

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UN
ACERO ESTRUCTURAL DE TIPO SAE 4340 TEMPLADO Y
REVENIDO, RECUBIERTO POR UNA PELÍCULA DE CrN
OBTENIDA POR UN PROCESO DE DEPOSICIÓN FÍSICA EN
FASE VAPOR ASISTIDO POR PLASMA.**

Presentado Ante La Ilustre
Universidad Central De
Venezuela
Por la Bachiller:
Joa U., Cecilia
Para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UN ACERO ESTRUCTURAL DE TIPO SAE 4340 TEMPLADO Y REVENIDO, RECUBIERTO POR UNA PELÍCULA DE CrN OBTENIDA POR UN PROCESO DE DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE VAPOR ASISTIDO POR PLASMA.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera

Presentado Ante La Ilustre
Universidad Central De
Venezuela
Por la Bachiller:
Joa U., Cecilia
Para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010



Caracas, 14 de julio de 2.010

ACTA

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

CECILIA JOA

Titulado:

“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UN ACERO ESTRUCTURAL DE TIPO SAE 4340 TEMPLADO Y REVENIDO, RECUBIERTO POR UNA PELÍCULA DE CrN OBTENIDA DE UN PROCESO DE DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE VAPOR ASISTIDO POR PLASMA”

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

Prof. Alberto Pertuz
Jurado

Prof. Crisanto Villalobos
Jurado

Prof. Eli Saúl Puchi
Tutor

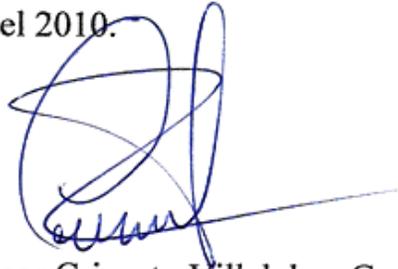
ACTA

Nosotros los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo Especial de Grado de la Br. **Cecilia Joa U.**, C. I. No. 19.044.580, el cual lleva por título: **“Estudio del Comportamiento a la Fatiga de un Acero Estructural de Tipo SAE 4340 Templado y Revenido, Recubierto por una Película de CrN Obtenida por un Proceso de Deposición Física en Fase Vapor Asistido por Plasma”**, considerando que dicho Trabajo representa una contribución importante al estudio del comportamiento a la fatiga de los aceros estructurales recubiertos con películas duras y que es un Trabajo sumamente original y de excepcional calidad, cuyos resultados podrían ser muy beneficiosos para la industria nacional que emplea componentes fabricados a partir de estos materiales, recomendamos el otorgamiento de una **MENCIÓN HONORÍFICA**.

En Caracas a los catorce días del mes de Julio del 2010.



Profesor Alberto Pertuz C.



Profesor Crisanto Villalobos G.



Profesor Eli Saúl Puchi Cabrera



DEDICATORIA

A Dios, por iluminarme el camino.

A mi Familia, por todo el amor y apoyo recibido a lo largo de esta y todas las etapas de mi vida, en especial a mi Madre por ser tan incondicional.

A mi Hermana , por ser mi mejor amiga y brindarme su apoyo y comprensión.

A mi Novio, por todo el amor y comprensión y ser mi soporte durante la carrera.

A mi sobrino, por iluminarnos la vida con su llegada.

A todas aquellas personas especiales en mi vida, que de una manera u otra contribuyeron para culminar esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios ante todas las cosas por darme la vida.

A la Universidad Central de Venezuela, por brindarme la oportunidad de ser parte de ella y ser mi casa de estudios.

A mi tutor, Profesor Elí Saúl Puchi Cabrera, por su abnegada colaboración y su gran vocación de enseñanza, que hicieron posible la realización de este trabajo especial de grado.

A mi profesor y amigo Pedro Álvarez, por su orientación y asistencia técnica y ser el impulsor en los inicios de este proyecto.

Al personal de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales: su directora Profa. Sonia Camero, a los profesores José Gregorio La Barbera, Engels Ochoa y a la Ing Ángela Castro, por su gran ayuda, apoyo y buen trato que de manera muy importante me permitió elaborar este trabajo.

Al Prof. Wilfrido González por prestar sus servicios como encargado del Laboratorio de Ensayos Mecánicos perteneciente a la Universidad Simón Bolívar.

