

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

COMPORTAMIENTO A LA FATIGA Y FATIGA-CORROSIÓN DEL ACERO SAE 4140 RECUBIERTO POR TERMO-ROCIADO

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Bachilleres:

Da Silva Da Silva, Jose A.

Nunes Moreno, Jose D.

Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

COMPORTAMIENTO A LA FATIGA Y FATIGA-CORROSIÓN DEL ACERO SAE 4140 RECUBIERTO POR TERMO-ROCIADO

TUTOR ACADEMICO: Prof. Dr. Eli Saul Puchi

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

por los Bachilleres:

Da Silva Da Silva, Jose A.

Nunes Moreno, Jose D.

Para optar al Título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

© Jose A Da Silva Da S, 2001
© Jose D Nunes M, 2001

Hecho el Depósito de Ley.
Depósito legal lft.487200162059

A mis Padres por ser mi guías y apoyo en todo momento.

A Juan por ser mas que un hermano un amigo.

A mis amigos y compañeros que me apoyaron y animaron a culminar esta etapa.

Jose Da Silva

***A mi padre Jose Nunes por ser tan
cascarrabias a Omaira por ayudarme y
animarme en mis momentos difíciles y
a mi hermanito Jordi.***

***A mi querida Gordita, por soportar mi
mal humor en esos momentos de
presión y brindarme su cariño.***

Dario Nunes

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Central de Venezuela** por habernos brindado la oportunidad de formarnos como profesionales en el área de la Ingeniería Mecánica.

Al **Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT)** por haber financiado este trabajo de investigación a través del **proyecto LAB-97000644** y a la Coordinación de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de esta misma Universidad.

A nuestro Tutor académico **Dr. Elí Saúl Puchi Cabrera** por la oportunidad y orientación de desarrollar este proyecto, **Ing. Jonathan Antonio Berríos Ortiz** mas que un colaborador un buen compañero de equipo por su orientación, constancia e interés en la realización de este trabajo especial de grado y a todas las demás personas de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, que de una u otra forma contribuyeron a la realización de dicho trabajo.

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

Andrea Scagni por su orientación y colaboración.

A la **Escuela Técnica Popular DON BOSCO**, especialmente a nuestro amigo salesiano **Mochatti** y al profesor **Freddy**.

A el taller de Matriceria J. V. y a **PLASMATEC INGENIEROS**.

Y por ultimo, a nuestro hermano y amigo **Juan Da Silva** por su colaboración prestada en la realización de este trabajo, y a todos nuestros panas y amigos con los que compartimos grandes momentos.

Da Silva D. Jose A. y Nunes M. Jose D.

**COMPORTAMIENTO A LA FATIGA Y FATIGA-CORROSIÓN DEL
ACERO SAE 4140 RECUBIERTO POR TERMO-ROCIADO**

Tutor académico: Ing. Eli Saúl Puchi Cabrera

Tesis. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas 2001, 175 páginas.

Palabras claves: Termo-rociado, Fatiga, Fatiga-Corrosión, Recubrimiento.

El recubrimiento NiCrBSiW (Colmonoy 88) es utilizado en la industria para proteger piezas del desgaste y la corrosión, a pesar que afecta las propiedades de fatiga del metal sobre el cual se aplica. Se ha realizado una investigación con la finalidad de determinar como afecta este recubrimiento aplicado por termo rociado mediante HV0F, las propiedades de fatiga y fatiga-corrosión del acero AISI 4140. Para ello se realizaron ensayos estáticos y dinámicos sobre el metal base (substrato) y metal base recubierto con Colmonoy 88. Los ensayos dinámicos se realizaron en dos tipos de condiciones: al aire y bajo un ambiente corrosivo utilizando una solución salina de NaCl al 3%; para este tipo de condición sólo se utilizaron las probetas recubiertas con Colmonoy 88. Además de estos ensayos se realizaron estudios de microscopía óptica y microscopia electrónica de barrido (MEB) acoplado con un espectrómetro de dispersión de energía (EDX) para determinar la micro estructura del acero, analizar como se producen las diferentes fallas por fatiga en cada una de las condiciones, comprobar la composición del recubrimiento y la existencia de posibles inclusiones de alúmina en la superficie del substrato que puedan iniciar la falla por fatiga. De estos estudios se obtuvo que efectivamente la aplicación de un recubrimiento de este tipo sobre el acero AISI 4140 disminuye la vida a la fatiga del metal base.

INDICE

Introducción.....	1
Objetivos.....	3
1 Fundamento Teórico.....	4
1.1 Acero AISI 4140.....	4
1.1.1 Color de Identificación.....	4
1.1.2 Características.....	4
1.1.3 Características Mecánicas.....	5
1.1.4 Aplicaciones.....	6
1.2 Aleación Molibdeno-Níquel-Aluminio (Capa de enlace METCO 447).....	6
1.2.1 Objetivos de la Capa de Enlace.....	6
1.2.2 Composición Química de la Capa de Enlace	7
1.3 Aleación Base-Níquel (Colmonoy 88).....	7
1.3.1 Objetivos del Recubrimiento.....	8
1.3.2 Composición Química del Colmonoy 88.....	8
1.3.3 Dureza del Colmonoy 88.....	9
1.4 Fatiga	9
1.4.1 Características de la Falla por Fatiga.....	11
1.4.1.1 Forma de la Rotura	11
1.4.1.2 Las Características de la Rotura por Fatiga.....	11
1.5 Tipos de Ensayos.....	14
1.5.1 Ensayo de Tracción.....	14
1.5.2 Ensayo de Fatiga a Flexión Rotativa.....	15
1.5.2.1 Diagrama de Fatiga de Wöhler.....	17
1.5.2.2 Modelo de Basquin.....	18

1.5.2.3 Causas de Dispersión Estadística de los Resultados en Fatiga.....	19
1.5.3 Fatiga-Corrosión.....	20
1.5.3.1 Corrosión.....	20
1.5.3.2 Formas.....	20
1.5.3.3 Generalidades de Fatiga-Corrosión.....	21
1.6 Recubrimientos.....	22
1.6.1 Termo-Rociado.....	22
1.6.1.1 Definición.....	22
1.6.1.2 Variantes del Proceso.....	23
1.6.1.2.1 Materiales Rociados.....	23
1.6.1.2.2 Procesos.....	23
1.6.1.3 Naturaleza de los Revestimientos Rociados.....	24
1.6.1.3.1 Substratos.....	24
1.6.1.3.2 Adherencia de los Revestimientos.....	25
1.6.1.3.3 Estructura del Revestimiento.....	25
1.6.1.4 Preparación de la Superficie.....	26
1.6.1.4.1 Limpieza y Manejo.....	27
1.6.1.4.1.1 Vaporizado Desengrasante.....	27
1.6.1.4.1.2 Vaporizado Abrasivo.....	28
1.6.1.4.1.3 Baño Químico.....	28
1.6.1.4.1.4 Horno.....	29
1.6.1.4.1.5 Ultrasonido.....	29
1.6.1.4.1.6 Abrasivos.....	29
1.6.1.4.1.7 Cepillado.....	30
1.6.1.5 Rugosidad.....	30
1.6.1.5.1 Propósito.....	31
1.6.1.5.2 Grado.....	31
1.6.1.6 Granallado.....	31
1.6.1.6.1 Factores que Tienen Influencia en la Selección de la Arena.....	31

1.6.1.6.2 Tipo y Tamaño del Abrasivo.....	32
1.6.1.6.3 Procedimientos de Desbaste.....	33
1.6.1.6.4 Reciclaje del Abrasivo.....	34
1.6.1.7 Macro Rugosidad.....	34
1.6.1.7.1 Socavado.....	34
1.6.1.7.2 Acanalado.....	34
1.6.1.8 Limpieza Después de la Rugosidad.....	35
1.6.1.9 Capa de Recubrimiento.....	35
1.6.1.9.1 Consideraciones Generales.....	36
1.6.1.9.2 Espesor de la Capa.....	36
1.6.1.9.3 Materiales.....	36
1.6.1.9.4 Recubrimientos de Cerámicos.....	36
1.6.1.10 Métodos de Deposición.....	37
1.6.1.10.1 Calentamiento por Electricidad.....	37
1.6.1.10.2 Calentamiento por Combustión.....	38
1.6.1.10.3 Métodos por Alta Presión y Velocidad Hipersónica.....	39
1.6.1.11 Características de los Revestimientos.....	41
1.6.1.12 Resistencia al Desgaste.....	42
1.7 Antecedentes.....	43
2 Metodología y Resultados Experimentales.....	48
2.1 Flujograma de la Metodología Experimental.....	48
2.2 Dimensiones de las Probetas de Tracción y de Fatiga.....	49
2.2.1 Material Base.....	49
2.2.2 Dimensiones.....	50
2.2.3 Pasos para la preparación de la superficie a Termo-rociar.....	51
2.3 Ensayo de tracción.....	56
2.3.1 Resultados de los Ensayos de Tracción.....	59
2.4 Ensayo de Fatiga.....	62

2.4.1 Descripción del Equipo.....	63
2.4.2 Resultados Ensayo de Fatiga Flexión Rotativa.....	68
2.5 Estudio Micro-estructural y Morfológico.....	83
2.5.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	83
2.5.1.1 Preparación de las Muestras.....	84
2.5.1.1.1 Corte de las Muestras.....	84
2.5.1.1.2 Limpieza de las Muestras.....	85
2.5.1.1.3 Montaje de las Muestras.....	85
2.5.1.2 Observación de las Muestras (MEB).....	86
2.5.2 Espectroscopía por dispersión de energía (EDX).....	87
2.5.3 Resultados del Estudio Microestructural.....	88
2.5.4 Resultados del Estudio Fractográfico.....	94
3 Análisis de resultados.....	106
Conclusiones.....	110
Recomendaciones.....	111
Bibliografía.....	112
Anexos.....	116

INDICE DE FIGURAS

1	Diagrama de fatiga de Wöhler.....	17
2	Zona de resistencia temporal a la fatiga; modelo de Basquin.....	19
3	Proceso de Termo-rociado, por el H.V.O.F. (High Velocity Oxi Fuel).....	24
4	Dimensiones de la probeta de tracción.....	49
5	Dimensiones de la probeta de fatiga.....	50
6	Disposición de las probetas de Tracción y Fatiga Termo-rociadas.....	53
7	(a) Disposición de las probetas durante el proceso de Termo-rociado;(b) Proceso de Termo-rociado; (c) Detalle C de la Figura 6b, detalle del termo-rociado superficial de las probetas.....	54
8	Maquina de tracción marca Instron, ubicada en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.....	56
9	Curvas esfuerzo real vs. deformación real de un acero AISI 4140 templado y revenido.....	59
10	Curvas esfuerzo real vs. deformación real de un acero AISI 4140 termo-rociado (sin considerar el espesor de recubrimiento).....	60
11	Probetas de Tracción de sustrato y sustrato recubierto por termo-rociado de Colmonoy 88. Detalle de desprendimiento en forma de tubos de recubrimiento durante el ensayo de tracción	62
12	Máquina de Ensayo de Fatiga Flexión Rotativa.....	63
13	Comportamiento a la fatiga de un acero AISI 4140.....	69
14	Resistencia a la fatiga-corrosión del sustrato.....	71
15	Resistencia y vida límite de fatiga del sustrato termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).....	73
16	Resistencia a la fatiga-corrosión del sustrato termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).....	75

17	Resistencia a la fatiga y vida límite del sustrato termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento).....	77
18	Resistencia a la fatiga-corrosión del sustrato termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento).....	79
19	Comportamiento a la fatiga; (a) Substrato; (b) Substrato termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento) (c) Substrato termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).....	80
20	Comportamiento a la fatiga-corrosión; (a) Substrato; (b) Substrato termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento) (c) Substrato termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).	81
21	Comportamiento de reducción vida fatiga; (a) Substrato termo-rociado (considerando el recubrimiento); (b) Substrato termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento); (c) Substrato termo-rociado a fatiga-corrosión (considerando el espesor del recubrimiento); (d) Substrato termo-rociado a fatiga-corrosión (sin considerar el espesor del recubrimiento); (e) Sustrato a fatiga-corrosión.....	82
22	Microscopio electrónico de barrido ubicado en el Centro de Microscopia Electrónica, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.....	83
23	Cortadora Buehler ubicada en el Lab. de Aluminio, Escuela de Metalúrgica y Ciencia de los Materiales	84
24	Equipo de Ultrasonido buehler ubicada en el Lab. de Aluminio, Escuela de Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.....	85
25	Equipo de Espectroscopia por dispersión de energía (EDX) ubicada en el Centro de Microscopia Electrónica, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.....	87
26	Fotomicrografías obtenidas por MEB, del corte transversal del sustrato termo-rociado atacado con nital, para el estudio microestructural: (a)	

	Vista general del sustrato termo-rociado, observándose claramente la capa de enlace con el recubrimiento; (b) Detalle A, Figura 26a, Vista de partículas de alúmina contenidas en la capa de enlace Mo-Ni-Al; (c) Detalle B, Figura 26a, Capa del Colmonoy 88 ampliada.....	88
27	Espectroscopía por dispersión de energía de una partícula de alúmina (Al_2O_3) Detalle C de la Figura 26b, obteniendo los resultados de la composición química de la misma.....	89
28	Espectroscopía por dispersión de energía del Detalle D de la Figura 26b, obteniendo los resultados de la composición química de la zona opaca de la capa de enlace Mo-Ni-Al.....	90
29	Espectroscopía por dispersión de energía de la Figura 26c, obteniendo la composición química.....	91
30	Fotomicrografías obtenidas por MEB, del corte transversal del sustrato termo-rociado atacado con nital, para el estudio microestructural: (a) Vista general del sustrato termo-rociado; (b) "Mapping" realizado a la Figura 30a; en donde se observa como están distribuidos los elementos que conforman el sustrato, la capa de enlace y el recubrimiento; (c) "Mapping" realizado al Detalle A, Figura 30a. Observándose claramente los componentes de la capa de enlace, que son Al y O_2	92
31	Espectroscopía por dispersión de energía del Detalle A de la Figura 30a, capa de enlace Mo-Ni-Al.....	93
32	Fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga al aire a 372 MPa considerando el espesor y 408 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: (a) Montaje de Fotomicrografías de la vista general de la superficie de fractura; (b) Vista de la superficie de fractura y de la pared lateral detallando el desprendimiento del recubrimiento; (c) Detalle A, Figura 32a inicio de la grieta principal y la dirección de propagación de la misma.	94

- 33 Montaje de fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga al aire a 372 MPa considerando el espesor y 408 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento. En donde se observa en la superficie de fractura la zona de inicio de la grieta principal y su propagación..... 95
- 34 Fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga al aire a 318 MPa considerando el espesor y 348 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: (a) Montaje de Fotomicrografías de la vista general de la superficie de fractura, en donde se observa la zona de sobrecarga debido a la reducción del área; (b) Vista de la superficie de fractura y la cara lateral; (c) Detalle del espesor del recubrimiento; (d) Vista de la pared lateral detallando el origen de una grieta secundaria en el recubrimiento y partículas de alúmina de la capa de enlace..... 96
- 35 Montaje de fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 318 MPa considerando el espesor y 348 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento; señalando la zona de inicio de la grieta principal y la propagación de la misma..... 97
- 36 Montaje de fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 318 MPa considerando el espesor y 348 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento. Detalle de los puntos de inicio y su propagación..... 98
- 37 Montaje de fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 425 MPa considerando el espesor y 465 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento. Indicando los planos de grietas

paralelas y la zona de sobrecarga.....	99
38 Fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 425 MPa considerando el espesor y 465 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: (a) Detalle A, Figura 37, vista de las grietas secundarias; (b) Detalle A, Figura 38a, Amplificación de la grieta secundaria superior; (c) Detalle B, Figura 38a, Amplificación de la grieta secundaria inferior; (d) Detalle C, Figura 38b, Amplificación de la grieta señalando la ruptura del sustrato.....	100
39 Fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 317 MPa considerando el espesor y 345 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: (a) Vista general de la superficie de fractura; (b) Detalle A, Figura 39a, donde se detallan los planos paralelos de las grietas provocados por la acción de la corrosión; (c) Detalle B, Figura 39a, detalle del escalón de la grieta principal la superficie de fractura; (d) Detalle de la cara lateral.....	101
40 Fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 317 MPa considerando el espesor y 345 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: Detalle C de la Figura 39c (a) Vista del escalón de planos de grietas principales; (b) Detalle A de la figura 40a, vista amplificada de las grietas secundarias.....	102
41 Fotomicrografías obtenidas por MEB, de la pared lateral de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 317 MPa considerando el espesor y 345 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: (a) Vista general de la pared lateral; (b) Detalle A, Figura 41a, de partículas de alúmina contenidas en la capa de enlace Mo-Ni-Al; (c) Detalle B, Figura 41b, de una partícula	

	de alúmina (Al_2O_3) contenida en la pared lateral; (d) vista ampliada de la pared lateral.....	103
42	Espectroscopía por dispersión de energía de una partícula de alúmina (Al_2O_3) Figura 41c, obteniendo los resultados de la composición química de la misma.....	104
43	Espectroscopía por dispersión de energía del Detalle C de la Figura 41b, obteniendo los resultados de la composición química de la capa de enlace Mo-Ni-Al.....	105

INDICE DE TABLAS

1	Composición química del acero AISI 4140, expresada en % en peso.....	5
2	Características Mecánicas del acero AISI 4140.....	5
3	Composición química de la aleación Molibdeno-níquel-aluminio (Capa de enlace METCO en % en peso).....	7
4	Composición química de la aleación Base-Níquel (Colmonoy 88 en % en peso).....	9
5	Parámetros de Termo-rociado con Aleación Molibdeno-níquel-aluminio (Capa de enlace).....	52
6	Parámetros de Termo-rociado con Colmonoy 88.....	53
7	Resultados de los ensayos de tracción de un acero AISI 4140.....	59
8	Resultados de los ensayos de tracción de un acero AISI 4140 termo-rociado.....	60
9	Ecuaciones de Basquin para cada condición de material.....	67
10	Resultados de los ensayos de fatiga para las probetas de acero AISI 4140.....	68
11	Resultados de los ensayos de fatiga para determinar el límite de fatiga de las probetas de acero AISI 4140.....	68
12	Método de la escalera para determinar el límite de fatiga del acero AISI 4140.....	69
13	Resultados de los ensayos de fatiga-corrosión para las probetas de acero AISI 4140.....	71
14	Resultados de los ensayos de fatiga para las probetas de acero AISI 4140 termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).....	72
15	Resultados de los ensayos de fatiga para determinar el límite de fatiga de las probetas de acero AISI 4140 termo rociado (considerando el espesor del recubrimiento).....	72

16	Método de la escalera para determinar el límite de fatiga del acero AISI 4140 termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).....	73
17	Resultados de los ensayos de fatiga-corrosión para las probetas de acero AISI 4140 termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).....	75
18	Resultados de los ensayos de fatiga para las probetas de acero AISI 4140 termo-rociado (sin consideras el espesor del recubrimiento).....	76
19	Resultados de los ensayos de fatiga para determinar el límite de fatiga de las probetas de acero AISI 4140 termo rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento).....	76
20	Método de la escalera para determinar el límite de fatiga del acero AISI 4140 termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento).....	77
21	Resultados de los ensayos de fatiga-corrosión para las probetas de acero AISI 4140 termo-rociado (sin consideras el espesor del recubrimiento).....	79
22	EDX Partícula de alúmina (Al_2O_3) presente en la capa de enlace de Mo-Ni-Al.....	89
23	EDX de la zona opaca de la capa de enlace Mo-Ni-Al.....	90
24	EDX Puntual en la capa de termo-rociado del Colmonoy 88.....	91
25	EDX de la capa de enlace Mo-Ni-Al detalle A Figura 27a.....	93
26	EDX de la capa de enlace Mo-Ni-Al detalle B Figura 41b.....	104
27	EDX de la capa de enlace Mo-Ni-Al detalle C Figura 41b.....	105

INTRODUCCIÓN

Un metal sujeto a tensiones repetidas o fluctuantes fallará a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la fractura en una sola aplicación de la carga. Las fallas ocurridas en condiciones de carga dinámicas se llaman fallas por fatiga. La falla por fatiga principia con una grieta diminuta en un área crítica de alto esfuerzo local; se presenta casi siempre en un elemento geométrico que eleva el esfuerzo y además están implicadas las fallas diminutas del material o las grietas existentes. Es necesario que el Ingeniero enfoque toda su atención a los lugares potencialmente vulnerables, como barrenos, esquinas muy marcadas, cuñeros, raspaduras en la superficie y daño producido por corrosión. Reforzar estos lugares vulnerables, con frecuencia, es tan efectivo como cambiar el material por uno más resistente.

Algunos componentes de máquinas sometidos a cargas cíclicas deben ser también resistentes a la corrosión y al desgaste. Una forma de mejorar estas propiedades es a través de la aplicación de recubrimientos.

Desde hace algunos años se viene utilizando una técnica para aplicar recubrimientos denominada Termo-rociado. Este proceso consiste en proyectar partículas que se encuentran en estado líquido o estado pastoso sobre un substrato previamente preparado.

Dentro de los procesos de Termo-rociado uno de los más utilizados es el llamado HVOF (High Velocity Oxi-Fuel). Esta técnica permite obtener recubrimientos con excelentes propiedades como baja porosidad, bajo contenido de óxidos, buena cohesión y adhesión comparado con los procesos convencionales. Numerosos materiales pueden ser aplicados mediante ésta técnica.

Las aleaciones base Níquel han sido ampliamente utilizadas debido a que poseen excelentes propiedades frente a la abrasión y a la corrosión; una de ellas es llamada comercialmente Colmonoy 88 (NiCrWBSi) y es aplicada por medio del proceso de Termo-rociado sobre el acero.

La técnica del HVOF es un extraordinario proceso de la ingeniería de superficie debido a su forma de aplicación y a las propiedades únicas de los recubrimientos. Dependiendo del método de aplicación, el recubrimiento a base Níquel es uniforme, duro, relativamente frágil, fácilmente soldable, de bajo coeficiente de fricción y altamente resistente a la corrosión.

En ésta investigación nos proponemos evaluar la vida a la fatiga y fatiga-corrosión que tiene un acero AISI 4140 solicitado a flexión rotativa, luego de la aplicación del termo-rociado y comparar la influencia del conjunto recubrimiento-substrato sobre las propiedades mecánicas estáticas y dinámicas del material, específicamente, sobre la resistencia a la fatiga del acero e igualmente estudiar las propiedades de fatiga-corrosión del conjunto substrato-recubrimiento obtenido por la técnica de High Velocity Oxi-Fuel.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar el comportamiento a la fatiga y fatiga-corrosión en la región de vida temporal para el acero AISI 4140 recubierto a base níquel NiCrWBSi, conocido comercialmente como Colmonoy 88, por medio de la técnica del HVOF termo-rociado; el comportamiento a la fatiga-corrosión se evaluará empleando Cloruro de Sodio al 3%.

Objetivos Específicos

- Evaluación y determinación de las curvas de fatiga y fatiga-corrosión en condiciones de flexión rotativa del acero 4140 bajo las condiciones establecidas en éste trabajo (material sin y con recubrimiento).
- Caracterización de las propiedades mecánicas en tracción del acero base y del acero base recubierto.
- Caracterización de la microestructura del acero base por medio de técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido.
- Evaluación de las superficies de fractura por medio de técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido.

1 FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 ACERO AISI 4140

1.1.1 Color De Identificación:



1.1.2 Características:

Acero especial revenido subsecuente al temple con aleación al cromo-molibdeno lo que permite, en la mayoría de los casos, su aplicación sin necesidad de tratamiento térmico adicional. Muy resistente al desgaste y al impacto. Utilizable en temperaturas de hasta 450 °C, sin perder su tratamiento térmico, indicado cuando se exige alta resistencia a la tracción y alta tenacidad.

La primera cifra de la designación 4140, indica el tipo de acero (elemento de aleación principal), el segundo dígito indica el porcentaje (%) en peso aproximado del elemento de aleación principal y los dos últimos dígitos proporcionan el contenido medio de carbono en porcentaje (%) en peso.

En la tabla 1, se presenta la composición química del acero AISI 4140, obtenida de la literatura, en el cual considera que cantidades pequeñas de ciertos elementos que no están especificados o que no son requeridos pueden estar presentes en los aceros aleados. Estos elementos son considerados como impurezas y se aceptan en pequeñas cantidades de porcentaje en peso. [2;24]

Tabla 1

Composición química del acero AISI 4140, expresada en % en peso.

C	Mn	P	S	Cr	Al	Ni	Cu	Si	Mo
0.39	0.75	0.018	0.03	0.95	0.02	0.15	0.28	0.24	0.17

[2]

1.1.3 Características Mecánicas

En la tabla 2 se presentan las características mecánicas mas relevantes del acero AISI 4140. [37]

Tabla 2

Características Mecánicas del acero AISI 4140.

Estado de entrega	Revenido subsecuente al temple
Resistencia a la tracción	932 – 1128 MPa
Limite de fluencia	687 – 823 MPa
Alargamiento	Mínimo 10%
Contracción	Mínimo 40%
Resilencia	0.49 MPa
Mecanizado	Se puede mecanizar con buriles de acero rápido
Dureza Brinell	312 HB

1.1.4 Aplicaciones:

Amplia aplicación en la construcción de vehículos, engranajes y motores. Partes de maquinarias y repuestos, tales como árboles de transmisión, brazos de ejes, ejes de bomba, ejes de cardan, cigüeñales, pernos y tuercas, bielas, árboles, pines, émbolos, etc. Para moldes para la inyección de plástico. [31;37]

1.2 ALEACIÓN Molibdeno-Níquel-Aluminio (Capa de enlace METCO 447)

La aleación MoNiAl es un material de deposición, llamado comercialmente Metco 447; es un polvo compuesto Molibdeno-níquel-aluminio. Se desarrolló como un material de propósito general, para la aplicación de capas duras, resistentes a presiones, impactos y a los abrasivos, con una dureza moderada que cubre los rangos de 75 a 80 Rb; la cohesión de las capas exhiben una fuerza tensora interior por encima de los 103 Mpa con una buena retención de borde después de mecanizar; la temperatura de servicio máxima es de 760 °C para funcionamiento intermitente y 650 °C para uso continuo.

1.2.1 Objetivos de la Capa de Enlace METCO 447

- ?? Permitir una buena adherencia entre el substrato y el recubrimiento a ser aplicado.

- ?? Prevenir la degradación de las superficies por corrosión, erosión y abrasión ó una combinación de estos mecanismos.

1.2.2 Composición Química de la Capa de Enlace METCO 447

En la tabla 3 se presenta la composición química de la aleación Molibdeno-Níquel-Aluminio METCO 447 que será utilizada para realizar el recubrimiento (la capa de enlace) del acero AISI 4140.

Tabla 3

Composición química de la aleación Molibdeno-Níquel-Aluminio (Capa de enlace METCO en % en peso).

Mo	AL	Ni
5.0	5.5	Balance

1.3 ALEACIÓN BASE-NÍQUEL (COLMONOY 88)

La aleación NiCrBSiW es un material de deposición, llamado comercialmente Colmonoy 88; 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, eliminando los problemas en que se incurrían con el mezclado y combinación de partículas de Carburo de Tungsteno, incrementado en los últimos años de 5 a 10 veces el tiempo de servicio de piezas de maquinarias.

Las aleaciones base Níquel de alta dureza, contienen cantidades substanciales de Boro y Silicio, disponen de la propiedad de ser auto fundentes, es decir a altas temperaturas ambos elementos reaccionan con

óxidos para formar boro silicatos con un punto de fundición bajo, forman una escoria y protegen al resto de los elementos de la aleación del proceso de la oxidación.

Uno de los principales problemas para maximizar los beneficios de esta aleación es la gran diferencia entre las partículas de carburo de tungsteno y los elementos de la matriz. Una vez mezcladas, las partículas de carburo de tungsteno comienzan a segregarse dependiendo de la cantidad, tiempo de traslado y agitación que sufre el polvo antes de llegar al sitio de trabajo. Otros factores que deben ser tomados en cuenta son: el punto de fusión de los carburos de tungsteno (3316 °C aproximadamente), la diferencia de tamaño y geometría de las partículas así como el efecto de peso específico en el ciclo de fusión en donde las partículas de WC caen al fondo, depositándose en la frontera del recubrimiento-substrato, aumentando la porosidad y por lo tanto disminuyendo la adhesión.

1.3.1 Objetivos del Recubrimiento

- ?? Prevenir la degradación de las superficies por corrosión, erosión y abrasión ó una combinación de estos mecanismos.

- ?? Extender la vida útil en piezas críticas de maquinarias que se encuentran en ambientes o condiciones agresivas de operación.

1.3.2 Composición Química del Colmonoy 88

En la tabla 3 se presenta la composición química de la aleación base-níquel Colmonoy 88 que será utilizada para realizar los recubrimientos del acero AISI 4140 previamente recubierto con la capa de enlace METCO 447.

Tabla 4

Composición química de la aleación Base-Níquel (Colmonoy 88 en % en peso).

