

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA AL AIRE Y FATIGA CORROSIÓN DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6063-T6 RECUBIERTA POR TERMO-ROCIADO, CON UNA ALEACIÓN BASE NÍQUEL DE ALTA RESISTENCIA AL DESGASTE

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por los Bachilleres
Felce M. Erwin E.
Padrón G. Alejandro
Para optar por el Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas 2004

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA AL AIRE Y FATIGA CORROSIÓN DE UNA ALEACION DE ALUMINIO 6063-T6 RECUBIERTA POR TERMO-ROCIADO, CON UNA ALEACIÓN BASE NÍQUEL DE ALTA RESISTENCIA AL DESGASTE

Tutor Académico:
Prof: Crisanto J. Villalobos G.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por los Bachilleres
Felce M. Erwin E.
Padrón G. Alejandro
Para optar por el Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas 2004

Caracas 18 de Noviembre del 2004

Los abajos firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el trabajo especial de Grado presentado por los Bachilleres Erwin Felce Morantes y Alejandro Padrón, titulado:

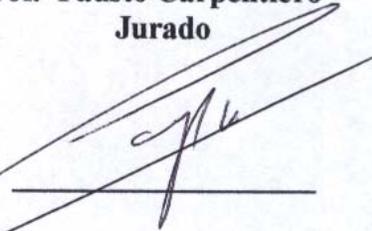
**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA AL AIRE Y
FATIGA CORROSIÓN DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6063-T6
RECUBIERTA POR TERMO-ROCIADO, CON UNA ALEACIÓN BASE
NÍQUEL DE ALTA RESISTENCIA AL DESGASTE**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al título de Ingeniero Mecánico.

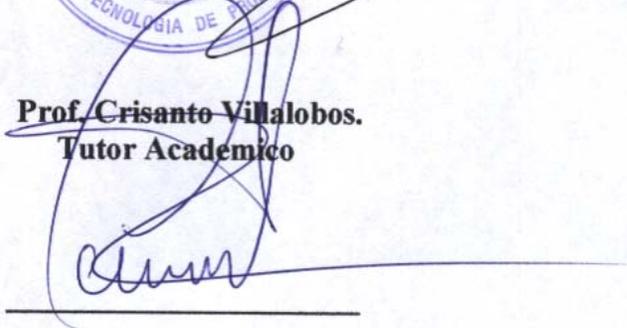
**Prof. Alberto Pertuz
Jurado**



**Prof. Fausto Carpentiero
Jurado**



**Prof. Crisanto Villalobos.
Tutor Académico**



DEDICATORIA

A Dios por cuidarme y protegerme.

A mi madre y a mi abuela que son los seres que mas quiero en este mundo.

A mi padre y a mi familia por el apoyo que me dieron.

A mi novia Zulma por estar conmigo siempre.

A mis hermanos Alberto, Charlie y Victor.

A mi tutor y amigo Crisantos Villalobos por su orientación y apoyo incondicional durante toda mi carrera.

Erwin Eduardo Felce Morantes

AGRADECIMIENTOS

A los profesores de la escuela de Ingeniería Mecánica de la U.C.V por su apoyo y enseñanza.

A los amigos de la escuela de Ingeniería Metalurgia por ayudarnos a realizar este trabajo.

A todos los grandes amigos que hice en esta casa de estudio mi Universidad Central de Venezuela; Javier, Ana, Alonzo, Nacho, Aquiles, German, Angel, Jose Alfredo, Marcos, Carlos, Silvano, Fernando, Bettsi; y a todos aquellos que no nombre se les quiere.

Erwin Eduardo Felce Morantes

DEDICATORIA

A mis Padres, por darme todo en la vida, sin ellos nada de esto lo hubiera podido lograr.

A mis hermanos, Daniel y Alicia, por darme su apoyo y por estar siempre conmigo.

A mis Sobrinos, mis enanos: Mauricio y Gabriel, porque los adoro muchísimo.

Alejandro Padrón González

AGRADECIMIENTOS

A mi Papá y Mamá, porque gracias a ellos nunca me ha faltado nada y siempre se han preocupado por mi.

A mis hermanos por apoyarme y ayudarme.

A mis sobrinos Maury y Gaby, por quererme mucho y yo a ellos.

A Silvia, porque estuvo conmigo siempre y me dio su apoyo.

A mis panitas de la UCV, los de la básica, los de la escuela mecánica, porque fueron muy panas.

A la Universidad Central de Venezuela.

A mi tutor, Crisanto Villalobos, porque más que un tutor fue un buen amigo.

Alejandro Padrón González

ÍNDICE GENERAL

Índice de tablas	Pág. ix
Índice de figuras	x
Resumen	xiii

CAPÍTULO

I	INTRODUCCIÓN	1
II	MARCO TEÓRICO	
II.1.	Características del aluminio 6063.....	3
II.1.1.	Propiedades mecánicas del aluminio 6063 para diferentes tratamientos térmicos	4
II.1.2.	Aplicación	5
II.1.3.	Características mecánicas	5
II.2.	Características del recubrimiento	6
II.3.	Definición de fatiga en los metales.....	8
II.3.1.	Cargas variables o fluctuantes presenten en fatiga.....	9
II.3.2.	Etapas del proceso de fatiga	10
II.3.3.	Características fractográficas	11
II.3.4.	Teoría de Orowan	13
II.3.5.	Diagrama de fatiga de Wholer	16
II.3.6.	Definición de límite de resistencia a la fatiga.	17
II.3.7.	Factores que afectan el límite de resistencia a la fatiga	18
II.4.	Fatiga-corrosión	20
II.4.1.	Introducción	20

II.4.2. Generalidades de la fatiga-corrosión	20
II.4.3. Variables que afectan la fatiga corrosión	21
II.4.4 Causa de la dispersión estadística de los resultados en fatiga	22
II.5. Termo-rociado.....	23
II.5.1 Aspectos fundamentales en los métodos de deposición	25
II.5.2. Procesos de recubrimiento por termo-rociado	26
II.5.3. Proceso por combustión	26
II.5.3.1 Llama.....	26
II.5.3.2. Rociado por detonación.....	28
II.5.3.3. HVOF (High Velocity Oxy-Fuel)	29
II.5.3.4. Ventajas del HVOF.....	31
II.5.3.5. Desventajas del procesode HVOF.....	32
II.5.3.6. Equipo utilizado para el HVOF	32
II.5.4. Proceso eléctricos	33
II.5.4.1. Arco eléctrico	33
II.5.4.2. Plasma	35
II.6. Variables que afectan la calidad del recubrimiento	37
II.6.1. Efecto de la distancia del rociado.....	38
II.6.2. Relación oxígeno/combustible y la presión de la cámara	39
II.6.3. La morfología y procesamiento de los polvos.....	40
II.7. Comparación entre los diferentes tipos termo-rociados	41
II.8. Antecedentes	42

III METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

III.1. Diagrama experimental	45
III.2. Caracterización del material base	46
III.3. Maquinado y preparación de las probetas	46
III.4. Deposición de los recubrimientos	48
III.5. Preparación de las muestras metalográficas	49
III.6. Microindentación estática y ensayo de dureza	49
III.7. Ensayos de tracción	50
III.7.1. Obtención y corrección de los datos de tracción	51
III.8. Rociado de abrasivo (Blasting)	53
III.8.1. Pasos para la preparación de la superficie mediante rociado de abrasivo	54
III.9. Proceso de termo-rociado vía HVOF.....	55
III.10. Ensayo de fatiga al aire y fatiga-corrosión	56
III.11. Construcción de la curva de Whöler	58
III.12. Determinación de la ecuación de Basquin	59
III.13. Determinación del tamaño de grano	59
III.14. Caracterización del conjunto	60
III.14.1. Estudio fractográfico (MEB)	60
III.14.2. Preparación de la muestras para la microscopía electrónica de barrido	61
III.15. Descripción de los equipos	61
III.15.1 Máquina de tracción	61
III.15.2. Máquina de fatiga	62
III.15.3. Cortadora de disco abrasivo	63
III.15.4. Máquina de pulido	63
III.15.4.1. Máquina de pulido mecánico	63
III.15.4.2. Máquina de pulido por vibración	63

III.15.5. Cortadora de precisión	64
III.15.6. Equipo de microindentación estática	64
III.15.7. Microscopio electrónico de barrido	65
III.15.8. Máquina embutidora	65
IV RESULTADOS Y ANÁLISIS	
IV.1. Caracterización del sustrato	66
IV.2. Caracterización del recubrimiento	68
IV.3. Resultados de dureza	70
IV.4. Ensayos de tracción	75
IV.5. Ensayos de fatiga al aire y fatiga corrosión	76
IV.6. Curvas de Whöler.....	78
IV.7. Parámetros de la ecuación de Basquin	79
IV.8. Estudio fractográfico para fatiga al aire y fatiga corrosión.....	82
V CONCLUSIÓN	87
Recomendaciones	89
Bibliografía	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
1- Límites e intervalos de los elementos de la aleación de aluminio 6063	3
2- Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6063 para algunos tratamientos térmicos.....	4
3- Propiedades de la aleación de aluminio 6063-T6	6
4- Elementos que conforman la aleación COLMONOY 88	8
5- Comparación entre los diferentes tipos de termo-rociados	41
6- Parámetros utilizados para el termorociado	56
7- Dureza vickers para la sección transversal del aluminio 6063-T6.....	71
8- Dureza vickers para la sección longitudinal del aluminio 6063-T6.....	71
9- Dureza vickers para la sección central del aluminio 6063-T6 con recubrimiento.....	73
10- Dureza del recubrimiento Colmonoy 88 medido en forma longitudinal y transversal	74
11- Resultados del ensayo de tracción para el aluminio 6063-T6	75
12- Resultados del ensayo de fatiga al aire del aluminio 6063-T6 recubierto con Colmonoy 88.....	77
13- Resultados ensayo de fatiga corrosión del aluminio 6063-T6 recubierto con Colmonoy 88.....	77
14- Obtención de la ecuación de Basquin para fatiga al aire del aluminio recubierto	79
15- Obtención de la ecuación de Basquin para fatiga corrosión del aluminio recubierto	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1- Esfuerzos cíclicos en fatiga.....	9
2- Texturas generadas en la superficie de fractura por avance de grieta.....	12
3- Comportamiento del crecimiento de grieta por fatiga	15
4- Curvas Wholer para materiales férreos y no férreos	16
5- Curvas S-N representación de la ecuación de Basquin.....	17
6- Proceso de rociado de alambre por llama.	28
7- Pistola de Termo-Rociado por HVOF	29
8- Proceso de Termo-Rociado vía HVOF	30
9- Termo-Rociado por arco eléctrico.	34
10- Proceso de Termo-Rociado por arco eléctrico	34
11- Equipo de Termo-Rociado por plasma.	36
12- Pistola de Termo-Rociado por plasma	37
13- Dimensiones de las probetas de fatiga	48
14- Dimensiones de las probetas de tracción	48
15- Máquina de tracción	62
16- Máquina de Fatiga	62
17- Cortadora de disco abrasivo	63
18- Máquina de pulido mecánico.....	63
19- Máquina de pulido por vibración	64
20- Equipo de Microindentación Estática	64
21- Máquina embutidora	65
22- Sección transversal en el borde del aluminio 6063-T6	66

23- Sección transversal en el borde del aluminio 6063-T6 recubierto	66
24- Sección transversal en la zona central del Aluminio 6063-T6	67
25- Sección transversal en la zona central del aluminio 6063-T6 recubierto	67
26- Vista general del deposito de Colmonoy 88	68
27- Fotomicrografías (a) y (b)	69
28- Ampliación Fotomicrografía	70
29- Dureza sección longitudinal del aluminio 6063-T6	72
30- Dureza sección transversal del aluminio 6063-T6	72
31- Dureza vs inverso de la diagonal promedio para la sección longitudinal del aluminio 6063-T6	72
32- Dureza vs inverso de la diagonal promedio para la sección transversal del aluminio 6063-T6	72
33- Dureza vs inverso de la diagonal para el del aluminio con y sin recubrimiento.....	73
34- Dureza vs carga para al aluminio 6063-T6 con y sin recubrimiento.....	73
35- Curva de Esfuerzo real vs Deformación real del material base	76
36- Curvas de Wholer del material base recubierto y ensayado al aire.....	78
37- Curvas de Wholer del material base recubierto ensayado en ambiente corrosivo.....	78
38- Curvas de Wholer	79
39- Estudio fractográfico, fatiga al aire, 120 MPa y Nf: 207.440. (a) Macrografía	83
(b) Detalle del punto de inicio.....	83
(c) Cara lateral de la probeta.....	83
40- Amplificación de la zona de fractura	84
41- Estudio fractográfico: (a) Fatiga al aire 120 MPa	84
(b) Fatiga corrosión 172 MPa	84

42- Estudio fractográfico:	
(a) Fatiga corrosión 172 MPa	85
(b). Mecanismo de propagación	85
43- Estudio fractográfico:	
(a) Fatiga corrosión 96 Mpa	86
(b) Detalle de avance de grieta	86

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA AL AIRE Y FATIGA CORROSIÓN DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6063-T6 RECUBIERTO POR TERMO-ROCIADO, CON UNA ALEACIÓN BASE NIQUEL DE ALTA RESISTENCIA AL DESGASTE

E. E Felce.*, A. Padrón* , C.J. Villalobos*. y E.S. Puchi **

*Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela.

** Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Central de Venezuela.

Palabras Claves: Fatiga, Fatiga-Corrosión, Termo-rociado, Aluminio.

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento a la fatiga al aire y fatiga corrosión en condiciones de flexión rotativa de un aluminio 6063 T6 recubierto con con una aleación comercial base níquel denominada Colmonoy 88, mediante la técnica de termorociado vía HVOF. Se mecanizaron 48 probetas según las normas **ASTM A-370** y **ASTM E-606** para ensayos de tracción y de fatiga respectivamente. Se realizaron (4) ensayos de tracción, con la finalidad de obtener los valores de esfuerzo de fluencia (S_y) y resistencia a la tracción (S_u) del material base, esto con la finalidad de seleccionar los valores de esfuerzos a utilizar en los ensayos de fatiga. Se realizaron ensayos de fatiga al aire y fatiga corrosión a muestras de la aleación de aluminio con y sin recubrimiento, tomando cuatro valores de esfuerzo para cada uno de los ensayos realizados. Los valores de esfuerzo para la evaluación de propiedades de fatiga fueron: 96, 120, 146 ,170 MPa. A partir de los datos recopilados en los ensayos de fatiga se obtuvieron las curvas S-N del material recubierto, lo que permitió obtener los coeficientes de la ecuación de Basquin del material recubierto, según la norma **ASTM E-739**. Se evaluaron muestras para determinar tanto la dureza del sustrato con y sin recubrimiento; utilizando un Microdurómetro Vickers como instrumento de medición. De los resultados obtenidos se tiene que para el sustrato con recubrimiento, la dureza no se vio alterada con respecto a la del sustrato en condición de entrega, lo cual indica que la aplicación del recubrimiento no provoca ningún efecto sobre la microestructura del material base. En los ensayos de fatiga al aire y fatiga corrosión se encontró un aumento en la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio recubierta en comparación con el material sin recubrir. En los ensayos de fatiga al aire, se produjo un incremento de 4,7 veces el valor del numero de ciclos a falla (N_f) para un valor de esfuerzo de 172 MPa, mientras que para el menor valor de esfuerzo ensayado (96 MPa), el incremento fue de 3,36 veces el valor de “ N_f ”. En los ensayos de fatiga corrosión, se produjo un incremento de 10 veces el valor del numero de ciclos a falla (N_f) para un valor de esfuerzo de 172 MPa, mientras que para el menor valor de esfuerzo ensayado (96 MPa), el incremento fue de 7,72 veces el valor de “ N_f ”.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En industrias como la aeronáutica, automotriz, ferroviaria, mecánica, eléctrica y civil se utilizan materiales donde es importante la resistencia a la fatiga de los distintos elementos de máquina. Entre estos destaca el aluminio, ya que entre sus propiedades mecánicas resalta su elevada relación peso-propiedad, por lo cual es muy utilizado para la elaboración de piezas.

Venezuela es uno de los principales productores de aluminio del mundo, produciendo para el año 2003 casi cinco millones de toneladas de bauxita, que luego de diversos procesos, es transformada en aluminio comercial, y que tiene como principal zona de explotación la región de Ciudad Guayana en el sur este del país.

Con los avances tecnológicos que se han desarrollado mundialmente, han emergido nuevos materiales con propiedades mecánicas mas adecuadas al campo de la ingeniería, pero estos suelen ser difíciles de producir en el país debido a los costos y la escasez de tecnología. Estos nuevos materiales están desplazando al aluminio como uno de los elementos utilizados en las industrias antes mencionadas, lo que en un futuro podría perjudicar económicamente a una de las industrias mas desarrolladas del país. Es por esta razón que se hace necesario proponer nuevas aplicaciones del aluminio, para así incrementar o garantizar el posicionamiento seguro en los mercados internacionales de nuestras materias primas, y porque no, hacer desarrollos tecnológicos propios que mejoren el mercado interno de este importante rubro.

Durante muchos años, una gran cantidad de aleaciones y técnicas de modificación de superficies han sido investigadas para proveer un incremento en la dureza y la resistencia al desgaste, a fin de extender la vida en servicio de piezas y componentes de máquinas. Sin embargo, estas mejoras en algunos casos producen el deterioro de otras propiedades mecánicas relacionadas con condiciones de servicio que involucran la existencia de cargas cíclicas. La realización de esta investigación tiene como finalidad determinar el comportamiento a la fatiga al aire y bajo ambiente corrosivo de la aleación comercial de aluminio 6063-T6 recubierta con una aleación base Níquel de alta resistencia, llamado comercialmente Colmonoy 88, obtenida por termo rociado específicamente a través de una técnica de alta velocidad (HVOF).

En esta investigación se determinara el comportamiento a la fatiga del conjunto recubrimiento-sustrato, cuando se varían las condiciones de amplitud de esfuerzo alternante y el medio, donde se realiza el ensayo.

Además se estudiarán las superficies de fractura para así observar en detalle el mecanismo de falla del conjunto recubrimiento-sustrato, y así comparar el comportamiento de éste en ambos ambientes. También se analizará la microestructura para observar si existió algún tipo de cambio en el tamaño y forma de los granos. Posteriormente se analizará la dureza del sustrato antes y después de ser aplicado el recubrimiento, a fin de determinar cualquier tipo de cambio que ocurra en el material base.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

II.1. Características de las Aleaciones de Aluminio AA-6063-T6

Las aleaciones de aluminio de la serie 6xxx contienen Magnesio y Silicio como componentes principales. Estas aleaciones se caracterizan por poseer una resistencia mecánica moderada, excelente resistencia a la corrosión, buena capacidad de conformado tanto en frío como en caliente, buena formabilidad y maquinabilidad.

En la siguiente tabla se puede observar específicamente, cuales son los componentes que conforman la aleación de aluminio 6063 y en que porcentaje se encuentran.

Tabla 1

Limites e intervalos de los elementos de la aleación de aluminio 6063

Componente	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
% Peso	98.9	Máx.	Máx.	Máx.	0.45 - 0.9	Max	0.2 - 0.6	Máx.	Máx.
		0.1	0.1	0.35		0.1		0.1	0.1

II.1.1 Propiedades mecánicas del aluminio 6063 para diferentes tratamientos térmicos.

Tabla 2

Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6063 para algunos tratamientos térmicos.

Tratamiento Térmico	Dureza Brinell Carga: 500kg. Bola: 10mm	Propiedades Mecánicas				% Elong. Long: 5 cm Esp: 1.6 mm
		S _y 0.2% (MPa)	S _{sut} (MPa)	Resistencia a la fatiga		
				S (MPa)	N(10 ⁶)	
T0	25	50	90	55	500	
T1	42	90	150	70	500	20
T4	46	90	170			22
T5	60	145	185	70	500	12
T6	73	215	240	70	500	12

T0: Estado Recocido.

T1: Temple a la salida de la prensa y envejecimiento natural hasta una condición sustancialmente estable.

T4: Templado a la salida de la prensa y luego envejecido naturalmente.

T5: Templado a la salida de la prensa y luego envejecido artificialmente.

T6: Extruido, solubilizado y envejecido artificialmente.

II.1.2 Aplicación

Una de las características principales de las aleaciones de aluminio es su bajo peso específico, lo que la hace de gran utilidad en la fabricación de aleaciones ligeras, extensamente empleadas en construcciones aeronáuticas y automotrices. Su elevada conductividad eléctrica lo hace útil para la fabricación de conductores eléctricos en forma de cables armados con acero galvanizado. Su elevada conductividad calorífica lo hacen útil para la fabricación de utensilios de cocina y en general, para aparatos de intercambio de calor. Su maleabilidad lo hace el material perfecto para la producción de laminas de aluminio, y su resistencia a la corrosión, lo hace indispensable en la fabricación de depósitos para ácido acético, etc.