Al equipo del Laboratorio de Microscopia Electrónica del Instituto Universitario Tecnológico.

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la UCV (CDCH-UCV), por otorgar los recursos económicos con los cuales se realizó el presente trabajo de grado.

A mi familiares, ya que sin ellos no hubiésemos podido lograr ésta y muchas de las metas a lo largo de nuestras vidas.

A mi novio, por estar siempre presentes apoyándome y ayudándome a lo largo de mi vida universitaria, y por nunca dejarme caer ante cualquier inconveniente.

A nuestros compañeros de estudio y excelentes profesores por incentivarnos a seguir luchando por alcanzar nuestros objetivos y ayudarnos a adquirir nuestros conocimientos en la carrera.

Joa U. Cecilia Del C.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UN ACERO ESTRUCTURAL DE TIPO SAE 4340 TEMPLADO Y REVENIDO, RECUBIERTO POR UNA PELÍCULA DE CrN OBTENIDA POR UN PROCESO DE DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE VAPOR ASISTIDO POR PLASMA.

Tutor Académico: Prof. Eli Saúl Puchi-Cabrera.
Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2010, 83 pp.

Palabras Claves: Límite de Fatiga, AISI 4340, Recubrimiento, PAPVD, CrN.

Resumen

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento a fatiga al aire de un acero AISI 4340 templado y revenido, recubierto por una película de CrN obtenida por un proceso de deposición física en fase vapor asistido por plasma (PAPVD). Los ensayos de fatiga se llevaron a cabo en condiciones de flexión rotativa, empleando muestras del sustrato recubierto. Para lograr este propósito, se mecanizaron 15 probetas según la norma E-606. El límite de fatiga fue evaluado en el intervalo de esfuerzos alternantes máximos de 520-580 MPa. Se determinó a partir de la relación entre el máximo esfuerzo alternante y el número de ciclos a falla propuesta por Stromeyer, que la presencia del recubrimiento da lugar a un aumento del 2% en el límite de fatiga en comparación con el material sin recubrir. Se evaluó el efecto de la aplicación de cargas cíclicas al material, en las propiedades mecánicas estáticas del mismo, empleándose muestras sometidas a 5×10^6 ciclos, determinándose un aumento aparente del 13% en el esfuerzo de fluencia y una disminución aparente del 31% con respecto al promedio del esfuerzo real a carga máxima, del conjunto sustrato-recubrimiento. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis a algunas muestras selectas, mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB). Del análisis fractográfico se mostraron las diferentes zonas características de la superficie de fractura, indicándose los orígenes de grieta, se observó la interface sustrato-recubrimiento, el comportamiento del recubrimiento y la propiedad de adherencia del mismo. El estudio ha podido corroborar que las grietas de fatiga se forman en la superficie libre del recubrimiento y posteriormente se transfieren al sustrato.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
Objetivo General:	4
Objetivo Específicos:	4
CAPÍTULO I	
MARCO TEÓRICO	5
1.1 ACEROS	5
1.1.1 Introducción a los aceros	5
1.1.2 Acero AISI 4340.....	5
1.1.3 Componentes, aleación	6
1.1.4 Influencia de los elementos de aleación.....	7
1.1.4 Tratamientos térmicos.....	8
1.1.4 Aplicaciones	9
1.2. TÉCNICAS DE DEPOSICIÓN. GENERALIDADES	10
1.2.1. Deposición física en fase de vapor.....	11
1.2.3. Procesamiento por Plasma	12
1.2.3. Ventajas del procesamiento de materiales por plasma	13
1.3. TECNOLOGÍA DE RECUBRIMIENTOS	15
1.3.1. Nitruro de Cromo. CrN.....	16
1.4. FATIGA	19
1.4.1. Definición de fatiga. Fatiga de metales	19
1.4.2. Tipos de esfuerzos de fatiga	21
1.4.3. Etapas del proceso de fatiga	24
1.4.4. Curva <i>S-N</i>	24
1.4.5. Resistencia y Límite de fatiga.....	27
1.4.6. Modelos que describen la curva <i>S-N</i>	30