C	Si	Cr	B	W	Fe	Ni
0.8	4.0	15.0	3.0	17.3	3.5	Balance

1.3.3 Dureza del Colmonoy 88

El material de deposición, llamado comercialmente Colmonoy 88 (NiCrBSiW), posee una dureza que varía entre los 59 y 64 Rc.

1.4 FATIGA

Una falla por fatiga se produce sin ningún indicio previo que permita precaverse contra ella. La fatiga da por resultado una fractura frágil, sin deformación notable. La superficie de fractura puede ser, microscópicamente, normal al eje de la tensión de tracción principal.

Las roturas por fatiga se pueden reconocer usualmente por el aspecto de la superficie de fractura, que muestra una región lisa, debida al frotamiento que ocurre cuando se propaga la grieta a través de la sección y una región rugosa, originada cuando la pieza ha roto dúctilmente por haber disminuido la sección sana al no poder soportar la carga. Es frecuente que el progreso de la fractura aparezca señalado por una serie de marcas anulares, que parecen propagarse, desde el punto de iniciación de la falla, como el frente de las olas hacia el interior de una playa.

Al inspeccionar las superficies después de la fractura final con frecuencia se observa donde se agrandó gradualmente la grieta partiendo desde una rizadura a la siguiente hasta que la sección se debilitó lo suficientemente como para que ocurriera la fractura final en una aplicación última de carga. Lo anterior puede suceder debido a que el esfuerzo excede la resistencia final, presentándose la fractura como una prueba estática a la tensión.

Se puede decir que la fractura final se presenta como si el material fuera frágil; esta fractura la favorece una alta concentración de esfuerzo y una aplicación rápida de la carga, estando ambos presentes normalmente cuando ocurre la fractura final por fatiga. La curvatura de la rizadura sirve para indicar el origen de la falla. El área con marcas se conoce como zona de fatiga. Tiene una textura lisa y aterciopelada desarrollada por la presión repetida de juntar y separar las superficies que encajan en la grieta. Esto contrasta con la fractura final relativamente áspera.

Existen tres condiciones para que se produzca la rotura por fatiga. Un valor elevado en los esfuerzos de tracción, una repetición cíclica en la aplicación de estos esfuerzos y un número suficiente de ciclos. Existen otras condiciones que producen la fatiga o la modifican, tales como las concentraciones de esfuerzos, corrosión, temperatura, sobrecarga, estructura metalúrgica, tensiones residuales y las tensiones combinadas. Se desconoce la causa fundamental de la fatiga de los metales, por lo que es necesario discutir el efecto de cada uno de estos factores desde un punto de vista empírico. Esta información se ha acumulado mediante las pruebas de fatiga, todas ellas normalizadas y muy restringidas, de numerosos materiales, en diversas formas y sujetos a diversas clases de cargas. [9;11;15;31]

1.4.1 Características de la falla por fatiga

1.4.1.1 Forma de la rotura

Las roturas por fatiga que se producen bajo esfuerzos alternativos se diferencian de las roturas violentas originadas por un único esfuerzo estático o dinámico. Una característica de la rotura por fatiga es que el material no experimenta una gran deformación en la región de rotura. Esto ha de considerarse también para materiales tenaces, que en las roturas violentas, por ejemplo, en el ensayo de tracción, experimentan grandes deformaciones y que, precisamente por esto, alcanzan altos valores de tenacidad.

1.4.1.2 Las características de la rotura por fatiga son:

■ **Zonas de fisuras:** En la rotura por fatiga puede observarse con frecuencia no uno sino varios lugares de fisuras o de roturas iniciales, desde los que se extiende la rotura. Estos puntos de rotura inicial pueden estar condicionados por el propio material, por la configuración superficial o por la forma de la pieza examinada. Los puntos de partida de la rotura inicial, debidos al material son con frecuencia pequeños defectos inevitables, tales como inclusiones de escoria, puntos o bandas de localización de carburos, rechupes o sopladuras. Las capas de cascarilla o vetas de arena incorporadas en los procesos de fabricación pueden originar también las roturas por fatiga.

Los puntos de rotura inicial condicionados por la forma de la pieza son originados, la mayoría de las veces, por el efecto de entalla a causa de una transición de forma demasiado brusca. Estas transiciones bruscas existen muchas veces en los chaveteros, roscas, zonas de transición en piezas roscadas y en otros cambios de sección. El estado superficial

también puede ejercer gran influencia si la superficie está finamente pulida o, por ejemplo, debido a la limpieza con muela que provoca una considerable disminución de resistencia a la fatiga a causa de un intenso efecto de entalle. Un fenómeno de corrosión superficial también suele tener gran repercusión en la disminución de la resistencia a la fatiga.

- **Zona de rotura por fatiga y zona de entallas lineales:** Siempre que el material reciba esfuerzos puramente elásticos, tal como puede considerarse en principio en el caso de cargas por debajo del límite elástico, una deformación no daría lugar más que a una distorsión de la red atómica, la cual desaparecería al volver a retirar la carga. La fatiga es debida a deformaciones plásticas en el cristal, muy pequeñas, pero que aparecen ya con cargas reducidas, y que siempre pueden ser originadas por puntos defectuosos de la red y excesos locales de tensiones en los límites de grano. En los estudios corrientes de resistencia mecánica, puede parecer que todo el cuerpo en su conjunto tiene todavía un comportamiento totalmente elástico. A esto hay que añadir que muchas veces puede haber ya micro tensiones en la estructura, tales como las que se dan en una estructura compuesta por constituyentes distintos, Estas micro tensiones pueden superponerse localmente a las tensiones externas. A causa de las tensiones, siempre que alcancen una medida determinada, se forman en primer lugar pequeñas fisuras no visibles al microscopio que actúan como si fuesen entallas muy agudas y luego, bajo la tensión de trabajo correspondiente, van creciendo hasta convertirse en grietas visibles al microscopio. Los defectos señalados como puntos de fisuración o puntos de rotura inicial en el material pueden producir también, en estos casos, una fisuración sub-microscópica, por dislocaciones o por otros defectos en la red.

Al seguir actuando continuamente sobre las grietas con las siguientes cargas alternativas, los bordes de las mismas se volverán en parte a colocar uno sobre otro en el momento de interrumpirse la carga, o a solaparse bajo presión incluso al cambiar el sentido del esfuerzo. Los bordes de las grietas quedan así parcialmente aplanados. Por consiguiente, las caras propiamente dichas de la falla por fatiga presentan, frente al resto un plano muy liso. Sin embargo en la práctica, la carga no será siempre igual. Con una determinada disminución de la carga se llega en parte a interrumpir el progreso de la rotura por fatiga, mientras que, incluso a cargas más pequeñas, la compresión de la región anteriormente agrietada sigue progresando con el cambio de carga. Cuando vuelve a aumentar la carga continúa el proceso de agrietamiento, por lo que con frecuencia se lleva a cabo un trabajo progresivo por zonas (grados de carga) de la falla. Por este proceso aparecen las entallas lineales. De acuerdo con el proceso de agrietamiento que desde un punto de fisuración inicial en el material se va propagando en todos los sentidos, las entallas tienen que aparecer aproximadamente en forma de círculos alrededor del punto de grieta inicial como centro de los mismos.

- **Zona de rotura por sobrecarga:** Se produce la falla por sobrecarga, con la forma de una falla violenta, en el momento en que la zona o zonas de falla por fatiga se han extendido hasta el punto que la sección de la pieza, que no ha llegado a romperse, se ha vuelto tan pequeña que no es ya suficiente la resistencia estática ni a veces, la dinámica para soportar la carga existente. esta zona de falla por sobrecarga presenta una gran deformación plástica debido a la gran sobrecarga aplicada sobre la sección remanente de la probeta. La naturaleza de la fisuración inicial confiere a la zona de falla, no un aspecto liso, sino quebrado. La rotura por sobrecarga aparecerá con un gran número de hoyuelos. Estas depresiones tienen

forma de copa, las cuales son como una especie de micro vacíos aglutinados. Estas micro cavidades nuclean en regiones de altos esfuerzos localizadas en discontinuidades, tal como asociadas con partículas en segunda fase de fatiga, inclusiones, límites de granos y dislocaciones acumuladas.

Como la tensión en el material aumenta, el micro vacío crece, se une a otros circunvecinos y eventualmente forma la superficie continua de fractura. El tamaño de los hoyuelos sobre una superficie de fractura viene dado por el número y la distribución de micro vacíos que son nucleados. Cuando los sitios de nucleación son pequeños y anchamente espaciados, los micro vacíos crecen longitudinalmente antes de unirse y el resultado es una superficie que contiene hoyuelos largos. Por la naturaleza de la rotura y su posición con relación a la sección y también por la forma en que esta se inicia, se puede llegar, en una pieza rota, a una conclusión sobre la índole de las tensiones aplicadas en servicio. La relación entre la dimensión de la zona de falla por sobrecarga, da una indicación de la magnitud de la tensión que ha originado la misma. [31]

1.5 TIPOS DE ENSAYOS

1.5.1 Ensayo de Tracción

Con los ensayos de tracción se obtienen diagramas de cargas (N) vs. alargamiento (mm), los cuales permiten estudiar los diferentes períodos por los cuales pasa el material; así se conocen principalmente tres períodos que determinan las propiedades estáticas del material:

- El primero, durante el cual el alargamiento en la probeta no es permanente, es decir, la probeta recupera sus dimensiones originales cuando se retira la carga.

- El segundo, el alargamiento en la probeta es permanente, por lo tanto la deformación ocurrida en la misma es fundamentalmente plástica.

- En el tercero y último, se produce un encuellamiento hasta que la probeta se fractura.

Las probetas usadas se caracterizan por poseer una región central uniforme, los extremos aumentan suavemente de sección hasta un tamaño mayor los cuales son adecuados para la sujeción en las mordazas auto alienantes (para asegurar una aplicación axial de la carga).

El alargamiento medido de las partes rotas de la probeta tiene dos componentes: un alargamiento uniforme, que es proporcional a la longitud entre las marcas y un alargamiento local en el estrangulamiento, que depende del diámetro, pero no de la longitud entre las marcas.

Usualmente se suele emplear la resistencia a la tracción para caracterizar la resistencia mecánica, así como también relacionarla con los ensayos de fatiga. [14;27]

1.5.2 Ensayo de Fatiga a Flexión Rotativa

Con la finalidad de establecer medidas cuantitativas de la resistencia a la fatiga de un determinado material es necesario realizar ensayos bajo condiciones controladas, para ello se pueden realizar:

- ✍ Ensayos en laboratorios con probetas bajo condiciones definidas de esfuerzos que son aplicados a ensayos de fatiga por flexión rotativa para determinar la resistencia a la fatiga de metales ferrosos y la

influencia de factores como elementos de aleación, tratamientos térmicos, recubrimientos, acabado superficial, etc.

✍️ ✍️ Ensayo bajo condiciones simuladas de lo que ocurre en la práctica con partes reales, los resultados son significativos por la influencia tanto del material como de la forma de elemento.

En la máquina de flexión rotativa, la probeta se soporta como una viga (un extremo de la probeta es sujetado en un mandril por medio de tornillos que sirven para alinear la probeta) y se aplica la carga (a través de un soporte situado en el otro extremo) con pesos muertos aplicados por medio de cojinetes, que permiten girar a la probeta. Cuando la probeta tiene movimiento de rotación, cada punto de la circunferencia de la sección de ensayo está sometido a un esfuerzo alternante que varía sinusoidalmente desde un valor de tensión a otro igual de compresión.

Cuando la probeta está sometida a una flexión estática constante, se genera en las fibras superiores, esfuerzos axiales a tracción y en las fibras inferiores esfuerzos de compresión. Al girar el elemento 180° (un reverso), las fibras que anteriormente estaban sometidas a tracción estarán solicitadas a compresión y viceversa. El tipo de sollicitación que se genera es alternante porque el momento flector constante cambia de signo por cada reverso para una misma fibra.

A través de este ensayo se determina la resistencia a la fatiga de un número de probetas similares, al someterse cada una a un valor particular de carga o esfuerzo fluctuante (carga cíclica) de amplitud constante sin efecto de una componente estática hasta su rotura, obteniéndose una relación entre la carga (S) y el número de ciclos a la fractura (N). [15;31]

1.5.2.1 Diagrama de Fatiga de Wöhler

En el diagrama de Wöhler se representa el comportamiento del material a través de la curva de fatiga Esfuerzo alternante-Número de ciclos (S-N), donde el eje de las ordenadas representa el esfuerzo alternante y el eje de las abscisas el número de ciclos. Por comodidad de la representación se utiliza escala doble logarítmica y la curva resultante es una línea recta e inclinada en la cual las probetas fracturan (mientras no alcanzan el límite de fatiga) y otra paralela al eje de las abscisas, cuando se alcanza dicho límite (ver figura 1). El punto de intersección de las curvas, se presenta generalmente para los aceros entre 1 a 5 millones de ciclos. Se distinguen dos regiones características:

- a) De vida temporal, correspondiente a condiciones para las probetas con vida finita.
- b) Región de vida infinita, en la que teóricamente las probetas no fallan. El límite de fatiga corresponde a la asíntota horizontal de la curva.

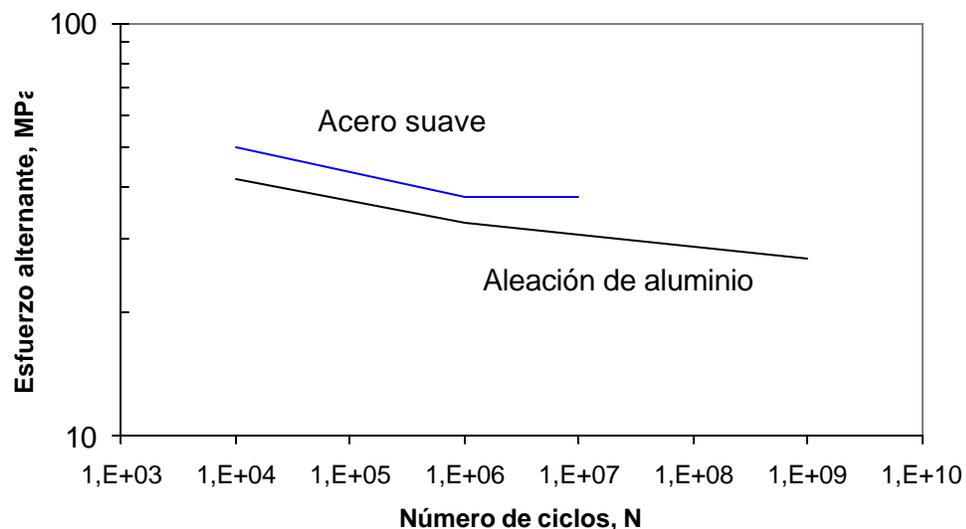


Figura 1
Diagrama de fatiga de Wöhler. [31]

Las curvas de fatiga o S-N, representadas por una línea inclinada en la cual las probetas fallan, son usualmente determinadas ensayando un gran número de probetas, debido a la naturaleza estadística de la fatiga (a la gran dispersión que se genera entre los resultados obtenidos) y en un intervalo de aproximadamente 10^5 a 10^8 ciclos.

Aunque estas curvas se utilizan para analizar la vida a la fatiga de un material, no hacen diferencia entre las etapas de inicio de fatiga y propagación de la grieta, sino que sólo indican el número total de ciclos necesarios para producir la fractura completa de la probeta a un nivel dado de esfuerzos. [9;11;15;31]

1.5.2.2 Modelo de Basquin

Describe la resistencia a la fatiga de los aceros en la zona de vida temporal (ver figura 4). Esta relación se puede expresar mediante una ecuación paramétrica simple de la forma:

$$S = A * (N_f)^b$$

Donde:

S: Resistencia a la fatiga.

A: Constante relacionado con el coeficiente de resistencia a la fatiga.

N_f : Número de reversos hasta la fractura

b: Exponente de resistencia a la fatiga o exponente de Basquin.

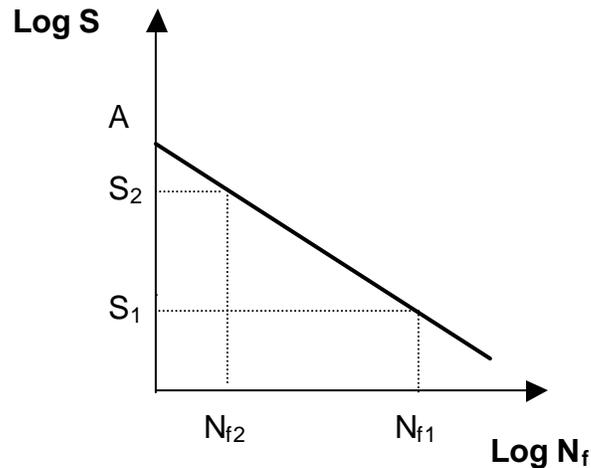


Figura 2

Zona de resistencia temporal a la fatiga modelo de Basquin,

1.5.2.3 Causas de dispersión estadística de los resultados en fatiga

Al realizar el estudio del comportamiento a la fatiga de un material, existe una dispersión respecto a los resultados obtenidos en los ensayos. Para fijar la dispersión atribuible al metal ensayado, se deben mantener constante las causas que a continuación citamos:

- Acabado superficial no uniforme ó existencia de imperfecciones locales tales como: rayaduras no apreciadas durante el pulido, marcas o muescas, porosidades y otros defectos de fabricación.
- Cambios apreciables de las condiciones de ensayo debido al incremento de temperatura o influencia de medios corrosivos.
- Defectos en la alineación de las probetas respecto a su eje de rotación.
- Defectos internos o superficiales por la heterogeneidad química y estructural del material.

- Presencia de esfuerzos superficiales debido al mecanizado ó tratamiento térmico realizado.
- Tolerancias de fabricación y montaje de las probetas. [9;31]

1.5.3 FATIGA-CORROSIÓN

1.5.3.1 Corrosión

Ataque químico o electro-químico que sufren los metales y aleaciones al reaccionar con el medio que los rodea; destrucción de los materiales por cualquier medio que no sea mecánico.

1.5.3.2 Formas

Una clasificación podría ser la siguiente:

- a) Ataque uniforme.
- b) Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo, el cual ocurre porque el metal está sometido a esfuerzos en medio corrosivo; los requisitos para que ocurra el agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo son:
 - i. Un medio ambiente específico (corrosivo).
 - ii. Una fuente de esfuerzos (aplicados o residuales).
- c) Disolución selectiva.
- d) Galvánica.

- e) Ínter granular.
- f) Por grietas o hendiduras.
- g) Por picadura. [15;16;31]

1.5.3.3 Generalidades de Fatiga-Corrosión

La fatiga-corrosión es un fenómeno de gran complejidad que puede afectar la vida de un elemento o material. Tiene lugar, por ejemplo, en los ejes de las hélices marinas, en los tubos de calderas y sobre calentadores, en los componentes de turbinas y bombas y en las líneas que transportan líquidos corrosivos durante su empleo.

Para fines prácticos la fatiga-corrosión puede considerarse que es debida al efecto de los esfuerzos fluctuantes en un medio corrosivo además del aire y son mayores las ocurrencias de falla cuando las piezas o componentes trabajan normalmente que cuando se hacen ensayos en laboratorio, puesto que estos ensayos son de duración más corta.

Los fallos debidos a fatiga-corrosión difieren de los fallos por fatiga normal en los siguientes aspectos:

- ✍✍ La superficie cambia de color por el proceso de corrosión y hay formación de picaduras o grietas en ciertos puntos debido a la fatiga.
- ✍✍ Existen muchas más grietas; esto debido a que el ataque electroquímico produce puntos de corrosión (corrosión por picadura) posibles para la formación de grietas secundarias de fatiga. [11;31]

1.6 RECUBRIMIENTOS

1.6.1 Termo-Rociado

Los procedimientos del termo-rociado son sofisticados y altamente especializados, con un amplio espectro de utilización en los campos de mantenimiento reconstructivo, de protección y manufactura. La naturaleza de estos procesos es la acción concentrada de varios componentes y variables, que actuando simultáneamente y aplicadas adecuadamente, producen un efecto mucho más grande que el de cada una de ellas cuando actúa individualmente. Por tal razón cada uno de los componentes y variables deben ser comprendidos para permitir la selección y operación apropiada de un proceso particular.

1.6.1.1 Definición

El termo-rociados comprende un grupo de procesos en los cuales materiales superficiales metálicos o no metálicos en condición fundida o pastosa son depositados en forma de rociado sobre un substrato previamente preparado. El material a ser aplicado superficialmente debe estar en forma de polvo, varillas, cordón o alambre. La pistola de termo-rociado genera el calor necesario mediante el uso de combustibles en forma de gas o líquido. A medida que el material es calentado cambia a un estado pastoso o líquido, siendo entonces acelerado por un gas comprimido. La corriente confinada de partículas es dirigida hacia el substrato, las partículas golpean la superficie, se aplastan contra ella y forman plaquetas delgadas que se conforman y adhieren a las irregularidades de la superficie preparada y entre ellas mismas. A medida que las partículas rociadas inciden sobre la

superficie del sustrato, se enfrían y consolidan, partícula por partícula, formando de esta manera el revestimiento. [18;19;20;21;22;23;30;33]

1.6.1.2 VARIANTES DEL PROCESO

Los materiales utilizados, el método de generación de calor y el método de impulsar los materiales sobre el sustrato, son las variantes básicas del proceso de termo-rociado.

1.6.1.2.1 Materiales Rociados

Los materiales rociados son utilizados en forma de alambre, varillas, cordón o polvo. Algunos metales, óxidos y compuestos inter metálicos. Algunos plásticos orgánicos, ciertos vidrios y cerámicas pueden ser depositados por una o más de los procesos de termo-rociado. [22;23]

1.6.1.2.2 Procesos

Los procesos de termo-rociado pueden ser categorizados dentro de dos grupos básicos de acuerdo al método de generación de calor. El primer grupo utiliza casi siempre gases combustibles como fuentes de calor, sólo el método H.V.O.F. (High Velocity Oxi Fuel) utiliza combustible líquido (ver figura 4). Los procesos que utilizan potencia eléctrica como fuente de calor, tales como el plasma (por arco, transferido ó no), arco eléctrico y plasma por inducción pertenecen al segundo grupo. Los consumibles utilizados en este grupo se encuentran en forma de polvo o alambre.

1.6.1.3 NATURALEZA DE LOS REVESTIMIENTOS ROCIADOS

Una regla básica del termo-rociado es que cualquier desviación de las normas para una aplicación particular o el descuido de algún detalle, puede producir resultados desfavorables. El termo-rociado tiene tres aspectos básicos que se deben tomar en consideración.

1.6.1.3.1 Substratos

Los substratos en los cuales son aplicados los revestimientos termo-rociados incluyen metales, óxidos, cerámicas, vidrios, algunos plásticos y madera. No todos los materiales, pueden ser aplicados sobre todos los substratos, algunos requieren técnicas especiales.

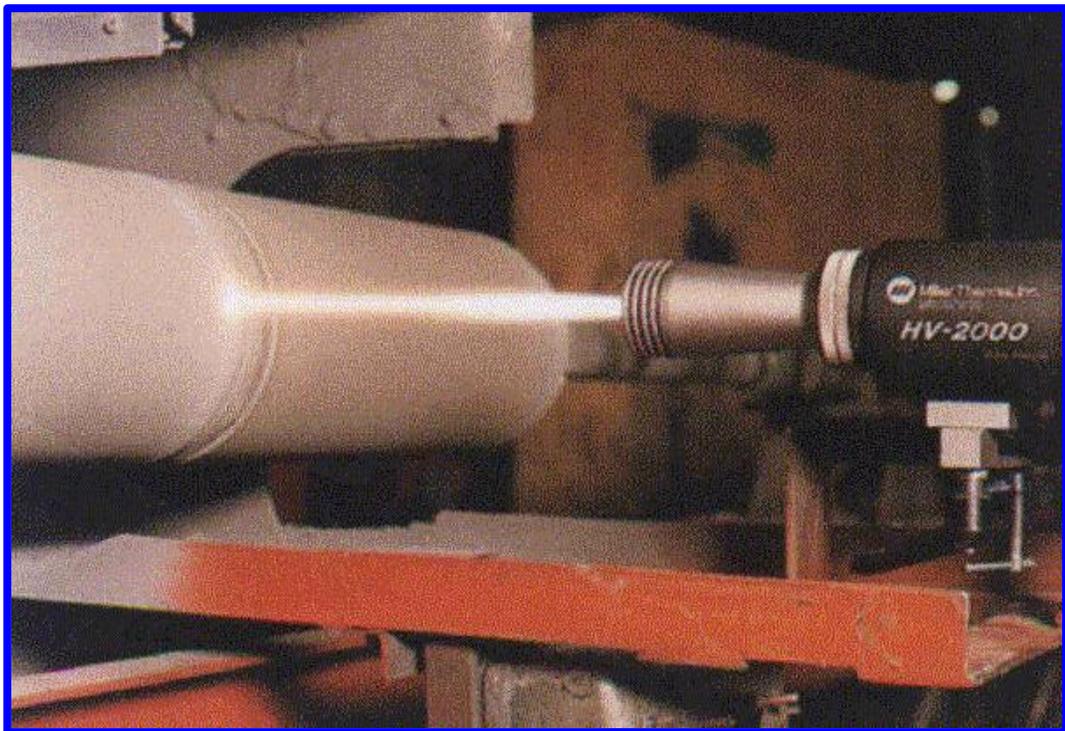


Figura 3

Proceso de Termo-rociado, por el H.V.O.F. (High Velocity Oxi Fuel) [37]

Para cada proceso de termo-rociado se necesita una previa preparación del sustrato a rociar, y es aplicada la misma para todos los procesos. Dos pasos de gran importancia son los siguientes:

✍️ Limpieza de la superficie para eliminar cualquier contaminación que pueda inhibir la adherencia del revestimiento al sustrato.

✍️ Aumentar la rugosidad de la superficie para proveer rugosidades y aumentar la adhesión del revestimiento, así como, para obtener una superficie efectiva mayor.

1.6.1.3.2 Adherencia de los Revestimientos

La unión entre el revestimiento y el sustrato puede ser mecánica o metalúrgica. Esta es influenciada por varios factores: material de revestimiento, condición del sustrato, grado de rugosidad de la superficie, limpieza, temperatura de la superficie antes, durante y después del rociado y la velocidad de impacto de las partículas.

1.6.1.3.3 Estructura del Revestimiento

La estructura y composición química de los revestimientos depositados, rociados en aire son diferentes a las características del mismo material antes de ser rociado.

Las diferencias en la estructura y composición química se debe a la naturaleza del revestimiento, a la reacción del material con los gases del proceso y con la atmósfera circundante mientras el material se encuentra en condición fundida. Por ejemplo cuando el aire u oxígeno son utilizados como

gases en el proceso, se forman óxidos del material aplicado y se convierten en parte del revestimiento. Los revestimientos metálicos tienden a ser porosos y frágiles y a tener una dureza distinta a la del material original. Las estructuras de los revestimientos rociados serán similares en su naturaleza laminar, pero exhibirá variaciones en sus características, dependiendo del proceso particular de rociado utilizado, los parámetros del proceso, técnica empleada, y el material aplicado.

La relación de densidad del depósito rociado varía con la velocidad de las partículas y la temperatura de la fuente de calor del proceso de revestimiento.

1.6.1.4 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

La preparación de la superficie es el paso más crítico en el proceso de termo-rociado. La calidad de la adhesión del recubrimiento está directamente relacionada con la limpieza y la rugosidad de la superficie del sustrato. El apego a los procedimientos para preparar la superficie del sustrato es necesario para asegurar la aplicación exitosa de la capa de termo-rociado. El material de recubrimiento y el tipo de sustrato son los principales factores que determinarán qué preparación de la superficie es necesaria para lograr una unión consistente.

En partes mecánicas con grandes esfuerzos, una inspección previa al recubrimiento es necesaria para detectar fallas en la base del metal. Esto se hace utilizando métodos de inspección no destructivos. Las fallas en la parte estructural pueden producir fallas similares en el recubrimiento. Las grietas del sustrato no son reparadas por el termo-rociado. Los depósitos rociados no agregan resistencia mecánica al sustrato.

1.6.1.4.1 LIMPIEZA Y MANEJO

El primer paso en la preparación de la superficie a termo rociar, es remover todas sustancias contaminantes que en ella se encuentren, tal como aceite, grasa, y pintura. El calor del termo-rociado no eliminará los contaminantes y esta a su vez inhibirá la unión. Después de haber removido todos los contaminantes, la limpieza de la pieza debe mantenerse hasta completar el ciclo de rociado.

1.6.1.4.1.1 Vaporizado Desengrasante

El vaporizado desengrasante caliente es un común, económico y eficiente método para remover contaminantes orgánicos. El proceso regularmente debe durar entre 15 a 30 min. para remover todo el aceite de los intersticios y superficies porosas. Si las superficies a trabajar son muy grandes para la limpieza con vapor, es recomendable sumergir la pieza en una solución jabonosa caliente, o en su defecto limpiar a mano con un solvente libre de aceite.

Los solventes comúnmente utilizados para desengrasar son el percioroetileno, el tricloroetileno, y el 1,1,1 tricloroetano. Ellos normalmente son seleccionados por sus consideraciones de seguridad y por poseer un espectro de temperaturas necesaria para la limpieza.