En resumen, las aleaciones de aluminio de la serie 6xxx es empleada comúnmente en la manufactura de muebles, ventanas, pasamanos de escaleras, barandas, perfiles tubulares, intercambiadores de calor, y es muy utilizado en la fabricación de perfiles arquitectónicos y en general para aplicaciones industriales donde la resistencia mecánica requerida sea moderada. La gran variedad de elementos que se pueden obtener del aluminio se debe principalmente a que esta es una aleación extruible y tratable térmicamente, lo que permite mejorar su resistencia mecánica para ciertas aplicaciones requeridas en la industria.

II.1.3. Características mecánicas

Las propiedades mecánicas mas interesantes que presenta el aluminio son una moderada resistencia mecánica, y su gran ductilidad y maleabilidad, características que facilitan su forjado, laminado y trefilado. El aluminio además presenta un punto de fusión relativamente bajo, y un punto de ebullición alto, lo que facilita su fusión y moldeo.

Tabla 3

Propiedades de la aleación de aluminio 6063 T6

PROPIEDADES MECÁNICAS		Comentarios
Resistencia a la fluencia (MPa)	215	
Resistencia a la tracción (MPa)	240	
Resistencia a la fatiga (MPa)	70	500.000.000 de Ciclos
Resistencia al corte (MPa)	150	
Porcentaje de elongación (%)	12	
Relación de Poissón	0.33	
Módulo de corte (GPa)	25.8	
Módulo de elasticidad (GPa)	69	
PROPIEDADES FÍSICAS		
Densidad (GMC)	2.7	
Dureza Vickers	83	
PROPIEDADES TÉRMICAS		
Punto de fusión (°C)	616	Estado sólido
Punto de fusión (°C)	654	Estado líquido
Punto de ebullición (°C)	2450	
Conductividad térmica (W/m-k)	201	
Capacidad calorífica (J/g-°C)	0.9	
PROPIEDADES ELÉCTRICAS		
Resistividad eléctrica (Ohm-cm)	0.0000033	

II.2. Características del recubrimiento

La tecnología de los recubrimientos termo-rociados con aleaciones autofundentes base níquel, tiene una amplia gama de aplicaciones sobre partes de maquinarias y herramientas mecánicas, mejorando su resistencia al desgaste abrasivo y erosivo. Dentro de estas aleaciones podemos encontrar una aleación compuesta por níquel, cromo, tungsteno, y boro (NiCrWBSi) llamada comercialmente COLMONOY 88.^[1]

Esta aleación, es el resultado de un precipitado fino de múltiples fases duras (complejos de carburos de tungsteno-cromo (WC-Cr) y boruros de tungsteno-cromo (BW-Cr), así como componentes trimetálicos de elementos semejantes) presentes durante su manufactura, las cuales permanecen uniformemente distribuidas durante su transporte, termo-rociado y fusión, lo que conduce a una mayor dureza y resistencia al desgaste del depósito.

Los boruros y los silicatos después del termorociado, se distribuyen a todo lo largo del recubrimiento encargándose de proporcionar dos características fundamentales en el recubrimiento:

- 1- Incrementa la precipitación de las partículas de la fase dura dentro de la matriz, obteniéndose una composición mas homogénea y evitando así la acumulación de fases duras en una sola zona, lo cual traería como inconveniente un recubrimiento frágil.
- 2- Otorga a estas aleaciones la propiedad de tener un comportamiento autofundente, lo cual es particularmente beneficioso en cuanto a la disminución de la porosidad ya que la fase líquida se obtiene a bajas temperaturas (900°C a 1100°C), es decir, las aleaciones autofundentes poseen un punto de fase líquida bajo, lo cual permite tratarlas térmicamente sin alterar su composición, es por eso que podemos aplicar tratamientos térmicos a estas aleaciones aun después de ser depositadas sobre un substrato.

A continuación se presenta el porcentaje en peso de los elementos que conforman la aleación COLMONOY 88.

Tabla 4Elementos que conforman la aleación COLMONOY 88 ^[2]

Composición	C	Si	Cr	B	W	Fe	Ni
% en peso	0.8	4	15	3	17.3	3.5	Balance

II.3. Definición de fatiga en los metales.

Desde hace mucho tiempo se conoce que los elementos de máquina sometidos a cargas constantes aplicadas de manera continua, son capaces de resistir estos esfuerzos sin que se produzca ninguna fractura, al contrario de las piezas que son sometidas a esfuerzos variables y repetidos un gran número de veces, que fallan, sin que deformación aparente alguna, anuncie su fractura.

Este fenómeno en el cual un material o elemento de máquina sufre una fractura estando el mismo bajo la acción de esfuerzos que varían en el tiempo se conoce como fatiga. ^[3]

En la mayoría de los casos, las magnitudes máximas de estos esfuerzos son inferiores a los límites de resistencia estática del material. Una de las características principales de las fallas por fatiga es que se producen sin una deformación previa visible teniendo la apariencia de una fractura frágil, originada en un área crítica de alto esfuerzo local. Las grietas producidas por fatiga son generalmente finas y difíciles de detectar a simple vista, pero al alcanzar un tamaño macroscópico, son capaces de difundirse y causar la fractura completa del material en un período de tiempo muy corto.

II.3.1. Cargas variables o fluctuantes presenten en fatiga.

Para comprender el fenómeno de la falla por fatiga, se debe conocer los tipos de esfuerzos fluctuantes a los que puede estar sometido un elemento de máquina.

Estos esfuerzos se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Esfuerzos irregulares o aleatorios: es aquel donde los esfuerzo no siguen ningún tipo de función o patrón establecido.
2. Esfuerzo fluctuante senoidal repetido: es aquel que varia entre dos valores distintos de cero tanto para la zona positiva como para la negativa.
3. Esfuerzo alternante senoidal con inversión completa: en este tipo de ciclos, tanto el esfuerzo máximo como el mínimo son de igual magnitud pero de signo contrario y el esfuerzo medio es igual a cero. Por convenio se puede decir que el esfuerzo de tracción se considera positivo y el de compresión negativo.

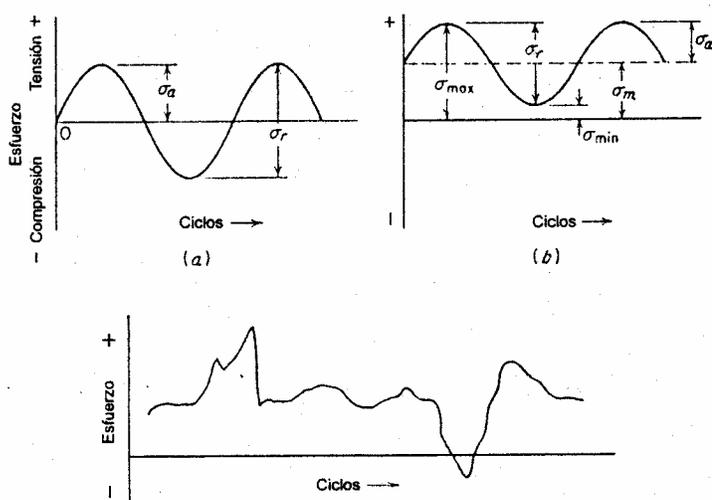


Figura 1

Esfuerzos ciclicos de fatiga.
 a- Inversión completa
 b- Tensión repetida
 c- Ciclos de esfuerzo irregulares

Estos ciclos están constituidos por los siguientes esfuerzos:

$$\text{Esfuerzo mínimo: } \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$\text{Esfuerzo máximo: } \sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\text{Esfuerzo medio: } \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$\text{Esfuerzo alternante: } \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Otras relaciones que se utilizan a menudo para describir los esfuerzos fluctuantes son:

$$\text{Relaciones de esfuerzos: } R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (\text{Ec. 2.5}) \quad \text{y} \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

La relación R puede variar del rango de -1 hasta $+1$. A medida que el valor R se aproxima a $+1$, el intervalo de esfuerzos tiende a cero, y la carga se convierte una constante. ^[3]

II.3.2. Etapas del proceso de fatiga

Las fracturas por fatiga son causadas por la acción simultánea de esfuerzos cíclicos, esfuerzos cortantes y deformación plástica, si alguno de estos tres no esta presente, el agrietamiento por fatiga no se iniciara y propagará. ^[2]

El proceso consta de la siguientes etapas:

- Daño inicial de fatiga llevando a la nucleación de la grieta.

- Crecimiento progresivo de una grieta hasta que la sección transversal remanente sin agrietar se ha reducido sustancialmente para soportar las cargas impuestas.

El inicio y propagación de la grieta de fatiga está en las regiones donde hay mayor deformación acumulada, y la mayoría de los materiales ingenieriles contienen defectos que actúan como concentradores de esfuerzos que intensifican la deformación. La mayoría de las grietas de fatiga se inician y crecen a partir de defectos estructurales.

Bajo la acción de cargas alternantes, una zona plástica se desarrolla en la punta del defecto. Esta zona de alta deformación se convierte en un sitio de inicio para una grieta de fatiga. La grieta se propaga bajo el esfuerzo aplicado a través del material hasta que resulta la fractura completa. A escala microscópica la característica mas importante de un proceso de fatiga es la nucleación de una o mas grietas bajo la influencia de esfuerzos de inversión completa que exceden el esfuerzo de fluencia seguido por el desarrollo de grietas de bandas de deslizamiento persistentes en los límites de grano. ^[4]

II.3.3. Características Fractográficas

La superficie de fractura que resulta de una falla por fatiga tiene una apariencia característica que puede ser dividida en tres zonas o etapas progresivas:

Etapa I: corresponde a la iniciación de las grietas y su propagación por el plano de deslizamiento de la fractura, extendiéndose desde la superficie hacia el centro aproximadamente a 45° del esfuerzo axial. En esta etapa, la grieta no se extiende por mas de 2 a 5 granos alrededor del origen. En algunos casos dependiendo del material,

el ambiente y el nivel de esfuerzo, la fractura en esta zona puede que no sea perceptible.

Etapa II: esta etapa se caracteriza por el inicio de la propagación de la grieta debido a la influencia de las cargas cíclicas. En esta etapa se produce un cambio de dirección de crecimiento de la grieta que va desde los 45° hasta los 90° con respecto al eje de esfuerzos aplicados al sistema. La superficie de fractura durante el crecimiento de la etapa II esta caracterizada por estriaciones y marcas de playa, que pueden ser relacionadas, en su densidad y ancho, con el nivel del esfuerzo aplicado. La superficie de fractura producida durante el crecimiento en esta etapa es relativamente lisa.

Etapa III: ocurre durante el ultimo ciclo de esfuerzo cuando la sección transversal no puede soportar la carga aplicada.

La fractura final, la cual es el resultado de una sobre carga, puede ser frágil, dúctil o una combinación de ambas, dependiendo básicamente de la naturaleza del material.^[4]

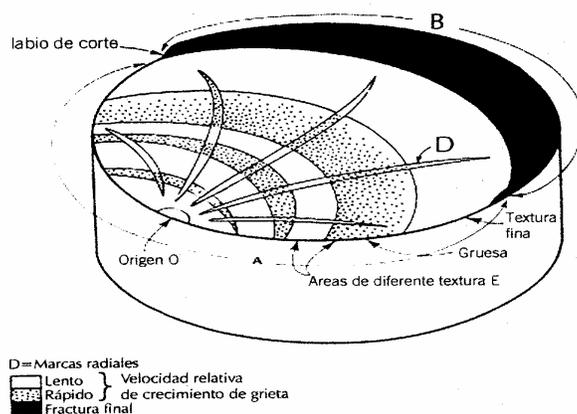


Figura 2

Texturas generadas en la superficie de fractura por avance de grieta.

II.3.4. Teoría de Orowan

Explica que el proceso de crecimiento de la grieta se basa en la consideración que el comportamiento de las pequeñas regiones plásticas embebidas en la matriz deformada elásticamente son sometidos a ciclos simétricos y a un nivel de esfuerzo constante. Para ciclos sucesivos de esfuerzos, la resistencia plástica local disminuye, pero el esfuerzo se incrementa con el cambio de la distribución de cargas entre esa región y los alrededores elásticos. El esfuerzo en la región tiende a un límite finito el cual dependiendo de lo que el material pueda soportar, resulta un agrietamiento o en un comportamiento elástico.

La vida de un componente sometido a fatiga está determinado por el número de ciclos requeridos para iniciar la grieta y por el número de ciclos necesarios para hacer crecer la grieta desde sus dimensiones iniciales hasta el valor crítico. ^[5]

El método general para medir la propagación de las grietas de fatiga usando técnicas de mecánica de fractura, esta resumido en la **figura 3**, una gráfica logarítmica de crecimiento de grieta por número de ciclos, da/dN , contra el intervalo de factor de intensidad de esfuerzo ΔK , correspondiendo al ciclo de carga aplicado a la probeta. Para casi todos los componentes metálicos se pueden distinguir tres etapas: la región I, presenta un umbral ΔK_{th} , que corresponde con el intervalo del factor de intensidad de esfuerzos en el cual la grieta no se propaga.

Para valores intermedios de ΔK , la región II en la **figura 3**, vemos una línea recta, usualmente obtenida de la gráfica **log-log** de ΔK vs da/dN , la cual es descrita por la relación o ecuación de Paris-Edrogon:

$$da/dN = C (\Delta K)^n \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde **C** y **n** son constantes características del material.

Para altos valores de ΔK (Región III en la **figura 3**), ocurre un comportamiento inestable, que resulta en un incremento evidente en la velocidad de propagación de la grieta justo antes de la fractura completa de la probeta. Existen dos posibles causas para este comportamiento.

Primero, el incremento de la longitud de la grieta durante el ensayo a cargas constante que ocasiona un “pico” de intensidad de esfuerzos que alcanza la tenacidad de fractura, K_{IC} y ese comportamiento inestable esta relacionado con las primeras etapas de la fractura frágil.

En segundo lugar, la propagación de la grieta produce una disminución del área remanente de la probeta, haciéndola insuficiente para soportar el pico de esfuerzo. La primera posibilidad, es operativa para metales de alta resistencia y baja tenacidad, en los que las probetas utilizadas normalmente en ensayos de velocidad de crecimiento de grieta presentan un comportamiento lineal-elástico para niveles de K iguales a K_{IC} .

La segunda posibilidad, es común para metales dúctiles, particularmente si K_{IC} es alta.

Hasta ahora han sido desarrollados una gran cantidad de ecuaciones para relacionar la velocidad de propagación de la grieta y los datos de intensidad de esfuerzos. Las más comúnmente aceptada es la nombrada anteriormente que es la ecuación propuesta por Paris (**Ec. 2.7**), y generalmente da una buena aproximación para la Región II de la etapa de propagación de grieta.

Otra relación basada en la ecuación de Paris, es la ecuación de Forman que es utilizada para representar la variación de da/dN , con otras variables, incluido el coeficiente de carga R , donde R es igual a $Carga_{max} / Carga_{min}$, y el valor crítico de K , K_c , para la cual ocurre la fractura violenta de la probeta (región III en la **figura 3**). La ecuación de Forman es:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^n}{(1 - R)(K_c - \Delta K)} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde C y n son constantes del material del mismo tipo que las de la ecuación de Paris, pero con valores diferentes. Una ventaja de la ecuación de Forman, es que ésta describe el comportamiento acelerado de da/dN observado para altos valores de ΔK , el cual no es descrito por la ecuación de Paris. Además, la ecuación de Forman describe el incremento de da/dN asociado con el incremento de R , desde 0 hasta, por lo que se puede decir que cuando es necesario describir el efecto de K cercano a K_c , o el efecto de R en da/dN , la ecuación de Forman puede ser utilizada para representar el comportamiento de da/dN . Cuando solo esté involucrada ΔK en la Región II, puede ser utilizada la ecuación de Paris.

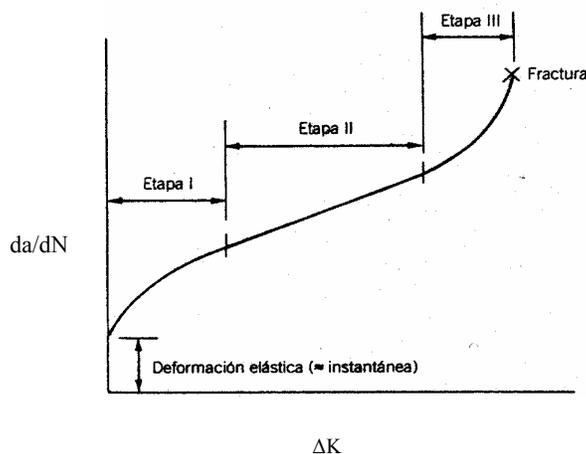


Figura 3
Comportamiento del crecimiento
de grieta por fatiga

II.3.5. Diagrama de fatiga de Wholer

Para determinar la resistencia a la fatiga de un material, es necesario un gran número de pruebas debido a la naturaleza estadística de la fatiga. Si los resultados obtenidos en estos ensayos se grafican, colocando los esfuerzos en el eje de las ordenadas y los números de ciclos a falla en el eje de las abscisas se obtiene una curva asintótica que divide a el plano del diagrama en dos regiones, una región superior correspondiente a las condiciones para las cuales las probetas no hubieran podido resistir sin romperse y otra región inferior en que las probetas nunca rompen. Estos diagramas se conocen como las curvas de Wholer o diagramas S-N. [6]

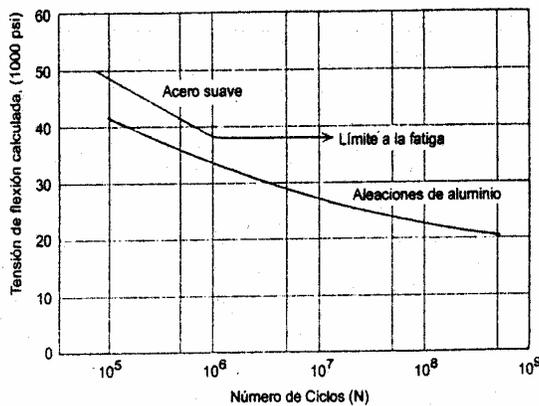


Figura 4
Curvas de wholer para materiales férreos
y no férreos

Por comodidad, estos diagramas se pueden representar como las curvas esfuerzos vs logaritmo del número de ciclos (S-LgN). Basquin demostró que la curva S-LgN puede ser linealizada utilizando todos los ejes coordenados en escala logarítmica (LgS-LgN). La curva entera puede ser linealizada y la amplitud de esfuerzo puede ser descrita como la resistencia a la fatiga por la siguiente relación:

$$S_a = S_f'(2N)^b \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde S_a es la resistencia a la fatiga del material, S_f es el coeficiente de resistencia a la fatiga, N es el numero de reversos a falla y b el exponente de fatiga.

Otra forma mas simple de representar esta ecuación es:

$$S_a = S_f (N)^b \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde S_a es la resistencia a la fatiga del material, S_f es el coeficiente de resistencia a la fatiga, N es el número de ciclos a falla y b el exponente de fatiga.

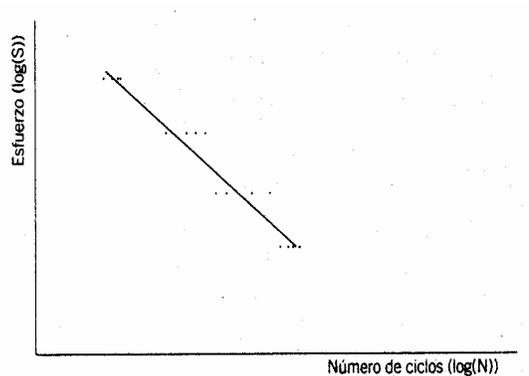


Figura 5
Curvas (S-N). Representación de la ecuación de Basquin

El comportamiento del acero con respecto a la fatiga, es que muestra un límite de resistencia a la fatiga muy definido, que tiene lugar entre 10^5 y 10^7 ciclos. En cambio para las aleaciones no férricas como el aluminio, no hay un límite de resistencia a la fatiga preciso, tomando el valor de la resistencia a la fatiga para un valor de 10^8 ciclos. En el caso de ensayar un material sin límite de fatiga, la curva de resistencia a la fatiga se describe aplicando solamente el modelo de Basquin.

II.3.6. Definición de límite de resistencia a la fatiga.

El límite de resistencia a la fatiga es considerado como el esfuerzo por debajo del cual la falla por fatiga nunca ocurre.^[7] Hay que acotar que para algunos material no

ferrosos, como las aleaciones de aluminio, no existe un límite de resistencia a la fatiga real definido. Para estos materiales, la duración a la fatiga es una consideración más crítica, ya que los esfuerzos aplicados deben ser lo suficientemente bajos, de modo que la falla no ocurra durante la vida útil del componente. Generalmente, para estas aleaciones se toma el valor del límite de resistencia a la fatiga como el esfuerzo por debajo del cual no ocurre la falla por fatiga para un número de ciclos de inversión de 500 millones.