1.4.7.	Factores que influyen el comportamiento de la curva S-N.	31
1.4.8.	Superficie de fractura en Fatiga	34
1.5.	ANTECEDENTES	41
CAPÍTULO II		
	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	44
2.1.	DIAGRAMA DE FLUJO	44
2.2.	PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS	45
2.3.	DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO	46
2.4.	ENSAYOS MECÁNICOS	48
2.4.1.	Ensayo de Fatiga	48
2.4.2.	Ensayos de tracción Post-Fatiga	50
2.5.	ESTUDIO FRACTOGRÁFICO	52
2.5.1.	Preparación de las Muestras	53
2.5.2.	Corte de las Probetas	53
2.5.3.	Embutido de las Muestras Longitudinales.....	55
2.5.4.	Pulido de las Muestras.....	56
2.5.5.	Microscopia Electrónica De Barrido (MEB).....	56
CAPÍTULO III		
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	58
3.1.	ENSAYO DE FATIGA	58
3.2.	ENSAYOS DE TRACCIÓN POST-FATIGA.....	60
3.3.	ESTUDIO FRACTOGRÁFICO	63
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
4.1.	CONCLUSIONES	76
4.2.	RECOMENDACIONES	78
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura N° 1.1, Procesamiento por técnica PAPVD.....</i>	14
<i>Figura N° 1.2, Recubrimiento BALINIT® CNI basada en CrN.....</i>	19
<i>Figura N° 1.3, Tipos de Esfuerzos de Fatiga</i>	22
<i>Figura N° 1.4, Comportamiento S–N de algunos materiales tecnológicos (gráfica Log-Log).....</i>	26
<i>Figura N° 1.5, Diagrama S-N.....</i>	27
<i>Figura N° 1.61.4.5. Curvas S-N.....</i>	29
<i>Figura N° 1.7, Influencia de la tensión media σ_m en el comportamiento a la fatiga.</i>	34
<i>Figura N° 1.8. Superficie de fractura en fatiga.....</i>	35
<i>Figura N° 1.10. Crecimiento de grieta en sección transversal de un espécimen.....</i>	36
<i>Figura N° 1.11. Esquemas de mecanismos que conducen al inicio de las grietas de fatiga: a) extrusiones e intrusiones en regiones de deslizamiento producidas por esfuerzos cíclicos. b) intrusiones y extrusiones de la banda de deslizamiento previas al inicio de la grieta</i>	37
<i>Figura N° 1.12. Marcas de Playas y marcas radiales</i>	38
<i>Figura N° 1.13. Estrías</i>	39
<i>Figura N° 1.14. Zonas de iniciación (A), propagación (B) y fractura (C).....</i>	40
<i>Figura N° 2.1. Diagrama de las probetas para ensayos de fatiga en flexión rotativa según la norma ASTM E 606.....</i>	45
<i>Figura N° 2.2. Torno marca Myford con plato de mordaza graduable.....</i>	46
<i>Figura N° 2.3. Probeta de acero AISI 4340 recubierta con CrN.....</i>	47
<i>Figura N° 2.4. Máquina de flexión rotativa marca FATIGUE DYNAMICS, modelo RBF-200.</i>	48
<i>Figura N° 2.6. Máquina de tracción MTS-810. b) Extensómetro marca INSTRON.</i>	52
<i>Figura N° 2.6. Cortadora de disco de diamante marca STRUERS modelo MINITOM.</i>	54
<i>Figura N° 2.7. Tipos de corte realizados en las probetas de fatiga.</i>	54

Figura N° 2.8. Embutidora marca BUEHLER modelo Simpliment. 55

Figura N° 2.9. Pulidora marca BUEHLER modelo METASERV 2000 variable
“speed grinder-polisher” 56

Figura N° 2.10. Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)..... 57

Figura N° 3.1. Curva Comparativa del Límite de Fatiga del acero AISI 4340
Recubierto con CrN y el acero AISI 4340 sin recubrir..... 59

Figura N° 3.2. Gráfica Comparativa de los Resultados de Tracción para las
Probetas de Fatiga Recubierta con CrN..... 62

Figura N° 3.3, Vista general del área de fractura del conjunto substrato
recubrimiento ensayado a fatiga al aire sometido a un esfuerzo de
560 MPa (a) y a un esfuerzo de 580MPa b) 64