Se prohíbe el uso de solventes con base de cloro en titanio o aleaciones de titanio, debido a que el cloro induce a la rotura o fractura de este material.

1.6.1.4.1.2 Vaporizado Abrasivo

Es un desgaste abrasivo húmedo; se trata de un líquido con componentes abrasivos el cual se proyecta con una pistola (JET) hacia la superficie. Este tipo de limpieza se realiza en un sitio cerrado; el mismo simula a una arena abrasiva; uno de los abrasivos utilizados es el óxido de aluminio. Las partes deben enjuagarse completamente después de haber realizado la limpieza. El vapor abrasivo se utiliza para cualquiera de los siguientes propósitos:

✍️✍️ Remover ligeras protuberancias.

✍️✍️ Remover productos corrosivos.

✍️✍️ Remover enchapados o recubrimientos anteriores.

✍️✍️ Poner las superficies ásperas para termo-rociados con plasma o arco eléctrico.

1.6.1.4.1.3 Baño Químico

El baño químico puro o diluido es el procedimiento de limpieza más drástico. Este proceso debe realizarse cuando la pieza se encuentra en la fase final del maquinado, para minimizar el peligro de un ataque ínter granular. Este proceso requiere una total inmersión de la pieza en la solución ácida. El tiempo del proceso depende de la condición tenaz de la superficie, de la remoción de cuerpos extraños o ambos. Después del baño químico, se enjuaga la pieza con agua caliente y se coloca dentro de una solución alcalina y se vuelve a enjuagar con una ráfaga de vapor caliente.

El ácido puede contaminar la superficie, lo cual puede ser neutralizado lavando la pieza con bicarbonato de sodio o un baño caliente de solución alcalina. Al final la superficie deberá lavarse con agua fría y secarla con aire.

1.6.1.4.1.4 Horno

Varios elementos de máquina pueden ser materiales porosos, por ser elaboradas en moldes de arena, y pueden absorber considerables cantidades de aceite, que pueden salir fuera de los poros durante el proceso de rociado. Juntas soldadas que han sido inspeccionadas con el método de líquidos penetrantes cumplen esta condición. Para evitar esto, se precalienta el horno a 315 C (600° F) por 4 horas para secar el aceite que pueda existir.

1.6.1.4.1.5 Ultrasonido

La limpieza ultrasónica puede ser usada cuando los contaminantes se alojan en áreas confinadas. El equipo consiste en un tanque que contiene una solución de limpieza que produce vibraciones ultrasónicas dentro de él. La solución es seleccionada en base al problema encontrado. Debido al calor generado, no se recomiendan solventes inflamables o muy volátiles para períodos largos de funcionamiento.

1.6.1.4.1.6 Abrasivos

El método de desgaste abrasivo es muy eficaz debido a que elimina depósitos de óxido, escamas, etc. El mismo se compone de un compresor de aire que acoplado a una tobera envía partículas abrasivas contra el sustrato. Este proceso debe realizarse en un equipo diferente al de termo-rociado, para prevenir la contaminación del material abrasivo. Debe tomarse

mucha atención en el tipo y tamaño del abrasivo a utilizar. Generalmente las piezas que son planas, son más difíciles de trabajar que las piezas maquinadas. Existen numerosos métodos de limpieza localizada, sin embargo los métodos de vapor o de baño químico son los más utilizados para limpieza general de la pieza.

1.6.1.4.1.7 Cepillado

Este método sólo se usa cuando la limpieza localizada es necesaria. Pequeños cepillos de alambre son conducidos por una máquina que limpia por una acción de arrastre.

1.6.1.5 RUGOSIDAD

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

1. Granallado.
2. Macro rugosidad.
3. Aplicación de una capa de recubrimiento.

A menudo se usan combinaciones de estos métodos, debido que la rugosidad apropiada es tan importante como la limpieza de la pieza.

1.6.1.5.1 Propósito

La superficie rugosa es usada para fortalecer la capa externa del sustrato y el recubrimiento sirve para:

- ✍️✍️ Proveer una superficie compacta y fuerte.
- ✍️✍️ Capas de agarre.
- ✍️✍️ Incrementar el área de agarre.
- ✍️✍️ Descontaminar la superficie.

1.6.1.5.2 Grado

El grado de rugosidad requerido y el recubrimiento dependen del material a aplicarse, el tipo de proceso a utilizar y las subsecuentes condiciones del proceso dependen del acabado del material.

1.6.1.6 GRANALLADO

La arena abrasiva proyectada, es el método comúnmente utilizado en la técnica de rugosidad. La superficie a recubrir es impregnada uniformemente por las partículas abrasivas.

1.6.1.6.1 Factores que tienen influencia en la selección de la arena

Debe tenerse mucho cuidado en la selección de la arena. Entre los factores que pueden considerarse están:

☞☞ Parte del material y dureza.

☞☞ Espesor y construcción de la parte a ser devastada.

☞☞ Tipo de recubrimiento y rugosidad requerida para una buena adhesión.

☞☞ Requisitos de servicios.

☞☞ Requisitos en la tasa de producción.

☞☞ Tamaño del abrasivo.

☞☞ Presión del desbaste.

☞☞ Tamaño de la tobera.

☞☞ Tiempo de vida.

1.6.1.6.2 Tipo y tamaño del abrasivo

Los efectos de la arena abrasiva dependen de su tipo y tamaño. Filo, dureza y partículas angulares proveen de excelentes resultados. Todo el abrasivo debe estar limpio, seco, libre de aceites, u otros contaminantes. La apropiada selección de un desbaste medio depende de la dureza del sustrato.

La calidad del acabado depende del tamaño del abrasivo; partículas pequeñas permitirán una preparación de más área por hora; en cambio partículas abrasivas grandes, producen una remoción rápida de material del sustrato, además de acabados mas ásperos.

Los abrasivos más comunes utilizados son:

☞☞Oxido de aluminio.

☞☞Hierro templado.

☞☞Acero angular.

☞☞Carburo de silicio.

1.6.1.6.3 Procedimientos de desbaste

En adición al tamaño y tipo de abrasivo, otras variables importantes en el proceso son:

a) **Presión de aire**, una baja o suave presión de aire puede ser utilizada para sustratos como el aluminio y aleaciones de cobre, bronce y plásticos para minimizar la probabilidad de que el abrasivo se empotre en el sustrato. Altas presiones causan un rápido desgaste del abrasivo y puede dañar la capa externa del sustrato.

b) **Ángulo de desbaste**, debe ser entre 75 y 90. (de lado a lado)

c) **Distancia**, está entre 10 y 30 cm.. Dependiendo del tamaño y tipo de abrasivo, apertura de la tobera y capacidad de la máquina.

d) **Tiempo**, un exceso en el tiempo del proceso puede acarrear una textura de la superficie indeseable.

1.6.1.6.4 Reciclaje del abrasivo

El abrasivo utilizado puede reciclarse, limpiarse y guardado para usos posteriores, solamente se requiere que un 80% del mismo se encuentre en su tamaño original, ya que el error producido en separar el abrasivo en mal estado puede ser perjudicial para el proceso.

1.6.1.7 MACRO RUGOSIDAD

La macro rugosidad es otro método de preparación de la superficie normalmente logrado por maquinado esmerilado y es mejorado con el granallado.

1.6.1.7.1 Socavado

El socavado consiste en una operación de maquinado o esmerilado que tiene como finalidad crear espacio suficiente para que se deposite el Termo-rociado. Este proceso provee un espesor de la superficie y acabado del recubrimiento uniforme y además trabaja en la dureza del sustrato, remueve contaminantes químicos y óxidos. La macro rugosidad reduce la sección transversal del componente lo cual puede afectar de manera adversa a las tensiones y niveles de fatiga de las partes.

1.6.1.7.1 Acanalado

Es una operación de corte profundo que tiene como objeto hacer estrías en el sustrato. Se realiza principalmente para los siguientes propósitos:

✍️✍️ Restringir los niveles de tensiones.

✍️✍️ Aumentar el área de agarre.

Los niveles de tensión interna aumentan a medida que aumenta el espesor del recubrimiento y es aun más severo en el caso de los metales duros o cerámicas; en cambio con este método se reducen los niveles de tensión ya que se dividen las tensiones en pequeños componentes. Este método mejora la adherencia del recubrimiento, y existe menos tendencia a que ocurra separación de las capas.

1.6.1.8 LIMPIEZA DESPUÉS DE LA RUGOSIDAD

Cuando se emplea una ráfaga de material erosivo para crear la rugosidad, se expone sustrato fresco que es susceptible a la contaminación. El contacto del elemento con las manos puede ocasionar que se depositen en el mismo aceite o sudor que puedan afectar el recubrimiento. A causa de esto el proceso de termo-rociado se debe completar antes que la superficie limpiada se oxide. Donde sea posible debe mantenerse niveles bajos de humedad, en algunos casos se utilizan hornos para eliminar los excesos de humedad.

1.6.1.9 CAPA DE RECUBRIMIENTO

La capa de recubrimiento es otro método utilizado en la preparación de la superficie. Este método particularmente se usa en superficies muy delgadas o muy duras para poder ser aplicados los métodos anteriores. Frecuentemente se selecciona para proporcionar protección al sustrato así como para proporcionar un buen agarre.

1.6.1.9.1 Consideraciones generales

La decisión de utilizar este método depende directamente bajo qué condiciones va a trabajar el recubrimiento, particularmente si va a ser utilizado en condiciones corrosivas o donde prevalezca el óxido.

1.6.1.9.2 Espesor de la capa

El uso de este método a veces limita el espesor de las siguientes aplicaciones de recubrimiento. La capa no va a absorber las posibles tensiones que se encuentren en el sustrato, usualmente el espesor aplicado va desde 0,08 a 0,18 mm.

1.6.1.9.3 Materiales

Los materiales que comercialmente se utilizan para este proceso son el molibdeno y las composiciones y aleaciones de níquel-aluminio, quienes interactúan con el sustrato durante el rociado. El Ni-Al es usado para muchas aplicaciones por sus propiedades a altas temperaturas y fácil aplicación en varios sustratos. Los recubrimientos de Ni-Cr, resisten a los choques térmicos mejor que otros recubrimientos.

1.6.1.9.4 Recubrimientos de cerámicos

La preparación de la superficie para los recubrimientos de cerámicas es parecido a los de recubrimiento de metales; este tipo de recubrimiento va de 0,05 a 0,33 mm. o más. Los materiales utilizados comúnmente son Ni, Cr, o cualquiera que resista a la corrosión; ellos proveen de flexibilidad y adherencia a los recubrimientos de los cerámicas. Estos recubrimientos cerámicos son a menudo sujetos a choques térmicos, altas temperaturas y corrosión química; espesores mayores aumentan la vida de la pieza bajo estas condiciones.

1.6.1.10 MÉTODOS DE DEPOSICIÓN

Se han desarrollado diferentes clases de sopletes para termo rociar metal fundido sobre metal base. Los diseños dependen del método empleado para generar calor, la forma como es introducido el metal al soplete, la clase de materiales que se atomizan y la temperatura requerida. Con las temperaturas de fusión de que se dispone actualmente casi cualquier metal, aleación o material cerámico puede ser termo-rociado. Los materiales se suministran como varillas, alambres, o en formas de polvo. Los procesos de termo-rociado están relacionados con el equipo comercial en uso; pueden ser divididos en dos categorías básicas: generación de calor por combustión o por electricidad.

1.6.1.10.1 CALENTAMIENTO POR ELECTRICIDAD

Se puede utilizar la potencia eléctrica como método de generación de calor, utilizando algunos de los procedimientos que se mencionan a continuación: Plasma (arco no transferido).

☞ Plasma (arco transferido).

☞ Arco Eléctrico.

☞ Plasma Inducido.

El rociado por arco eléctrico utiliza un arco entre un par de electrodos consumibles de alambre; el arco funde la punta de los electrodos, y aire comprimido impulsa el material fundido hasta el sustrato.

El proceso de plasma por arco transferido es una combinación de los procesos de termo-rociado y soldadura. Se introduce el polvo o alambre en una corriente de arco de plasma emitido de una boquilla; el rociado forma charcos sobre el sustrato que posteriormente se enfrían y solidifican formando una solución con el metal base.

En el proceso de rociado por arco no transferido, un gas o mezcla de gases se pasa a través de un arco eléctrico entre un cátodo de tungsteno y un orificio en un ánodo de cobre que se encuentran coaxialmente alineados. El gas que pasa a través del orificio es calentado a temperaturas muy altas, ionizándose parcialmente durante el calentamiento. A medida que el plasma sale de la pistola, las moléculas disociadas del gas diatómico se recombinan y liberan calor. El polvo se introduce dentro del plasma se funde y es impulsado hacia el sustrato por una corriente a alta velocidad. El contenido de calor, temperatura y velocidad del plasma son controlados por el tipo de boquilla, el arco actuante, la relación de la mezcla de gases y la tasa de flujo del gas.

1.6.1.10.2 CALENTAMIENTO POR COMBUSTIÓN

El termo-rociado que utiliza el calor proporcionado por una reacción química es conocido como rociado por combustión o por flama. Cualquier sustancia que no sublime y que funda a temperaturas menores que 276° C puede ser rociada por flama utilizando métodos no hipersónicos. Temperaturas sobre 331° C pueden ser alcanzadas dentro de una pistola de detonación o por un sistema de alta presión como el JP-5000 (ambas utilizan velocidades hipersónicas de las partículas), mientras la temperatura del sustrato se mantiene por debajo de 150° C mediante un sistema de enfriamiento por dióxido de carbono. Se puede obtener un espectro de

espesores de 0,05 a 6,00 mm. Este tipo de proceso produce un nivel de sonido que excede de 150 db y es por lo tanto necesario realizarlo en un recinto a prueba de ruidos. En la actualidad la operación de revestimiento por este tipo de método es completamente automático y controlada remotamente. La alta velocidad de impacto de las partículas resulta en una fuerte unión con el sustrato. Puede ser obtenidos excelentes acabados debido a la baja porosidad en este tipo de revestimientos.

1.6.1.10.3 MÉTODOS POR ALTA PRESIÓN Y VELOCIDAD HIPERSÓNICA

El método de deposición por pistola de detonación (Oxygen Detonation Gun) difiere de otros métodos que utilizan la combustión como generador de calor. Este utiliza la energía de explosiones de mezclas de oxígeno - acetileno, el lugar de una llama estable. Para empujar el material pulverizado a la superficie del sustrato, el depósito resultante es extremadamente duro, denso y fuertemente unido.

La pistola de detonación consiste en un cañón largo dentro del cual se introduce una mezcla de oxígeno, gas combustible y material de revestimiento pulverizado; cuando la mezcla de gases es encendida; una onda de detonación controlada o frente de llama, acelera y calienta las partículas de polvo a medida que se mueven dentro del cañón. La velocidad de salida de las partículas es de aproximadamente 950 m/s dependiendo del material. Después de que cada inyección de polvo ha sido descargada, un pulso de nitrógeno limpia el cañón y la cámara.

En el método de deposición por el sistema de alta presión (JP-5000) se utiliza una combinación de combustible líquido y oxígeno para obtener una flama de combustión a presión y temperaturas muy altas, así como para

transferir energía tanto cinética como térmica a las partículas de polvo, las cuales aumentarán gradualmente su eficiencia y balance a medida que pasan los gases de combustión por una tobera convergente - divergente, llegando a alcanzar una velocidad de hasta 2195 m/s; esta corriente de gases, arrastra y funde el material en forma de polvo que entra a la pistola al final de la tobera. La energía cinética transferida a las partículas realiza dos funciones, una es el rociado y la otra es la fuerza mecánica producida por el choque entre las partículas y el substrato, ocasionando que las partículas deformen toda la superficie de forma irregular, produciéndose un choque inelástico que genera más calor, ayudando a tener las condiciones adecuadas para el sucesivo impacto de partículas.

Según investigaciones realizadas hasta los momentos, se ha comprobado que las propiedades del recubrimiento no se deben alterar durante el proceso de rociado, de manera que se garantice un menor desgaste de la superficie a ser recubierto. El que las propiedades del revestimiento permanezcan inalterables depende de que el proceso se realice a temperaturas no tan elevadas y que sea a velocidades altas para garantizar que no ocurra oxidación en las partículas, siendo esto característico del método en cuestión. Otra de las ventajas de la utilización de este método es que el combustible se utiliza en forma líquida, siendo el kerosén el de uso más frecuente y la refrigeración de la pistola mediante agua; además se presume que las propiedades especiales de este tipo de termo-rociado se deben a la alta energía depositada en cada partícula durante la aceleración y emisión de calor cuando impacta sobre el substrato.

1.6.1.11 CARACTERÍSTICAS DE LOS REVESTIMIENTOS

La principal ventaja de los revestimientos termo-rociados es la capacidad de variar las propiedades del revestimiento de acuerdo a la aplicación. Un material puede ser rociado para formar un revestimiento duro o suave, poroso o denso. Esta versatilidad presenta dificultades cuando se trata de hacer comparaciones entre propiedades reportadas de revestimientos. Estos efectos son implicados cuando se emplean diferentes técnicas de prueba; de esta forma, los valores tabulados para un revestimiento dado deben ser considerados solo como información general.

La resistencia de los depósitos termo-rociados a los esfuerzos de tensión, consiste en la unión entre el depósito y el sustrato (adhesión) y la atracción entre partículas (cohesión). La adhesión del revestimiento al sustrato está relacionada con la interacción entre partículas y la superficie. Los mecanismos de unión caen dentro de tres categorías: mecánica, metalúrgico - química y física. La adhesión es una combinación de los tres mecanismos. Una partícula fundida que impacta sobre una superficie convenientemente preparada se aplastará y conformará a la superficie ondulada y se ajustará mecánicamente a las asperezas existentes. Cuando ocurren la formación de compuestos intermetálicos y soluciones sólidas, el mecanismo de adhesión es metalúrgico - químico. La adhesión de la partícula al sustrato por fuerzas de Van der Waals o valencia secundaria se considera unión física. Las zonas de interacción están localizadas principalmente en el centro de las partículas o en la porción de mayor masa. La adhesión de la partícula al sustrato es generalmente mecánica y enfatiza la importancia de una preparación apropiada de la superficie para conseguir una buena adhesión.

1.6.1.12 RESISTENCIA AL DESGASTE

Los revestimientos termo-rociados son utilizados para incrementar la resistencia al desgaste de materiales suaves o sustratos deteriorados. El deterioro de una superficie debido al uso, incluye erosión debida a flujo de gas, líquido o partículas sólidas, o una combinación de ellos. Desgaste por deslizamiento, desgaste combinado de impacto y deslizamiento, y cavitación, entre otros.

Existen muchos métodos para evaluar el desgaste, entre ellos las pruebas de servicio simulado y otras pruebas normalizadas. Los resultados de las pruebas son útiles como ayuda en la selección de un revestimiento, ya que varios factores tienen que ser individualmente seleccionados y evaluados. Los resultados de servicio simulado tienen una aplicación práctica limitada, porque pueden haber otros factores críticos en el servicio real. Para definir las características de desgaste de los depósitos termo-rociados es necesario definir las condiciones de servicio.

Los revestimientos termo-rociados son generalmente más resistentes al desgaste que el material de fundición o en su forma original. Esto es atribuido a la tasa de enfriamiento, estructura resultante, porosidad y, en el caso de revestimientos metálicos, contenido de óxido. La porosidad de los revestimientos les permite mantener una película lubricante. Una ventaja de la porosidad es que puede contener partículas generadas durante el desgaste, exponiendo de esta forma superficies de contacto limpias.

1.7 ANTECEDENTES

■ **Evans y Gresson** [1993], reportaron una disminución en la resistencia a la fatiga de la aleación Ti-6Al-4V bajo dos condiciones de granallado:

Con oxido de aluminio (Alúmina) de 840 μm y posterior recubrimiento con un depósito de Calcio sintético (Hidroxiapatita), a través de la técnica de Termo- rociado por Plasma. Así mismo, con Arena Sílice de 100 a 50 μm de diámetro, obteniéndose una menor disminución en el límite a la fatiga, para el caso con arena Sílice.

Los ensayos de fatiga se realizaron en una máquina de flexión rotativa en medio corrosivo (solución acuosa aireada de Ringer que contiene 0.89% de NaCl en peso, 0.0322% de CaCl y 0.03% de KCl), en una aleación usada para implantes ortopédicos de Ti-6Al-4V.

A través de MEB se observó que el rociado con arena de sílice (“Sand blasting”) produjo una superficie ligeramente más lisa con algunas hendiduras y rasguños en la superficie del material, pero al utilizar la alúmina la superficie se encontraba más agrietada. Se midió también la rugosidad de las muestras arrojando resultados de 0.79 y 3.60 μm para las muestras granalladas con arena de sílice y alúmina respectivamente. Evans y Gresson [1993] concluyeron que las grietas superficiales causadas con el proceso de granallado fueron las causantes de la disminución en el límite a la fatiga, además de reportar que el termo-rociado por plasma producía una disminución en dicho límite para ambas condiciones de granallado, debido a que durante la deposición del calcio sintético existe un incremento en la temperatura superficial del sustrato, produciéndose un alivio de las tensiones residuales de compresión producidas por el proceso de granallado.

■ **Watanabe et al. [1997]**, ensayaron muestras de acero al carbono de composición química 0.43% C, 0.21% Si, 0.66% Mn, 0.018% P, 0.008% S, 0.13% Cu, 0.091/0 Ni, 0.20% Cr con hierro como balance; todas las muestras fueron recocidas por 0.5 horas al vacío a una presión de 5×10^4 Mpa y a una temperatura de 850 °C. Las superficies de las muestras fueron granalladas con óxido de aluminio a una presión de 0.5 MPa, utilizando para el proceso de termo-rociado subsecuente dos tipos de polvos comerciales de WC-12%Co en peso. Cada proceso de manufactura fue diferente para los polvos, el tipo A fundido y el tipo B aglomerado.

Los ensayos de fatiga a flexión rotativa fueron realizados a una frecuencia de 36 Hz; algunas de las muestras fueron pulidas con pasta de diamante de 1 μ m antes del ensayo de fatiga.

El límite de fatiga de las muestras granalladas y recubiertas mostró claramente valores altos comparados con el del sustrato; también el límite de fatiga de la muestra recubierta fue cercano al valor del reportado para las muestras granalladas más recubrimiento A; el límite a la fatiga para 50 μ m de espesor de recubrimiento en comparación con la muestra de 100 μ m de espesor fue más alto; en cambio para el recubrimiento tipo B tanto a 50 y 100 μ m de espesor, el límite a la fatiga fue igual, aunque para niveles de esfuerzos altos la vida a la fatiga del primero fue mayor; esto puede ser una señal de que el efecto del espesor del recubrimiento afecta el límite de fatiga, siendo menos significativo el recubrimiento B

El recubrimiento A de 50 μ m de espesor fue ensayado a un nivel de esfuerzo de 350 MPa, mientras que el recubrimiento A de 100 μ m y los recubrimientos B de 50 μ m y 100 μ m fueron ensayados a un nivel de esfuerzo de 320 MPa; en cuanto a la morfología del inicio de grieta entre el

recubrimiento tipo A y B resultó ser diferente para ambos; en el tipo A se produjeron grietas mientras que el tipo B mallas de grietas. En ambos, recubrimientos el número de grietas en la capa delgada (50 μm) de recubrimiento fue más numerosa que en las muestras de mayor espesor (100 μm).

De la observación de las fotomicrografías de MEB de la superficie del recubrimiento tipo A se concluyó que el mismo posee mejor cohesión entre las partículas y mejor adhesión en la intercara substrato-recubrimiento en las muestras de 50 μm . También para las muestras de 100 μm las grietas se propagan alrededor del perímetro de inicio de grieta, por lo que la probeta exhibe buena cohesión entre las partículas pero pobre adhesión en la intercara substrato-recubrimiento.

Se concluyó que la morfología de la grieta por fatiga en recubrimientos es dominada por la unión en la intercara de las partículas depositadas y la intercara entre el substrato-recubrimiento, mostrando esto en la práctica ser una eficiente vía para la evaluación de recubrimientos termo-rociados.

■ **Padilla y Velásquez [1999]**, utilizaron un acero AISI 4140 termo-rociado con METCO 447, previamente rociado a presión con alúmina; Se observó mediante Microscopía electrónica de barrido, incrustaciones de alúmina en el material base, lo cual influye sobre las propiedades estáticas del acero, disminuyendo el esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tracción y el esfuerzo real a carga máxima. Este tratamiento superficial afecta el material produciendo numerosos concentradores de esfuerzo; estos concentradores de esfuerzo son una de las causas por la cual se reduce la vida a fatiga del material.

En el caso del metal base recubierto podemos observar que la disminución de la vida es mucho mayor; para un esfuerzo alto la disminución es de un 79% y para un esfuerzo bajo es de un 85%. Debido a que el recubrimiento es mucho más frágil que el metal base se producen grietas en el recubrimiento que permiten la nucleación de la falla por fatiga en la superficie del sustrato.

Comparando la vida a la fatiga del metal base recubierto, ensayado al aire y ensayado a corrosión se puede observar una disminución de la vida de un 8% para esfuerzos altos y de un 7% para esfuerzos bajos. Esta reducción de la vida a la fatiga se debe a que la corrosión actúa, como concentradora de esfuerzos.

■ **Hernandez y Oliveira [1999]**, utilizaron un acero AISI 4340 termo-rociado con Colmonoy 88, previamente rociado a presión con alúmina; Se observó mediante Microscopía electrónica de barrido, incrustaciones de alúmina en el material base, lo cual influye sobre las propiedades monotónicas del acero, disminuyendo el esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tracción y el esfuerzo real a carga máxima.

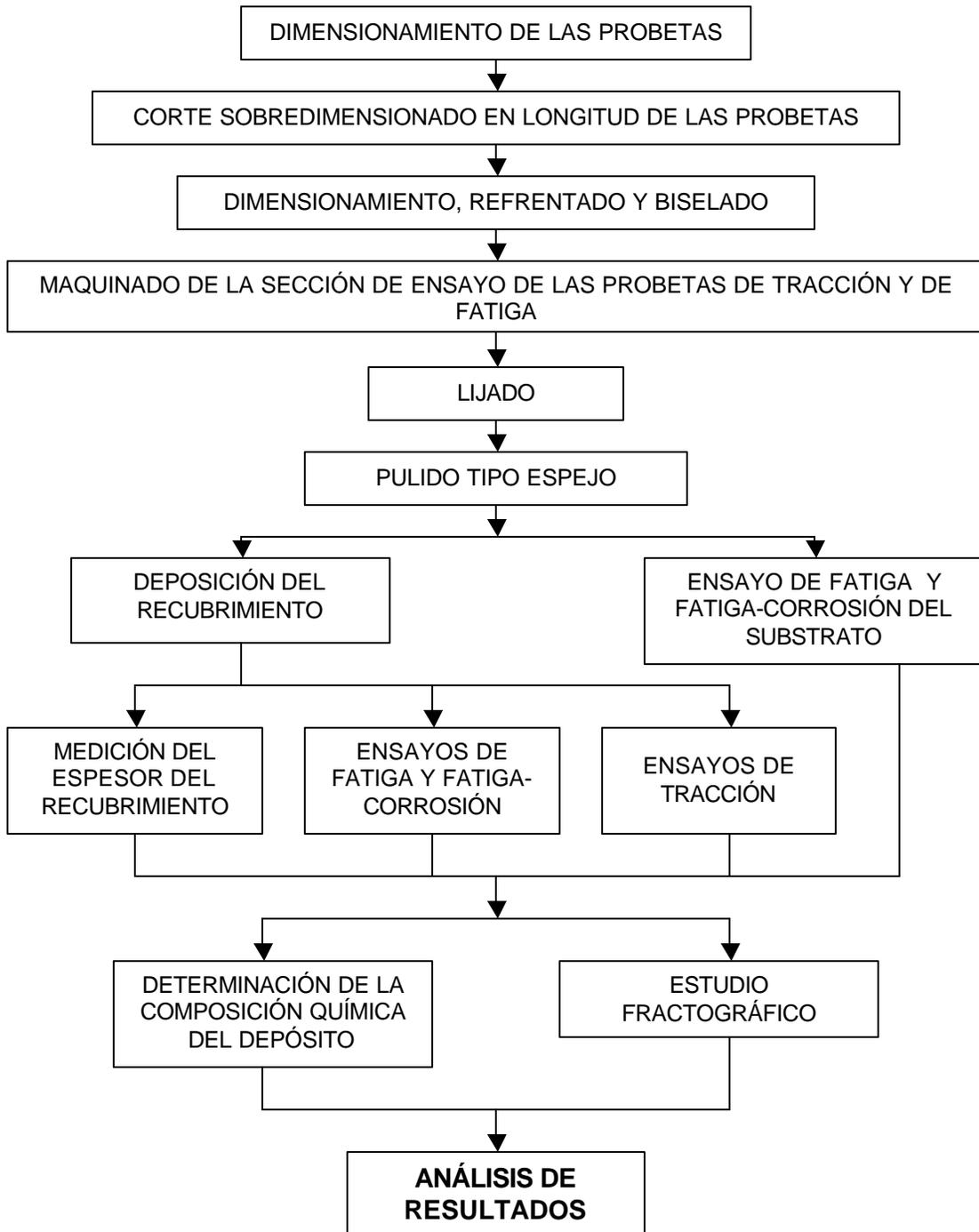
Esto podría ser atribuido a dos factores: las múltiples incrustaciones de alúmina que actúan como imperfecciones locales, concentradoras de esfuerzos en la superficie del sustrato y que el recubrimiento debido a sus grietas y poros y a que es más frágil que el sustrato, fractura rápidamente y prolonga la grieta al sustrato provocando una fractura de la probeta a un número menor de ciclos.

