar la probeta hacia la rueda girando la palanca hacia abajo.
12. Pulsar **F1** para iniciar el giro de la rueda.

13. Desde este punto inicia la prueba, es importante verificar durante todo el ensayo que el flujo de arena sea constante.
14. El equipo se apagará en el momento que cumpla con el número de revoluciones programadas.
15. Inmediatamente después que la rueda deje de girar, retirar la muestra de la rueda girando la palanca en sentido contrario a las manecillas del reloj.
16. Cerrar la válvula de alimentación de la arena.
17. Retirar la muestra del porta-probeta y limpiarla.
18. Pesar la muestra utilizando el mismo equipo del numeral No. 3.
19. Examinar la huella de desgaste y compararlas con las de la figura 6.
Verificar que la huella esté centrada y sea uniforme. Un patrón no uniforme indica una incorrecta alineación de la rueda o que la geometría de la probeta no es uniforme.



(a) Huellas de desgaste correctas

(b) Huellas de desgaste incorrectas

Figura 6. Forma de la Huella de desgaste abrasivo según ASTM G 65.

20. Reportar el índice de desgaste abrasivo como pérdida de volumen en mm^3 .

VI. RECOMENDACIONES DE USO

- No retirar el panel de instrumentos, ya que el usuario no podrá reparar ningún componente electrónico; ésto debe realizarlo solo personal calificado.

- La superficie de la probeta que entra en contacto con el recubrimiento de caucho debe ser plana y pulida, ya que si presenta gránulos, rayas o zanjas, éstos provocarán acanalamiento en la superficie del caucho, alterando los resultados del ensayo y deteriorando de manera prematura la rueda.
- Nunca dejar presionado el caucho de la rueda por el portaprobeta o probeta cuando el motor está detenido ya que éste se deforma fácilmente, para ésto la palanca de liberación de peso debe estar siempre en posición horizontal.
- Verificar el nivel de agua del refrigerante.
- Los tornillos de ajuste del porta-probeta son sólo para mantener fija la probeta durante el ensayo, no exceder el torque de apriete.
- La temperatura de la probeta no debe exceder los 70°C.
- Secar y limpiar la arena después de su uso. Sólo se puede reutilizar la arena una vez.
- Las muestras de acero que tienen magnetismo residual deben desmagnetizarse, si no es posible, no se deben utilizar.
- Una vez terminado el ensayo limpiar el equipo.

VII. MANTENIMIENTO

1. Aplicar grasa de litio para rodamientos a las chumaceras ubicadas detrás de la rueda de caucho y delante del motor cada 500 horas de funcionamiento. Ver figura 7.



Vista posterior del equipo



Chumacera ubicada detrás de la rueda

Figura 7. Elementos de engrase

2. El reductor contiene $\frac{1}{4}$ galón de aceite grado 15w40 que se debe reemplazar cada 5000 horas de trabajo.
3. Reemplazar el caucho de la rueda motriz cuando el diámetro del recubrimiento de caucho es inferior a 8 $\frac{1}{2}$ ". Si la rueda se deforma o su concentricidad excede 0,05mm (0,002") es necesario rectificar la goma con herramienta de corte.
4. El resto del equipo no requiere de mantenimiento, solamente limpieza de rutina.