Figura N° 3.4. Vista general del área de fractura del conjunto substrato
recubrimiento ensayado a fatiga al aire, sometido a un esfuerzo de
560 MPa. La probeta falló después de 493.300 ciclos. Aspecto
general de la superficie que muestra la existencia de una sola grieta
dominante 64

Figura N° 3.5. Vista ampliada de la zona de iniciación de grieta y su dirección de
propagación a) y detalle de la apertura del sitio de grieta b). 65

Figura N° 3.6. Vista general del área de fractura del conjunto substrato
recubrimiento ensayado a fatiga al aire, sometido a un esfuerzo de
580 MPa. La falla ocurrió después de 2.099.200 ciclos de aplicación
de carga..... 66

Figura N° 3.7. (a) Vista ampliada de la zona de iniciación de la grieta y su dirección
de propagación. (b) Detalle de la zona de inicio de la grieta..... 67

Figura N° 3.8. (a) Vista de la pared del recubrimiento cercana al sitio de iniciación,
600X. (b) Detalle de las grietas circunferenciales, 1500X y (c)
Detalle de defectos en la superficie, 5000X. 67

Figura N° 3.9. Vista longitudinal de una muestra ensayada a fatiga al aire, sometido a un esfuerzo de 560 MPa, la cual falló después de 493.300 ciclos.
 (a) 15.000X, (b) 15.000X y (c) 20.000X..... 68

Figura N° 3.10. Vista longitudinal de una muestra ensayada a fatiga al aire, sometido a un esfuerzo de 550 MPa y un ciclaje de 5.000.000.(a) 10.000X, (b) 10.000X, (c) 20.000X y (d) 10.000X..... 69

Figura N° 3.11. (a) Vista general de la probeta ensayada a tracción luego de ser ensayada a fatiga a un esfuerzo de 520 MPa y ciclaje de 5.000.000. (b)Detalle de la zona central (c) Detalle de una grieta presente en la misma. 70

Figura N° 3.12. (a) Vista general de la probeta ensayada a tracción luego de ser ensayada a fatiga a un esfuerzo de 540 MPa y ciclaje de 5.000.000.(30X), (b) Detalle de la zona central (100X) 71

Figura N° 3.13. (a) Estado de esfuerzo para una probeta de radio continuo, (b) Gráfico esquemático que ilustra la variación de los esfuerzos a través de la sección transversal de la muestra..... 72

Figura N° 3.14. (a) Vista general de la probeta ensayada a tracción luego de ser ensayada a fatiga a un esfuerzo de 560 MPa y ciclaje de 5.000.000. (b)Detalle de la zona (c) Detalle de la zona 72

Figura N° 3.15. (a) Detalle del borde de la superficie de la fractura que ilustra que la película se ha mantenido bien adherida al sustrato después de la deformación. (b) Detalle de la zona 73

Figura N° 3.16. (a) Detalle del borde de la superficie de la fractura que ilustra un avance de grieta (b) Detalle de la zona 74

Figura N° 3.16. (a) Vista general de la probeta ensayada a tracción luego de ser ensayada a fatiga a un esfuerzo de 570 MPa y ciclaje de 5.000.000. (30X) (b) Detalle de la zona, 200X y (c) detalle de la zona, 1000X. 74

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1. Composición química del acero AISI 4340 % en peso.</i>	6
<i>Tabla 1.2. Propiedades mecánicas del acero AISI 4340.</i>	7
<i>Tabla 1.3. Características del recubrimiento CrN.</i>	18
<i>Tabla 2.1. Composición química del acero AISI 4340 en % en peso.</i>	45
<i>Tabla 3.1. Resultados de los Ensayos de Límite de Fatiga al aire en un acero AISI 4340 con recubrimiento de CrN.</i>	58
<i>Tabla 3.2. Resultados Comparativos de las Probetas de Fatiga Ensayadas a Tracción.</i>	61

INTRODUCCIÓN

El hombre a lo largo de la historia se ha caracterizado por ir en la búsqueda del desarrollo y la evolución de las sociedades, lo cual ha estado vinculado con la capacidad de producir y conformar los materiales creando nuevas máquinas que simplifican las tareas del hombre moderno y ayudan a crear equipos adicionales más complejos que exigen materiales cada vez más resistentes y duraderos, a fin de satisfacer sus necesidades.