II.3.7. Factores que afectan la vida a la fatiga

- **Condiciones superficiales:** generalmente, la gran mayoría de las grietas de fatiga se originan en la superficie de la pieza. La resistencia a la fatiga de un material depende en gran parte del tipo de acabado que esta presente, ya que a medida que la superficie de la pieza sea más rugosa, la resistencia a la fatiga será menor. Para ello las probetas de fatiga deben estar perfectamente pulidas, esto con la finalidad de eliminar cualquier entalla o cualquier otro tipo de discontinuidad importante que permita disminuir la rugosidad de las mismas.
- **Deposición de recubrimientos :** La deposición de recubrimientos metálicos, así como la técnica y el material utilizado en la deposición, afectan la superficie del material base, por lo cual tienen una gran influencia en la variación de la resistencia a la fatiga del material.
- **Tamaño de la pieza:** A medida que aumenta el tamaño del elemento de máquina, aumenta la probabilidad de que se produzcan nucleaciones en la pieza al ser ésta sometida a esfuerzos alternantes, lo que produce a su vez un aumento en las probabilidades de que la pieza falle por fatiga. .

- **Tamaño de grano:** si el tamaño de grano en los materiales se reduce, se produce un incremento en el número de granos por unidad de volumen y por consiguiente un aumento en la cantidad de bordes de grano, lo que produce un aumento en la resistencia a la fatiga del material producto de la dificultad que presentara cualquier dislocación para movilizarse. En consecuencia, un materiales con un tamaño de grano fino presentan mayor resistencia a la fatiga que un material con un tamaño de grano grueso.
- **Carga:** El tipo de carga a la cual se somete el material, es un factor que afecta la resistencia a la fatiga de éste. La flexión, torsión y la carga axial, son las cargas a las cuales se puede someter un elemento de máquina, siendo la mas desfavorable la carga por torsión.
- **Temperatura:** pruebas experimentales indican que la resistencia a la fatiga se ve afectada por la temperatura a la cual trabaja el elemento de máquina. En el caso de los aceros, el límite de resistencia a la fatiga, aumenta ligeramente si la temperatura de operación oscila entre los 20 y 50 °C, y disminuye si la temperatura de operación es superior a los 150 °C.
- **Esfuerzos residuales superficiales:** la resistencia a la fatiga de los materiales se puede ver afectada por ciertas operaciones como el pulido, granallado o laminado en frío, debido a los esfuerzos residuales que estos procesos son capaces de generar en la superficie del material. Por lo general si los esfuerzos residuales generados son de compresión, se produce un aumento de la resistencia a la fatiga del material, por el contrario si los esfuerzos generados son de tensión, se produce una disminución de la resistencia de la fatiga del material, esto se debe a que la fallas por fatiga son producto de la influencias de estos esfuerzos.

- **Concentradores de esfuerzos:** Cualquier discontinuidad geométrica en un elemento de máquina, altera su distribución de esfuerzos, produciendo que el esfuerzo local sea mayor que el nominal en ese punto. Estas zonas localizadas se conocen como áreas concentradoras de esfuerzos, y este será el sitio con mayor potencial para la nucleación de grietas de fatiga.
- **Frecuencia de aplicación de la carga:** En condiciones normales la falla por fatiga es independiente de la frecuencia, pero cuando se encuentran factores como la corrosión o temperaturas elevadas, el factor cíclico llega a ser importante. Cuanto menor sea la frecuencia y mas alta sea la temperatura, mayor será la propagación de las grietas y mas breve la duración a un nivel de esfuerzo dado.

II.4. Fatiga - corrosión

II.4.1. Introducción

La acción corrosiva sobre una pieza metálica, puede provocar desgaste, picaduras, y grietas en ciertos puntos de su superficie. Si la pieza es sometida a esfuerzos fluctuantes y a su vez se encuentra en un ambiente corrosivo, seguramente se producirá una pérdida considerable de la resistencia a la fatiga del metal.

II.4.2. Generalidades de la fatiga-corrosión

- Los elementos mecánicos que trabajan en ambientes corrosivos sufren una disminución en su resistencia a la fatiga, esto debido a las picaduras generadas en su superficie producto del ataque electroquímico. Si la acción corrosiva y la aplicación de los esfuerzos alternantes sobre el elemento de máquina se dan de manera simultánea, se observará una mayor disminución de la resistencia a

la fatiga, en comparación con la acción de cada factor actuando por separado. Este comportamiento se conoce en ingeniería como fatiga-corrosión.

- Generalmente las piezas o componentes que se ensayan en laboratorio, presentan un número de ciclos a falla mucho menor en comparación con piezas que trabajan normalmente en ambientes corrosivos, debido a que estos ensayos son de corta duración.

Los fallos debidos a fatiga corrosión difieren de los fallos por fatiga al aire en los siguientes aspectos:

- a- La superficie cambia de color por el proceso de corrosión y hay formación de picaduras o grietas en ciertos puntos.
- b- Existen muchas mas grietas, esto es debido a que el ataque electroquímico produce puntos de corrosión como picaduras que permiten la formación de grietas de fatiga.
- c- La falla ocurre a un número menor de ciclos alternantes.

II.4.3. Variables que afectan la fatiga corrosión

- **Efecto del tamaño de grano:** La influencia del tamaño de grano en el crecimiento de la grieta en fatiga corrosión va a depender del modo de fractura de la aleación en el ambiente. En un ambiente benigno, tal como en el vacío, la propagación de la grieta se realiza generalmente transgranularmente, deslizándose a través de los enlaces y la velocidad de crecimiento de la grieta usualmente decrece con el incremento de el tamaño de grano. En un ambiente agresivo, el efecto del tamaño de grano puede verse disminuido, esto

dependiendo de cómo se vea afectado el modo de fractura de la aleación por el ambiente.

- **Efecto de la relación de esfuerzos** : en general a mayores relaciones de esfuerzos se encontrara que la velocidad de crecimiento de la grieta por fatiga-corrosión es mayor.
- **Efecto de la temperatura**: debido a que la temperatura puede influir en la reacción ambiente-superficie metálica, así como en algunos procesos de transporte, se puede esperar que ésta afecte el crecimiento de la grieta por fatiga corrosión. En muchos de los sistemas aleación-ambiente la velocidad de crecimiento de la grieta se incrementa a medida que aumenta la temperatura, esto debido a que el proceso de agrietamiento es térmicamente activado.

II.4.4 Causa de la dispersión estadística de los resultados en fatiga

El trazado de toda la curva de fatiga muestra que los puntos figurativos se encuentran generalmente más o menos dispersos a una u otra parte de la curva supuesta.

Las causas de esta dispersión son múltiples y debidas a:

- Defectos en la alineación de las probetas respecto a su eje de aplicación de la carga.
- Cambios apreciables de las condiciones de ensayo debido al incremento de la temperatura o la influencia de medios corrosivos.

- Acabado superficial no uniforme o existencia de imperfecciones locales tales como: rayaduras no observadas durante el pulido, marcas o muescas, porosidades, etc.
- Defectos internos o superficiales producto de la heterogeneidad química y estructural del material.
- Presencias de esfuerzos residuales superficiales debidos al mecanizado. ^[6]

II.5. Termo-rociado.

El proceso de termo-rociado surge inicialmente como una importante herramienta en lo que a protección de superficies se refiere. No obstante, el termo-rociado no es una tecnología nueva ya que este proceso comienza luego de la introducción de dos procesos: el primero de ellos, era *llama oxiacetilénica*, la cual fue introducida entre los años 1890 y 1910, el segundo proceso se debe a Schoop y sus colaboradores, quienes inventaron el llamado *arco eléctrico* alrededor del año 1910 con la finalidad de fundir, atomizar y aplicar metales conductores en forma de cables sobre un material base. A partir de allí surge el termo-rociado como el producto de la unión de estos dos procesos. Sus principales aplicaciones se encontraban en las plantas químicas, estructuras marinas y puentes, posteriormente al transcurrir el tiempo se fueron adicionando nuevos procesos como el rociado por plasma. Este último fue introducido por Reinecke en el año 1930 en el cuál se podía confinar en un arco, altas temperaturas y así poder fundir o semifundir materiales con altos puntos de fusión como los cerámicos.

El termo-rociado es un conjunto de procesos para la deposición de materiales tanto metálicos como no metálicos, donde metales, carburos cerámicos y hasta polímeros (plásticos) son semi-fundidos mediante el calentamiento suministrado por

un proceso de combustión o arco eléctrico, a través de su energía térmica mediante la ayuda de un gas comprimido en donde se aceleran gotas semi-fundidas y se proyectan en forma de rocío sobre una superficie de un sustrato que previamente ha sido preparado para formar así un recubrimiento. Al golpear el sustrato, se aplastan y constituyen una capa fina que se adhiere a las irregularidades de la superficie. El recubrimiento formado no es homogéneo y contiene comúnmente un cierto grado de porosidades, y en el caso de metales rociados, el recubrimiento va a contener óxidos del metal. La unión entre el sustrato y el recubrimiento puede ser mecánico, químico o metalúrgico o una combinación de ellos.

Los recubrimientos termo-rociados pueden ser blandos como el *Babbitt* el cual es utilizado en superficies anti-fricción (cojinetes de cigüeñales) o tan duros como el *Carburo de Tungsteno* utilizado en superficies anti-desgastes.

Debido a esto, el campo de aplicación se cataloga en función de una serie de requerimientos mínimos de diseño:

- Resistencia al desgaste.
- Resistencia a la oxidación
- Resistencia a la corrosión
- Reconstrucción o restauración de dimensiones.
- Creación de barreras térmicas (aislantes)
- Conductividad o resistividad eléctrica.
- Biomedicina.
- Resistencia a la cavitación.
- Resistencia a altas temperaturas.
- Resistencia a los metales fundidos.
- Resistencia a la corrosión atmosférica y soluciones químicas.

II.5.1. Aspectos fundamentales en los métodos de deposición

Los procesos de termo-rociado difieren básicamente en tres aspectos fundamentales:

1.- Material de alimentación : es la forma en que el material de alimentación es incorporado al proceso de termo-rociado, esta puede ser en forma de polvo por medio de tolva, alambre y barra cerámica a través del uso de rodillos. Más de 200 materiales de alimentación con diferentes características de dureza, coeficiente de fricción y otras propiedades existen en el mercado, que pueden ser utilizados con el fin de cubrir los requerimientos de diseño, estos pueden ser agrupados de la forma siguiente:

- a.- Materiales duros.
- b.- Aleaciones metálicas.
- c.- Carburos.
- d.- Cerámicos
- e.- Polímeros
- f.- Materiales de composición especial.

2.- Método de calentamiento aplicado : el calentamiento del material consiste en la preparación del mismo para ser proyectado a través de una corriente de gas alta presión sobre el substrato. Este paso es de gran importancia ya que el calentamiento homogéneo del material es uno de los factores que determinan la morfología del recubrimiento, es decir, la distribución final de la partículas así como también la formación de poros e inclusiones de óxidos. El sistema que se utiliza para generar la energía necesaria, es producto de la energía térmica del proceso de combustión o un arco eléctrico capaz de semi-fundir las gotas de material a ser rociado.

3.- Método de proyección del material sobre el sustrato: se refiere a las características con las cuales es depositado el material de recubrimiento. Estas características, que a su vez determinan la calidad del recubrimiento, son la velocidad y la trayectoria desde su punto de propulsión hasta el sustrato.

II.5.2. Procesos de Recubrimiento por Termo-rociado

Los procesos de termo-rociado pueden ser clasificados tanto en procesos de combustión como en procesos eléctricos. Los procesos de combustión incluyen el rociado por *llama*, *HVOF* y rociado por *detonación*. Los procesos eléctricos incluyen rociados por *arco eléctrico* y *plasma*.

II.5.3. Procesos por combustión

II.5.3.1. Llama

Es una de las formas más viejas de termo-rociado, este método puede ser usado para la aplicación de una gran variedad de materiales de recubrimiento, incluyendo polvos metálicos y no metálicos, alambres metálicos, cerámicos, etc.

En el rociado por *llama* el material de recubrimiento es suministrado continuamente en el extremo de la pistola de rociado donde éste es fundido en una llama e impulsado al sustrato en una corriente de gas.

El proceso de recubrimiento por *llama* ocurre a bajas velocidades (subsónicas), y utiliza el calor proporcionado por su llama para la semi-fusión del material de recubrimiento. Es el proceso más simple y versátil. Las diferentes formas del material de alimentación que existen pueden rociarse con este proceso subsónico de llama. El material de alimentación es semi-fundido por una llama oxiacetilénica (generada de la combinación de oxígeno y un combustible).

Los componentes básicos del rociado por *llama* son: el material de recubrimiento, los mecanismos de alimentación, oxígeno y gases reguladores de flujo y presión, un compresor de aire y un regulador.

a) Polvo rociado por Llama. En el rociado de polvo con llama, las partículas de polvo se calientan aproximadamente a 2473 K, e impactan con una velocidad al sustrato de 30 m/s. El polvo es transportado por el flujo de gas dentro de la cámara de combustión donde es semi-fundido y proyectado al sustrato por la fuerza de la llama. La tasa de alimentación del polvo dentro de la cámara de combustión es importante en este proceso, al ser baja, algunos polvos pueden volatilizar, incrementando los costos de operación y deteriorando la calidad de la superficie, en cambio si la velocidad es alta, el polvo no puede ser totalmente semi-fundido, entonces disminuye la eficacia y aumenta la posibilidad de que existan partículas no semi-fundidas atrapadas dentro del recubrimiento. Usualmente las pistolas poseen un dispositivo para ajustar la tasa de alimentación del polvo dentro del flujo del gas.

Las tasas de producción para rociado de polvos por llama son generalmente menores que el rociado por Arco o el rociado por *llama*. La aplicación de los recubrimientos son generalmente menos densos y no tan adherentes como aquellos aplicados por otros métodos de termo-rociado.

b) Alambre rociado por Llama: El rociado de *alambre por llama* es el proceso de llama con mayor utilización. En el rociado de alambre las partículas de alambre son fundidas y atomizadas a una temperatura de 3073 K, e impactan con una velocidad sobre el sustrato de 180 m/s. El elevado flujo de gas en el rociado por llama con alambre, otorga a las gotas gran energía de impacto. La baja velocidad de la partícula en el impacto de rociado por llama puede producir una disminución en la adhesión y un incremento en la porosidad, al compararlo con otros procesos de termo-rociado.

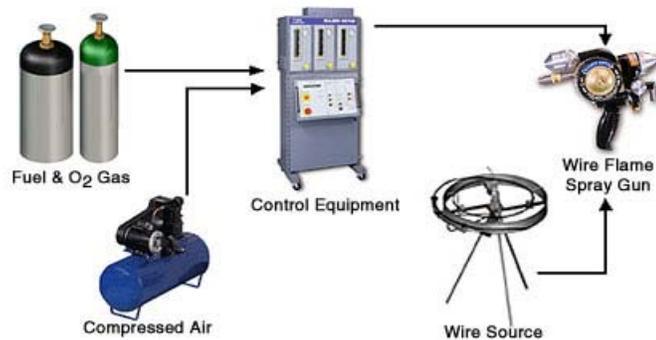


Figura 6 Proceso de rociado de alambre por llama

Las características y beneficios de los sistemas de rociado por *llama* son:

- El proceso puede automatizarse.
- En el rociado de polvo pueden usarse gran variedad de materiales para el recubrimiento.
- Fáciles de operar.
- Portátil
- Ruido operacional relativamente bajo.
- Versátiles y fiables.
- Son sistemas económicos con un vida útil larga.

II.5.3.2. Rociado por Detonación

En el rociado por *detonación de llama*, una mezcla de oxígeno, acetileno y polvos de material de recubrimiento son detonados por una chispa en la cámara de la pistola muchas veces por segundo. El material de recubrimiento es depositado a muy altas temperaturas para producir altas densidades en el recubrimiento. Sus aplicaciones típicas incluyen el revestimiento cerámico de los recubrimientos para la resistencia a altas temperaturas.

II.5.3.3. HVOF (High Velocity Oxy-Fuel)

Es uno de los métodos más nuevos de rociado térmico, utiliza oxígeno y un gas como combustible a altas presiones, algunos de estos gases son: propano, propileno e hidrógeno.

Pueden tener dos modalidades: alta velocidad oxígeno-combustible y alta velocidad aire-combustible. La selección del equipo depende de los niveles de presión de trabajo, si la presión es de 345 a 1034 kPa, el combustible es quemado por aire, en cambio si las presiones están comprendidas entre 1034 y 8274 kPa, se requiere aire enriquecido con oxígeno y por encima de 8274 kPa se requiere oxígeno puro.

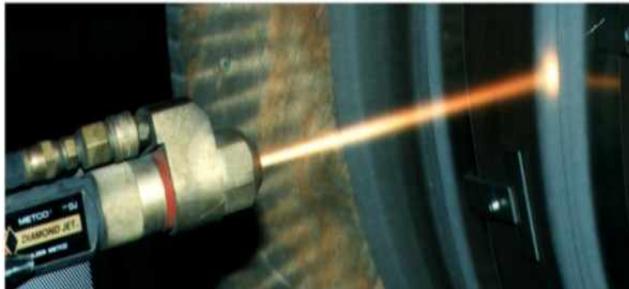


Figura 7 Pistola de Termo-rociado por HVOF

El proceso consiste en inyectar oxígeno y combustible, dentro de una cámara de combustión, acelerando los productos de la combustión mediante el uso de una boquilla convergente-divergente. Las partículas son inyectadas a través de un orificio de inyección localizado aguas abajo de la boquilla y son calentadas y aceleradas en el tubo de aceleración. Esta mezcla de gas y partículas es descargada fuera de la antorcha al substrato el cual se encuentra a una cierta distancia de la salida del tubo de aceleración. La expansión proveniente de una zona de combustión a la presión atmosférica da como resultado una caída significativa de temperatura. Polvos

inyectados dentro de un flujo supersónico a una temperatura constante más baja que el punto de fusión del material pulverizado, aceleran las partículas sólidas hasta velocidades extremas a través de un tubo largo o tobera convergente-divergente. Los depósitos rociados térmicamente son formados mediante la unión cohesiva, resultando los llamados splats (cuando una gota de material fundido golpea una superficie, se aplana y solidifica), formando de esta manera el recubrimiento.

Este proceso está íntimamente relacionado al rociado por *llama*, pero una diferencia esencial entre ellos es que, en el rociado por *llama* los procesos de combustión se realizan al aire (ambiente), mientras que en el HVOF la combustión se realiza en una pequeña cámara. Debido a las altas presiones creadas en la cámara de combustión, los gases salen a velocidades supersónicas, y aceleran las partículas fundidas. Estas, aunque no alcanzan las velocidades de los gases, alcanzan altas velocidades con las que chocan en la superficie obteniendo un recubrimiento de alta calidad.



Figura 8 Proceso de Termo-Rociado vía HVOF

El HVOF produce velocidades de partículas más altas que los demás procesos de rociado térmico. Las velocidades de los gases oscilan entre 1370 m/s y 1930 m/s con velocidades de partícula de polvo correspondientes a 480 a 1020 m/s. La temperatura del gas en la recámara están entre 1650 °C y 2760 °C, dependiendo del combustible usado y la reacción estequiométrica de la combustión.

Los proceso de HVOF se pueden dividir en cuatro grandes grupos:

1.- Combustión interna con gases calientes directamente dentro de una cámara donde éstos se mezclan, se calientan y se unen con el gas transportador y las partículas de polvo.

2.- Inyección simultánea de polvo dentro de la cámara de combustión donde la mezcla continuamente se quema y calienta las partículas.

3.- Combustión confinada dentro de la cual una corriente de polvo con gas transportador es inyectada.

4.- Sistema de combustible líquido a alta presión con inyección radial de polvo aguas abajo de la salida de la cámara de combustión.

II.5.3.4. Ventajas del HVOF.

1.- Aumenta resistencia al desgaste debido a una mayor resistencia en el revestimiento.

2.- Energía cinética más alta en los impactos.

3.- Implanta una barrera anticorrosiva a través de la baja porosidad.

4.- Calentamiento de la partícula mas uniforme y eficiente.

5.- Ambiente más favorable, atmósfera menos oxidante.

6.- Superficies más lisas debido a una velocidad de impacto más alta.

7.- Densidad más alta, porosidad más baja, porque la energía de impacto es mas alta debido a la velocidad alcanzada por la partícula.

8.- Volumen del óxido más bajo debido al menor tiempo de exposición de la partícula con el aire.