En el caso de las probetas recubiertas ensayadas a fatiga-corrosión se nota que presentan una disminución en la resistencia a la fatiga, en

comparación a las probetas de material base ensayadas al aire y la curva de fatiga es muy similar a la de las probetas recubiertas ensayadas al aire. Por lo cual se puede asumir que ni el medio corrosivo, ni el método de ensayo tuvieron efecto sobre la probeta, debido a que el recubrimiento es altamente resistente a la corrosión y aun después de haber fracturado a un número de ciclos menor a la fractura, las grietas principales y secundarias ya han nucleado y se han propagado a causa de las incrustaciones de alúmina que actúan como concentradores de esfuerzos.

2 METODOLOGÍA Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

2.1 Flujoograma de la Metodología Experimental



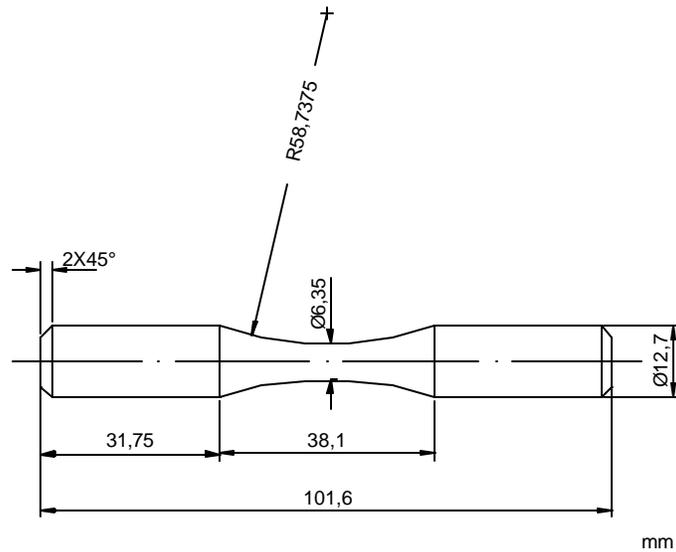


Figura 5

Dimensiones de la probeta de fatiga.

2.2.2 Dimensiones

El diámetro del hombro de las probetas de fatiga y de tracción es de 12.7 mm, ya que las mordazas de las maquinas respectivas de ensayo son capaces de soportar probetas con hombros de dicha dimensión.

La longitud mínima ($L_{\text{mín.}}$) de las probetas de tracción es de 120 mm.

La longitud máxima ($L_{\text{máx.}}$) de las probetas de fatiga es de 90 mm, ya que la máquina de ensayo ha sido diseñada para ensayar probetas entre 80 - 90 mm de longitud.

Las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de fatiga, según el manual de la máquina son las siguientes:

✍✍ Diámetro mínimo de la sección de ensayo = 6.35 mm.

✍✍ Longitud de la sección de ensayo = 38.1 mm.

✍✍ Radio de acuerdo (R) entre la sección de ensayo y los hombros de la probeta = 58.73 mm.

2.2.3 Pasos para la preparación de la superficie a Termo-rociar

El principio del proceso de termo-rociado consiste en el calentamiento, atomización y proyección del material a alta velocidad contra una superficie a ser recubierta.

Los parámetros de operación que influyen sobre la calidad del recubrimiento son:

✍✍ Temperatura de calentamiento del material de aporte.

✍✍ Variación de la temperatura a lo largo del recorrido entre la boquilla y el material base.

✍✍ Temperatura de la superficie a recubrir.

✍✍ Velocidad de proyección.

✍✍ Existencia y el tipo de atmósfera protectora.

Estos factores que influyen sobre la calidad del recubrimiento están relacionados también con las características del metal base y del material de aporte.

Las probetas, fueron mantenidas en todo momento bajo una cámara de termo-rociado con la finalidad de evitar su contaminación por contacto con una atmósfera húmeda; el proceso de termo-rociado se realizó en presencia de aire con el fin de evitar el calentamiento excesivo de las probetas y bajo los siguientes parámetros (tabla 5 y 6)

Se dispusieron 8 probetas unidas entre sí formando una barra de 80 cm de longitud aproximadamente para facilitar el proceso de deposición del recubrimiento (Ver figura 6) debido a que la corta longitud de las probetas hacia difícil y exageradamente largo en cuanto a tiempo, el proceso de termo-rociado.

Después de la capa de enlace el proceso de termo-rociado se inicia con la deposición del recubrimiento metálico (Colmonoy 88).

Tabla 5

Parámetros de Termo-rociado con Aleación Molibdeno-Níquel-Aluminio (Capa de enlace).

Distancia de rociado	15 cm
Temperatura de precalentamiento del sustrato	250 °C
Tasa de alimentación del polvo	34 g/min
Velocidad de giro del torno	230 r.p.m.
Presión de Acetileno	0.10 MPa
Presión de Oxígeno	0.17 MPa
Flujo de Acetileno (l/min)	16
Flujo de oxígeno (l/min)	22
Pistola (Subsónica)	5P

Tabla 6

Parámetros de Termo-rociado con Colmonoy 88.

Distancia de rociado	33 cm
Temperatura de precalentamiento del sustrato	253 °C
Tasa de alimentación del polvo	90 g/min
Velocidad de giro del torno	230 r.p.m.
Presión de kerosén	1.17 MPa
Presión de Oxígeno	1.52 MPa
Flujo de kerosén (l/min)	0.38
Flujo de nitrógeno (transporte del polvo) (l/min)	14
Flujo de oxígeno (l/min)	705
Pistola (Hipersónica)	JP-5000



Figura 6

Disposición de las probetas de Tracción y Fatiga Termo-rociadas.

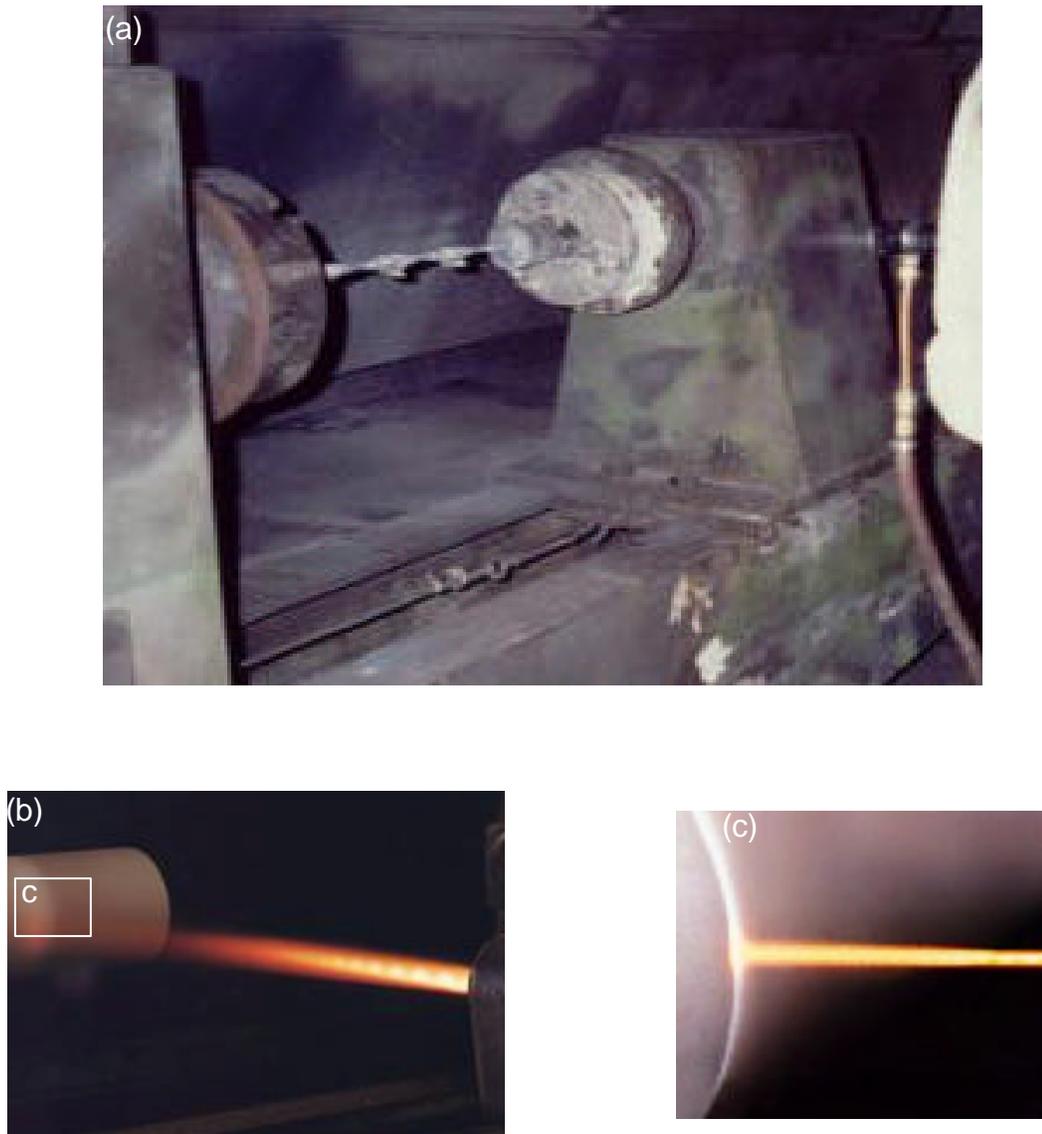


Figura 7

(a) Disposición de las probetas durante el proceso de Termo-rociado; (b) Proceso de Termo-rociado; (c) Detalle C de la Figura 6b, detalle del termo-rociado superficial de las probetas.

El metal para recubrir se transporta desde un tanque de almacenamiento y es suministrado a la pistola por medio de aire comprimido y conducido hasta la boquilla de la pistola. Una vez cumplida esta etapa el combustible se enciende y derrite el polvo que es inyectado a la superficie de la probeta a velocidades de aproximadamente Mach 4 con un ángulo de impacto de 90°, la inspección visual nuevamente es la que decide hasta que punto se puede seguir añadiendo material a las probetas para conseguir un espesor de la capa metálica de 220 μm (aproximadamente 4 pasadas o movimientos de lado a lado con la pistola, hasta cubrir por entero la superficie de las probetas). En las figuras 7a y 7b se muestran detalles del proceso de termo-rociado con Colmonoy 88 de las probetas a través de la técnica de recubrimiento por HVOF.

2.3 Ensayo de tracción

Máquina: Instron,

Modelo: 8502.

Ubicación: Lab. de Ensayos Mecánicos, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

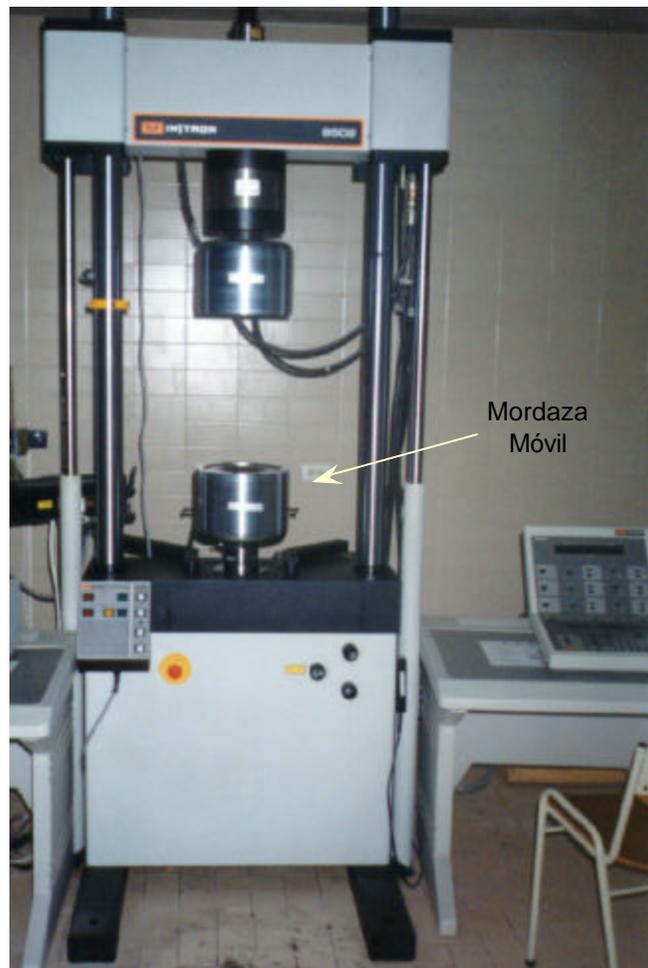


Figura 8

Maquina de tracción marca Instron ubicada en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

Estos ensayos fueron controlados mediante un programa de computadora para ensayos mecánicos, a una velocidad de desplazamiento del actuador (mordaza móvil) de 3 mm/min (ver figura 8).

Los datos registrados corresponden al alargamiento de la probeta sin corrección (L_i) y la carga aplicada (F_i), los cuales fueron almacenados en la misma computadora que controla el ensayo.

Se realizaron mediciones tanto del diámetro inicial como del diámetro final mediante un vernier digital, para determinar el área inicial (A_0) y área final (A_f) de la sección transversal de la probeta, respectivamente. Para la condición del material base se emplearon 4 probetas de tracción y 3 para la condición del material termo-rociado.

Los datos obtenidos en cada ensayo fueron procesados con la finalidad de eliminar el efecto de deformación elástica de los componentes de la máquina involucrados en el sistema de carga. La ecuación utilizada para realizar dicha corrección es:

$$L_{i\text{ corr}} = L_i - F_i \frac{k_{teo} - k_{exp}}{k_{teo} * k_{exp}}$$

donde: k_{exp} = Rigidez experimental.

k_{teo} = Rigidez teórica de la probeta.

$$k_{exp} = \frac{F_i}{L_i} \qquad k_{teo} = \frac{A_0 * E}{L_0} \qquad A_0 = \frac{\pi * D^2}{4}$$

siendo:

E = Módulo de elasticidad = 207 GPa.

L_0 = Longitud inicial de la sección de ensayo de las probetas de tracción.

En las tablas 5 y 6 se presentan los resultados de los ensayos de tracción con las correcciones antes mencionadas, así como los promedios de éstos resultados y la desviación estándar para cada condición de material. Dichos resultados corresponden al esfuerzo de fluencia (s_y) a 0,002 de deformación, resistencia a la tracción (S_u), esfuerzo real a carga (s_u), deformación real a carga máxima (e_u), esfuerzo real a la fractura (s_f) y reducción de área en %.

Comparando los resultados obtenidos con los reportados en el catálogo empresa Ferrum, se observa que el límite de fluencia del acero base, de 817 MPa encuentra dentro del intervalo especificado.

En las figuras 9 y 10 se presentan las curvas de esfuerzo real vs. deformación real correspondientes a cada condición del material. Así, se puede observar la dispersión de las mismas durante todo el ensayo.

Estos ensayos se realizaron para obtener el límite de fluencia y la resistencia a la tracción del material, con la finalidad de poder seleccionar los niveles de esfuerzo que se utilizarían más adelante en los ensayos de fatiga a flexión rotativa sin producir fluencia en el material.

2.3.1 Resultados de los Ensayos de Tracción

Tabla 7

Resultados de los ensayos de tracción de un acero AISI 4140

Probeta	s_y (MPa)	S_u (MPa)	s_u (MPa)	e_u (mm/mm)	Reducción de Área (%)
1	809	939	1005	0.067	61.2
2	827	959	1028	0.070	60.3
3	814	954	1027	0.073	62.5
4	818	958	1038	0.080	61.8
Promedio	817	952	1024	0.072	61.4
Desviación Estándar	8	9	14	0.005	0.9

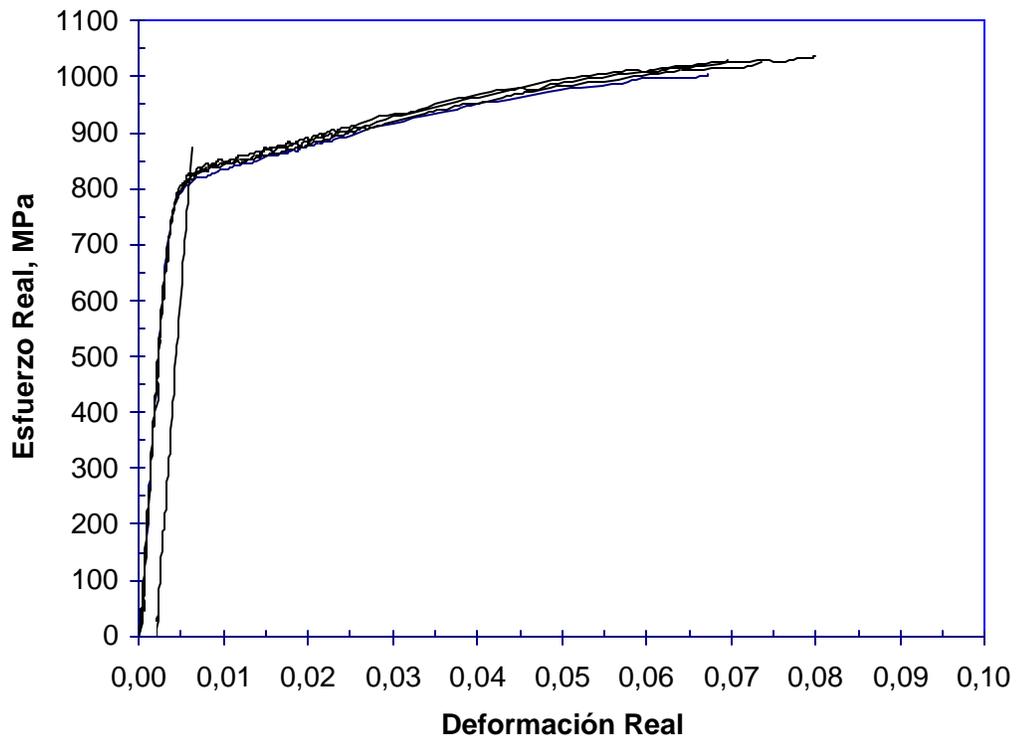


Figura 9

Curvas esfuerzos real vs. deformación real de un acero AISI 4140 templado y revenido.

Tabla 8

Resultados de los ensayos de tracción de un acero AISI 4140 termo-rociado.

Probeta	s_y (MPa)	S_u (MPa)	s_u (MPa)	e_u (mm/mm)	Reducción de Área (%)
1	808	988	1043	0.054	57.0
2	842	933	991	0.061	58.8
3	898	998	1091	0.089	59.6
Promedio	876	973	1042	0.068	58.4
Desviación Estándar	30	35	50	0.02	1.3

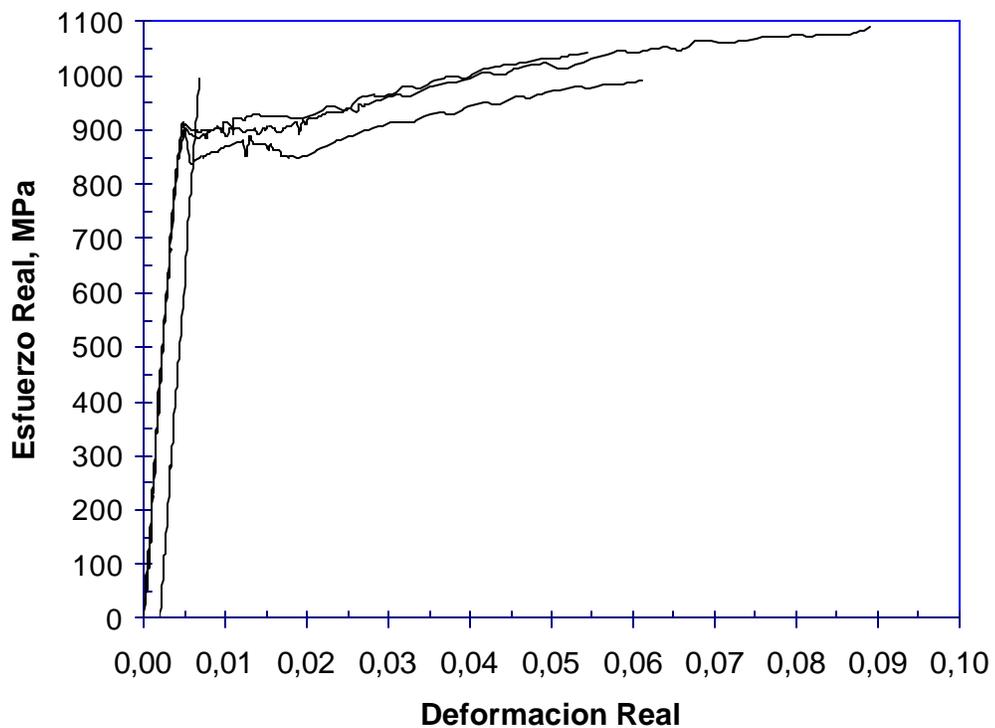


Figura 10

Curvas esfuerzo real vs. deformación real de un acero AISI 4140 termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento).

En la tabla 6 se presentan los resultados de los esfuerzos de fluencia, los cuales arrojaron un aumento aproximadamente del 7% de sus valores; esto posiblemente obedece a que no ha sido considerado el espesor del recubrimiento (ver figura 10); por lo tanto el recubrimiento soporta una parte de la carga hasta su desprendimiento y el substrato soportará la carga aplicada durante la continuación del ensayo, el cual estará expuesto a un marcado incremento del esfuerzo real aplicado ya que el recubrimiento fracturado no soporta carga alguna.

En los resultados de los esfuerzos máximos se observa un pequeño incremento del 1% aproximadamente, comportándose prácticamente iguales.

En los resultados de los ensayos de tracción (tablas 5 y 6) se observa un promedio de reducción de área para la condición de substrato (metal base) de 61.4 % y en las probetas de metal base termo-rociado una reducción del área de 58.4 %. Esta disminución poco significativa de reducción de área en las probetas termo-rociadas se debe probablemente a que en el proceso de termo-rociado el material base obtuvo esfuerzos residuales de compresión haciendo de este un material más duro y frágil; igualmente se observa el desprendimiento total del recubrimiento debido al comportamiento plástico diferente tanto del material termo-rociado (recubrimiento de Colmonoy 88) como del metal base (acero AISI 4140), tal como se observa en la figura 9

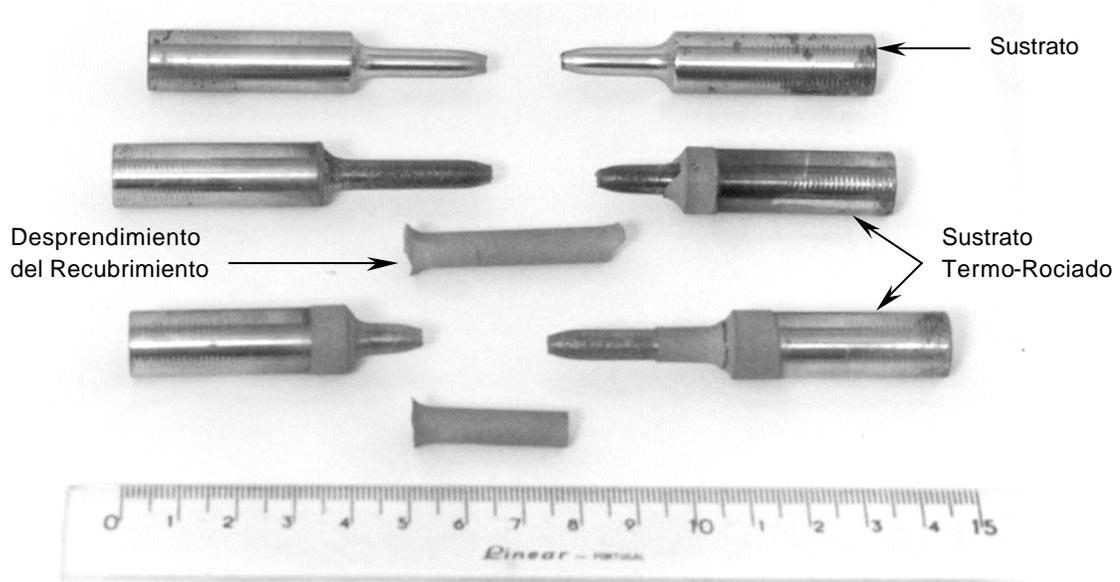


Figura 11

Probetas de Tracción de sustrato y sustrato recubierto por termo-rociado de Colmonoy 88. Detalle de desprendimiento en forma de tubos de recubrimiento durante el ensayo de tracción

2.4 ENSAYO DE FATIGA

Los ensayos de fatiga fueron realizados con la finalidad de determinar las constantes de la ecuación de Basquin correspondiente a cada condición estudiada:

- ☞☞ Material base ensayado a fatiga.
- ☞☞ Material base ensayado a fatiga-corrosión.
- ☞☞ Material base termo-rociado ensayado a fatiga.
- ☞☞ Material base termo-rociado ensayado a fatiga-corrosión.

2.4.1 Descripción del Equipo

Fabricante: Fatigue dynamics.

Modelo: RFB-200.

Ubicación: Lab. de Ensayos Mecánicos, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

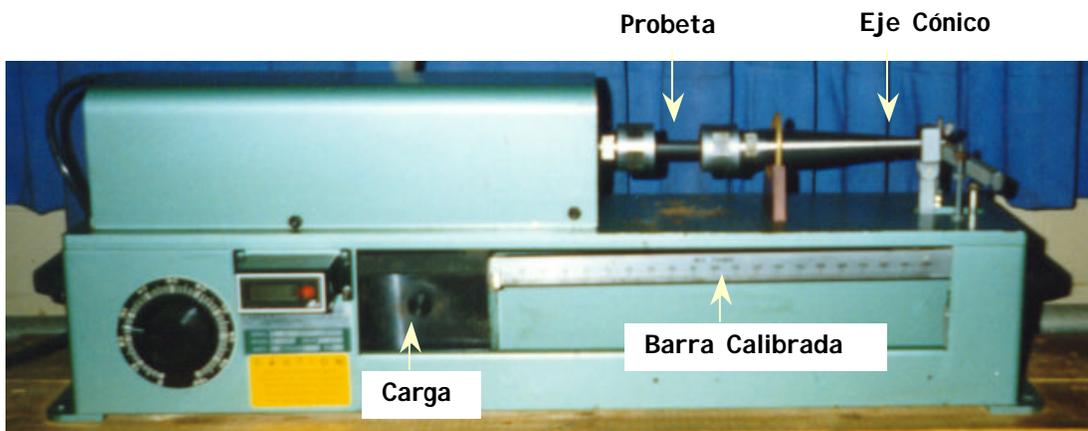


Figura 12

Maquina de Ensayo de Fatiga a Flexión Rotativa.

Los extremos de la probeta fueron sujetos mediante mordazas, acopladas al eje del motor y a un eje cónico (ver figura 12). Este último eje está unido a una barra graduada en función del momento flector (M), el cual es producido por una carga aplicada; con lo cual se produce en cierta región de la superficie de la probeta un nivel de esfuerzo (S):

$$S = \frac{M * c}{I} \quad c = \frac{d_0}{2}$$

donde:

c = distancia desde el eje neutro de carga hasta la superficie de la probeta.

I = momento polar de inercia.

Para una barra de sección circular, el momento polar de inercia se expresa como:

$$I = \frac{\pi * D_0^4}{64}$$

siendo: D_0 = Diámetro inicial de la probeta.

El momento flector (M), se obtiene entonces como:

$$M = 11.0955 * S * F_0^3 \text{ MPa} * \text{mm}^3$$

Por lo tanto se obtiene el momento flector correspondiente al nivel de esfuerzo cíclico.

La máquina está provista de una cámara independiente utilizada para realizar los ensayos de fatiga-corrosión, donde el medio corrosivo es una solución. El rociado de dicha solución salina a la probeta se realiza por medio de una boquilla de distribución fijada en la parte superior de dicha cámara el ancho de la boquilla corresponde aproximadamente el diámetro mínimo de la probeta a ensayar, obteniendo de esta forma una humedad uniforme en la misma. La solución salina fue preparada con un 3% en peso de Cloruro de Sodio y 97% en peso de agua destilada.

Se dispuso de un total de 120 probetas de fatiga a flexión rotativa, distribuidas en seis grupos de la siguiente manera:

24 Probetas de material base para ensayos de fatiga.

12 Probetas de material base para ensayos de límite de fatiga.

24 Probetas de material para ensayos de fatiga-corrosión.

24 Probetas de material base termo-rociadas para ensayos de fatiga.

12 Probetas de material base termo-rociadas para ensayos de límite de fatiga.

24 Probetas de material termo-rociadas para ensayos de fatiga-corrosión.

Todos los ensayos de fatiga fueron realizados a una frecuencia de 50 Hz y se ensayaron 6 probetas para cada nivel de esfuerzo.