Este requerimiento ha impulsado a la ciencia y a la tecnología a investigar los materiales de los componentes de las maquinarias, sus propiedades y características. Mediante la investigación y estudio de estos materiales se han podido mejorar sus propiedades y como consecuencia de esto se han creado nuevos equipos más compactos, eficientes y resistentes, capaces de operar bajo condiciones adversas y ambientes severos, siendo el diseño de piezas o componentes mecánicos un área de vital importancia en el campo de la ingeniería mecánica

Con el propósito de mejorar este desempeño, en las últimas décadas, la tecnología de los recubrimientos ha ofrecido una respuesta apropiada a requerimientos necesarios en herramientas de corte con respecto a: aumento en la productividad de maquinado, reducción de mantenimiento e introducción en el mercado de nuevos materiales difíciles de cortar. La filosofía de los recubrimientos es aprovechar eficientemente el material base de fabricación de la pieza incorporando a la superficie una mayor resistencia al desgaste, menor cociente de fricción y una protección al sustrato contra el desgaste químico o la corrosión. Debido a esto, la ingeniería está en una constante búsqueda de nuevas tecnologías para mejorar dichas características. Una de estas es el proceso PAPVD (Deposición Física en Fase Vapor Asistida por Plasma) el cual ha empezado a ser un método típico para depositar recubrimientos tribológicos ya que recientemente se han introducidos las

modificaciones necesarias en este proceso para proveer beneficios tales como: buena adhesión, control de la estructura y depósito a bajas temperaturas.

Es ahora donde este desarrollo se presenta como una herramienta importante dentro del campo específico de la mecánica de materiales que hace relevante el estudio de las propiedades mecánicas derivadas de las nuevas características aportadas por la presencia del recubrimiento sobre el sustrato. Entre las ventajas que posee este proceso está la posibilidad de depositar compuestos de aleaciones, estructuras y composiciones multicapas y la capacidad de variar las características del recubrimiento continuamente a través de la película, dando el concepto de un recubrimiento graduado funcionalmente. Sin embargo, la mejora de las propiedades de la superficie por medio de recubrimientos a fin de aumentar el rendimiento de contra el desgaste y la corrosión podría deteriorarse significativamente las propiedades de fatiga del sustrato.

El objetivo de los ensayos de fatiga es obtener una aproximación racional de la vida de un material para luego extrapolar estas propiedades a lo que representa un elemento estructural, elementos de máquina, partes y piezas en general que están sometidas a cargas cíclicas.

Lo que ha motivado la realización de este Trabajo Especial de Grado es el interés de innovar y utilizar mejores materiales, sin que esto signifique un elevado costo en la producción de piezas y por consiguiente un aumento en los costos de producción.

El propósito fundamental que se persigue con la realización de este trabajo es estudiar el comportamiento a la fatiga al aire del acero SAE 4340 templado y revenido que cumplirá la función de sustrato, recubierto con una película de CrN (nitruro de cromo) el cual ha sido depositado a través de la técnica PAPVD (plasma-assisted physical vapor deposition), por la compañía Oerlikon Balzers.

Se realizará el ensayo de fatiga a las probetas bajo condiciones de sollicitación cíclica de aire, para determinar el límite de fatiga mediante la utilización del método de la escalera. Aunado a todo esto, se evaluará el daño acumulado en las probetas de fatiga que no fallen luego de 5 millones de ciclos, con el fin de verificar variación en las propiedades estáticas producto de dicho daño. Finalmente se llevará a cabo un estudio fractográfico con microscopía electrónica de barrido, el cual nos permitirá realizar un análisis más detallado de las zonas de fractura, la microestructura, formación de las grietas y comportamiento del recubrimiento.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Estudiar el comportamiento a la fatiga a temperatura ambiente de un acero estructural de tipo SAE 4340 templado y revenido, recubierto con una película de CrN (Nitruro de Cromo) obtenida por el proceso de deposición química en fase vapor asistido por plasma.