9.- Mayor cantidad en el volumen de las partículas fundidas debido a un mejor calentamiento de éstas.

10.- Capas con mayor espesor, a través del mejoramiento en las tensiones residuales.

- 11.- Mayor retención de las propiedades químicas del polvo y sus fases debido al tiempo reducido de exposición a altas temperaturas.
- 12.- Adherencia más alta y mayor fuerza cohesiva, producto de la unión entre las partículas.
- 13.- Tiempo de exposición más corto debido a las altas velocidades de las partículas.

II.5.3.5. Desventajas del HVOF.

- 1.- Ruido elevado (130 dBA) generado por la combustión de alta presión y el fluido de gas a velocidades supersónicas.
- 2.- Costos de operación altos (dependiendo de la proporción de rocío y material) debido al alto flujo de gas requerido (28 a 57 m³/s).

II.5.3.6. Equipo Utilizado para el HVOF

Los recubrimientos realizados por HVOF ofrecen mejor calidad que los realizados por procesos de *plasma* o *llama*, principalmente por las altas velocidades alcanzadas por las partículas debido al incremento de la presión en la cámara a través de la continua alimentación tanto de los gases como del polvo. Esta energía de presión se transforma en energía cinética a través de una tobera convergente-divergente.

La longitud de la boquilla, debe ajustarse para cada material debido a las pérdidas de calor producto del refrigerante (generalmente agua), lo cual reduce su eficacia calorífica. El calentamiento y/o fusión excesiva de la partícula dentro de la boquilla puede conducir a la deposición del material en la paredes de la misma, originándose el fenómeno conocido como *plunging* que produce un funcionamiento inestable de la pistola debido a la restricción del flujo del gas por las deposiciones.

Entre los materiales que pueden ser depositados mediante el proceso de HVOF tenemos:

- Cerámicos (Cr₂O₃, Al₂O₃, ZrO₂, TiO₂, SiO₂)
- Compuestos (WC-Co, WC-CoCr, WC-Ni, Cr₃C₂-NiCr)
- Metales puros (Al, Zn, Ni, Cu)
- Aleaciones (Acero inoxidable, Inconel, Bronces)
- Metales Preciosos (Aleaciones de Plata)
- Lubricantes Sólidos (Base Granito, Nitrato de Boro)
- Súper aleaciones (Base de Cobalto, Ni-Fe)
- Semi-conductores (Óxido de Titanio)
- Aleaciones Metálico-Refractarias (Mo-Ta base)

II.5.4. Proceso eléctricos

II.5.4.1. Arco eléctrico

Es generalmente el método de termo-rociado más económico para la aplicación de recubrimientos metálicos para la resistencia a la corrosión, incluyendo Zinc, aluminio y sus aleaciones.

El proceso utiliza un par de alambres eléctricamente conductores (electrodos) que se funden a través de un arco eléctrico. Los alambres se alimentan en forma continua y automáticamente a un punto en frente de una nariz de atomización, un arco se forma, fundiendo el alambre a 5273 K.

El material semi-fundido es atomizado y propulsado por una corriente o chorro de aire comprimido de gas, impactando al substrato a una velocidad de aproximadamente 240 m/s, solidificándose rápidamente y formando la capa del recubrimiento.

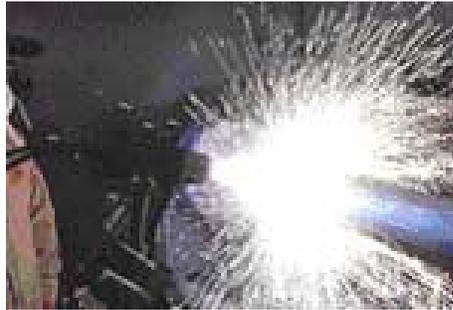


Figura 9 Termo-rociado por arco eléctrico

Un equipo de termo-rociado por arco, consiste de una planta de poder DC, dos rollos de alambre de alimentación, una pistola de rociado y un sistema de suministro de aire comprimido. El poder suministrado puede oscilar entre 18 y 40 Voltios. Generalmente el voltaje se mantiene tan bajo como sea posible mientras se tiene la estabilidad del arco. El tamaño de la gota semi-fundida se incrementa si aumenta el voltaje.

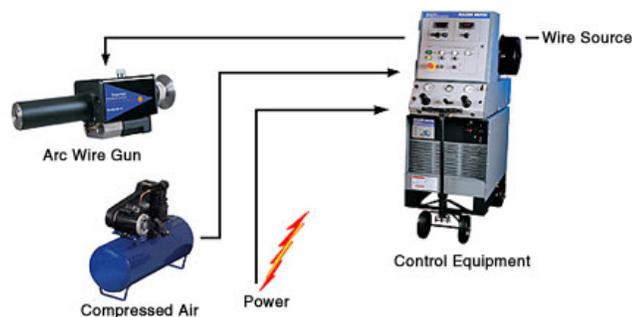


Figura 10 Proceso de Termo-rociado por arco eléctrico

La calidad y propiedades del recubrimiento pueden ser controladas variando la entrada de presión, la tasa de alimentación de cable, la distancia de rociado y la fuente de poder. Los recubrimientos de rociado por arco muestran una excelente fuerza de adhesión y cohesión

Entre las aplicaciones en la industria se destacan las siguientes:

- 1.- Aeronáutica
- 2.- Conductores Eléctricos
- 3.- Industria Automotriz
- 4.- Industria Naval
- 5.- Recuperación de piezas

Entre las ventajas de este proceso tenemos:

- 1.- El equipo es fácil de trasladar.
- 2.- No transfiere calor al substrato por encima de 413 K.
- 3.- Permite depositar materiales resistentes a la corrosión con un bajo costo.
- 4.- Presenta un alta rendimiento energético.
- 5.- Produce pocos gases contaminantes.

II.5.4.2. Plasma

En el proceso de Termo-rociado por *plasma* se dispone de un material en forma de polvo el cual se inyecta en una llama de elevada temperatura. Esta se calienta rápidamente y es acelerado proyectándolo sobre el substrato. El equipo comprende básicamente un ánodo de cobre y un cátodo de tungsteno centralizados en la pistola que son refrigerados, generalmente por agua, mientras que el gas (argón, nitrógeno, hidrógeno o helio) fluye alrededor del cátodo y a través del ánodo formando una boquilla estrecha.

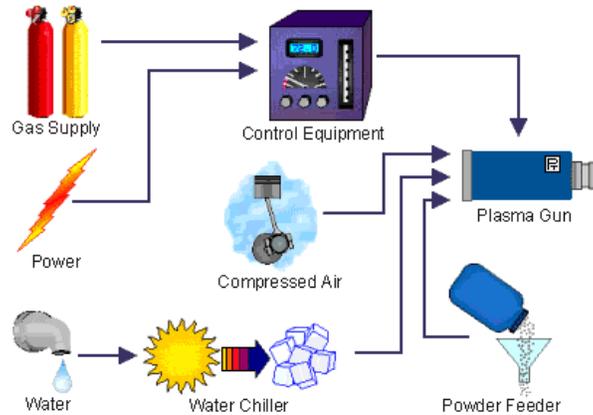


Figura 11 Equipo de Termo-Rociado por Plasma

El plasma es producido por una descarga de alto voltaje como consecuencia de una ionización localizada y un conductor que sirve para la formación de un arco de corriente continua formado entre el cátodo y el ánodo.

Este tipo de procesos ofrece una gran flexibilidad en cuanto a parámetros de control, versatilidad, resistencia a la corrosión de sus recubrimientos por ataque químico y además que pueden termorociarse materiales con punto de fusión muy altos. La desventaja principal del proceso de plasma son el alto costo relativo y complejidad del proceso.

Al igual que en el proceso por arco eléctrico las partículas que impactan se solidifican para formar rápidamente una capa que puede llamarse *proceso frío*.

**Figura 12**

Pistola utilizada en rociado por Plasma

II.6. Variables que afectan la calidad del recubrimiento

Los efectos de la velocidad y la temperatura de la partícula sobre las características del recubrimiento han sido estudiados por un gran número de investigadores.

Para producir recubrimientos de calidad se requiere un conocimiento detallado de cómo los parámetros de entrada del proceso afectan la temperatura y la velocidad de la partícula, por eso a continuación se mencionan las variables más importantes del proceso:

- 1.- La distancia del rociado.
- 2.- Relación oxígeno/combustible y la presión de la cámara.
- 3.- La morfología y procesamiento de los polvos.
- 4.- Gas de transporte.
- 5.- Flujo de alimentación de polvos.
- 6.- Longitud del cañón de la pistola.

II.6.1. Efecto de la distancia del rociado.

Yang (1966), modeló el movimiento de las partículas y su comportamiento térmico durante el proceso de termo-rociado HVOF, el cual fue validado con datos experimentales obtenidos en una pistola TAFA JP-5000. Se utilizaron polvos de la aleación INCONEL 718 (super aleación base níquel), y obtuvieron el comportamiento de la temperatura y velocidad de las partículas en función de la distancia, desde el punto de inyección de los polvos en el cañón hasta la ubicación del sustrato a recubrir. Para esta investigación se evaluaron distintos diámetros de polvo y velocidades de inyección de los mismos.

Las partículas con diámetros mayores tales como 20 y 40 micrones salen del cañón con velocidades menores a 820 y 470 m/seg, respectivamente, debido a la mayor inercia de estas partículas ellas son menos aceleradas cuando la velocidad del gas es mayor que la respectiva velocidad de las partículas. En general mientras más alta sea la velocidad de la partícula al impactar, mejor será el recubrimiento obtenido.

Esto se debe a que en una mayor velocidad simplemente compacta las partículas más densamente en el recubrimiento. Esa diferencia de velocidades para diferentes tamaños de partículas, puede explicarse por la inercia de la partícula y así por el mecanismo de aceleración y desaceleración de la misma.

Respecto al efecto de la distancia de rociado en la temperatura de la partícula, Yang y Sobolev (1966), determinaron para diversos polvos de alimentación que el comportamiento térmico de la partícula durante su viaje al sustrato depende de su morfología, tamaño, forma, temperatura inicial, de la transferencia de calor del gas a la partícula, del material de la partícula y de sus propiedades termofísicas.

De la comparación y resultados presentados por Sobolev para partículas de WC-12%Co, se tiene que la distancia de rociado para partículas relativamente pequeñas son:

Dp: $10 \mu\text{m} < 400 \text{ mm}$

Dp: $20 \mu\text{m} < 480 \text{ mm}$

Dp: $25 \mu\text{m}$ puede exceder los 500 mm

Esto significa que la distancia de rociado óptima aumenta con el peso de la partícula. Debido a que un aumento en el peso de la partícula causa una disminución en su velocidad y así un aumento en su tiempo de residencia a altas temperaturas en la llama.

Es importante destacar que el intervalo de distancias de rociado permisible y su valor máximo aumenta con el diámetro de la partícula. Las condiciones térmicas óptimas para el termo-rociado HVOF pueden ser más fácilmente alcanzadas para diámetros que estén en un intervalo entre 20 y 40 μm .

Las partículas con un tamaño mayor al intervalo de 40 μm no se fundirán adecuadamente. En cambio las partículas con un tamaño menor como partículas de 10 μm de diámetro tendrán una tolerancia muy estrecha para la distancia de rociada óptima la cual puede ser muy difícil de controlar. Con distancias de rociado mayores a la óptima las partículas pueden ser sobre enfriadas en el caso contrario debe considerarse la posibilidad de que las partículas alcancen el substrato en un estado líquido sobrecalentado lo cual causará excesiva pérdida de metal, oxidación de las mismas y la producción de recubrimiento irregulares. El sobrecalentamiento o posible sobreenfriamiento con diámetros fuera de este intervalo de tamaño, conlleva al deterioro en la calidad de los recubrimientos.

II.6.2. Relación oxígeno/combustible y la presión de la cámara.

Las variables de velocidad y temperatura de partícula son las responsables directas de la calidad del recubrimiento obtenido, por lo que, los caudales de oxígeno

y combustible y la relación existente entre ellos son los factores que a la hora de la proyección térmica de alta velocidad (HVOF), con un tipo de pistola determinado y una distribución de tamaños, composición de fases y morfologías prefijadas, pueden ser modificados con el objetivo de alterar dichas variables y así obtener una óptima calidad del recubrimiento. Sobelev (1999).

II.6.3. La morfología y procesamiento de los polvos.

La forma y tamaño de las partículas es de gran importancia en procesos como la velocidad de alimentación en la pistola, transferencia de calor y la interacción con la atmósfera durante el viaje de los polvos hacia el sustrato. Sobelev (1999), Fauchais(2001).

Los polvos obtenidos por procesos de atomización de un gas tienden a ser esféricos, mientras que los atomizados con agua y los obtenidos por molienda son angulares. Los polvos pueden tener tamaños comparables pero diferente morfología lo cual tiene una influencia significativa en las características de termo-rociado. Por tanto, además de especificarse el tamaño de los polvos, debe también indicarse la morfología de los mismos.

Los procesos de alta velocidad como el HVOF, requieren un tamaño de partícula más fino que los otros procesos de termo-rociado con plasma y llama, debido al corto tiempo de residencia de la partícula en la zona de combustión. Según Kepraski (1993), en algunos casos un tamaño de la partícula muy fino tenderá a generar esfuerzos residuales más altos en el recubrimiento y límites en los espesores del mismo, posiblemente debido a que el rápido enfriamiento reduce el tiempo para que el recubrimiento pueda relajar térmicamente los esfuerzos por deformación plástica.

II.7. Comparación entre los diferentes tipos de termo-rociados

Tabla 5

Tipo de Termorociado	Flama	Arco Eléctrico	Plasma	HVOF
Velocidad de las partículas (m/s) en el impacto	20-50	100-200	100-300	300-500
Temperatura de la partícula(°C)(medida con DPV 2000).	-	-	< 2500	< 2000
Porosidad del recubrimiento (%)	10-20	10-20	1-10	< 2
Contenido de óxido (%)	< 15	< 12	< 7	< 5
Temperatura flama/arco (°C)	2200-2700	2200-5800	2700-13800	2200-2700
Resistencia a la tracción (MPa)	10-30	10-30	20-50	> 60
Velocidad del gas (m/s)	150	150	600	> 1500
Temperatura del gas (°C)	2500	4000	15000	2800
Ventajas	Bajo costo, amplio rango de materiales	Bajo costo, alta relación de rocío	Baja porosidad, buena adhesión	Muy baja porosidad, excelente adhesión, densidad, esfuerzos a compresión,
Limitaciones	Alta porosidad, baja adherencia, limitaciones térmicas en relación al sustrato	Alta porosidad, conductor de electricidad	Altos Costos	-
Materiales	-	Zn/Al	Todos los materiales	Carburos, metales, cermets

II.8. Antecedentes

- **Diepart** en 1986, realizó una revisión de los efectos que pudiesen tener los esfuerzos residuales inducidos por el granallado en metales, encontrando que el granallado, además de mejorar la resistencia a la fatiga por cargas variables, también mejora la resistencia a la fatiga-corrosion. Esta investigación demostró que el granallado se puede usar como una herramienta de diseño para:
 - Prolongar la vida en servicio de piezas mecánicas expuestas a mayores esfuerzos.
 - Permite la reducción del tamaño de los elementos de máquina.
 - Reduce la necesidad de mejorar el acabado.
 - Reducción de costos debido al uso de materiales mas económicos.
- **Mc Adam** en 1934, investigó acerca del efecto de la corrosión en ausencia de esfuerzos sobre el comportamiento posterior de la fatiga en aire. Realizó ensayos con aleaciones de aluminio en las que las probetas eran corroídas en agua durante tiempo variable, a continuación eran sometidas a ensayos de fatiga. La corrosión previa disminuyó la resistencia a la fatiga, aumentando esa disminución con el tiempo de inmersión en el agua, pero la curva S-N para un tiempo de inmersión dado era similar, en cuanto a forma, a la curva S-N en aire.
- **F. Oliveira, L. Hernández, J. A. Berríos, C. Villalobos, A. Pertuz, E.S. Puchi Cabrera**, estudiaron el comportamiento a la fatiga corrosión para el acero AISI 4340 se evaluó bajo dos condiciones diferentes, la primera sin recubrimiento, y la segunda granallada con alúmina y recubierto con Colmonoy 88 por aplicación de termo-rociado vía HVOF. Los ensayos fueron realizados en flexión rotativa en un

medio de 3% en peso de NaCl. Los resultados indican que el comportamiento a la fatiga de las muestras recubiertas son similares a las reportadas en las pruebas al aire.

Las grietas de fatiga fueron nucleadas en las partículas de alúmina depositadas en la matriz del sustrato durante el granallado y en las picaduras por corrosión durante el ensayo. La resistencia a la fatiga del sustrato sin recubrir ensayada en solución de NaCl, ha sido menor que la ensayada al aire, y cuando el acero es recubierto con una aleación de Colmonoy 88, su vida a la resistencia corrosión aumenta sustancialmente. La observación microscópica de la superficie de fractura también mostró que bajo algunas condiciones de esfuerzos alternantes, la intercara entre el deposito y el sustrato puede ser severamente agrietada.

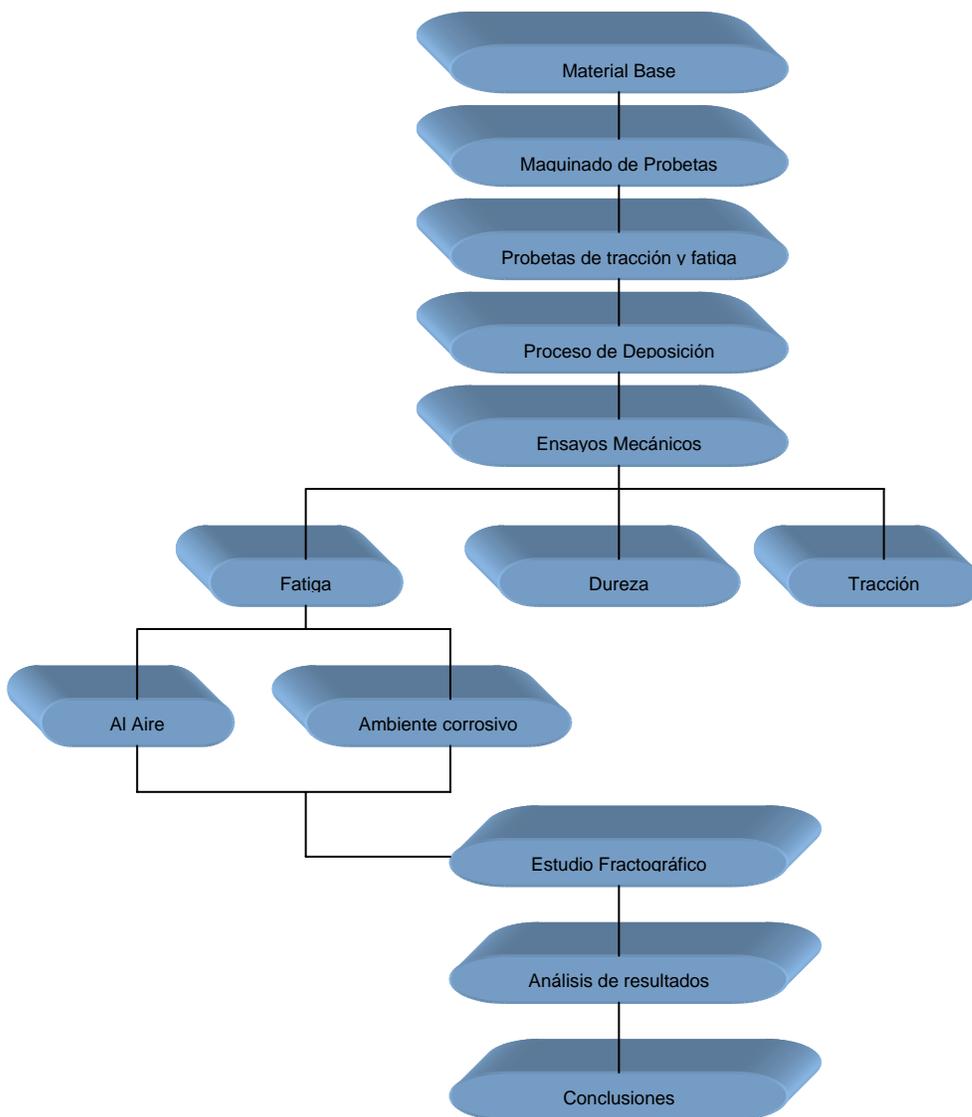
- **S. Simard, B. Arsenault**, investigaron como la tecnología HVOF ofrece una gran variedad de materiales para recubrimientos, con un buen desempeño bajo diferentes condiciones agresivas como desgaste, erosión por impacto de partículas de corrosión. Los carburos son comúnmente utilizados en los procesos de termorociado, y las nuevas tecnologías permiten un mejor control en la densidad y el contenido de los óxidos para los carburos, los cuales son parámetros importantes a considerar para las aplicaciones de corrosión. El éxito de los recubrimientos está relacionado con la selección de un material que sea capaz de ofrecer mejoras para distintas aplicaciones. Frecuentemente la falta de información sobre el comportamiento de materiales a ser usados como recubrimientos, hace difícil su selección, debido a eso se buscó caracterizar el comportamiento de diferentes carburos en diferentes ambientes corrosivos, obteniéndose que el WC-10% Co-4%Cr fue el recubrimiento mas apropiado para un medio corrosivo de HCl frente a recubrimientos como WC-12Co+35%(Cr₃C₂-NiCr).