Las condiciones de material base fueron ensayadas a los niveles de esfuerzo (S) iguales a: 598, 580, 562 y 544 MPa los cuales corresponden a 63, 61, 59, y 57, de S_u , respectivamente.

Los ensayos de material base a fatiga-corrosión fueron realizados a los niveles de esfuerzo (S) iguales a: 510, 492, 474 y 456 MPa, los cuales corresponden a aproximadamente 54, 52, 50 y 48 % de S_u , respectivamente.

Las condiciones de material base termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento) fueron ensayadas a los niveles de esfuerzo (S) iguales a: 372, 354, 336 y 318, MPa los cuales corresponden aproximadamente a 39, 37, 35 y 33% de S_u , respectivamente.

Las condiciones de material base termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento) ensayadas a fatiga-corrosión fueron ensayadas a los niveles de esfuerzo (S) iguales a: 425, 389, 353 y 317 MPa los cuales corresponden aproximadamente a 45, 41, 37 y 33% de S_u , respectivamente.

Previo al ensayo de fatiga, la superficie de las probetas de metal base o substrato fue preparada al grado de pulido tipo espejo y la superficie de las probetas recubiertas con Colmonoy 88 fueron ensayadas sin preparación posterior. Una vez realizados los ensayos de fatiga hasta la fractura, se obtuvieron las ecuaciones de Basquin para cada condición de material, las cuales son presentadas en la tabla 7. Dichas ecuaciones fueron obtenidas aplicando el análisis de regresión lineal recomendado por la norma ASTM E 739, la cual considera todos los datos de los ensayos de fatiga hasta la fractura para cada condición de material. Estos datos son presentados en las tablas 8 a 19.

Tabla 9

Ecuaciones de Basquin para cada condición de material.

Condición	Ecuaciones de Basquin
Material base	$\text{Log}(S) = -0,0513 * \text{Log}(N_f) + 3,0292$
Material base en fatiga-corrosión	$\text{Log}(S) = -0,1545 * \text{Log}(N_f) + 3,4510$
Material base termo-rociado	$\text{Log}(S) = -0,0782 * \text{Log}(N_f) + 2,9650$
Material base termo-rociado en fatiga-corrosión	$\text{Log}(S) = -0,2254 * \text{Log}(N_f) + 3,6872$
Material base termo-rociado en fatiga sin considerar espesor del recubrimiento.	$\text{Log}(S) = -0,0793 * \text{Log}(N_f) + 3,0107$
Material base termo-rociado en fatiga-corrosión sin considerar espesor del recubrimiento.	$\text{Log}(S) = -0,2294 * \text{Log}(N_f) + 3,7452$

En las figuras 13 a 18, se presentan en escala doble logarítmica, los puntos correspondientes a cada amplitud de esfuerzo vs. ciclos a la fractura y las ecuaciones de Basquin para cada condición de material, tal como lo recomienda la norma ASTM E 468 titulada "Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials". También, en escala doble logarítmica se presentan los puntos correspondientes a cada amplitud de esfuerzo vs. número de ciclos para las siguientes condiciones: figura 20 ensayo a fatiga-corrosión del metal base y del metal base termo-rociado (considerando y sin considerar el espesor del recubrimiento), figura 19 fatiga del substrato y metal base termo-rociado (considerando y sin considerar el espesor del recubrimiento).

2.4.2 Resultados Ensayo de Fatiga Flexión Rotativa

Tabla 10

Resultados de los ensayos de fatiga para las probetas de acero AISI 4140.

PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA	PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA
1	598	92.100	13	562	323.400
2		180.200	14		191.700
3		103.800	15		230.700
4		217.800	16		247.100
5		126.800	17		147.000
6		133.900	18		204.500
7	580	179.100	19	544	387.100
8		177.600	20		511.300
9		112.200	21		364.600
10		268.100	22		194.300
11		202.400	23		285.200
12		153.200	24		344.000

Tabla 11

Resultados de los ensayos de fatiga para determinar el límite de fatiga de las probetas de acero AISI 4140.

PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA	PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA
1	510	5.000.000	7	510	5.000.000
2	517	5.000.000	8	517	644.800
3	524	5.000.000	9	510	797.100
4	531	485.700	10	503	5.000.000
5	524	505.400	11	510	5.000.000
6	517	802.100	12	517	532.600

Tabla 12

Método de la escalera para determinar el límite de fatiga del acero AISI 4140.

Nivel de Esfuerzo	Esfuerzo (MPa)	Resultados de los ensayos O: No falla hasta 5.000.000 ciclos X: Falla antes de 5.000.000 ciclos												Resumen de los resultados de los ensayos		i*n	I ² *n
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Fallaron (n _i)	No Fallaron		
4	531				X									1	0	4	16
3	524			O		X								1	1	3	9
2	517		O				X		X				X	3	1	6	12
1	510	O						O		X		O		1	3	1	1
0	503										O			0	1	0	0
TOTAL												6	6	14	38		

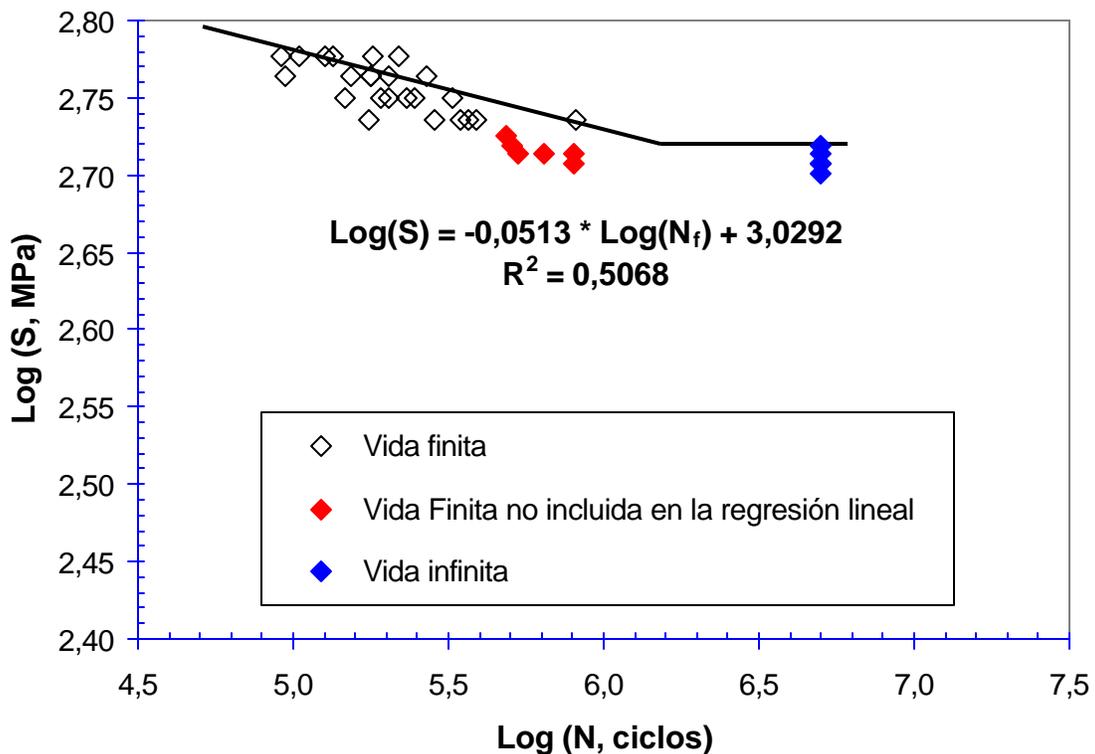


Figura 13

Comportamiento a la fatiga de un acero AISI 4140.

Para determinar el límite de fatiga del metal base se usó el método de la escalera o método ascendente y descendente. En la tabla 10 se presentan los datos obtenidos de los ensayos de fatiga; en esta tabla se observan seis (6) probetas que fallaron y seis que no fallaron, de un total de 12 probetas ensayadas. En el cálculo de dicho límite, solamente se consideró las probetas que fallaron. El nivel de esfuerzo más bajo al que la probeta falla se asignó con $i=0$, el siguiente nivel con $i=1$ y así sucesivamente. El límite medio a la fatiga se denomina "X" y su desviación estándar se denomina "S".

Ecuación para obtener el límite de fatiga:

$$X = X_0 + d \left(\frac{A}{N} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde: X_0 = Primer nivel de esfuerzo = 503 MPa

d = Incremento del esfuerzo = 7 MPa

$$A = 10^{i * n} \cdot 14$$

$$N = 10^{n} \cdot 6$$

El signo positivo de la ecuación anterior se utiliza cuando el análisis se basa en las probetas que no fallaron, mientras que el signo negativo es utilizado en caso contrario sustituyendo estos valores dentro de la ecuación, obtenemos que el valor del límite a la fatiga para el ensayo del metal base es aproximadamente:

$$X = 516 \text{ MPa}$$

La ecuación para obtener la desviación estándar es:

$$S = 1,620 * d * \left(\frac{N * B * A^2}{N^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,029$$

Donde: $B = 10^{i^2 * n} \cdot 38$

Sustituyendo todos los valores tenemos: $S = 10 \text{ MPa}$

Tabla 13

Resultados de los ensayos de fatiga-corrosión para las probetas de acero AISI 4140.

PROBETA #	ESFUERZO (Mpa)	CICLOS A LA FRACTURA	PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA
1	510	69.100	13	474	107.500
2		92.900	14		101.300
3		60.400	15		88.700
4		78.400	16		95.700
5		68.700	17		104.800
6		80.300	18		86.300
7	492	93.100	19	456	116.700
8		120.700	20		90.200
9		82.100	21		117.600
10		80.900	22		140.000
11		81.900	23		110.800
12		78.700	24		134.800

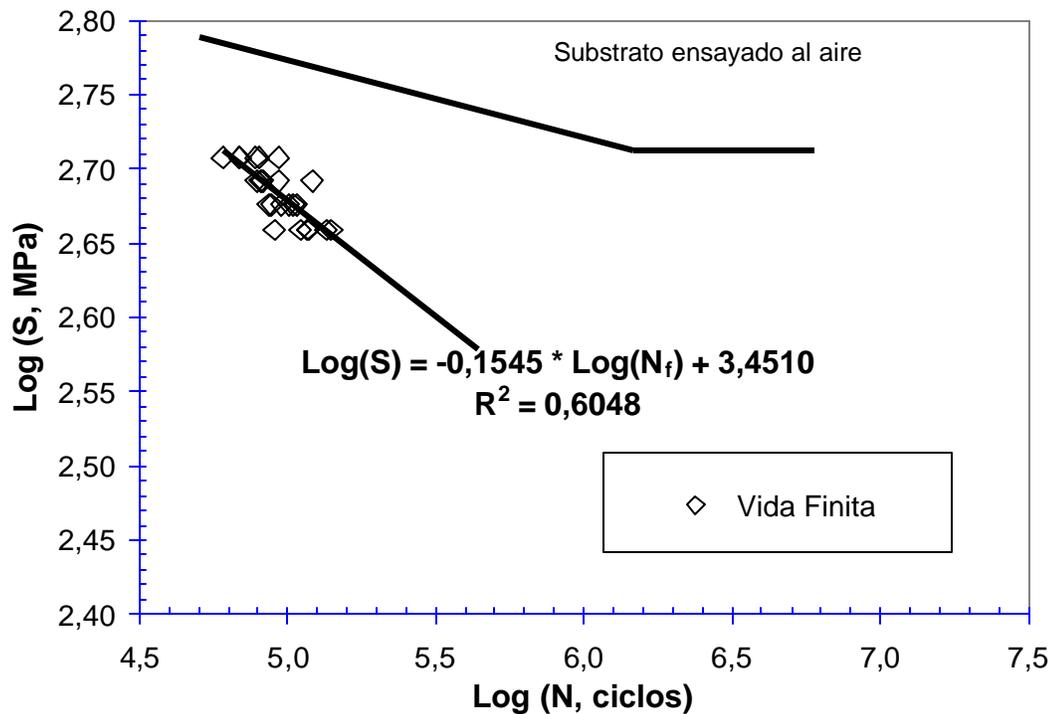


Figura 14

Resistencia a la fatiga-corrosión del sustrato.

Tabla 14

Resultados de los ensayos de fatiga para las probetas de acero AISI 4140 termo-
 rociado (considerando el espesor del recubrimiento).

PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA	PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA
1	372	156.200	13	336	271.900
2		101.000	14		211.700
3		181.700	15		450.900
4		164.800	16		309.500
5		326.500	17		267.000
6		133.700	18		523.400
7	354	145.400	19	318	345.300
8		415.400	20		425.100
9		334.700	21		783.700
10		252.200	22		680.600
11		201.400	23		311.400
12		364.100	24		935.200

Tabla 15

Resultados de los ensayos de fatiga para determinar el límite de fatiga de las
 probetas de acero AISI 4140 termo rociado (considerando el espesor del
 recubrimiento).

PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA	PROBETA #	ESFUERZO (Mpa)	CICLOS A LA FRACTURA
1	300	5.000.000	7	300	1.037.600
2	307	626.400	8	293	952.100
3	300	2.223.900	9	286	5.000.000
4	293	5.000.000	10	293	5.000.000
5	300	5.000.000	11	300	744.200
6	307	719.500	12	293	940.300

Tabla 16

Método de la escalera para determinar el límite de fatiga del acero AISI 4140 termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).

Nivel de Esfuerzo	Esfuerzo (MPa)	Resultados de los ensayos O: No falla hasta 5.000.000 ciclos X: Falla antes de 5.000.000 ciclos												Resumen de los resultados de los ensayos		i*n	i ² *n
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Fallaron (ni)	No Fallaron		
i																	
3	307,0		X				X							2	0	0	0
2	300,0	O		X		O		X				X		3	2	4	8
1	293,0				O				X		O		X	2	2	2	2
0	286,0									O				0	1	0	0
TOTAL												7	5	6	10		

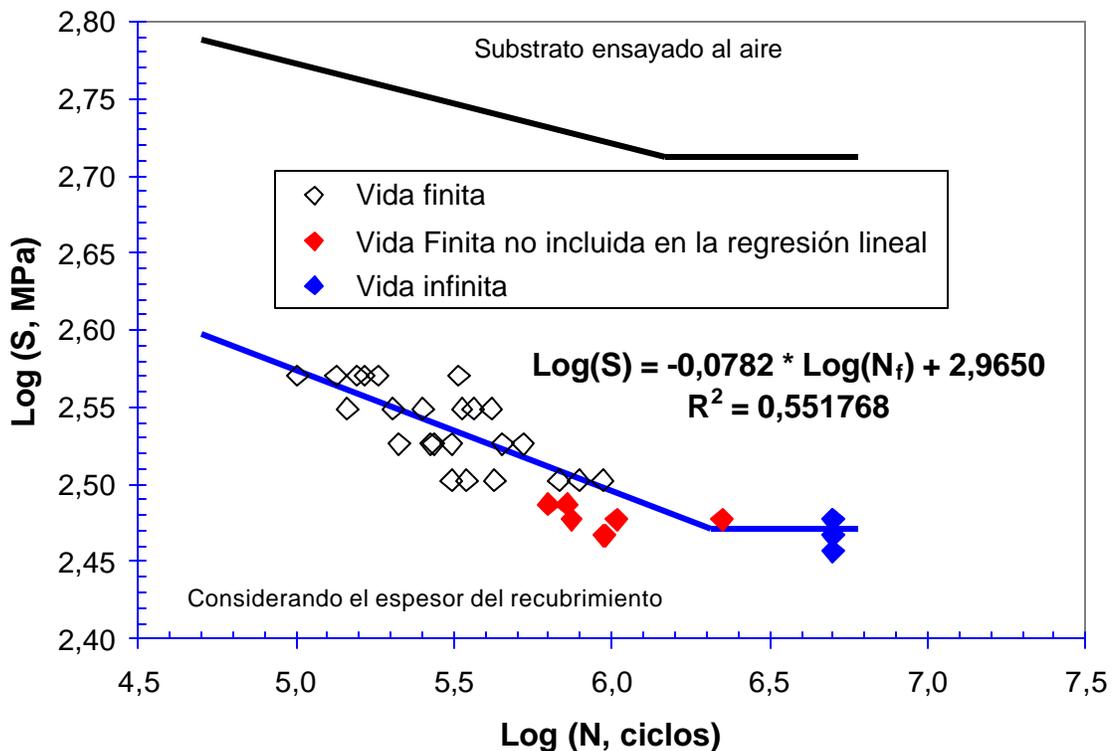


Figura 15

Resistencia y vida límite de fatiga del substrato termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).

Ecuación para obtener el límite de fatiga:

$$X = X_0 * d^{\frac{A}{N}} * \frac{1}{2}$$

Donde: X_0 = Primer nivel de esfuerzo = 286 MPa

d = Incremento del esfuerzo = 7 MPa

A = $i * n = 6$

N = $n = 7$

Sustituyendo estos valores dentro de la ecuación, obtenemos que el valor del límite a la fatiga para el ensayo del metal base termorrociado que es aproximadamente:

$$X = 296 \text{ MPa}$$

La ecuación para obtener la desviación estándar es:

$$S = 1,620 * d * \frac{N * B * A^2}{N^2} = 0,029$$

Donde: $B = i^2 * n = 10$

Sustituyendo todos los valores tenemos:

$$S = 8 \text{ MPa}$$

Tabla 17

Resultados de los ensayos de fatiga-corrosión para las probetas de acero AISI 4140 termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).

PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA	PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA
1	425	75000	13	353	129500
2		79700	14		126500
3		58600	15		86600
4		50600	16		110000
5		39300	17		93300
6		42200	18		148700
7	389	128200	19	317	130700
8		84300	20		132900
9		100500	21		128300
10		65600	22		119400
11		89100	23		165600
12		107000	24		106600

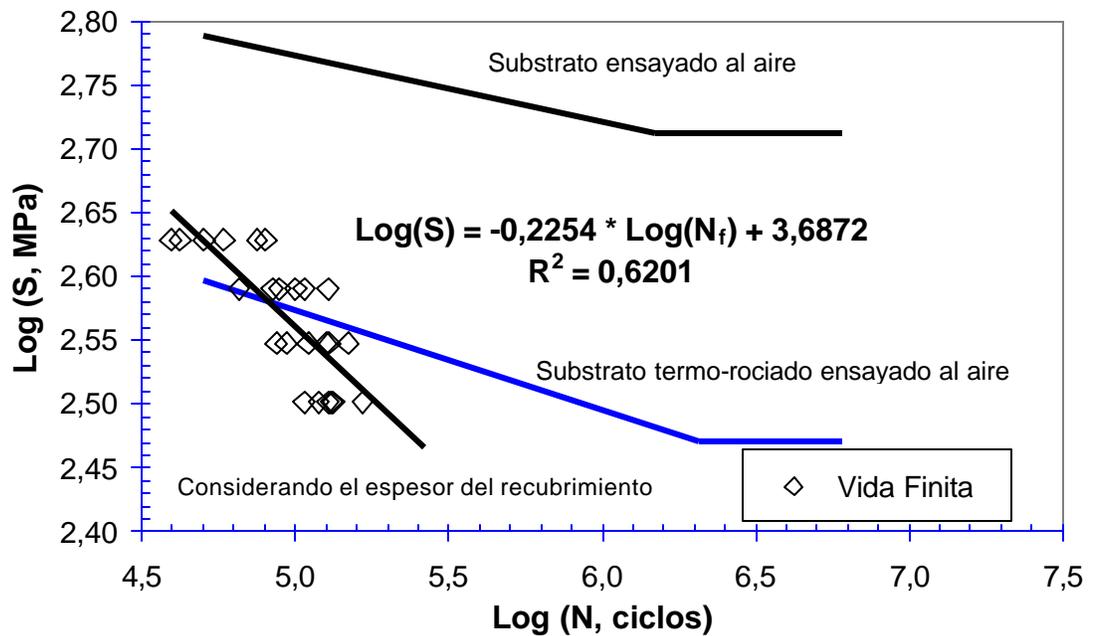


Figura 16

Resistencia de fatiga-corrosión del substrato termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).

Tabla 18

Resultados de los ensayos de fatiga para las probetas de acero AISI 4140 termo- rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento).

PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA	PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA
1	408	156200	13	368	271900
2		101000	14		211700
3		181700	15		450900
4		164800	16		309500
5		326500	17		267000
6		133700	18		523400
7	388	145400	19	348	345300
8		415400	20		425100
9		334700	21		783700
10		252200	22		680600
11		201400	23		311400
12		364100	24		935200

Tabla 19

Resultados de los ensayos de fatiga para determinar el límite de fatiga de las probetas de acero AISI 4140 termo rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento).

PROBETA #	ESFUERZO (MPa))	CICLOS A LA FRACTURA	PROBETA #	ESFUERZO (MPa))	CICLOS A LA FRACTURA
1	328	5000000	7	328	1037600
2	335	626400	8	321	952100
3	328	2223900	9	314	5000000
4	321	5000000	10	321	5000000
5	328	5000000	11	328	744200
6	335	719500	12	321	940300

Tabla 20

Método de la escalera para determinar el límite de fatiga del acero AISI 4140 termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento).

Nivel de Esfuerzo	Esfuerzo (MPa)	Resultados de los ensayos O: No falla hasta 5.000.000 ciclos X: Falla antes de 5.000.000 ciclos												Resumen de los resultados de los ensayos		i*n	i ² *n	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Fallaron (ni)	No Fallaron			
3	335		X				X								2	0	0	0
2	328	O		X		O		X				X			3	2	4	8
1	321				O				X		O		X		2	2	2	2
0	314									O					0	1	0	0
TOTAL												7	5	6	10			

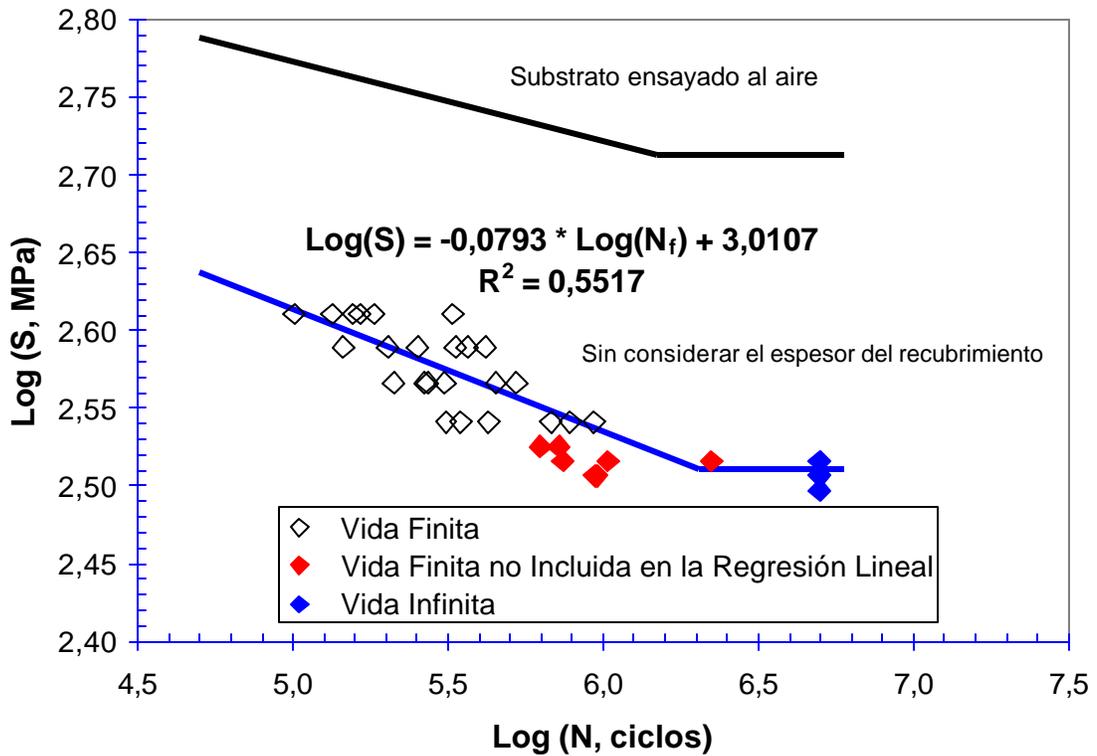


Figura 17

Resistencia de fatiga y vida límite del sustrato termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento).

Ecuación para obtener el límite de fatiga:

$$X = X_0 \cdot d^{\frac{A}{N}} \cdot \frac{1}{2}$$

Donde: X_0 = Primer nivel de esfuerzo = 286 MPa

d = Incremento del esfuerzo = 7 MPa

A = $i \cdot n = 6$

N = $n = 7$

Sustituyendo estos valores dentro de la ecuación, obtenemos que el valor del límite a la fatiga para el ensayo del metal base termorrociado que es aproximadamente:

$$X = 324 \text{ MPa}$$

La ecuación para obtener la desviación estándar es:

$$S = 1,620 \cdot d \cdot \frac{N \cdot B \cdot A^2}{N^2} \cdot 0,029$$

Donde: B = $i^2 \cdot n = 10$

Sustituyendo todos los valores tenemos:

$$S = 8 \text{ MPa}$$

Tabla 21

Resultados de los ensayos de fatiga-corrosión para las probetas de acero AISI 4140 termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento).

PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA	PROBETA #	ESFUERZO (MPa)	CICLOS A LA FRACTURA
1	465	75000	13	385	129500
2		79700	14		126500
3		58600	15		86600
4		50600	16		110000
5		39300	17		93300
6		42200	18		148700
7	425	128200	19	345	130700
8		84300	20		132900
9		100500	21		128300
10		65600	22		119400
11		89100	23		165600
12		107000	24		106600

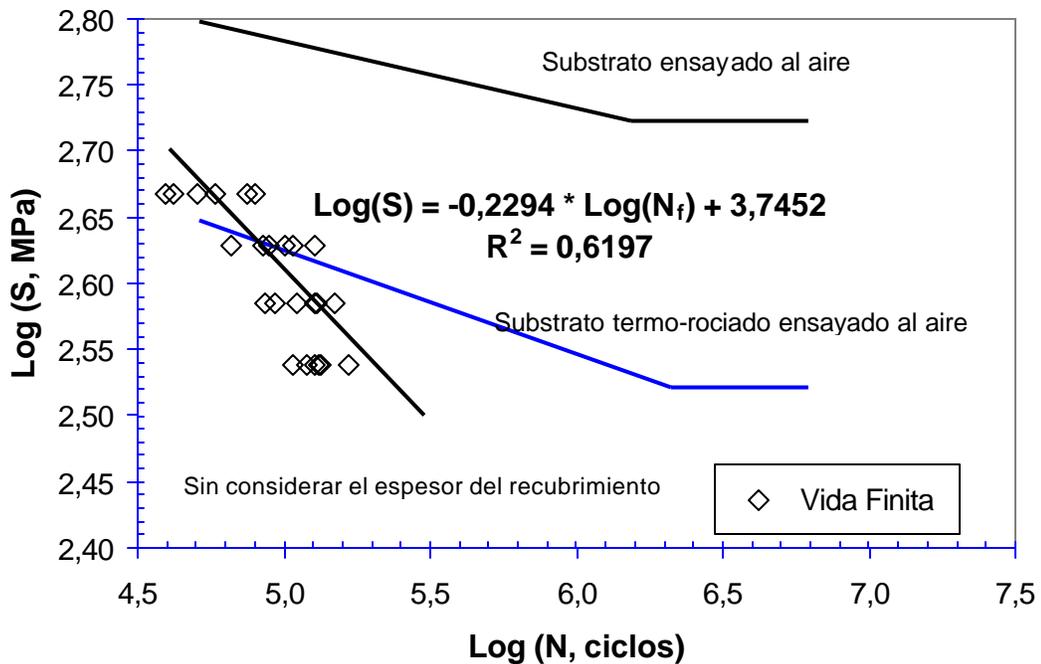


Figura 18

Resistencia de fatiga-corrosión del substrato termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento).