Objetivo Específicos:

- Investigar las técnicas de recubrimiento de metales
- Evaluar el comportamiento a la fatiga al aire a fin de determinar el límite de fatiga del conjunto substrato-recubrimiento.
- Realizar ensayos de tracción en algunas de las muestras que alcancen 5 millones de ciclos a fin de examinar sí el daño acumulado por fatiga genera cambios en las propiedades mecánicas estáticas del material.
- Evaluar la sección transversal de algunas de muestras con 5 millones de ciclos acumulados mediante técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB), en la búsqueda de grietas incipientes de fatiga que pudieran estar presente.
- Realizar un análisis fractográfico de la superficie de algunas de las muestras ensayadas y de algunas secciones transversales a estas, empleando métodos de microscopía electrónica de barrido, en la búsqueda de posibles grietas de fatiga que se hayan formado durante la etapa de aplicación de las cargas cíclicas.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 ACEROS

1.1.1 Introducción a los aceros

Los aceros son aleaciones hierro-carbono donde el carbono no supera el 2,1 % del peso de la composición de la aleación. Se caracteriza por su gran resistencia, contrariamente a lo que ocurre con el hierro. Un 92% de todo el acero que se produce es acero al carbono; el resto es acero aleado: aleaciones hierro con carbono y otros elementos tales como, níquel, cromo, molibdeno, vanadio, etc. La adición de estos elementos produce aceros considerablemente más resistentes mecánicamente. Porcentajes mayores al 2% de carbono dan lugar a las fundiciones, aleaciones relativamente frágiles y no forjables, a diferencia de los aceros.

El carbono es el elemento que tiene mayor efecto en las propiedades del acero. La dureza y resistencia aumentan a medida que el porcentaje de carbono se eleva, pero lamentablemente el acero resultante es más frágil y su soldabilidad disminuye considerablemente. Una menor cantidad de carbono hace al acero más suave y dúctil, pero también menos resistente mecánicamente. ^[1]

1.1.2 Acero AISI 4340

El acero AISI 4340 es de media aleación. Estos aceros son aleaciones hierro-carbono con adiciones de Cr, Ni y Mo en cantidades totales menores al 5% en peso. El propósito de estos elementos aleantes adicionales es mejorar las propiedades mecánicas para ciertas aplicaciones específicas que se comparan con otros aceros no aleados. Estas propiedades que por lo general son mejoradas comprenden la resistencia, dureza en frío y en caliente, resistencia al desgaste, tenacidad, y

combinaciones más deseables de estas propiedades. La aleación 4340 es utilizada para fabricar componentes estructurales de alta resistencia mecánica. Esta propiedad dependerá directamente del tratamiento térmico aplicado, requerido de acuerdo a la utilidad de la pieza o componente y sus condiciones de servicio.

1.1.3 Componentes, aleación

Según el sistema de designación determinado por la American Iron and Steel Institute (AISI) y luego tomado por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), respectivamente los aceros se clasifican con cuatro dígitos XXXX, el primero especifica la aleación principal, el segundo la aleación secundaria y los dos últimos dígitos proporcionan el contenido medio de carbono en porcentaje en peso (%) ^[2]. La serie AISI 4XXX son aceros que están medianamente aleados, específicamente la serie AISI 43XX tiene en su constitución dentro de sus elementos aleantes el níquel, cromo y molibdeno, siendo el níquel el de mayor porcentaje. Cada uno de estos aleantes le otorga mejoras en distintas propiedades como por ejemplo, una de las mayores ventajas que reporta el empleo del níquel, es evitar el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir en ellos gran tenacidad.

En la tabla 1.1, se muestra la composición química del acero AISI 4340, en porcentaje en peso, teniendo en cuenta que los porcentajes de los elementos, Fósforo (P), Silicio (S) y Cobre (Cu), se encuentran presentes como impurezas del acero. ^[3]

Tabla 1.1. Composición química del acero AISI 4340 % en peso.

COMPOSICIÓN QUÍMICA ACERO AISI 4340 % EN PESO								
C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	P	S	Cu
0.38-0.43	0.7-0.9	1.65-2.0	0.6-0.8	0.2-0.3	0.15-0.35	0.009	0.002	0.093

El acero AISI 4340 combina la capacidad de resistencia a la penetración, con alta ductilidad, tenacidad y resistencia. Como posee alta resistencia a la fatiga, es

comúnmente empleado en condiciones severas de servicio y donde se requieren secciones de alta resistencia mecánica.