- **J. Stokes, L. Looney**, establecieron el potencial para la producción de componentes metálicos duros para fines industriales, usando el proceso de termo-rociado via HVOF. Este estudio está enfocado en la maximización del espesor en los componentes, la dificultad de termo-rociar componentes con determinadas formas usando estas técnicas, tiende a producir esfuerzos residuales en el recubrimiento. Esto produce pérdidas a la adhesión y desprendimiento interlaminar o agrietamiento en los componentes formados. El incremento del esfuerzo residual durante el termo-rociado puede ser reducido, disminuyendo el incremento y fluctuaciones de la temperatura de impacto y estas pruebas se realizaron usando un sistema de enfriamiento de dióxido de carbono. Esto permitió continuar la deposición a una temperatura estable y así, producir un termo-rociado en componentes con determinadas formas exitosas.
- **R. Danzer**, concluyó que la fractura mecánica en los materiales cerámicos comienza con una grieta como defecto. La resistencia mecánica así como el tiempo de vida de los componentes cerámicos pueden ser mejorados, si los defectos llegan a eliminarse o a disminuirse. El estudio fractográfico es utilizado para detectar e identificar los defectos que inician la fractura, para detectar e identificar partes débiles en la microestructura, además para análisis de falla y de carga. Toda esta información es de suma importancia ya que se puede mejorar y controlar el proceso de materiales cerámicos, optimizando las propiedades mecánicas con una microestructura deseable, además permite analizar fallas en componentes cerámicos. En general, la observación de superficies fracturadas y el estudio de la correlación entre el avance de grieta y la trayectoria de fractura, es de suma importancia para el entendimiento y el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los materiales.

CAPITULO III

Metodología Experimental

III.1. Diagrama Experimental



III.2. Caracterización del material base

Las probetas fueron fabricadas de una aleación de aluminio de la serie 6xxx por extrusión, las cuales contienen como principales componentes magnesio y silicio.

III.3. Maquinado y preparación de las probetas

El maquinado de las probetas de fatiga y tracción fue realizado en tornos de control numérico en el Taller Metalmecánico JV C.A., ubicado en la carretera Caracas-Guarenas, sector Turumo; de acuerdo a las normas **ASTM E-606** y **ASTM A-370** respectivamente.

Una vez fabricadas las probetas se procedió a dar el acabado superficial adecuado, para ello se procedió al lijado y pulido de la sección de ensayo de las probetas de fatiga el cuál fué realizado en un torno a baja velocidad en dirección longitudinal en relación al eje de la probeta, con el fin de producir un lijado diagonal libre de entallas circunferenciales, las cuales podrían ser fuentes de inicio de grietas por fatiga. Las probetas de tracción fueron lijadas y pulidas de igual forma que las probetas de fatiga con el fin de obtener la misma homogeneidad en el espesor y en la adhesión del material de recubrimiento, así como también propiciar una menor dispersión de los datos de fatiga.

El diámetro de los hombros de las probetas de fatiga-corrosión de los materiales con y sin recubrimiento es comúnmente de 12.7 mm, y la longitud de 101.6 mm, esto es lo sugerido por el fabricante del equipo, y lo especificado en los manuales de la empresa **Fatigue Dynamics**.

En lo referente a las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de fatiga de radio continuo, estos son los siguientes: diámetro menor de la sección de ensayo

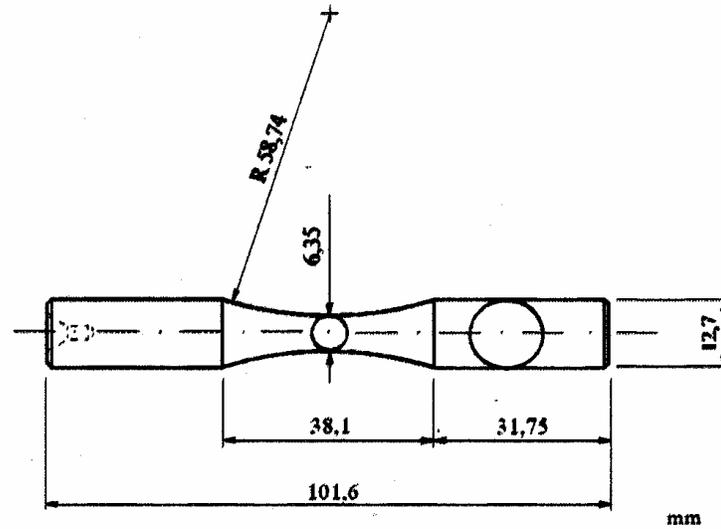
(d_o) aproximadamente igual a 6.35 mm, radio continuo de la sección de ensayo de la probeta (R) igual a 58.74 mm.

Por otra parte, el dimensionamiento de los hombros de las probetas de tracción de los materiales con y sin recubrimiento, también es de 12.7 mm, ya que estas probetas deberán ser extraídas de las mismas barras de aluminio utilizado para la construcción de las probetas de fatiga. Además, la longitud de las probetas de tracción fue de 120 mm, ya que las mordazas de la máquina donde se realizó puede alojar probetas de 120 mm de longitud mínima sin la utilización de barras o accesorios de extensión.

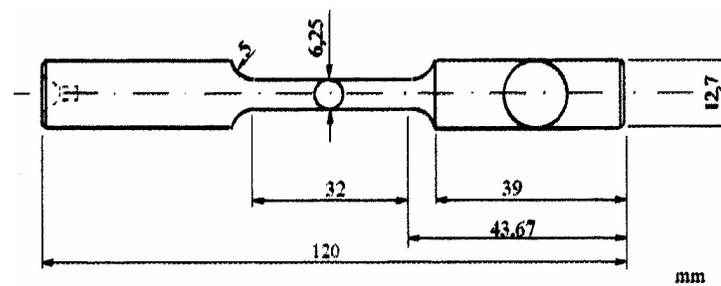
En lo referente a las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de tracción, estas deben cumplir con las recomendaciones sugeridas por la norma **ASTM A-370**. Dichas dimensiones son: diámetro de la sección de ensayo (d) igual a 6,25 +/- 0,12 mm, la longitud de la sección de ensayo de 32 mm y radio de filete entre la sección de ensayo y el hombro de la probeta (R) igual a 5 mm.

Adicionalmente, basado en las normas **ASTM E-739** y **A-370** se estableció que para la obtención de una ecuación confiable de Basquin se necesitan ensayar entre 12 y 24 probetas de fatiga y para poder reportar confiablemente las propiedades estáticas se necesitan en ensayar como mínimo 3 probetas de tracción.

Así mismo se maquinaron probetas cilíndricas que fueron utilizadas para realizar los ensayos de microindentación estática y análisis composicional, estas se obtuvieron realizando cortes del material base, manteniendo el mismo diámetro (1pulg) y una altura de 1 a 1,5 cm, estas probetas fueron llevadas a la empresa **Plasmatec Ing. C.A** para realizar los recubrimientos. Para este tipo de probeta no existe norma de elaboración.

**Figura 13**

Dimensiones de las probetas de fatiga.

**Figura 14**

Dimensiones de las probetas de tracción

III.4. Deposición de los recubrimientos

El proceso de deposición de los recubrimientos de la aleación base níquel de alta resistencia al desgaste **W-17%Cr-15%Si-4%** denominado comercialmente **Colmonoy 88** por termorociado vía HVOF se realizaron en la empresa **PLASMATEC Ing, C.A.**

III.5. Preparación de las muestras metalográficas

1- Corte de las muestras.

Las muestras fueron cortadas transversalmente utilizando una cortadora con disco abrasivo marca BUEHLER, modelo ABRASIMET 2, ubicadas en el Laboratorio de Aluminio de la Escuela de Metalurgia UCV.

2- Pulido de las muestras.

Con el fin de manipular las muestras, éstas fueron montadas en una resina termoestable, específicamente polvo transóptico, a una presión de 4400 psi, 160° y 8 minutos de duración, en un equipo BUEHLER, modelo SIMPLIMET 2, ubicadas en el Laboratorio de Aluminio de la Escuela de Metalurgia UCV.

Las muestras fueron pulidas siguiendo los pasos de desbaste con papel de lija de agua de diferentes rugosidades y un pulido con paño CHEMOMET BUEHLER, utilizando alúmina de distinta granulometría, finalizando el proceso de pulido con paños de lona y fieltro para obtener muestras libres de rayas y una superficie tipo espejo.

3- Ataque de las muestras.

Para poder observar al microscopio las muestras, estas fueron atacadas electrolíticamente con ácido fluorhídrico al 2% con 22 voltios, durante 30 segundos, y utilizando electrodos de acero inoxidable. Esto con la finalidad de revelar la microestructura del metal base.

III.6. Microindentación estática y ensayo de dureza del conjunto

Las muestras fueron ensayadas tanto en su corte longitudinal como en el transversal, con la finalidad de determinar la dureza del material base, el recubrimiento, y el conjunto substrato-recubrimiento. Para ello se utilizó un microdurómetro, con un penetrador Vickers (pirámide de diamante con base cuadrada

con ángulo de 136° entre caras) y se utilizó un barrido de cargas: 25,50,100 y 200 gramos. Para este ensayo se disponía de un Software que controlaba la platina motorizada del equipo de microindentación y de esta forma permitía diseñar una plantilla, la cual reproducía los puntos de análisis durante los ensayos. La plantilla se diseñó para realizar 24 medidas, 6 medidas x 4 niveles de carga a una distancia de 300 μm entre cada punto de estudio, para evitar el endurecimiento por deformación creado por el indentador en cada penetración al material adyacente a la huella, luego a través del Software se realizó la medida de las diagonales de la huella y posteriormente a través de la ecuación estándar de Vickers se estimó la dureza como función de la carga aplicada y el valor de las diagonales de la huella. Dicha ecuación se presenta a continuación:

$$HV := 2P \cdot \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

Una vez realizados los ensayos se procedió a graficar los valores de **Dureza vs Inverso de la diagonal promedio** y de la **Dureza vs Carga aplicada**, para así determinar si existe alguna dependencia por efecto de tamaño de huella en el comportamiento de dureza del conjunto y poder observar si el proceso de deformación provocó algún cambio en la microestructura del material.

III.7. Ensayos de tracción

El ensayo de tracción se realizó a 3 probetas, diseñadas y elaboradas para este tipo de ensayo según la norma descrita anteriormente, en una máquina Instron modelo 8502, los cuales fueron controlados por medio de una computadora empleando para ello un programa de ensayo de materiales en el cual se utilizó una velocidad de desplazamiento de la mordaza móvil (actuador) de 3 mm/min y los

datos tanto de alargamiento como de carga aplicada fueron registrados en la misma computadora a una frecuencia de 3 seg^{-1} .

Se realizaron mediciones tanto al diámetro inicial como del diámetro final mediante un Vernier digital, para determinar el área inicial (A_0) de la sección transversal de la probeta.

Los datos obtenidos durante el ensayo a saber; **Carga Vs Alargamiento** fueron corregidos para obtener los valores reales de alargamiento experimentados por la probeta.

III.7.1. Obtención y corrección de los datos de tracción

Se realizó una corrección a los datos de alargamiento con el fin de eliminar el efecto de deformación elástica de los componentes de la máquina involucrados en el sistema de ensayo (mordaza, actuadores, extensiones, etc.).

La ecuación utilizada para realizar dicha corrección es la siguiente:

$$\Delta L_i(\text{prob}) := \Delta L_i(\text{exp}) - F_i \cdot \left(\frac{K_{\text{prob}} - K_{\text{exp}}}{K_{\text{exp}} \cdot K_{\text{prob}}} \right) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde K_{exp} y K_{prob} son la rigidez experimental y rigidez teórica del material de la probeta, respectivamente. Dichas cantidades se expresan por:

$$K_{\text{exp}} := \frac{\sum F_i}{\sum \Delta L_i} \quad (\text{Ec. 3.2}) \quad \text{y} \quad K_{\text{prob}} := A_0 \cdot \frac{E}{L_0} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

donde:

A_o : es el área transversal de la sección de ensayo de la probeta.

E : es el módulo de elasticidad del material.

L_o : es la longitud inicial de la sección de ensayo de la probeta.

Para obtener los resultados más precisos y de forma más rápida hemos realizado un programa en hoja de cálculo Excel con los datos ordenados para cada probeta.

Estos ensayos se realizaron con la finalidad de obtener el límite de fluencia y la resistencia a la tracción del material para poder seleccionar los niveles de esfuerzo para diseñar los ensayos de fatiga en flexión rotativa sin producir fluencia en el material, así como también, observar algún efecto que a consecuencia de la presencia de la película o del proceso de deposición puede haber afectado el desempeño del conjunto en comparación con el material base.

Una vez obtenidos los valor de alargamiento corregido $(\Delta L_i)_{corr}$, para cada estado de carga correspondiente (F_i), se procederá a construir la curva de **Esfuerzo vs Deformación Real (σ vs ϵ)** a partir de la curva **Esfuerzo vs Deformación ingenieril (S vs e)**, según las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo ingenieril : } S_i = \frac{F_i}{A_o} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

$$\text{Deformación ingenieril: } e_i = \frac{(\Delta L_i)_{corr}}{L_o} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$\text{Esfuerzo real: } \sigma_i = S_i(1 + e_i) \quad (\text{Ec. 3.6})$$

$$\text{Deformación real: } \epsilon_i = Ln(1 + e_i) \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Con estos resultados se obtuvieron diversos parámetros como son : esfuerzo de fluencia (σ_y) a 0,2 % de la deformación efectiva

III.8. Rociado de abrasivo (Blasting)

Los revestimientos termo-rociados se unen al sustrato principalmente por anclaje mecánico, razón por la cual es importante determinar el efecto de rugosidad del material base sobre la calidad de los revestimientos. Este tipo de sistema de rociado esta basado en el bombardeo de pequeñas partículas abrasivas a gran velocidad sobre la superficie metálica, produciendo una superficie limpia a metal blanco. Puede utilizarse distintos tipos de abrasivos como: metales, arenas sílicas o no sílicas.

El valor del promedio aritmético de la rugosidad “Ra” adecuado para las operaciones de termo-rociado están en el intervalo de 2,5 a 13 μm y en general la adherencia de un revestimiento termo-rociado mejora si la rugosidad aumenta, pero esto depende del tipo de sustrato.

Para un sustrato de bajo punto de fusión, la rugosidad mínima requerida es mayor que, para sustrato con puntos de fusión altos. Se recomienda que la rugosidad sea al menos 2/3 del diámetro del polvo que se utiliza para termo-rociar.

El tiempo de rociado de abrasivo es un factor importante en el proceso; existe un tiempo óptimo para lograr una rugosidad máxima que generalmente es de 3 minutos.

La distancia pieza-boquilla influye en la rugosidad obtenida; se recomienda que la distancia este entre 10 y 20 cm, en el caso de sustratos blandos se recomienda alejar unos 30 cm la boquilla.

El método de rociado de abrasivo consta de tres etapas: formulación del baño, condiciones de operación y preparación del material.

III.8.1. Pasos para la preparación de la superficie mediante rociado de abrasivo.

- Remover todos los agentes contaminantes de la superficie, tales como: costras, grasa y pintura a través de procesos adecuados. Con la finalidad de limpiar la superficie de las probetas, el primer paso fue lavar las probetas para remover los agentes contaminantes con un solvente preparado (en este caso, thinner), luego se procedió a precalentar la superficie de las probetas con el objeto de eliminar la humedad.
- Seleccionar adecuadamente el abrasivo a aplicar de acuerdo a la dureza del sustrato. En nuestro caso, las muestras fueron preparadas con un chorro abrasivo de óxido de aluminio.
- Para sustratos metálicos, el tamaño de la partícula varía entre 1.4 y 0.21 μm , produciendo una remoción más rápida del sustrato y acabados más ásperos. El tamaño de las partículas utilizadas para la preparación de las muestras fue de aproximadamente 0.5 μm de diámetro.
- La presión de aire para el soplado debe estar entre 207 y 6990 KPa, dependiendo del material del sustrato, tipo de acabado de la superficie, flujo, peso, tamaño de las partículas abrasivas y del tipo de máquina y tobera a utilizar. En nuestro caso, el óxido de aluminio utilizado para el proceso de rociado abrasivo, fue inyectado en una boquilla con una presión de chorro de 621 kPa.

- Dirigir el chorro abrasivo a la superficie con un ángulo de rociado de 75 a 90°, y moverse de lado a lado hasta cubrir completamente la superficie.
- La distancia entre la tobera y el sustrato varía entre 10 y 30 cm, dependiendo del tipo y tamaño de la tobera, y la capacidad del equipo de soplado. En la preparación de nuestras muestras, la distancia de impacto de la partícula con el sustrato fue de aproximadamente 30 cm.
- Las probetas se giraron manualmente para realizar el proceso de rociado de abrasivo.

III.9. Proceso de Termorociado vía HVOF

Previo al ensayo de fatiga, las probetas fueron recubiertas con un cermet compuesto por una aleación base níquel de alta resistencia al desgaste **W-17%Cr-15%Si-4%**, por termorociado vía HVOF (High Velocity Oxy-Fuel), utilizando una pistola para HVOF modelo JP5000, este proceso involucra una serie de parámetros que a continuación se mencionan:

Tabla 6
Parámetros utilizados para el termorociado

Parámetros	Condiciones
Flujo de oxígeno	1850 scfh
Flujo de combustible (Kerosene)	0,3785 L/min.
Flujo de termorociado	98 gr/min
Flujo de gas de transporte (N ₂)	0,01085m ³ /min
Velocidad de alimentación de polvos	330 rpm
Presión de combustible (en la cámara)	710,16 ± 34,47 KPa
Presión de inyección de oxígeno	930,79 ± 68,94 KPa
Presión de inyección de combustible	827,37 ± 68,94 KPa
Longitud de cañón de la pistola	6-8 pulg.(152,4 – 203,2 mm)
Distancia de rocío	15 pulg. (380 mm)
Espesor por paso	0.0127 mm
Espesor máximo de recubrimiento	1.3 mm

III.10. Ensayo de fatiga y fatiga-corrosión

Los ensayos de fatiga y fatiga-corrosión se realizaron en una máquina de flexión, diseñada para aplicar ciclos de carga de inversión completa de flexión rotativa en voladizo en probetas de forma cilíndrica, el equipo incluye un contador de velocidad (rpm) para contabilizar los ciclos a falla y una barra calibrada con un contrapeso la cual se utiliza para aplicar el momento flector responsable de generar el esfuerzo al cual están sometidas las probetas durante el ensayo.

Para crear una atmósfera corrosiva durante el ensayo, la máquina esta provista de una cámara independiente, donde el medio corrosivo es una solución salina preparada con un 3% en peso de cloruro de sodio (NaCl). El rociado de dicha solución salina sobre la superficie de la probeta se realizó por medio de una boquilla de distribución fijada en la parte superior de dicha cámara de corrosión. La ubicación de la boquilla coincide aproximadamente con el diámetro mínimo de la probeta a ensayar, obteniendo de esta forma una gota de solución por segundo, el flujo continuo de la solución se garantizó mediante el uso de una bomba eléctrica de desplazamiento positivo inmersa en un depósito para la succión del líquido y luego descarga.

Se realizaron **16** ensayos para las probetas de fatiga al aire con recubrimiento y **16** para las probetas de fatiga corrosión a cuatro niveles de esfuerzos (**172,147,120 y 96 MPa**), todos ellos inferiores al esfuerzo de fluencia determinado en el ensayo de tracción, para cada uno de estos niveles de esfuerzos se ensayaron **4** probetas.

El montaje de las probetas se realizó sujetando sus extremos mediante mordazas acopladas al eje del motor y a un eje cónico a través del cual se aplica una carga sobre la probeta, ya que el mismo esta unido a una barra graduada en función del momento flector “M” el cual es producido por un contrapeso móvil. En vista que el nivel de esfuerzo necesario en cada ensayo se aplica a través de la barra calibrada en función del momento flector, se debe calcular el valor del momento flector para cada uno de los niveles de esfuerzo preestablecido. Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$S = \frac{M * C}{I} \Rightarrow M = \frac{S * I}{C} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

M : es el momento flector dado en N.m.