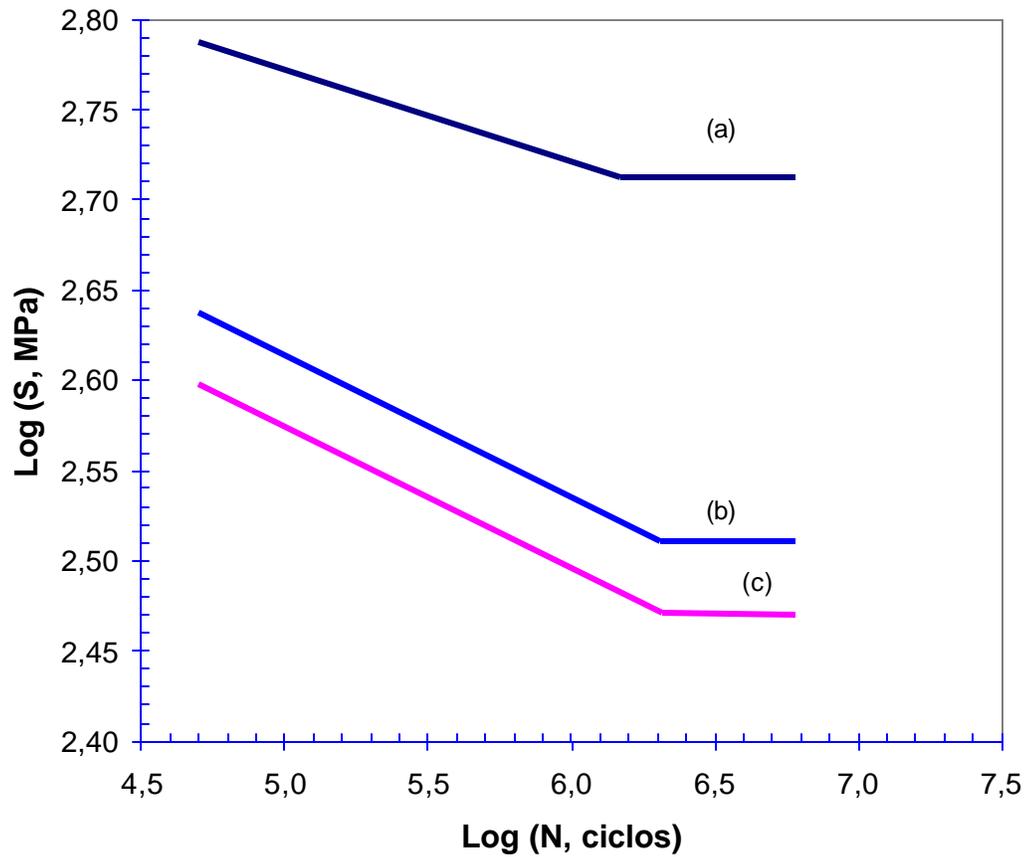


Figura 19

Comportamiento a la fatiga; (a) Substrato; (b) Substrato termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento) (c) Substrato termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).

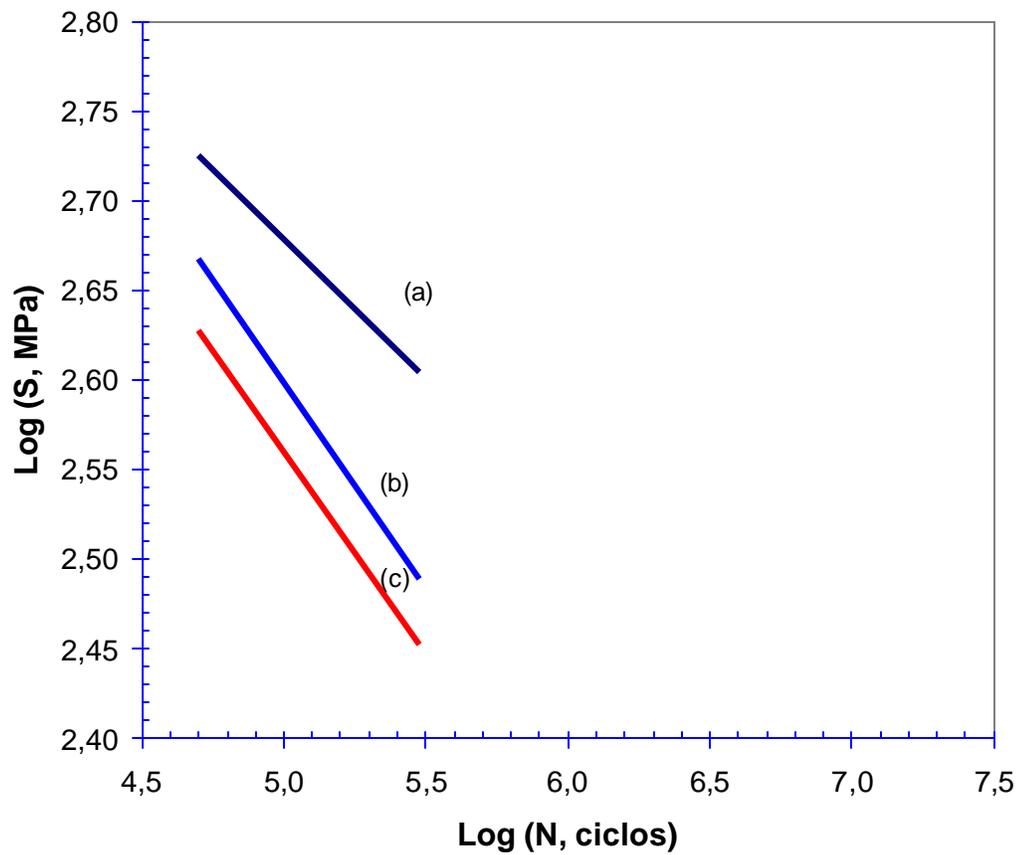


Figura 20

Comportamiento a la fatiga-corrosión; (a) Substrato; (b) Substrato termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento) (c) Substrato termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento).

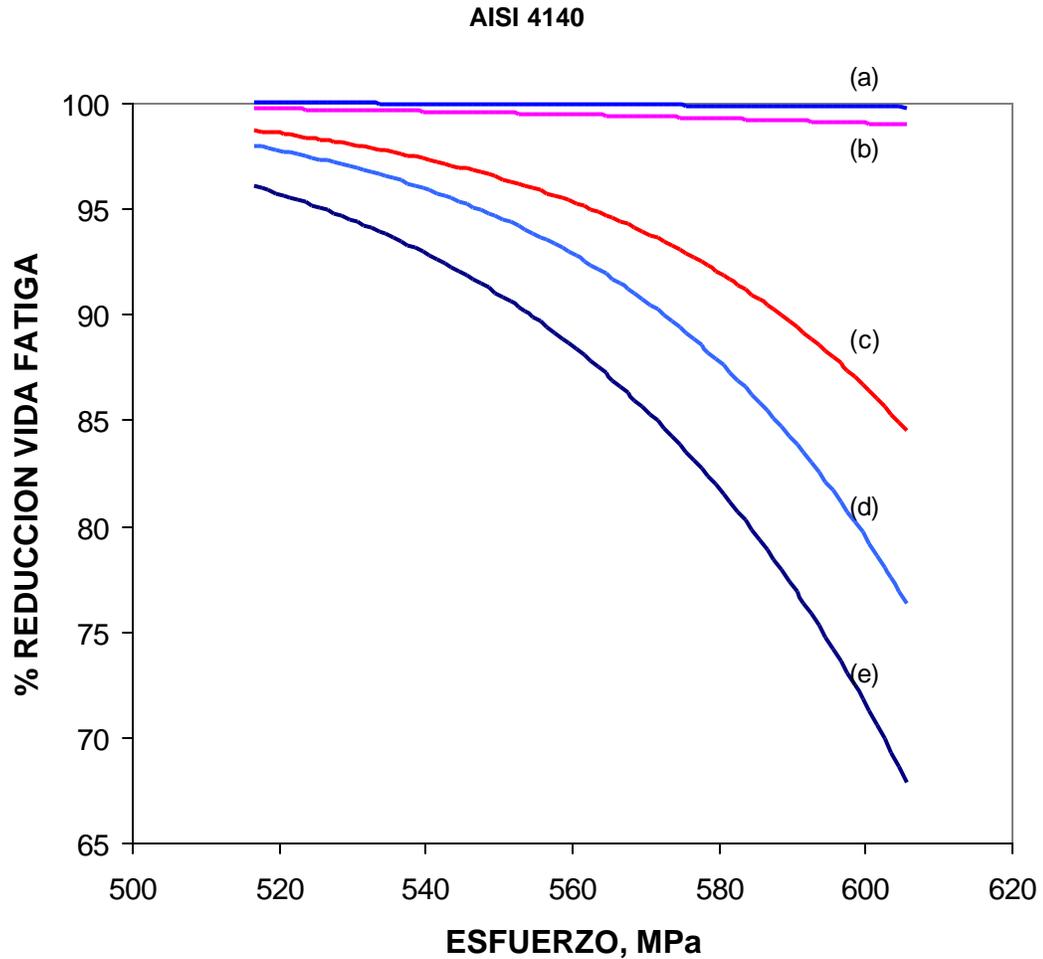


Figura 21

Comportamiento de reducción vida fatiga; (a) Substrato termo-rociado (considerando el recubrimiento); (b) Substrato termo-rociado (sin considerar el espesor del recubrimiento); (c) Substrato termo-rociado a fatiga-corrosión (considerando el espesor del recubrimiento); (d) Substrato termo-rociado a fatiga-corrosión (sin considerar el espesor del recubrimiento); (e) Substrato a fatiga-corrosión.

2.5 Estudio Micro-estructural y Morfológico

El estudio micro-estructural fue realizado en una probeta con la finalidad de obtener las características de los recubrimientos.

El estudio morfológico fue realizado en probetas que fallaron a un número de ciclos próximo al promedio del nivel de esfuerzo más bajo y más alto para las condiciones siguientes: fatiga metal base, metal base termo-rociado y fatiga-corrosión metal base, metal base termo-rociado.

2.5.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La microscopía electrónica de barrido (**MEB**) fue realizada en un microscopio electrónico de barrido.

Marca: Hitachi, modelo: S-2400, voltaje: 20 kV.

Ubicación: Centro de Microscopía Electrónica, Escuela de Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.



Figura 22

Microscopio electrónico de barrido ubicado en el Centro de Microscopia Electrónica, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

2.5.1.1 Preparación de las Muestras

2.5.1.1.1 Corte de las Muestras

Se cortaron muestras de aproximadamente 7 mm de alto, desde la zona de fractura por fatiga. Para ello se utilizó una cortadora marca Buehler, modelo ABRASIMET II, ubicada en el Lab. de Aluminio, Escuela de Metalurgia.



Figura 23

Cortadora Buehler ubicada en el Lab. de Aluminio, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

2.5.1.1.2 Limpieza de las Muestras

Previo a la observación por MEB, primero se limpiaron las muestras con acetona y luego con alcohol en ultrasonido durante 15 y 10 min, respectivamente, manteniendo la zona de fractura hacia abajo y totalmente sumergida. Esto fue realizado con la finalidad de eliminar productos de grasa u óxidos depositados en la superficie de fractura. Este equipo de ultrasonido marca Buehler, modelo Ultramet II, está ubicado en el Lab. de Aluminio, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.



Figura 24

Equipo de Ultrasonido buehler ubicada en el Lab. de Aluminio, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

2.5.1.1.3 Montaje de las Muestras

Las muestras fueron montadas en una base utilizando para ello una pega instantánea; además, debido a la naturaleza aislante de la pega, se utilizó una pintura de plata para garantizar la conductividad entre la muestra y su base.

2.5.1.2 Observación de las Muestras (MEB)

Colocada una muestra que ha sido cortada transversalmente, pulida y atacada con nital en el MEB, se realizó el estudio metalográfico.

Una vez realizado el estudio metalográfico, se procedió a colocar las muestras obtenidas de los ensayos de fatiga en el MEB; en primer lugar se localizó la zona de fractura final; basándose en esto se ubicó la región probable de inicio de fatiga; una vez localizada esta zona, se comenzó una exploración detallada a lo largo de la intercara, con el fin de ubicar grietas u otros aspectos de interés para este trabajo; por último se procedió a tomar fotografías de los detalles más importantes en la superficie de fractura.

Las fotomicrografías que se presentan a continuación muestran la zona de fractura del conjunto de probetas más representativas ensayadas a bajo nivel de esfuerzo; en las mismas se observan las tres zonas: inicio de grieta, propagación de grieta y fractura del material. En la primera zona se observa la superficie brillante y lisa; en la segunda zona se presenta la propagación de la grieta como resultado del esfuerzo aplicado en forma continua en una superficie más oscura e irregular y en la zona de fractura la superficie es de aspecto fibroso y más irregular producto de la falla ocurrida cuando el material no resistió el esfuerzo aplicado debido a la reducción del área de la sección transversal de la misma.

Las figuras 26 y 30 corresponden al estudio microestructural, las figuras 32 y 33 corresponden al Sustrato Termo-rociado a 39 % Su del Acero AISI 4140, considerando el espesor del recubrimiento y 43 % sin considerar el espesor, las figuras 34 - 36 corresponden al Sustrato Termo-rociado a 33 % Su del Acero AISI 4140, considerando el espesor del recubrimiento y 37 % sin considerar el espesor, las figuras 37 y 38 corresponden al Sustrato Termo-rociado ensayado a fatiga-corrosión a 45 % Su del Acero AISI 4140, considerando el espesor del recubrimiento y 49 % sin considerar el espesor, y las figuras 39 - 41 corresponden al Sustrato Termo-rociado ensayado a fatiga-corrosión a 33 % Su del Acero AISI 4140, considerando el espesor del recubrimiento y 37 % sin considerar el espesor.

2.5.2 Espectroscopia por dispersión de energía (EDX)

Marca: EDAX, voltaje: 25 kV.

Ubicación: Centro de Microscopía Electrónica, Escuela de metalúrgica y Ciencia de los Materiales.



Figura 25

Equipo de Espectroscopia por dispersión de energía (EDX) ubicada en el Centro de Microscopía Electrónica, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

Se realizaron análisis puntuales en las zonas de las probetas observadas en el MEB que fallaron por fatiga y a la probeta que se realizó el estudio microestructural, con la finalidad de determinar la composición química, tanto del material base como del recubrimiento, para poder comparar los resultados con los reportados por los fabricantes. Estos análisis químicos fueron realizados en las muestras correspondientes a las figuras 26, 30 y 41, los resultados son presentados en las tablas 22 – 27.

2.5.3 Resultados del Estudio Microestructural

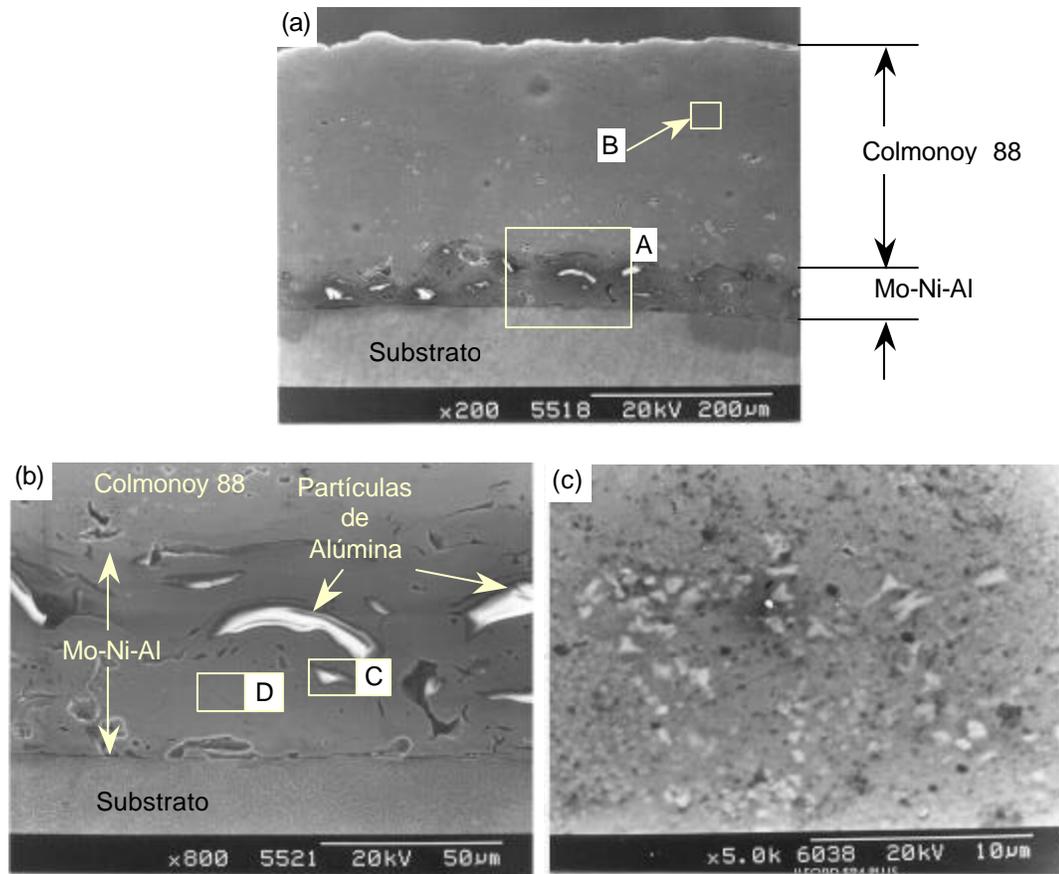
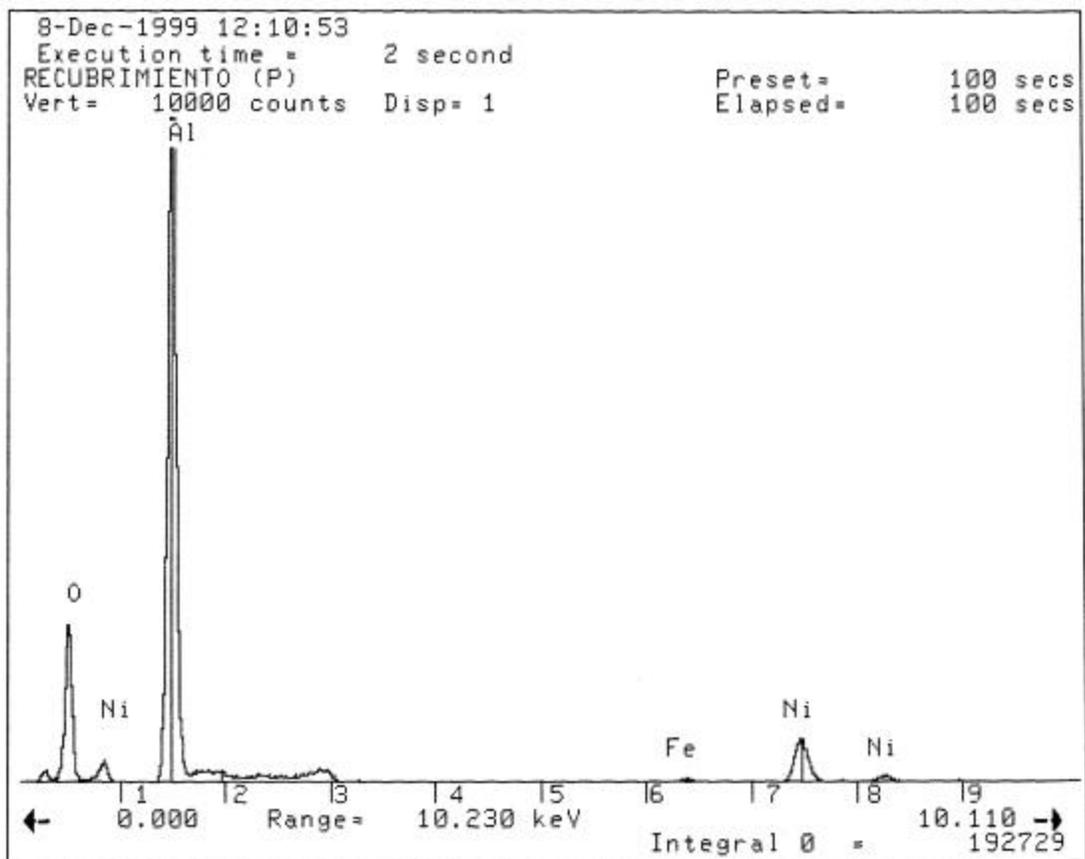


Figura 26

Microfotografías obtenidas por MEB, del corte transversal del sustrato termo-rociado atacado con nital, para el estudio microestructural: (a) Vista general del sustrato termo-rociado, observándose claramente la capa de enlace con el recubrimiento; (b) Detalle A, Figura 26a, Vista de partículas de alúmina contenidas en la capa de enlace Mo-Ni-Al; (c) Detalle B, Figura 26a, Capa del Colmonoy 88 ampliada.

Tabla 22EDX Partícula de alúmina (Al_2O_3) presente en la capa de enlace de Mo-Ni-Al

Elemento (Ka)	Peso (%)	Atómico (%)	Precisión
Al	81,89	90,75	0,23
Fe	0,97	0,52	0,05
Ni	17,14	8,73	0,16
TOTAL	100,00	100,00	

**Figura 27**

Espectroscopía por dispersión de energía de una partícula de alúmina (Al_2O_3) Detalle C de la Figura 26b, obteniendo los resultados de la composición química de la misma.

Tabla 23

EDX de la zona opaca de la capa de enlace Mo-Ni-Al

Elemento (Ka)	Peso (%)	Atómico (%)	Precisión
Fe	2,06	2,16	0,04
Ni	97,94	97,84	0,38
TOTAL	100,00	100,00	

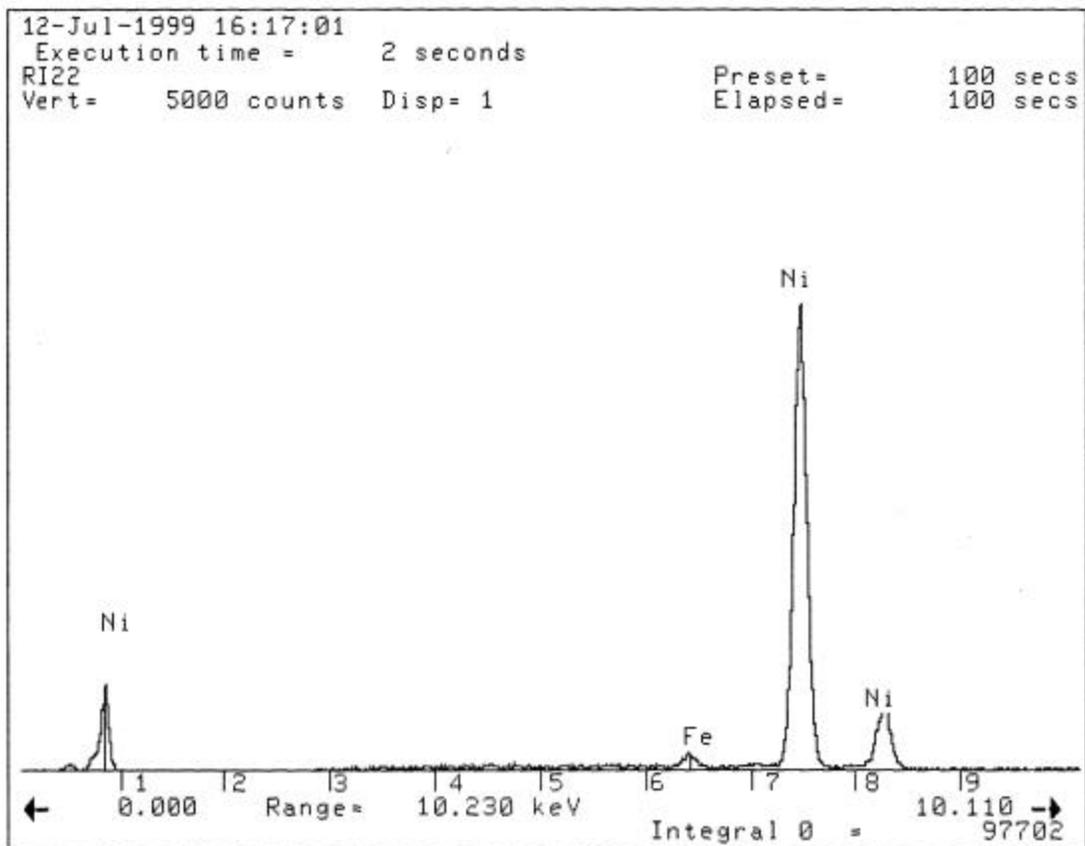


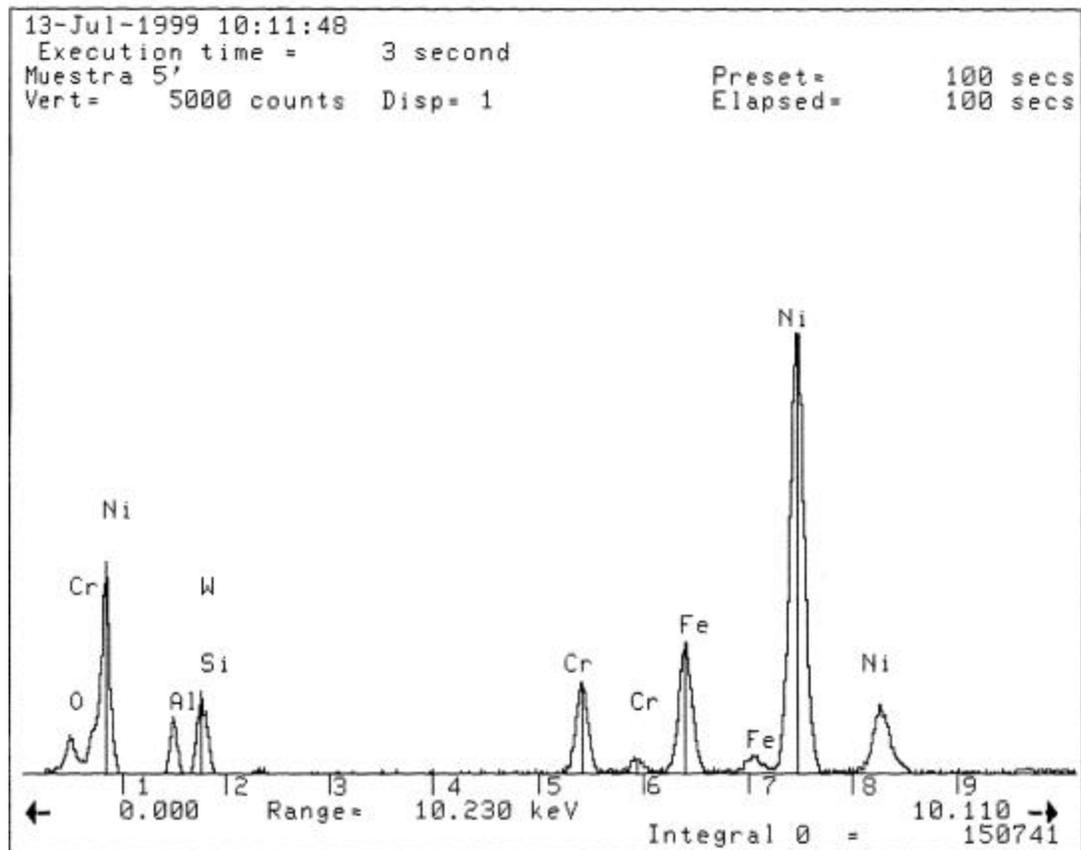
Figura 28

Espectroscopía por dispersión de energía del Detalle D de la Figura 26b, obteniendo los resultados de la composición química de la zona opaca de la capa de enlace Mo-Ni-Al.

Tabla 24

EDX Puntual en la capa de termo-rociado del Colmonoy 88.

Elemento (Ka)	Peso (%)	Atómico (%)	Precisión
Al	1,25	2,82	0,04
Si	1,26	2,73	0,06
Cr	6,64	7,75	0,07
Fe	12,15	13,21	0,10
Ni	67,47	69,78	0,27
W (La)	11,22	3,71	0,26
TOTAL	99,99	100,00	

**Figura 29**

Espectroscopía por dispersión de energía de la Figura 26c, obteniendo la composición química.