S : es el esfuerzo aplicado en MPa.

I : es el momento polar de inercia dado en mm^4 .

C : es la distancia desde el eje neutro de carga hasta la superficie de la probeta dado en mm.

$$C = D/2, D \text{ es el diámetro de la probeta en mm} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Para una barra circular, se tiene que :

$$I = \frac{\pi * D^4}{64} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Sustituyendo se tiene que:

$$M = \frac{S * \pi * D^3}{32} \quad (\text{Ec.3.11})$$

Todos los ensayos de fatiga se realizaron a una frecuencia de 50 Hz y a una velocidad promedio entre 2800 y 3200 rpm, aunque este último no tenga mayor repercusión en los resultados, se ensayaron a una misma velocidad para disminuir la dispersión de los resultados. Los datos obtenidos de estos ensayos fueron los de número de ciclos a falla de las probetas para cada uno de los niveles de esfuerzo.

III.11. Construcción de la curva de Whöler

Para representar los datos de los ensayos de fatiga-corrosión de una forma ordenada y al mismo tiempo con una rápida visualización de los resultados con facilidad para la comparación de los distintos recubrimientos con el sustrato, se representaron los datos obtenidos en las pruebas de fatiga en una gráfica denominada curvas de Whöler, en la cual se colocan los esfuerzos alternantes (**S**) en el eje de las ordenadas del diagrama, y el número de ciclos a falla (**N**), en el eje de las abscisas.

III.12. Determinación de los parámetros de la ecuación de Basquin.

Para una mayor comodidad, la curva S-N o curva de Whöler fue representada en escala doble logarítmica, colocando el logaritmo decimal de los esfuerzos alternantes (**log S**) en el eje de las ordenadas, contra el logaritmo decimal del número de ciclos a falla (**log N**) en el eje de la abscisas, transformando de esta manera la curva en una línea recta, la cual es representada mediante la ecuación sugerida por Basquin:

$$S_a = S_f(N)^b \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Donde:

S_a : es la resistencia a la fatiga del material.

S_f : es el coeficiente de resistencia a la fatiga.

N : es el número de ciclos.

b : es el exponente de Basquin.

Este método se aplicó a las probetas recubiertas con la aleación base níquel de alta resistencia al desgaste **W-17%Cr-15%Si-4%** y se tomó de la literatura los datos de esta ecuación para el material base, tanto para fatiga al aire como para fatiga-corrosión, esto para poder realizar la comparación entre todas ellas. Las ecuaciones de Basquin obtenidas fueron realizadas aplicando el método de regresión lineal recomendado por la norma **ASTM E-739**

III.13. Determinación del tamaño de grano.

- 1.- Las intersecciones con los límites se cuentan como un (1) punto.
- 2.- Las intersecciones con los puntos triples de grano se cuentan como uno y medio (1,5) puntos.
- 3.- Los segmentos a los extremos de una línea de ensayo que se penetran en un grano se cuentan como medio (0,5) punto.
- 4.- Una intersección tangencial con un grano se cuenta como un (1) punto.

5.- El número total de puntos así contados se denota como N.

6.- Se determina el número de intersecciones o interceptados por mm (NL) mediante la relación siguiente:

$$N_l = \Sigma N / L_t \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Donde N es el número total de intersecciones con cada línea de ensayo y L t es la longitud total de cada línea de ensayo.

Longitud promedio (mm) de intercepto lineal : (Parámetro análogo al diámetro promedio de grano Dp)

$$L_3 = D_p = 1/N_l \quad (\text{Ec. 3.14})$$

III.14. Caracterización del conjunto

III.14.1. Estudio fractográfico (MEB)

La evaluación fractográfica se realizó por medio de un microscopio electrónico de barrido (**MEB**) con un voltaje de aceleración de 25 KV, básicamente se utilizaron dos modos de imagen, a saber, electrones secundarios para el estudio de la superficie de fractura y electrones primarios en el análisis de secciones perpendiculares a la superficie a fin de detectar grietas paralelas a la grieta principal. Adicionalmente se garantizó un ángulo de incidencia no mayor de 60°, pudiendo de esta manera reportar dimensiones reales a partir de las fotomicrografías obtenidas, donde sólo se evaluaron las probetas con recubrimiento que fallaron a un número de ciclos próximos al promedio calculado para el nivel de esfuerzo correspondiente. La observación se realizó sobre la superficie de la grieta principal de fractura para ubicar las zonas de avance de grieta por fatiga, transición y de sobrecarga, así como también los

potenciales puntos de inicio, ello también permitirá inferir el modo de propagación de las grietas.

III.14.2. Preparación de la muestras para la microscopía electrónica de barrido (MEB)

De las probetas fracturadas por fatiga la mitad de cada probeta fué cortada a unos 6 mm, de la zona de fractura para poder montarlas en el microscopio, para ello se utilizó una máquina cortadora de disco abrasivo, para observar los puntos de inicio de la grieta o grietas. A la otra mitad de la probeta se le realizó un corte longitudinal por el centro de la superficie fracturada y luego un corte transversal a unos 7 mm de la zona de fractura, para este caso se empleó una máquina cortadora con disco de diamante, esto con el objeto de terminar en que lugar se forma la grieta, ya que puede originarse en la intercara recubrimiento-sustrato, en el sustrato o en el recubrimiento.

A todas las muestras se le realizó una limpieza con acetona en el equipo de ultrasonido durante 20 a 30 minutos, manteniendo la zona de fractura hacia abajo y totalmente sumergida, y luego se limpiaron con alcohol y secadas con aire caliente, todo esto con la finalidad de eliminar productos de grasa u óxidos depositados en la superficie de fractura. Las muestras fueron montadas en unas bases metálicas del microscopio, utilizando para ello adhesivos conductores para su fijación en la cámara del microscopio.

III.15. Descripción de los equipos

III.15.1. Máquina de Tracción

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina universal de ensayos mecánicos, marca Instron, modelo 8502, ubicada en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Metalurgia de la UCV. Estos ensayos fueron controlados por medio de un programa de computadora de ensayos mecánicos a una velocidad del actuador de 3mm/min.



Figura 15
Maquina de tracción

III.15.2. Máquina de Fatiga

Los ensayos de fatiga y fatiga corrosión se realizaron en una máquina de flexión rotativa fabricada por Fatigue Dynamics Inc. Modelo RBF-200 ubicada en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Metalurgia de la UCV. La máquina está diseñada para aplicar ciclos de cargas a inversión completa en voladizo sobre probetas en forma cilíndrica; esta Máquina posee un contador de ciclos y un regulador de velocidad que puede variar las revoluciones entre 500 y 10.000 rpm. Adicionalmente es posible acoplar al equipo una cámara capaz de gotear continuamente una solución salina sobre la sección calibrada de la probeta.



Figura 16
Maquina de fatiga

III.15.3. Cortadora de Disco Abrasivo

Los cortes de las probetas para microscopía fueron realizados en la cortadora con disco abrasivo marca BUEHLER, modelo ABRASIMET 2, perteneciente al Laboratorio de Aluminio de la Escuela Metalurgia de la UCV.



Figura 17
Cortadora de disco abrasivo

III.15.4. Máquina de Pulido

III.15.4.1. Máquina de pulido mecánico

El pulido de las probetas fue realizado en la máquina de pulido mecánico marca BUEHLER modelo ECOMET5.



Figura 18
Máquina de pulido mecánico

III.15.4.2. Máquina de pulido por vibración

El pulido final de las probetas fue realizado en la máquina de pulido marca BUEHLER modelo VIBROMET2.

Ambas máquinas pertenecen al Laboratorio de Aluminio de la Escuela de Metalurgia de la UCV.



Figura 19

Máquina de pulido por vibración

III.15.5. Cortadora de Precisión

Los cortes longitudinales y transversales de las probetas para la microscopia electrónica fueron realizados en la cortadora de precisión con disco de diamante, marca BUEHLER, modelo ISOMET 2000, perteneciente al Laboratorio de Aluminio de la Escuela de Metalurgia de la UCV.

III.15.6. Equipo de Microindentación Estática

Se utilizó un equipo durómetro modelo Leco M-400H acoplado a un sistema de análisis de imagen Leco 3001, perteneciente al Laboratorio de Análisis de superficie ubicado en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de laUCV



Figura 20

Equipo de Microindentación Estática

III.15.7. Microscopio electrónico de barrido

Se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido marca Phillips, modelo XL 30, con un voltaje de aceleración de 25 KV perteneciente al Laboratorio del Instituto Universitario Tecnológico.

III.15.8. Máquina embutidora.

Se utilizó una Máquina para embutición marca BUEHLER, modelo SIMPLIMET 2 perteneciente al Laboratorio de Aluminio de la Escuela de Metalurgia de la UCV.



Figura 21
Máquina embutidora

CAPITULO IV

Análisis y Resultados

IV.1. Caracterización del sustrato

Con la finalidad de comparar el tamaño de grano promedio entre el material base (**Aluminio 6063-T6**) y el conjunto sustrato recubrimiento (**material base más aleación base níquel W-17%Cr-15%Si-4%**), se procedió a realizar un estudio comparativo en dos zonas específicas de la sección transversal de ambas muestras. En las **figuras 22, 23**, se muestran la distribución de los granos en el borde del material base y la intercara del conjunto base-recubrimiento, mientras que en las **figuras 24 y 25**, se puede observar el tamaño de grano tanto en la zona central del material base como en el conjunto sustrato - recubrimiento.

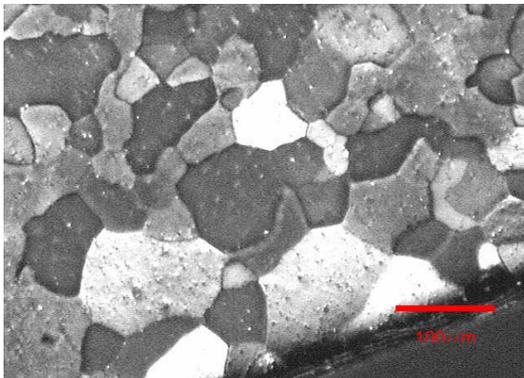


Figura 22
Sección transversal en el borde
del Aluminio 6063-T6

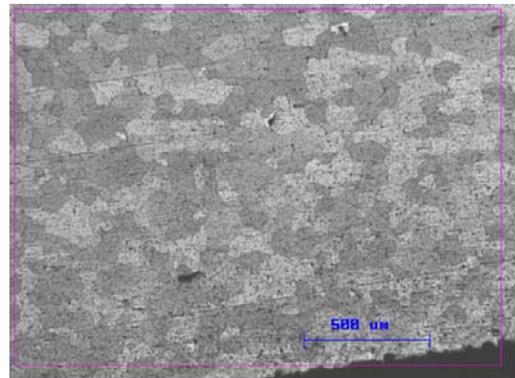
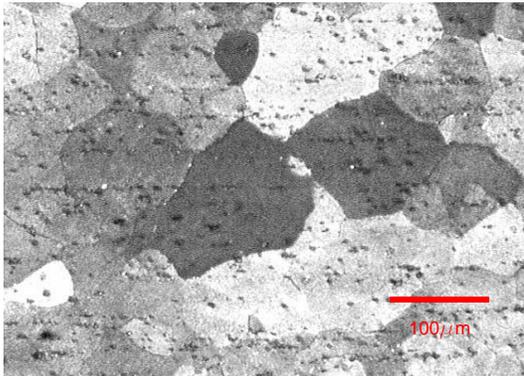
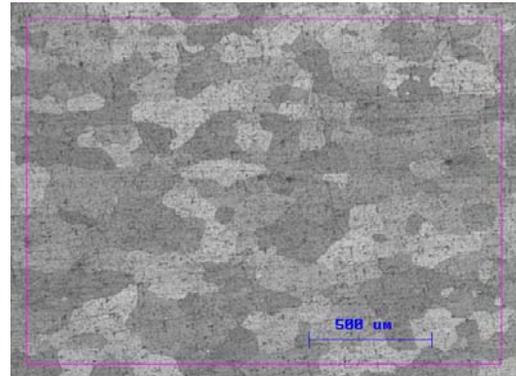


Figura 23
Sección transversal en el
borde del Aluminio 6063-T6
recubierto.

**Figura 24**

Sección transversal en la zona central del Aluminio 6063-T6

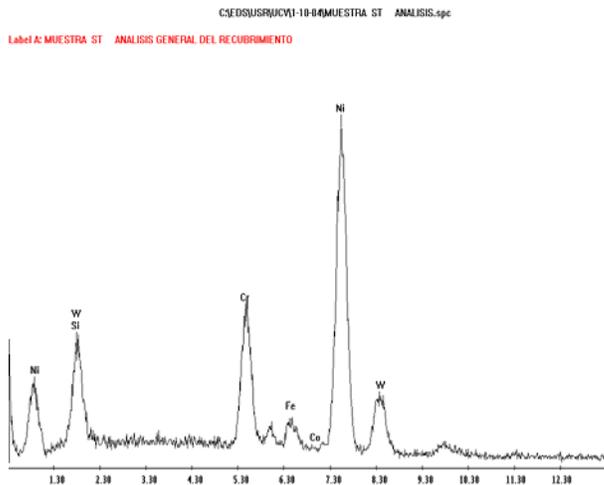
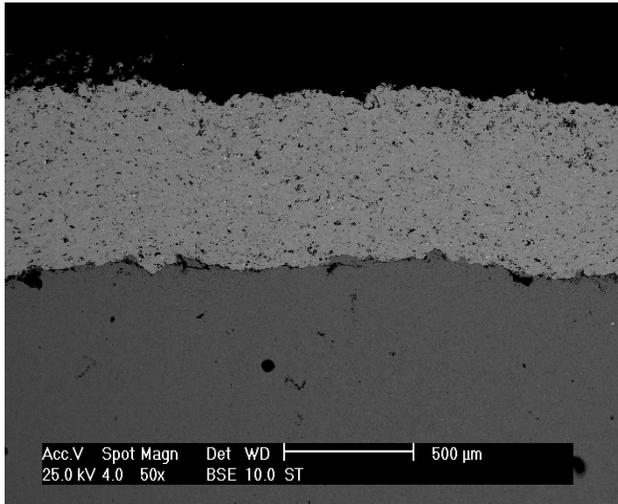
**Figura 25**

Sección transversal en la zona central del Aluminio 6063-T6 recubierto

En el análisis hecho a la microestructura del sustrato, se pudo observar como el tamaño de grano del material base, medido en la sección transversal correspondiente a la zona cercana al borde fue de 50 μm , mientras que para la zona central fue de 64,8 μm . Estos valores de tamaño de grano son característicos de materiales que han sido extruidos como en el caso del aluminio de la serie 6063-T6.

El tamaño de grano medido para la sección transversal, específicamente en la zona central del material base después de aplicado el recubrimiento fue de 63,8 μm , mientras que la zona cercana al borde fue de 58,5 μm . Basados en estos resultados se puede inferir que la aplicación del recubrimiento por el método de HVOF no produjo ningún cambio significativo en el tamaño y forma de los granos que conforman la microestructura del material base.

IV.2. Caracterización del recubrimiento



Vista general del deposito de Colmonoy 88 sin tratamiento térmico, se aprecia gran cantidad de poros en especial en la zona cercanas a la intercara o en la misma intercara los cuales son de mayor tamaño, adicionalmente tenemos un análisis por espectroscopia por dispersión en energías de rayos X tomado de manera general a partir del cual se puede apreciar la naturaleza elemental del recubrimiento, teniéndose un aproximado de la relación porcentual de los mismos.

Figura 26 Vista general del deposito de Colmonoy 88.

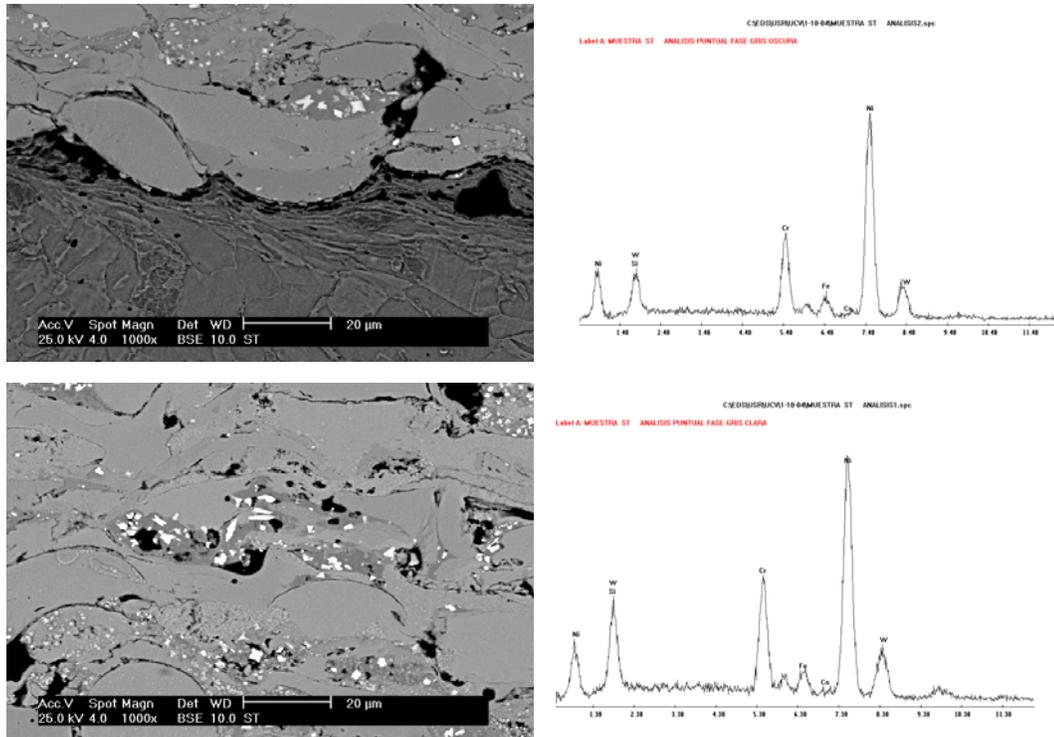


Figura 27 Fotomicrografías (a) y (b)

En la **figura 27 fotomicrografías (a)** se puede observar en detalle de la intercara substrato recubrimiento en donde se pueden apreciar dos cosas en particular; la alta deformación que presenta el substrato producto del choque de las particular abrasivas durante el proceso de adecuación de la superficie para la aplicación del deposito y el segundo aspecto es la presencia de poros en dicha intercara. Así mismo es posible observar en la **fotomicrografia (b)** la presencia de una estructura lamelar típica de este tipo de técnicas en donde también es clara la presencia de partículas no fundidas o semi-fundidas de tonalidad gris clara, las cuales corresponden al material del deposito original mayoritariamente constituido de Níquel, de igual forma las

zonas gris oscuras, también se corresponden a una zona químicamente afín con el material original, claro esta, con diferencias apreciables en la distribución porcentual de Tungsteno, la microestructura, totalmente heterogénea, es producto de procesos de aleación mecánica que tiene lugar durante la deposición del recubrimiento.

Finalmente se tiene la **figura 28** en donde se sigue evidenciando todas las características anteriormente descritas, con la identificación de una tercera fase blanca correspondiente posiblemente a Carburos o Boruros de tungsteno, verificación que no es posible tener a través de la técnica utilizada. Es importante tener en consideración que una estructura con estas características podría suscitar marcadas heterogeneidades en el sólido en cuanto a sus propiedades mecánicas en especial la dureza y otras tantas de carácter superficial.