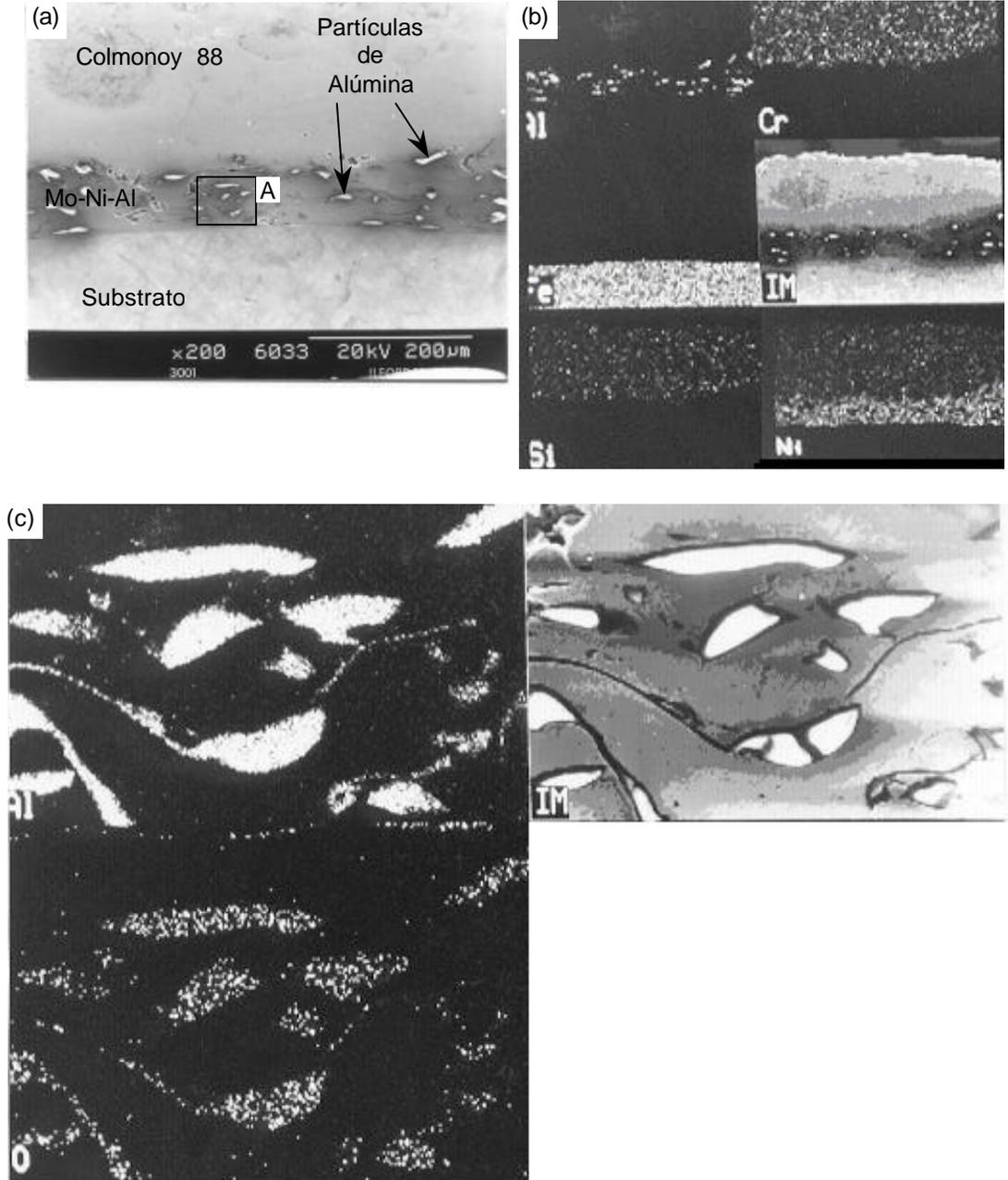


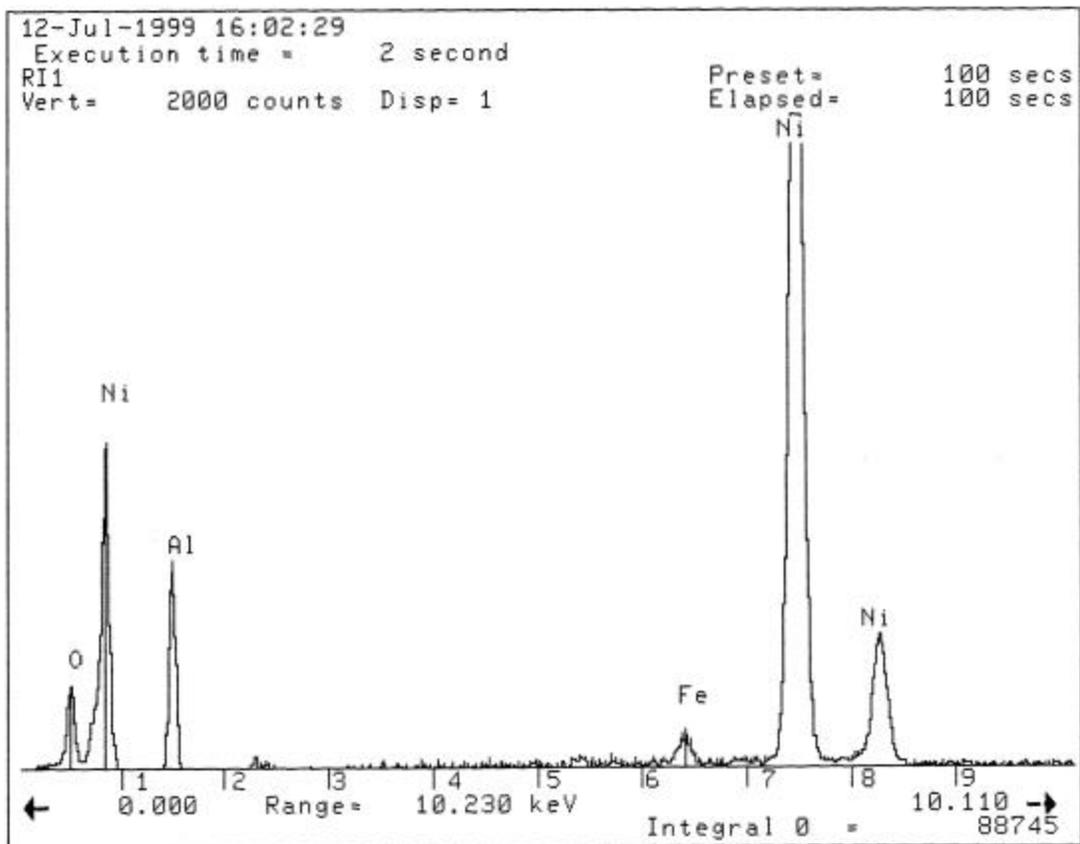
Figura 30

Fotomicrografías obtenidas por MEB, del corte transversal del substrato termo-rociado atacado con nital, para el estudio microestructural: (a) Vista general del substrato termo-rociado; (b) "Mapping" realizado a la Figura 30a; en donde se observa como están distribuidos los elementos que conforman el substrato, la capa de enlace y el recubrimiento; (c) "Mapping" realizado al Detalle A, Figura 30a. Observándose claramente los componentes de la capa de enlace.

Tabla 25

EDX de la capa de enlace Mo-Ni-Al detalle A figura 27a

Elemento (Ka)	Peso (%)	Atómico (%)	Precisión
Al	4,63	9,54	0,10
Fe	1,59	1,59	0,04
Ni	93,78	88,87	0,40
TOTAL	100,00	100,00	

**Figura 31**

Espectroscopía por dispersión de energía del Detalle A de la Figura 30a, capa de enlace Mo-Ni-Al.

2.5.4 Resultados del Estudio Factográfico

Sustrato Termo-rociado a 39 % S_u del Acero AISI 4140, considerando el espesor del recubrimiento y 43 % sin considerar el espesor.

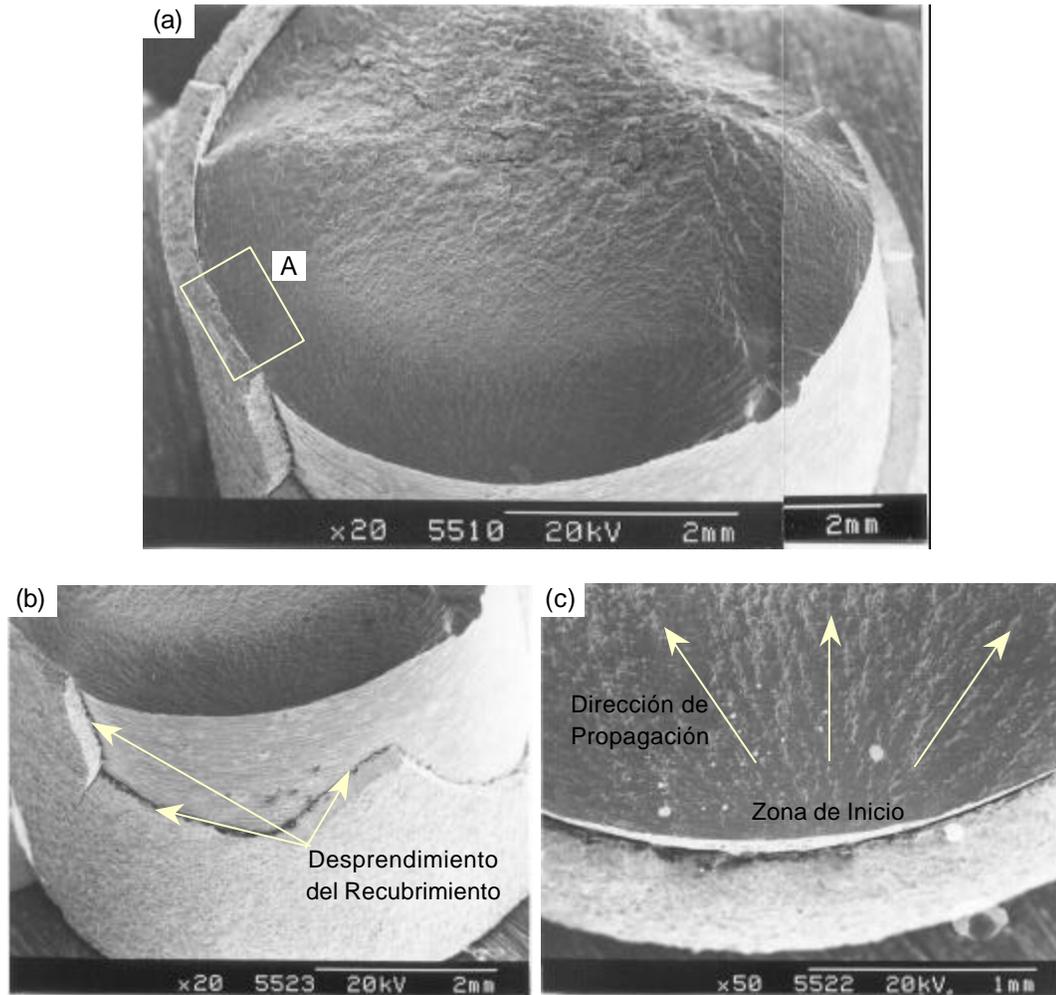


Figura 32

Microfotografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga al aire a 372 MPa considerando el espesor y 408 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: (a) Montaje de microfotografías de la vista general de la superficie de fractura; (b) Vista de la superficie de fractura y de la pared lateral detallando el desprendimiento del recubrimiento; (c) Detalle A, Figura 32a inicio de la grieta principal y la dirección de propagación de la misma.

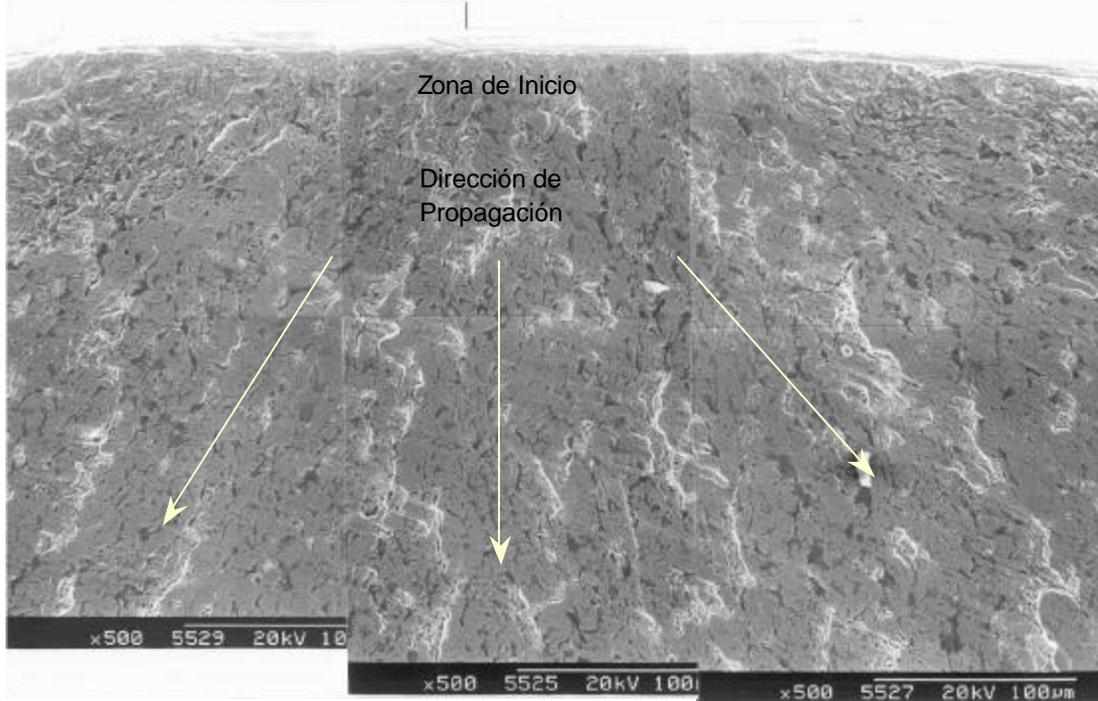


Figura 33

Montaje de fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga al aire a 372 MPa considerando el espesor y 408 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento. En donde se observa, en la superficie de fractura, la zona de inicio de la grieta principal y su propagación.

Sustrato Termo-rociado a 33 % S_u del Acero AISI 4140, considerando el espesor del recubrimiento y 37 % sin considerar el espesor.

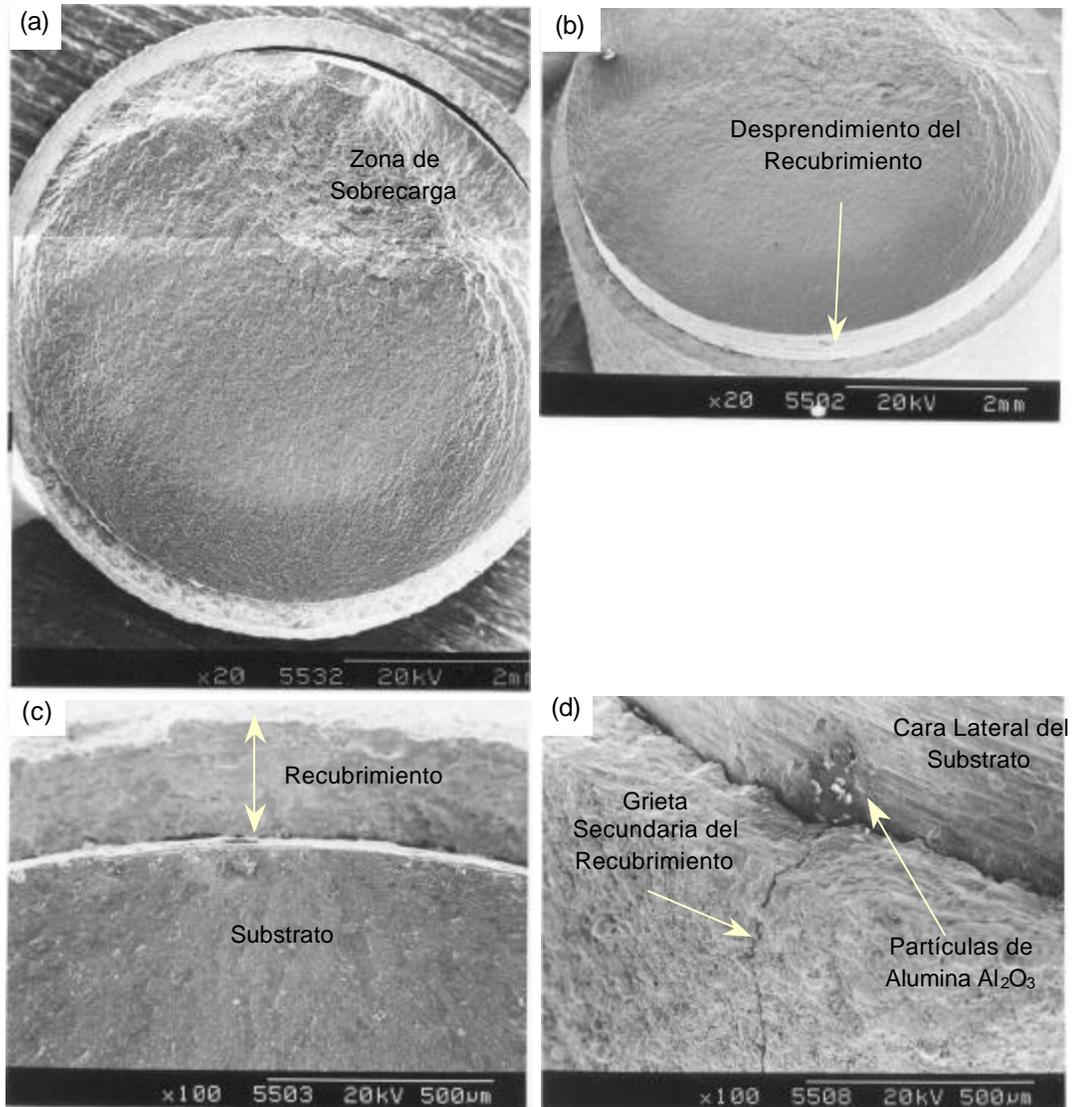


Figura 34

Fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga al aire a 318 MPa considerando el espesor y 348 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: (a) Montaje de fotomicrografías de la vista general de la superficie de fractura, en donde se observa la zona de sobrecarga debido a la reducción del área; (b) Vista de la superficie de fractura y la cara lateral; (c) Detalle del espesor del recubrimiento; (d) Vista de la pared lateral detallando el origen de una grieta secundaria en el recubrimiento y partículas de alúmina de la capa de enlace.

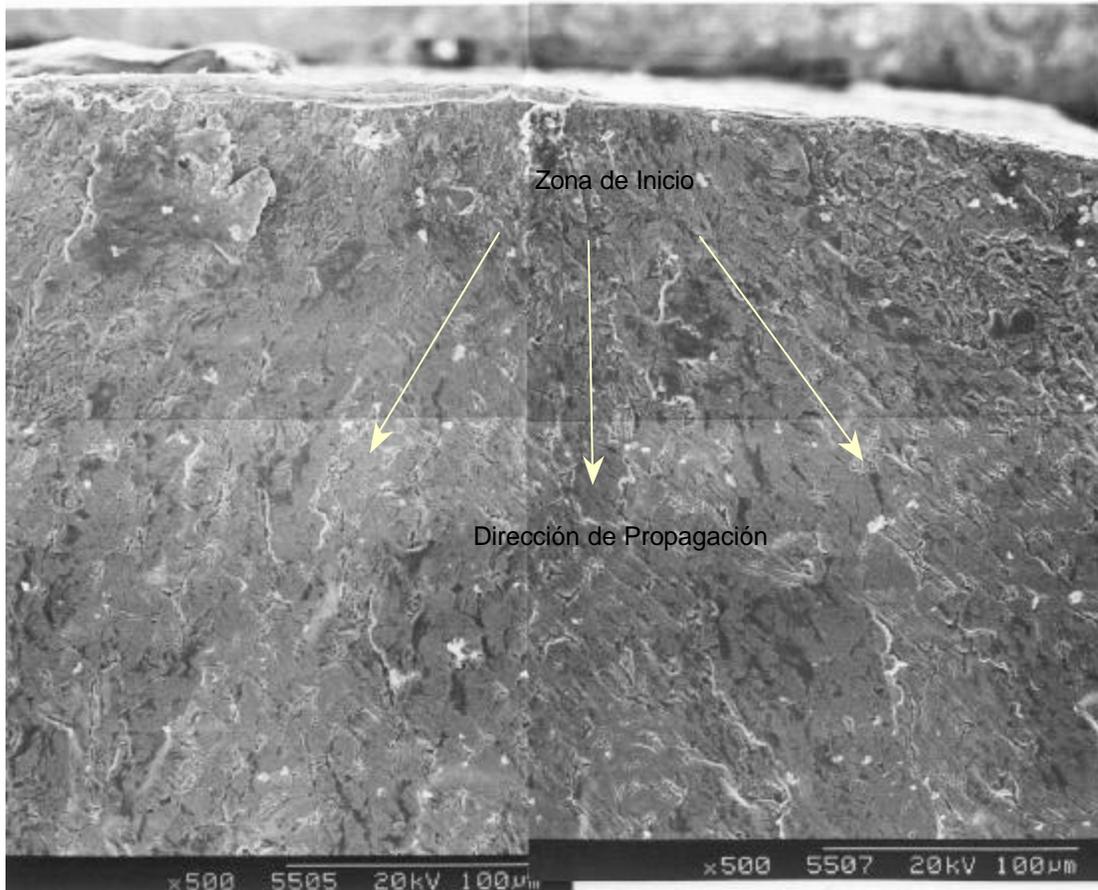


Figura 35

Montaje de fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 318 MPa considerando el espesor y 348 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento; señalando la zona de inicio de la grieta principal y la propagación de la misma.

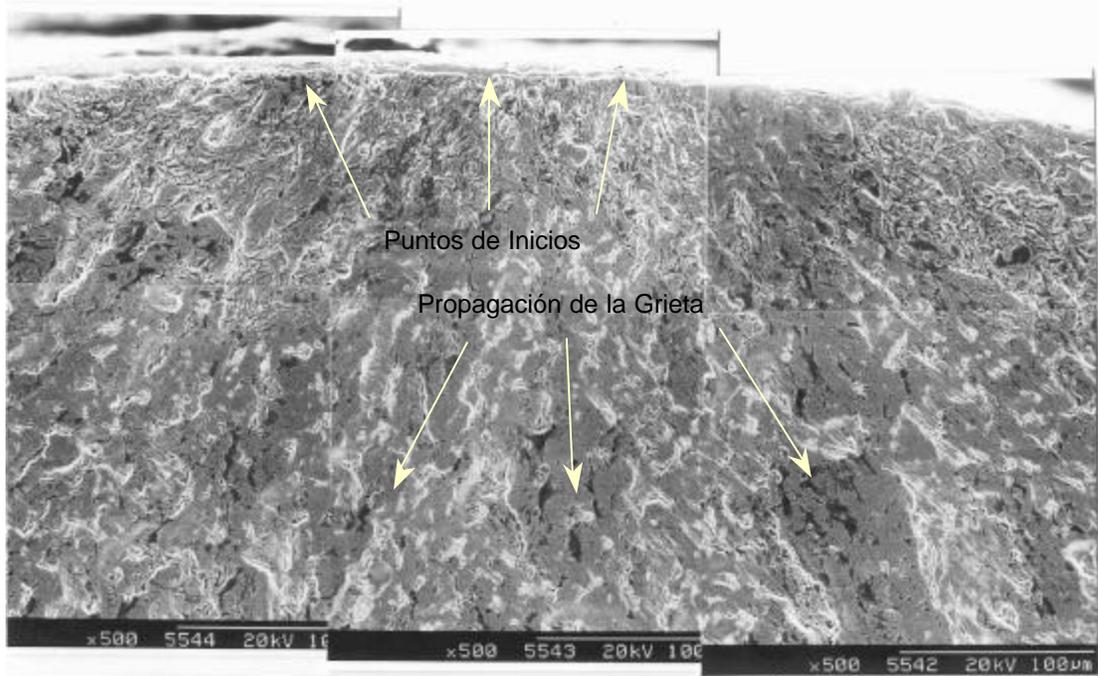


Figura 36

Montaje de fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 318 MPa considerando el espesor y 348 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento. Detalle de los puntos de inicio y su propagación.

Sustrato Termo-rociado ensayado a fatiga-corrosión a 45 % S_u del Acero AISI 4140, considerando el espesor del recubrimiento y 49 % sin considerar el espesor.

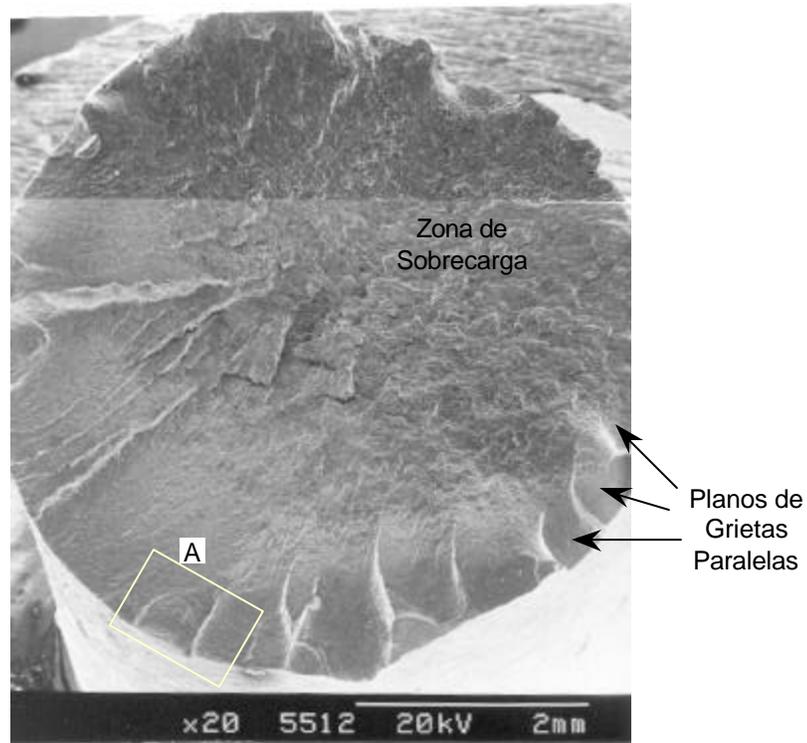


Figura 37

Montaje de fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 425 MPa considerando el espesor y 465 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento. Indicando los planos de grietas paralelas y la zona de sobrecarga.

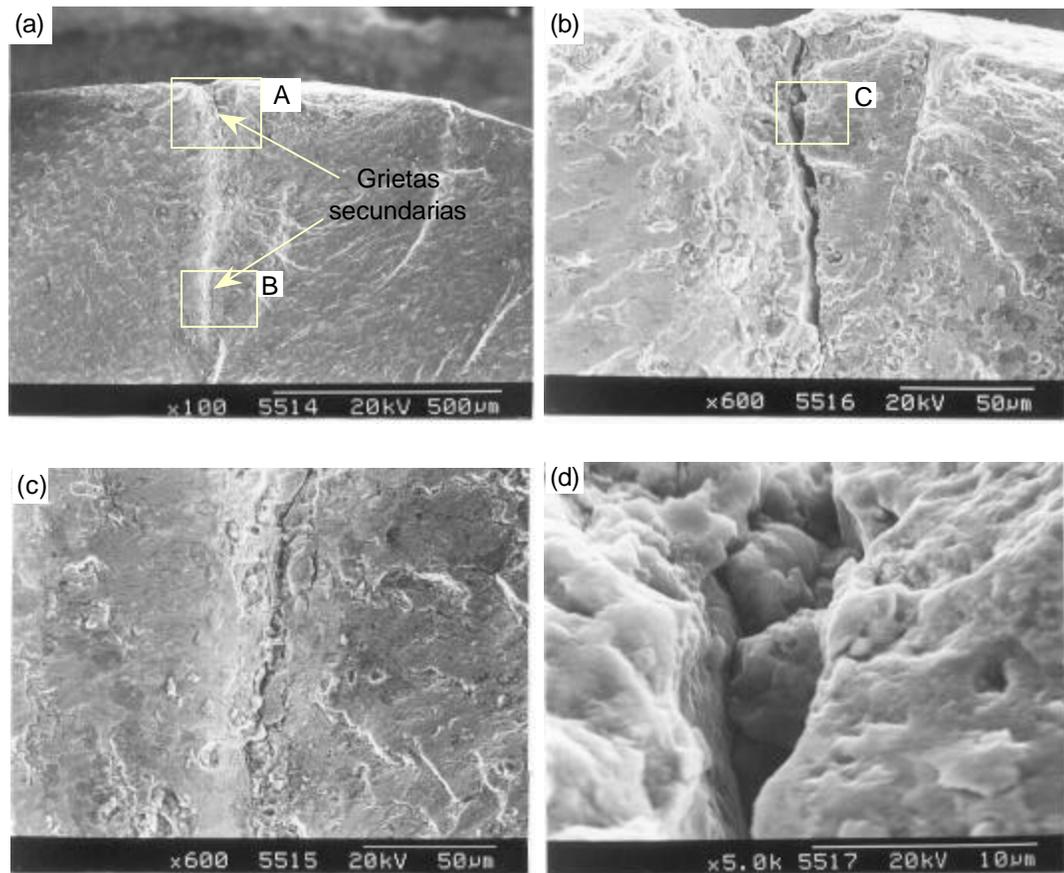


Figura 38

Fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 425 MPa considerando el espesor y 465 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: (a) Detalle A, Figura 37, vista de las grietas secundarias; (b) Detalle A, Figura 38a, Amplificación de la grieta secundaria superior; (c) Detalle B, Figura 38a, Amplificación de la grieta secundaria inferior; (d) Detalle C, Figura 38b, Amplificación de la grieta señalando la ruptura del sustrato.

Sustrato Termo-rociado ensayado a fatiga-corrosión a 33 % S_u del Acero AISI 4140, considerando el espesor del recubrimiento y 37 % sin considerar el espesor.