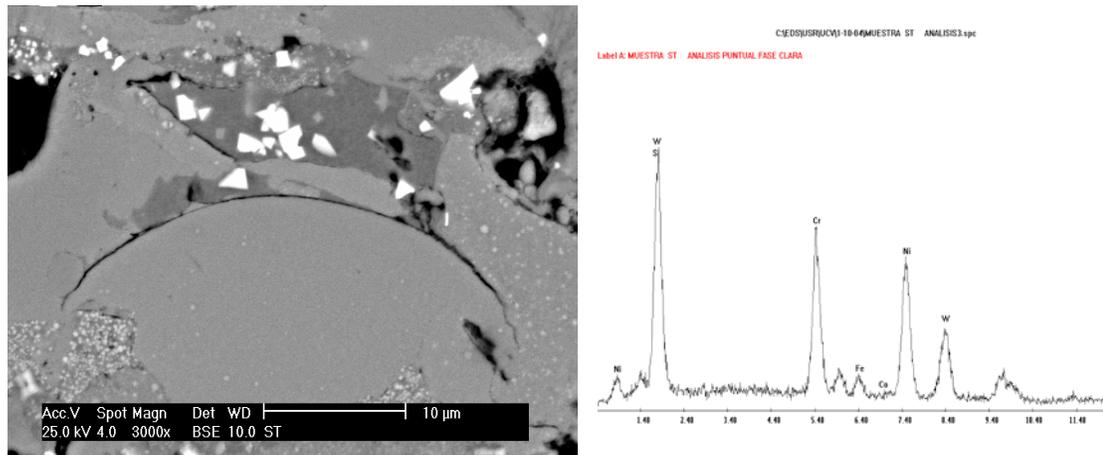


Figura 28 Ampliación Fotomicrografía

IV.3. Resultados de dureza

En las **tablas 7, 8 y 9**; se muestran los valores de la dureza producto de un barrido de cargas aplicadas a dos muestras, una muestra del material base (aluminio

6063-T6) sin aplicación de recubrimiento y otra muestra del mismo material recubierto con Colomoy 88, donde se aplicaron las cargas sobre el substrato, para determinar si el proceso de deposición produce cambios en las propiedades intrínsecas del material base. También se muestran los valores de dureza obtenidos en el recubrimiento y en la intercara y centro del material recubierto

Tabla 7 Dureza vickers para la sección transversal del aluminio 6063-T6

Carga (g)	Aluminio Base			
	Diagonal Promedio (mm)	Dureza Vickers (HV)	Dureza Vickers (GPa)	1/dprom
25	0.025	73.19	0.717	39.73
50	0.035	72.88	0.714	28.03
100	0.047	82.18	0.805	21.05
200	0.070	74.97	0.734	14.21

Tabla 8 Dureza vickers para la sección longitudinal del aluminio 6063-T6

Carga (g)	Aluminio Base			
	Diagonal Promedio (mm)	Dureza Vickers (HV)	Dureza Vickers (GPa)	1/dprom
25	0.025	71.75	0.70	39.34
50	0.035	73.91	0.72	28.23
100	0.049	74.42	0.72	20.03
200	0.070	75.50	0.73	14.26

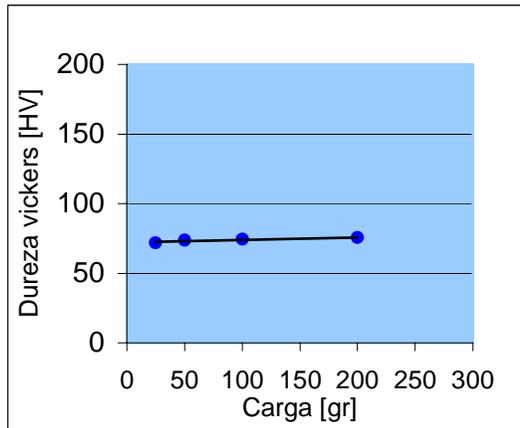


Figura 29
Dureza sección longitudinal del Aluminio 6063-T6

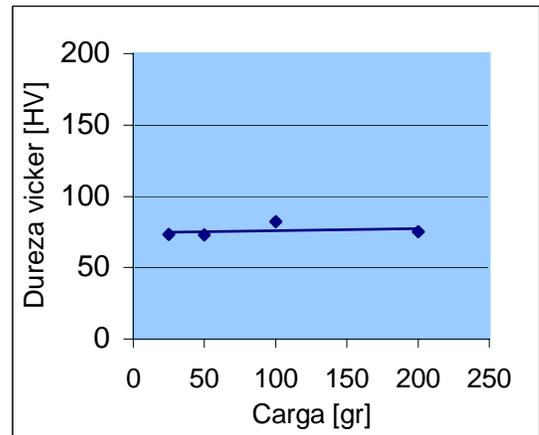


Figura 30
Dureza sección transversal del Aluminio 6063-T6

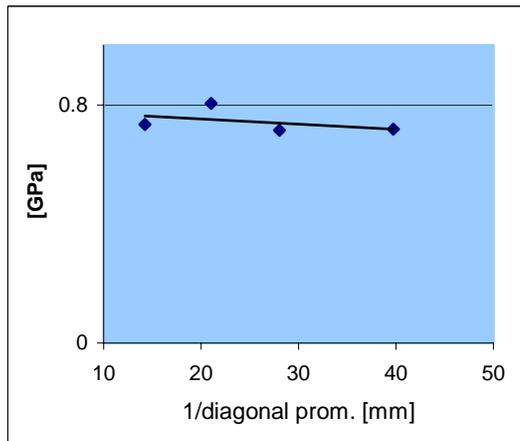


Figura 31
Dureza vs inverso de la diagonal promedio para la sección longitudinal del Aluminio 6063-T6

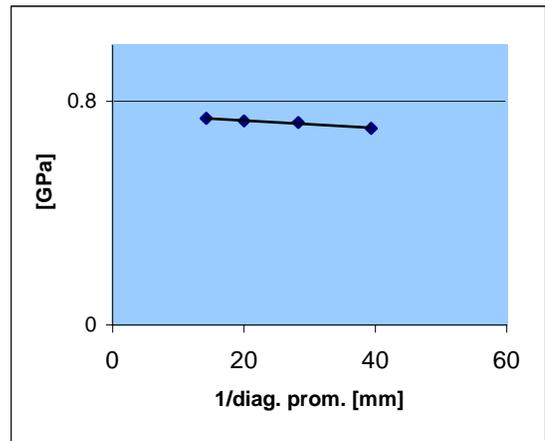
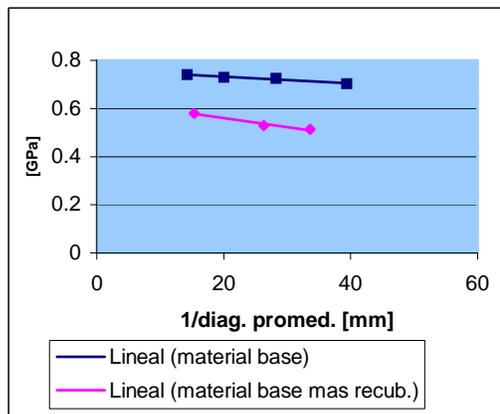


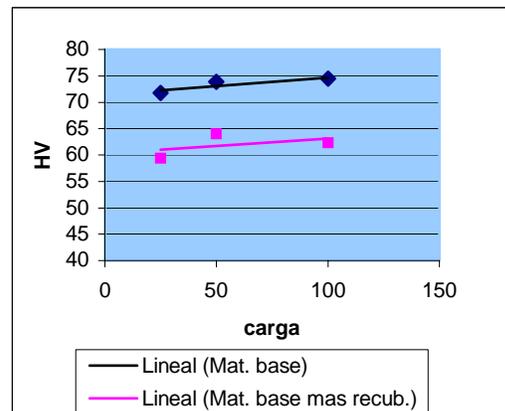
Figura 32
Dureza vs inverso de la diagonal promedio para la sección transversal del Aluminio 6063-T6

Tabla 9 Dureza vickers para la sección central del aluminio 6063-T6 con recubrimiento

Carga (g)	Diagonal promedio	Dureza Vickers (HV)	Dureza Vickers (GPa)	1/diagrom
25	0.029	55.13	0.54	34.47
50	0.037	60.17	0.64	26.71
100	0.041	62	0.67	24.39

**Figura 33**

Dureza vs inverso diagonal promedio para aluminio 6063-T6 con y sin recubrimiento

**Figura 34**

Dureza vs carga para al aluminio 6063-T6 con y sin recubrimiento

Tabla 10 Dureza del recubrimiento Colmonoy 88 medido en forma longitudinal y transversal

	Carga (gr)	Diagonal Promedio	Dureza Vickers (HV)	Dureza (GPa)	1/diaprom
Longitudinal	25	0.00847	649.15	6.36	118.2
Transversal	25	0.00846	647.141	6.34	118.1
Longitudinal	50	0.01357	510.5	5.0	74.024
Transversal	50	0.011	359.8	3.52	87.9
Longitudinal	100	0.0156	768.72	7.53	64.26
Transversal	100	0.015	780.94	7.65	64.89
Longitudinal	200	0.0215	800.25	7.84	46.42
Transversal	200	0.021	771.05	7.55	45.58
Longitudinal	300	0.027	740.87	7.26	36.40
Transversal	300	0.025	552.96	5.41	38.6

Se observa en las **figuras 29 y 30** que para el rango de cargas aplicados, la dureza es independiente de la carga utilizada, esto puede ser debido a que es un material que acepta poca deformación plástica.

Finalmente en las **figuras 33 y 34**, se observa un ablandamiento el cual puede ser atribuido al calentamiento generado durante el proceso de deposición, esto a pesar de que en trabajos previos, no se observó este fenómeno, hay que tener en cuenta que la deformación previa al proceso de deposición en si mismo, puede hacer más susceptible la aleación a fenómenos de recristalización dinámica que eventualmente pudiesen estar involucrados en este ablandamiento, sin que ello se vea reflejado en el

incremento del tamaño de grano, por lo que no era posible inferir esta situación a partir del estudio por microscopía óptica.

IV.4. Ensayos de tracción

En la **tabla 11**, se proporcionan los resultados obtenidos del ensayo de tracción realizados para el material base, aluminio 6063-T6, dichos valores son resultado del promedio de las muestras ensayadas, de igual forma, los datos de **Carga-Alargamiento** para cada ensayo fueron corregidos, a fin de considerar la deformación elástica de los elementos de máquina que pudiesen afectar los valores de la deformación real. Las tablas muestran los valores de **Esfuerzo real a carga máxima** obtenidos de las curvas **Esfuerzo vs Deformación real** para cada ensayo realizado, reportando el promedio del esfuerzo de fluencia del material base, necesarios para diseñar los ensayos de fatiga.

Tabla 11 Resultados del ensayo de tracción para el aluminio 6063-T6

	σ_y (MPa)	σ_{sut} (Mpa)
Probeta 1	190	246
Probeta 2	185	230
Probeta 3	196	224
Promedio	190.25	225

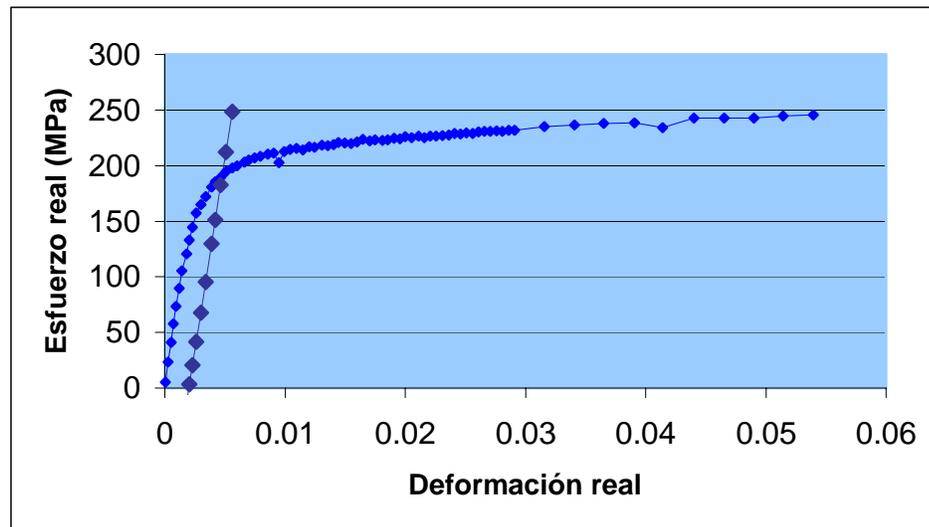


Figura 35 Curva de Esfuerzo real vs Deformación real

IV.5. Ensayos de Fatiga al aire y Fatiga corrosión

De las tablas presentadas a continuación (**tabla 12 y 13**), se pueden observar los datos de fatiga al aire y fatiga corrosión en flexión rotativa del material base recubierto, ensayados bajo niveles de esfuerzos de (172, 147, 120, 96 MPa), también se muestran en las **figuras 36 y 37** las curvas $\text{Log } \sigma\text{-Log } N$ del material base en comparación con el material recubierto para fatiga al aire y fatiga corrosión, así como los parámetros de la ecuación de Basquin, los cuales fueron obtenidos por medio de una regresión lineal de todos los puntos de cada curva y que se muestran en las **tablas 14 y 15** para fatiga al aire y fatiga corrosión respectivamente.

Tabla 12 Resultados del ensayo de fatiga al aire del aluminio 6063-T6 recubierto con Colmonoy 88.

Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	7,02	51,8	172	289.900	1	6,85	41,1	147	896.900
2	6,9	49,2		219.200	2	6,99	43,7		825.900
3	6,88	48,7		191.200	3	6,9	42,0		600.900
4	7,08	53,1		312.900	4	6,91	42,2		709.600
Promedio				253.300	Promedio				758.325
Desviación estándar				57.477	Desviación estándar				130.290

Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	6,93	34,7	120	2.533.700	1	6,95	28,0	96	3.498.000
2	7	35,8		1.804.700	2	7,11	30,0		4.630.200
3	7	35,8		2.074.400	3	6,95	28,0		13.579.100
4	6,93	34,7		3.327.000	4	7,04	29,1		4.145.000
Promedio				2.434.950	Promedio				6.463.075
Desviación estándar				666.512	Desviación estándar				4.766.633

Tabla 13 Resultados ensayo de fatiga corrosión del aluminio 6063-T6 recubierto con Colmonoy 88.

Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	6,9	49,2	172	135.400	1	6,99	43,7	147	195.300
2	7,08	53,1		140.000	2	6,92	42,4		356.500
3	6,94	50,0		149.200	3	7	43,9		220.100
4	7,03	52,0		160.600	4	6,97	43,3		275.500
Promedio				146.300	Promedio				261.850
Desviación estándar				11.127	Desviación estándar				71.454

Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	7	35,8	120	378.500	1	6,96	28,2	96	1.498.000
2	6,98	35,5		400.900	2	7,02	28,9		1.971.300
3	6,86	33,7		702.600	3	6,88	27,2		2.045.300
4	6,92	34,6		420.900	4	6,98	28,4		1.500.000
Promedio				475.725	Promedio				1.753.650
Desviación estándar				152.238	Desviación estándar				295.593

IV.6. Curvas de Whöler

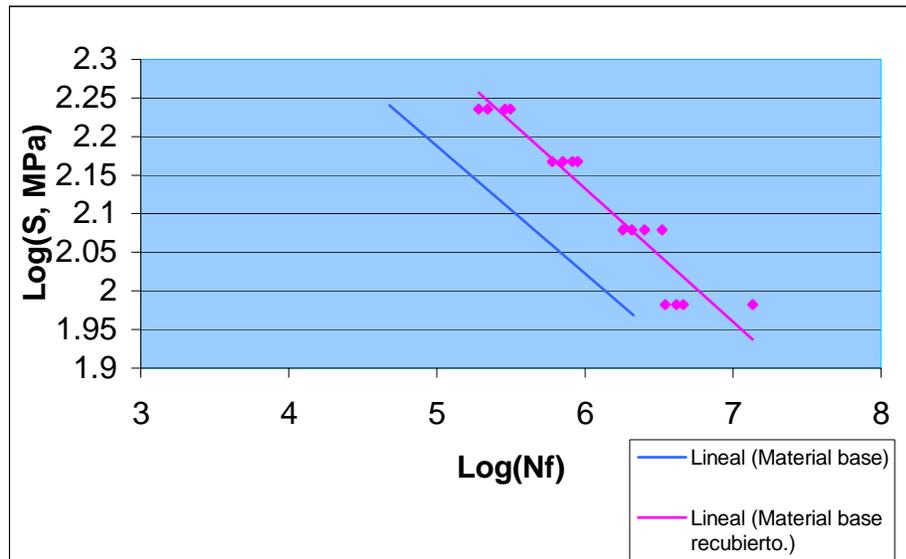


Figura 36 Curvas de Whöler del material base recubierto ensayado al aire.

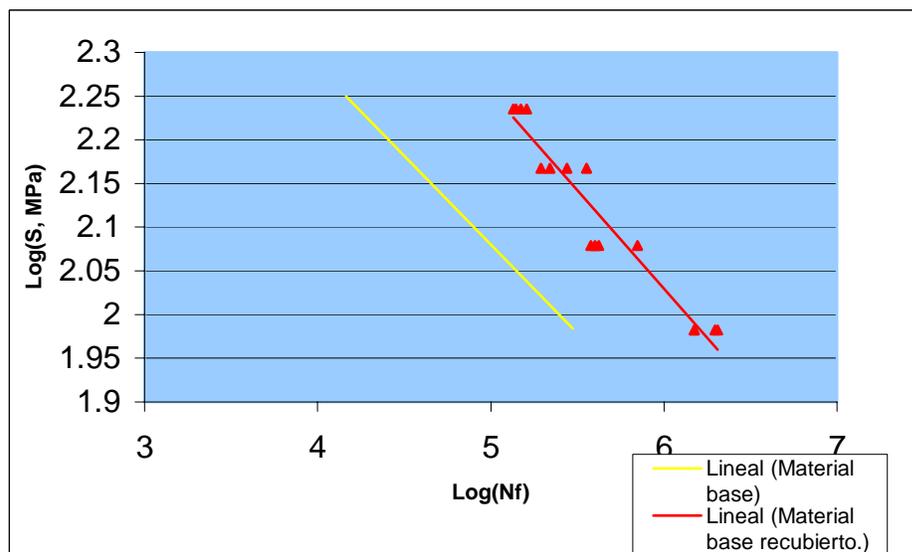


Figura 37 Curvas de Whöler del material base recubierto ensayado en ambiente corrosivo.

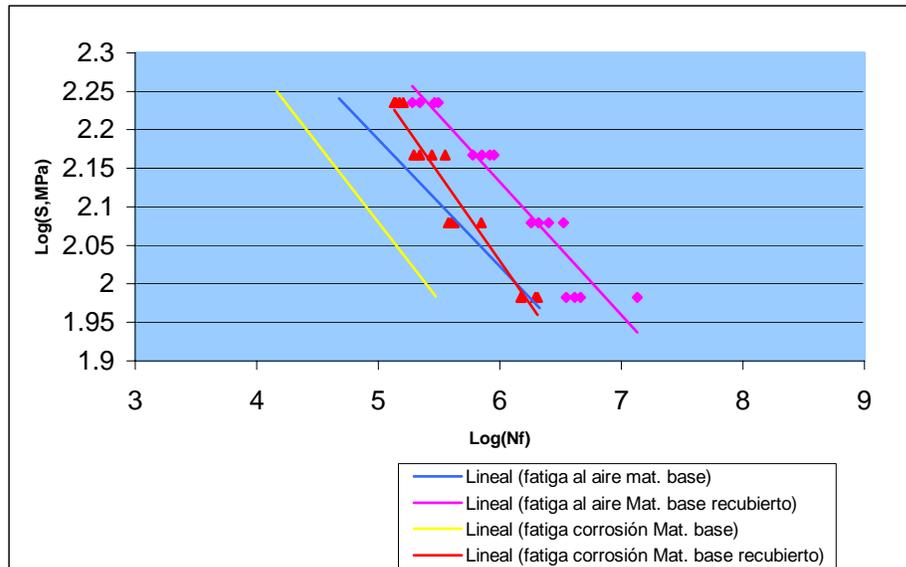


Figura 38 Curvas de Wohler

IV.7. Parámetros de la ecuación de Basquin

Tabla 14 Obtención de la ecuación de Basquin para fatiga al aire del aluminio recubierto.

Obtención de la ecuación de Basquin			
Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,1728	b =	-0,1728
Intersección (eje Y)	3,1698	Sf =	1478,42
		Ecuación de Basquin	
R2 =	0,9155	Sa = 1478,42*(Nf)^{-0,1728}	

Tabla 15 Obtención de la ecuación de Basquin para fatiga corrosión del aluminio recubierto

Obtención de la ecuación de Basquin			
Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,2253	b =	-0,2253
Intersección (eje Y)	3,382	Sf =	2409,90
		Ecuación de Basquin	
R2 =	0,9336	Sa = 2409,90*(Nf)^{-0,2253}	

En los datos de fatiga al aire del material recubierto, se puede observar un aumento de la vida a la fatiga para altos números de ciclos de 4,7 veces más que para el material base sin recubrir, y de 3,36 veces más para fatiga a bajo número de ciclos. Esto es debido a la presencia del recubrimiento (Colmonoy 88).

Este aumento significativo en la resistencia a la fatiga del conjunto, puede ser atribuido a la presencia de los esfuerzos residuales de compresión ejercidos por el recubrimiento al momento de la deposición. Es posible también que la técnica de SandBlasting aplicada para una mejor adherencia del recubrimiento haya influido en la resistencia a la fatiga, ya que hizo que un material muy dúctil como el aluminio se comprimiera ante el choque de la alúmina causando de esta manera mayores esfuerzos residuales de compresión.

También se observa que la desviación estandar aumenta al disminuir el esfuerzo, esto es debido según la **Teoría de Orowan** a que la vida de un componente sometido a fatiga está determinada por el número de ciclos requeridos para iniciar la grieta (nucleación) y por el número de ciclos necesarios para hacer crecer la grieta desde sus dimensiones iniciales hasta el valor crítico.

Esto se puede explicar por el hecho de que al aumentar significativamente el esfuerzo, el factor de propagación de grieta aumenta, ya que a altos esfuerzos es mucho más probable de que ocurra una falla más rápidamente provocando que la propagación de la grieta produzca una disminución del área remanente de la probeta, haciéndola insuficiente para soportar el esfuerzo, es decir, que el proceso de falla a altos niveles de esfuerzos es controlado por el esfuerzo alternante aplicado, mientras que a bajos niveles de esfuerzos el proceso de falla se ve gobernado por el evento de nucleación, y no por la velocidad de propagación de la grieta, introduciendo su naturaleza probabilística, viéndose esto reflejado en una alta desviación estándar, ya que a bajos niveles de esfuerzos el material tarda más tiempo en producir la nucleación.

En la **tablas 13**, se puede observar como el material recubierto bajo un ambiente corrosivo varía significativamente su vida a la fatiga, ya que ésta se vio disminuida en casi una cuarta parte con respecto a la vida a la fatiga sin ambiente corrosivo, y también se pudo observar como la dispersión que presentan los datos fué mucho menor.

Estos aspectos se pueden explicar con el hecho de que como el material estuvo bajo un ambiente corrosivo éste fue creando pequeñas picaduras en el material producido por el ataque, haciendo que se produjeran gran número de concentradores de esfuerzos en la aleación y aumentara de esta manera la probabilidad de ocurrencia de grietas en el Colmonoy 88.

Es por esta razón que la desviación estandard en este ensayo fue mucho menor que en la fatiga al aire, ya que aquí la vida a la fatiga se ve muy influenciada por la solución corrosiva (NaCl al 3 %) condicionando el evento de nucleación del material, y disminuyendo a si la componente probabilística.

Se puede apreciar en las **tablas 14 y 15** como el valor del exponente en la ecuación de Basquín representado por la pendiente de las rectas de las **figuras 36 y 37**, tanto en fatiga al aire como en fatiga corrosión, no presenta una variación significativa, infiriendo que la aplicación del recubrimiento en ambos casos, no varió la susceptibilidad del conjunto a la vida a la fatiga en función de la variación del esfuerzo alternante aplicado.

IV.8. Estudio fractográficos para fatiga al aire y fatiga corrosión

A continuación se muestran los resultados obtenidos del estudio fractográfico realizado a partir de la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) a ocho (8) muestras de probetas fracturadas, cuatro (4) con cortes longitudinales y cuatro (4) con cortes transversales, éstas son muestras representativas de los correspondientes niveles de esfuerzos, seleccionadas a partir del criterio de ser las mas próximas al promedio de el nivel de esfuerzo utilizado. De estos resultados se exponen una serie de fotomicrografías realizadas a distintos aumentos para cada una de ellas, con la finalidad de diferenciar las distintas zonas de fractura por fatiga y observar los posibles puntos de inicio de la grieta. Para algunas de las muestras, se observaron a un mayor aumento para definir el mecanismo de fractura del material. En otras se realizó un estudio de la zona del recubrimiento para ver la forma de propagación de la grieta y su comportamiento luego de estar sometido a cargas; y en los casos de mayor interés se realizó un análisis composicional por medio de la técnica de Espectroscopia por dispersión en energía de rayos X (EDX).

Las primeras tres fotomicrografías presentadas en la **figura 39; fotomicrografías (a), (b) y (c)**, muestran las superficies de fractura de una probeta de fatiga al aire bajo un esfuerzo de 120 MPa.

En la **figura 39, fotomicrografía (a)**, se puede observar múltiples inicios de grieta. La zona que indicamos nos sugiere un punto potencial de inicio de grieta de acuerdo a la dirección de las marcas radiales, aquí es posible ver claramente como los frentes de crecimiento se interceptan generando escalones de clivaje. En la **figura 39, fotomicrografía (b)**, se puede ver una ampliación de la zona de inicio mostrada en la foto anterior, ésta morfología aquí observada, sugiere que efectivamente este es un punto de iniciación de las grietas de fatiga. Adicionalmente se aprecian grietas secundarias. Por último en la **figura 39, fotomicrografía (c)**, encontramos la presencia de múltiples partículas no fundidas en la superficie del recubrimiento lo cual de acuerdo a la literatura especializada, podrían representar las discontinuidades que potenciaron estos lugares como nucleadores de la grieta.

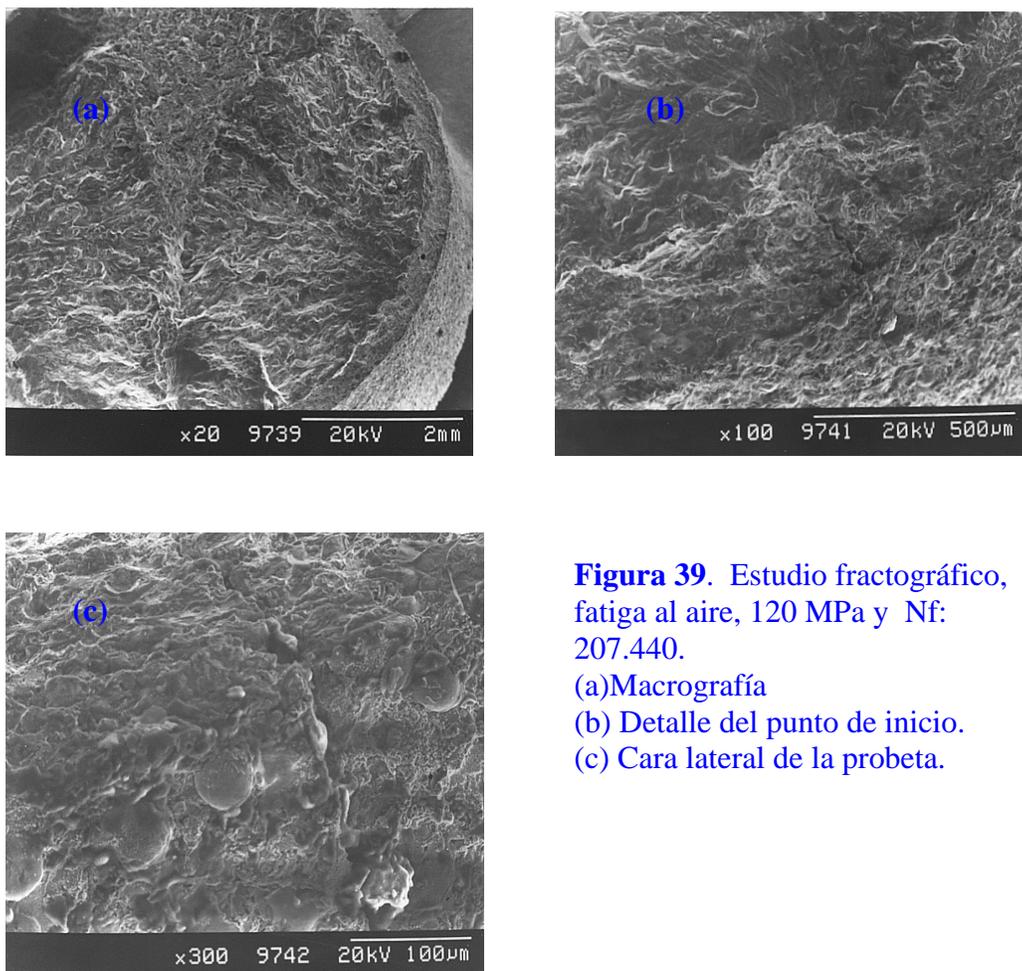


Figura 39. Estudio fractográfico, fatiga al aire, 120 MPa y Nf: 207.440.

(a) Macrografía

(b) Detalle del punto de inicio.

(c) Cara lateral de la probeta.

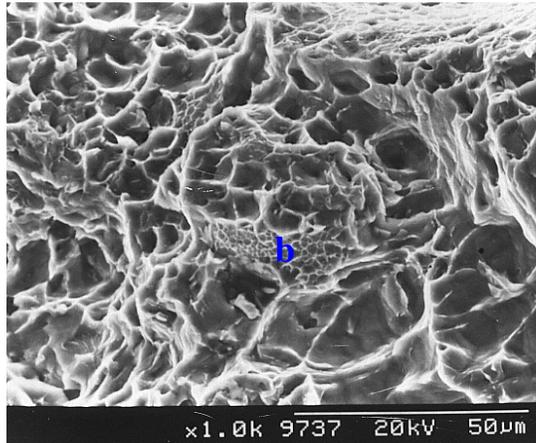


Figura 40. Amplificación de la zona de fractura.

En la **figura 40** se aprecia una ampliación de la zona de fractura por sobrecarga o fractura final. En ella se aprecia una topografía típica de fractura dúctil así lo revelan la masiva presencia de microhoyuelos, así mismo se observa una gran cantidad de deformación plástica en las caras de los granos **detalle b**

Existe multiplicidad en la nucleación de grietas que coalescen antes de la fractura y ellas nuclean indistintamente del esfuerzo aplicado, muestra de ello son las fotomicrografías presentadas en la **figura 41**, en la misma se tienen dos superficies de fractura para dos niveles distintos de esfuerzos, la condición de multiplicidad en la nucleación de grietas de fatiga se mantiene para todos los niveles de esfuerzos estudiados y en ambas condiciones tanto para fatiga al aire como en fatiga corrosión. Se puede ver también como en la **fotomicrografía (a)** el desprendimiento de una parte del recubrimiento producto del crecimiento de la grieta.

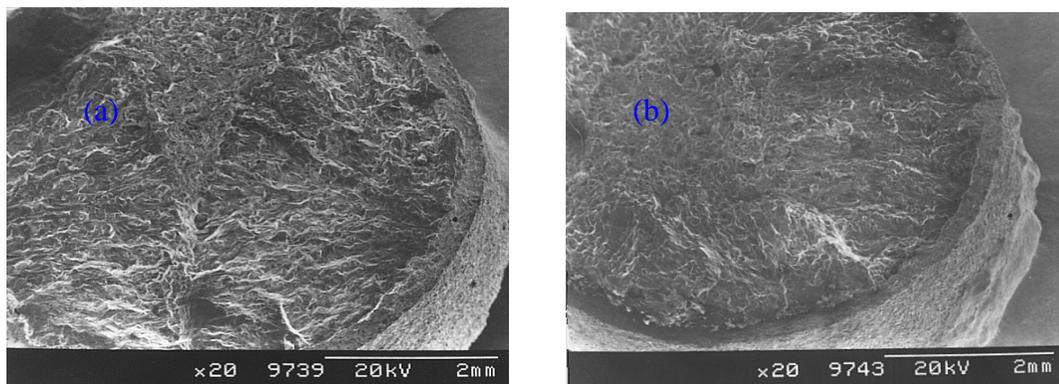


Figura 41. Estudio fractográfico: (a).Fatiga al aire 120 MPa. (b) Fatiga corrosión 172MPa

En las fotomicrografías presentada, en la **figura 42**, tenemos una clara evidencia del mecanismo de propagación intergranular que expone el metal base para las primeras etapas de crecimiento. Lo cual es típico de este tipo de aleaciones que son endurecidas por envejecimiento artificial. La literatura especializada sugiere que las microestructuras desarrolladas en estas aleaciones generan unas así llamadas zonas libres de precipitados en las regiones cercanas a los límites de grano, esto implicaría que las mismas tendrían menor resistencia mecánica que el grano en si mismo, por lo que la grieta debe entonces avanzar a lo largo de estas zonas teniendo entonces un avance de tipo intergranular.

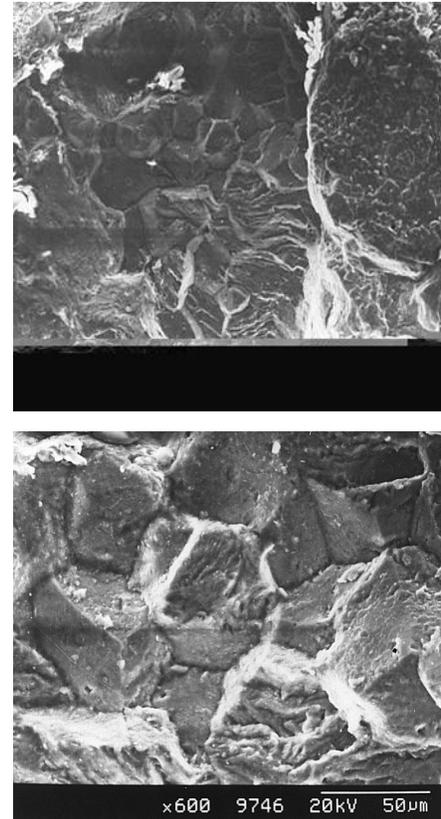


Figura 42. Estudio fractográfico:
(a) Fatiga corrosión 172 MPa.
(b). Mecanismo de propagación.

En las **figura 43, fotomicrografías (a) y (b)**, se puede ver un corte longitudinal para una probeta ensayada a un esfuerzo de 96 MPa, y en la cual se pueden observar como la nucleación es en la superficie, lo cual indicaría que el mecanismo de Blanting utilizado para una mejor adherencia no disminuye la vida a la fatiga de la aleación, esto podría ser explicado en términos de la baja susceptibilidad de las

aleaciones de aluminio a la presencia de entallas como concentradores de esfuerzos debido a su gran ductilidad.

El avance de la grieta es través del recubrimiento posiblemente a lo largo de la fase cementante y luego puede ser transferida al sustrato y seguir el avance, o por el contrario, cambiar de dirección propagándose a través de la intercara y separando físicamente el recubrimiento del sustrato como se muestra en la **foto b**

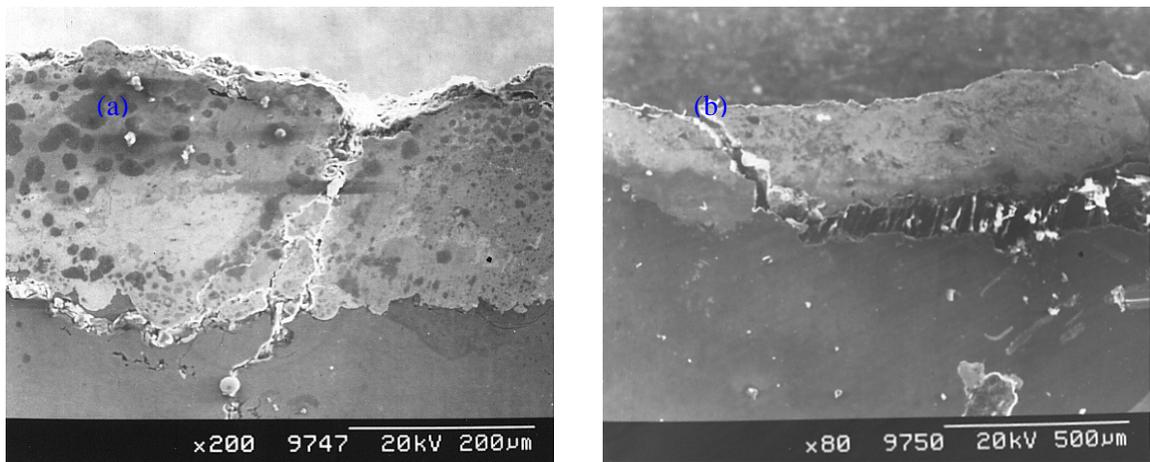


Figura 43. (a) Fatiga corrosión 96 MPa. y (b). Detalle de avance de grieta

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

En el trabajo de investigación realizado, se obtuvo una serie de resultados, los cuales fueron estudiados y analizados con el fin de obtener una respuesta satisfactoria a los datos obtenidos en los ensayos experimentales, utilizando además resultados experimentales de otros trabajos de investigación como base de información para el estudio completo de éste. Las conclusiones a continuación se realizarán con el mismo orden en que se realizaron los análisis de las mismas.

La dureza del conjunto se ve disminuida con respecto a la del sustrato debido al calentamiento generado por el proceso de termo-rociado.

La dureza del sustrato es independiente de la carga aplicada para el rango de cargas estudiados.

La presencia del recubrimiento Colmonoy 88 sobre el aluminio 6063-T6 es uno de los factores que otorgan un incremento apreciable en la vida a la fatiga del conjunto.

El estado de esfuerzos residuales de compresión en el recubrimiento contribuye con el aumento de la vida a la fatiga, los cuales pudieron ser introducidos al sistema por la aplicación del Blasting y el depósito como tal.

La dispersión estandar para fatiga al aire fue mucho mayor que en fatiga corrosión.

El exponente de la ecuación de Basquin no se ve modificado por la acción del medio del ensayo.

Las grietas nucleadas sobre la superficie del recubrimiento, avanzan a través de éste hasta llegar al sustrato donde puede que cambien de dirección a través de la intercara, uniéndose luego con otras grietas que provienen de la superficie, esto logra el despegue de fragmentos de recubrimiento en ciertos casos.

Otro modo de propagación es cuando la grieta continúa avanzando ya sea con la dirección original de la grieta proveniente de la superficie o desplazándose a través de la intercara y luego retomando su dirección hacia el sustrato.

La grieta avanza de manera intergranular en los primeros ciclos de avance, perpendicular al esfuerzo aplicado.

RECOMENDACIONES

El proceso de rociado de alúmina se recomienda realizarlo con un abrasivo de menor dimensión.

Realizar un estudio por Difracción dinámica de Rayos X o por difracción de Electrones retrodispersados EBSD, para establecer la condición real de los esfuerzos residuales presentes en la película depositada.

Referencias Bibliográficas

- 1.- Fillion G. L. (1994). *Colmonoy 88 A New Development in Nickel-Based Hardfacing Alloy* Welding Journal. Volumen 78, pag 37-42.
- 2.- ASM HandBook. (1985). "Mechanical Testing". Volumen 8, ninth edition.
- 3.- Shigley, J. (2001). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. Editorial Mag Graw-Hill, 5ta Edición, pag 303-350
- 4.- ASM HandBook. (1985). "Failure Análisis and Prevention". Volumen 11, ninth edition.
- 5.- Orowan, E. (1939). Proc. Roy. Soc.
- 6.- Cazaud, R. (1957) La fatiga de los metales. Ediciones Aguilar. 2da edición, Pp 377.
- 7.- Dif, Ronan. (2002). Corrosion-Fatigue Interaction for High Strenght Aluminium Alloys.
- 8.-Alvarez, M. (1998). Comportamiento fatiga-corrosión del acero inoxidable 316L Tesis Escuela de Ingeniería Mecánica U.C.V.

- 9.-Askeland,D. (1990).*La ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Iberoamericana. Pág. 111-113.
- 10.- F. Oliveira, L. Hernández, J. A. Berríos, C. Villalobos, A. Pertuz, E. S. Puchi Cabrera. (2001). Use of scanning with light interferometry in the characterization of wear mechanism in thermal sprayed coating. *Materials Characterizations*. 47(1), 307-314.
- 11.- Forrest, P.G. (1972). *Fatiga de los Metales*. Ediciones URMO, 3ra edición, Pág. 76.
- 12.- King, Frank. (1992). El aluminio y sus aleaciones. Madrid.
- 13.- Dieter. (1967). *Metalurgia Mecánica*. Ediciones Aguilar. 5ta edición, Volumen II.
- 14.- Navas, Foilan y Jose Ortega. (1982). Estudio de una aleación 6063 - T6 de aluminio por medio de análisis por difracción de rayos X, medidas de dureza y microscopia óptica.
- 15.- Ortúzar, Raúl. (1999). Mecánica de fractura en estructuras navales. Trabajo Especial de Grado, Universidad de Lima.
- 16.- Juvenal, Robert. (1991). Fundamentos de diseño para Ingeniería Mecánica. Edit. Limusa.

- 17.- Thornton, Peter y Colangelo, Vito. (1987) Ciencia de materiales para la ingeniería. Editorial Prentice Hall. México. 715 P
- 18.- Padilla Pineda, Kattyna y Adolfo Velasquez Martinez. (1999). Efectos de la aplicación de un recubrimiento Ni-Mo-Al por termo-rociado sobre las propiedades de fatiga corrosión del acero AISI 4143.

Referencias Electrónicas

- 1- www.thermalspray.com/HVOF
- 2- www.advanced-coating.com
- 3- www.plasmacoatings.com
- 4- www.metallisation.com
- 5- www.sulzernetco.com
- 6- www.ptise.com
- 7- www.asminternational.com
- 8- www.asbindustries.com
- 9- www.dynacer.com
- 10- www.engineeringtalk.com
- 11- www.metal-spray.com
- 12- www.nationalthermalspray.com
- 13- www.tafa.com