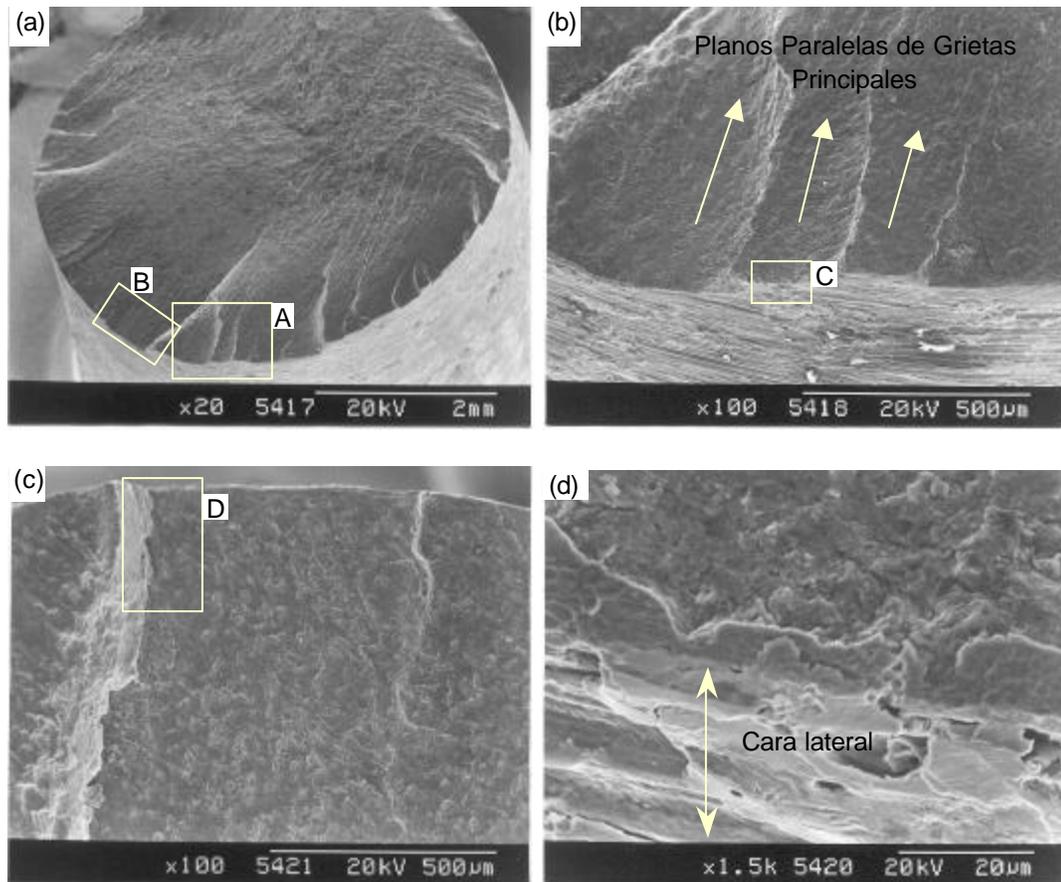


Figura 39

Fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 317 MPa considerando el espesor y 345 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: (a) Vista general de la superficie de fractura; (b) Detalle A, Figura 39a, donde se detallan los planos paralelos de las grietas provocados por la acción de la corrosión; (c) Detalle B, Figura 39a, detalle del escalón de la grieta principal la superficie de fractura; (d) Detalle de la cara lateral.

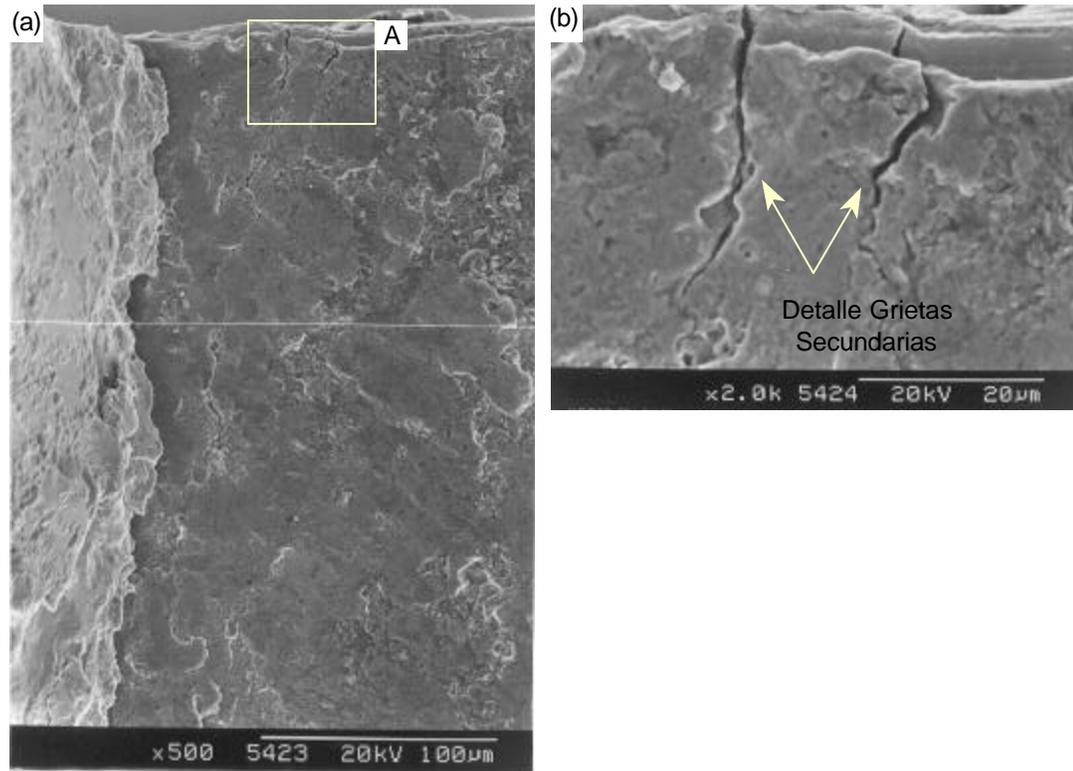


Figura 40

Fotomicrografías obtenidas por MEB, de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 317 MPa considerando el espesor y 345 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: Detalle C de la Figura 39c (a) Vista del escalón de planos de grietas principales; (b) Detalle A de la figura 40a, vista amplificada de las grietas secundarias.

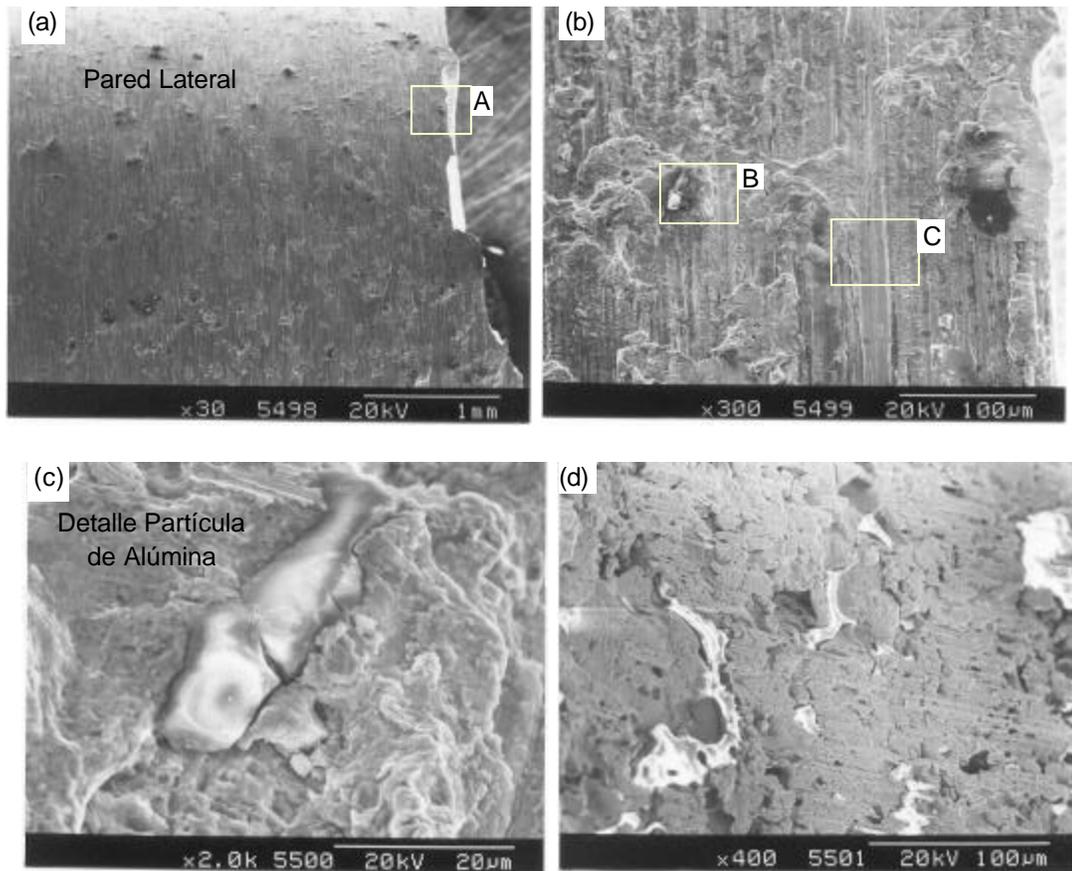


Figura 41

Fotomicrografías obtenidas por MEB, de la pared lateral de una probeta de acero 4140 recubierta por termo-rociado, la cual ha sido ensayada a fatiga-corrosión a 317 MPa considerando el espesor y 345 MPa sin considerar el espesor del recubrimiento: (a) Vista general de la pared lateral; (b) Detalle A, Figura 41a, de partículas de alúmina contenidas en la capa de enlace Mo-Ni-Al; (c) Detalle B, Figura 41b, de una partícula de alúmina (Al_2O_3) contenida en la pared lateral; (d) vista amplificada de la pared lateral.

Tabla 26

EDX de la capa de enlace Mo-Ni-Al detalle B figura 41b.

Elemento (Ka)	Peso (%)	Atómico (%)	Precisión
Al	66,19	81,08	0,17
P	1.16	1,24	0,04
S	0,00	0,00	0,00
Fe	2,83	1,67	0,06
Ni	26,22	14,76	0,16
Mo La	3,61	1,24	0,08
TOTAL	100,01	99,99	

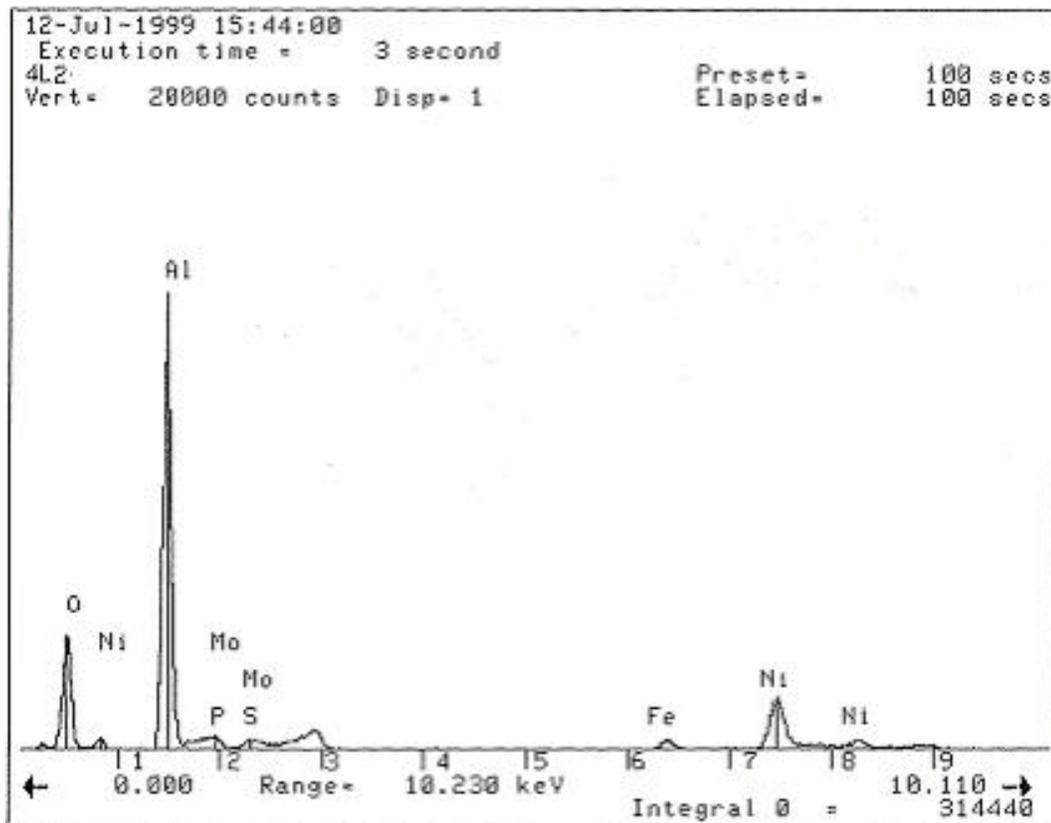


Figura 24

Espectroscopía por dispersión de energía de una partícula de alúmina (Al_2O_3) Figura 41c, obteniendo los resultados de la composición química de la misma.

Tabla 27

EDX de la capa de enlace Mo-Ni-Al detalle C figura 41b

Elemento (Ka)	Peso (%)	Atómico (%)	Precisión
Fe	7,56	7,99	0,09
Ni	89,96	90,48	0,40
Mo La	2,49	1,53	0,08
TOTAL	100,01	100,00	

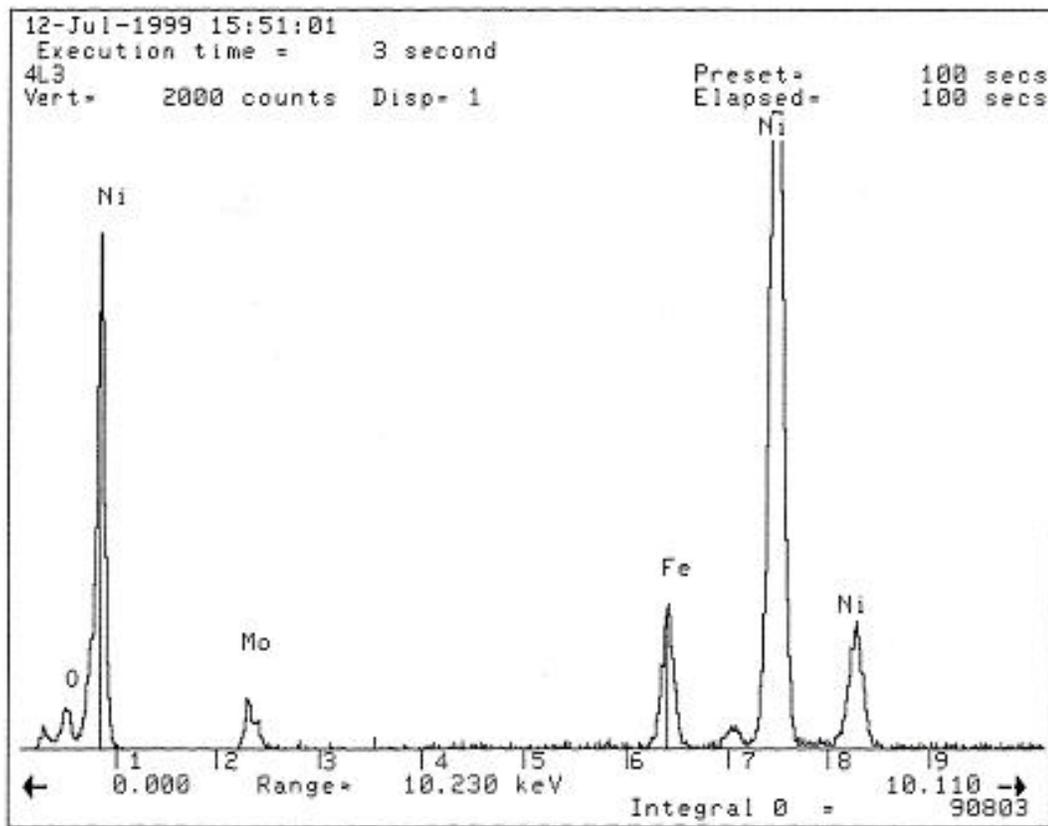


Figura 43

Espectroscopía por dispersión de energía del Detalle C de la Figura 41b, obteniendo los resultados de la composición química de la capa de enlace Mo-Ni-Al.

3 Análisis de Resultados

La caracterización de las propiedades mecánicas en tracción mostró los siguientes resultados: un aumento en los valores de las propiedades del sustrato con recubrimiento (sustrato termo-rociado) en comparación con el sustrato sin recubrimiento, debido posiblemente a que el recubrimiento soporta una parte determinada de la carga, hasta la fractura del recubrimiento; el material depositado (Colmonoy 88) no posee la ductilidad que presentan los aceros, por lo que durante la deformación plástica, el recubrimiento se desprende tal como se puede apreciar en la figura 11, lo que demuestra que el recubrimiento es relativamente frágil; además, se detalla que el mismo falla lejos de la zona de encuellamiento de las probetas ensayadas a tracción. Debido a que el recubrimiento no posee las mismas propiedades mecánicas del material base, el primero en fallar es el recubrimiento porque su ductilidad es menor que la del sustrato, por lo cual al fallar el recubrimiento se obtiene un incremento en el esfuerzo real aplicado.

Al evaluar el comportamiento del acero AISI 4140, termo-rociado considerando y sin considerar el espesor del recubrimiento, se obtuvo una disminución en la resistencia a la fatiga para todas las condiciones de material evaluadas al compararlas con el material base ensayado, tal como se muestra en las figuras 14 a 20.

En la figura 14 se observa el comportamiento típico de probetas en condición sustrato ensayado al aire y bajo corrosión ya que a medida que aumenta el número de ciclos (duración del ensayo) disminuye considerablemente la resistencia a la fatiga debido a que el medio corrosivo produce sobre la superficie la formación de cavidades que darán lugar más

tarde a la progresión de las picaduras de corrosión o grietas que se extienden hacia el interior del metal.

En las probetas de material base sin y con termo-rociado (considerando y sin considerar el espesor del recubrimiento) ensayadas a fatiga-corrosión, se nota que la disminución de la resistencia a la fatiga es más marcada para la condición de sustrato termo-rociado (considerando el espesor del recubrimiento), por lo que se puede afirmar que el recubrimiento no es resistente a la corrosión (ver figura 20).

Al comparar la condición de sustrato con sustrato termo-rociado (considerando y sin considerar el espesor del recubrimiento) ensayado a fatiga al aire (ver figura 19), se observa que nuevamente la resistencia a la fatiga se ve disminuida en el sustrato termo-rociado para ambas condiciones de espesor. De los resultados obtenidos durante los ensayos de fatiga y reportados en las tablas 8, 9,12,13,16 y 17 para cada condición de material ensayado respectivamente, se observa una dispersión de los puntos para cada nivel de esfuerzo, posiblemente debido a los diferentes parámetros involucrados al realizar cada proceso (capa de enlace y termo-rociado) se debe recordar que durante el proceso de termo-rociado es muy importante que el calentamiento sea homogéneo ya que tanto la proyección como el impacto de las partículas sobre el sustrato determinan la formación de poros e inclusiones de óxidos en el material que influyen negativamente en el acabado superficial, resultando ser concentradores de esfuerzos. Al fallar el recubrimiento se obtiene un incremento en el esfuerzo real aplicado; debido a esto un mayor número de inicios secundarios de la grietas principal se inician con anterioridad y una disminución brusca en el diámetro de la probeta causa una disminución en la resistencia a la fatiga cuando son

comparadas las probetas de condición sustrato termo-rociado (considerando y sin considerar el espesor del recubrimiento).

Comparando todas las condiciones de ensayo: sustrato y sustrato termo-rociado (considerando el recubrimiento como parte estructural y sin considerarlo) ensayados a fatiga y fatiga-corrosión (ver figura 19 y 20), se observa que bajo cualquier condición de ensayo la resistencia a la fatiga se ve reducida tanto para las muestras recubiertas bajo fatiga y fatiga-corrosión, resultando ser el ensayo de sustrato a la fatiga-corrosión el más perjudicial al compararlos con el metal base ensayado a fatiga al aire.

En cuanto a los resultados obtenidos de la evaluación del estudio micro-estructural de las superficies de corte por medio de microscopía electrónica de barrido observamos un espesor del recubrimiento de aproximadamente 67 μm para la capa de enlace Mo-Ni-Al y de 233 μm para la capa del Colmonoy 88 sumando un total de 300 μm .

Al observar las superficies de fractura de las probetas de material base termo-rociado ensayadas bajo corrosión figuras 34, - 37, se notan múltiples grietas paralelas a la superficie de fractura, esto posiblemente debido a que la velocidad de propagación de la grieta tiende a decrecer, dando tiempo para el crecimiento de posteriores picaduras.

Finalmente se puede decir que el comportamiento a la fatiga para materiales con recubrimientos, depende en parte de los esfuerzos residuales de tracción o compresión desarrollados por el método de deposición del recubrimiento y en el sustrato, los cuales están asociados a su vez a la composición química del depósito y del sustrato y al estado del sustrato previo a la deposición del recubrimiento; también dependerá de la resistencia

a la fatiga del depósito con respecto al sustrato y la influencia del acabado superficial, es decir, la presencia o ausencia de defectos locales (inclusiones o impurezas inherentes al material) en el recubrimiento o en el depósito adyacente a la intercara del recubrimiento-sustrato; al relacionarse estos factores pueden dar lugar a una idea del incremento o disminución del número de ciclos necesarios para que la grieta por fatiga nucleee y luego se propague al conjunto recubrimiento-sustrato con respecto al sustrato sin depósito (recubrimiento); en éste sentido, se encuentra que el recubrimiento fractura a un número de ciclos más bajo. Además, debe tenerse en consideración que para materiales sin depósitos la nucleación de la grieta por fatiga puede consumir aproximadamente el 90% de la vida a la fatiga.

CONCLUSIONES

Al caracterizar las propiedades mecánicas en tracción, las probetas recubiertas (substrato termo-rociado) en comparación a las del material base presentan un pequeño aumento en todas sus propiedades estáticas como son: esfuerzo de fluencia (s_y), resistencia a la tracción (S_u), esfuerzo real a carga máxima (s_u), deformación real a carga máxima (ϵ_u), esfuerzo real a la fractura (s_f) y reducción en área a la fractura en %. Siendo el esfuerzo de fluencia (s_y), el que presenta el mayor incremento, debido a que el recubrimiento soporta una parte de la carga hasta alcanzar la zona de deformación plástica.

Las probetas de metal base ensayadas a fatiga-corrosión en comparación a las probetas de metal base ensayadas al aire, presentan una disminución en la resistencia a la fatiga, debido a que el medio corrosivo produce en la superficie de la probeta múltiples picaduras las cuales nuclean las grietas.

Las curvas del metal base termo-rociado ensayadas a fatiga y fatiga-corrosión cuando no se considera el espesor del recubrimiento es ligeramente superior a cuando se considera el espesor de recubrimiento, debido a que el recubrimiento se fractura rápidamente no soportando la carga dinámica.

Las probetas recubiertas con depósito de Colmonoy 88 de 233 μm de espesor presentan una mayor disminución en la resistencia a la fatiga en comparación con los resultados obtenidos de las probetas de material base; esto podría ser atribuido a que el recubrimiento debido a sus grietas y poros y a que es más frágil que el substrato, fractura rápidamente y prolonga la grieta al substrato provocando una fractura de la probeta a un número menor de ciclos.

RECOMENDACIONES

Realizar futuros trabajos de investigación en fatiga y fatiga-corrosión sobre el acero AISI 4340, utilizando la capa de enlace Mo-Ni-Al (METCO 447) y el recubrimiento Colmonoy 88, con la finalidad de evaluar las propiedades estáticas y dinámicas, bajo las mismas condiciones de ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Askeland, Donald. La ciencia e ingeniería de los materiales. Grupo Editorial Iberoamericana. México. 1987. 556 P.

[2] ASM Handbook "Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys". Vol. Ohio.Usa . 1994.

[3] ASM Handbook. "Fractography". Vol. XII.Ohio.USA. 1995.

[4] ASTM Designation: A 370 - 96. Vol 01.02. "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products ". 1997. Pp 175-226.

[5] ASTM Designation: E 468 - 90. Vol 03.01. "Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials". 1997. pp. 476-481.

[6] ASTM Designation: E 606 - 92. Vol 03.01. "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing". 1997. Pp 523-537.

[7] ASTM Designation: E 739 - 91. Vol 03.01. "Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (F,-N) Fatigue Data". 1997. Pp 594- 600.

[8] Browning, J; Matus, R; Richter, R A New HVOF Thermal Spray Concept. Proceedings of SP National Thermal Spray Conference. Houston, Texas. 1995. 13 P.

[9] Cazaud, R. la Fatiga de los Metales. Ediciones Aguilar. España. 1957. Pp 377-401.

[10] Desvignes; Gentil; Castes. Fatigue with Residual Stresses due to Shot Peening: Effects and Evolution. International Conference Residual Stress November 88. Elsevier Applied Science. 1989. 18 P.

[11] Dieter. Metalurgia Mecánica. Ediciones Aguilar. Madrid. 1967. Volumen II 651 P.

[12] Fatigue Dynamics. Instruction manual Model RBF-200 Rotaring beam Fatigue Testing Machine, 1993. 15 P.

[13] Fillion, G. L Colmonoy 88: A New Development in Nickel-Based Hardfacing Alloys. Welding Journal. 1994. No. 78. Pp 37-42.

[14] Flinn /y/ Trojan. Materiales de ingeniería y sus aplicaciones. Ediciones Mc Graw-Hill. México. 3ra. Edición. 1994. 742 P.

[15] Forrest, P. G. "Fatiga de los Metales". Ediciones Urmo. Espartero. 10-Bilbao. 1972. Pp 76.

[16] Fritz, Todt. Corrosión y Protección. Ediciones Aguilar. Madrid. 1959. 1034 P.

[17] Herbert, H and Sulit, R. Thermal Spray Coatings ASM Handbook: Barzing and Soldering. ASM International. 6 ta Edición. 1993. Volumen 6.

[18] Herman, Herbert. Thermal Spray Coatings. Special Welding and Joining Topics. State University of N. Y. 1994. Pp 1004-1009.

[19] Howes JR, C. P. Thermal Sraying: Processes, Preparation, Coatings and Aplicacions. Welding Journal. 1994. No. 78. Pp 47-51.

[20] Irving, B.; Knight, R.; Smith, R. The HVOF Process the Hottest Topie in the Thermal Spray Industry. Welding Journal. 1993. No. 62. Pp 25-51

[21] Irving, B.; Knight, R.; Smith, R. Thermal spray: New Technology is its Lifeblood. Welding Journal. 1998. No. 125. Pp 38-45.

[22] Kushner, Burton and Novinski, Edward R. Surface Treatments and Coatings for friction and Wear Control. Thermal spray Coatings. Perkin-Elmer Corporation, Metco Division. 1995. Pp 829-833.

[23] Kushner, Burton and Novinski, Edward R. Thermal Spray Coatings ASM Handbook: Friction, Lubrication and Wear Technology. ASM International. 6th Edition. 1992. Volumen XVII.

[24] Málishév, A. ; Nikoláliev, G. ; Shuválov, Y. Tecnología de los Metales. Editorial Paz. Moscú. 1983. Pp 138-140.

[25] Rodríguez, M.-, Staia, M.-, Gil, L., Arenas, R.; Scagni, A. Study of the influence of a high Velocity Oxi-Fuel (HVOF) Thermal Sprayed Ni-Based Alloy. Escuela de Mecánica, Facultad de Ingeniería UCV. Caracas, Venezuela. 1998. 10 P.

[26] Rodríguez, M.-, González, E.; Rangel, J.; Arenas, F.; Scagni, A. Caracterización de un Recubrimiento de Acero Inoxidable depositado por diferentes técnicas de Termo rociado. Jornadas de Investigación Facultad de Ingeniería UCV. 1998. Caracas, Venezuela. 1998. Vol 1. Pp 152-153.

[27] Rowe, Geoffrey W. Conformado de los metales. Ediciones Ermo. 1972. 371 P.

[28] Shengping; Chengjie; Mei; Renzhi; Yiangbin. Effect of shot peening on Fatigue Strength of notched Specimens. Conference Procedure: ICSP-5. 1993. Pp 150-153.

[29] Siitonen, Konos y Kettunen. Corrosion Properties of Stainless Steel Coatings Made by Different Methods of Thermal Spraying. 7^o National Thermal Spray Conference. Boston, Massachusetts. 1994. Pp 105-110.

[30] Smith, W. R and Fast, D. R- The Future of Thermal Spray Technology. Welding Journal. 1991. No. 47. Pp 56-65.

[31] Thornton, Peter /y/ Colangelo, Vito. Ciencia de los materiales para ingeniería. Prentice-Hall Hispanoamericana. S. A. México. 1987. 715 P.

[32] Thorpe, Marie L. Try Thermal Spray for Specially Metal and Carbide Coatings. Chemical Engineering Progress. 1991. Pp 54-57.

[33] Van den Berge, Frank M. J. Thermal Spray Processes Advanced Materials & Processes. 1998. Pp 31-34.

[34] Wahg, B. Q. The Elevated Temperature Erosion of HVOF Tungsten Carbide Cermet Coating. 81 National Thermal Spray Conference. Houston, Texas. 1995. Pp 711-715.

[35] Padilla Oineda, Katina del C., y Velásquez Martínez, Adolfo J., 1999, Efectos de la aplicación de un recubrimiento Ni-Mo-Al por termo-rociado sobre las propiedades de fatiga de corrosión del acero AISI 4140, Tesis de Grado Presentada en la Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, U.C.V., Caracas, Venezuela, Pág. 95.

[36] Hernandez Mayz, Leris, y Oliveira Oliva, Francisco, 1999, Evaluación de propiedades de fatiga del acero AISI 4340 recubierto por termo-rociado, Tesis de Grado Presentada en la Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, U.C.V., Caracas, Venezuela, pág. 136.

[37] <http://www.edenia.com/uniweld/un02003.htm>

ANEXOS