Tabla 1.2. Propiedades mecánicas del acero AISI 4340.

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 4340					
Estado de Suministros	Resistencia a la tracción [Kg/mm ²]	Límite Elástico [Kg/mm ²]	Porcentaje Alargamiento [%]	Reducción de Área [%]	Dureza Brinell [HB]
Laminado	65/75	45	20	50	210/240
Calibrado	75/85	65	10	30	240/260
Temple y revenido	90/110	80	16	45	260/320

En la tabla 1.2 se observan las propiedades mecánicas del acero AISI 4340, dependiendo del estado de suministro; en ella encontramos la resistencia a la tracción, límite elástico, porcentaje de alargamiento, porcentaje de reducción de área y la dureza Brinell característica de cada estado.

1.1.4 Influencia de los elementos de aleación

Los elementos aleantes más importantes presentes en el acero AISI 4340 son Níquel, Cromo y Molibdeno, los cuales forman soluciones sólidas con el hierro y en el caso del Cr, carburos.

Se puede resumir algunos de los efectos de los principales elementos aleantes del AISI 4340 como se describe a continuación:

- Níquel (Ni): Mejora la resistencia y tenacidad, incrementa la templeabilidad. En cantidades significativas mejora la resistencia a la corrosión.
- Cromo (Cr): Mejora la resistencia, dureza en frío y en caliente, así como la resistencia al desgaste. Tiene gran importancia en el incremento de la

templabilidad. También mejora significativamente la resistencia a la corrosión.

- Molibdeno (Mo): Aumenta la tenacidad, dureza en caliente y resistencia a la termofluencia. También mejora la templabilidad y junto al carbono forma carburos que proporcionan mayor resistencia al desgaste.

1.1.4 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos permiten modificar las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones, tales como dureza, resistencia y tenacidad, sin que se produzcan cambios en la composición química promedio del material. Asimismo, tanto el tiempo como la temperatura son las variables principales a controlar, en función de las condiciones finales requeridas.

Un acero se considera en estado de “bonificado” cuando ha sido sometido a un tratamiento térmico de temple y revenido. De acuerdo a lo establecido por Mangonon ^[4], dichos procesos pueden ser descritos como endurecedores bajo las siguientes características:

El temple es un tratamiento térmico que se realiza a las piezas ya conformadas por mecanizado para aumentar su dureza, resistencia mecánica y tenacidad. El proceso se lleva a cabo calentando el acero a una temperatura superior a la temperatura de austenización (entre 800° y 925°C) en el cual la ferrita se transforma en austenita; después, la pieza es enfriada rápidamente, sumergiéndola en agua, aceite u otros fluidos o sales fundidas, obteniéndose una estructura martensítica, que produce una elevada resistencia y dureza. La transformación martensítica depende de la cantidad de carbono existente; sin embargo la presencia de elementos aleantes permite un temple mucho menos drástico e induce menos esfuerzos residuales y distorsión durante el enfriamiento. El temple es uno de los principales tratamientos

térmicos que se realiza y conlleva a disminución y afino del tamaño del grano del acero.

Las características generales del temple son las siguientes:

- Hace al acero más duro y resistente, pero más frágil
- La temperatura de calentamiento puede variar de acuerdo a las características de la pieza y resistencia que se desea obtener.
- El enfriamiento es relativamente rápido.
- Si el temple es muy brusco las piezas se pueden agrietar.

El revenido se aplica luego del temple a fin de otorgarle al material mayor ductilidad, ya que la estructura alcanzada con el temple suele ser muy frágil. El tratamiento consiste en realizar un calentamiento durante cierto tiempo a una temperatura inferior a la temperatura crítica y luego se deja enfriar al aire. Las temperaturas a las cuales se recalienta y el tiempo de duración del proceso dependen de la composición del acero así como también del grado de dureza y tenacidad que se requieren. En el proceso se liberan tensiones residuales dentro de la pieza originadas por el temple o por deformación en frío. Usualmente la presencia del molibdeno como elemento aleante induce un endurecimiento secundario en la pieza que aumenta su dureza final.

1.1.4 Aplicaciones

El acero en sus distintas clases está presente de forma abrumadora en nuestra vida cotidiana en forma de herramientas, utensilios, equipos mecánicos, electrodomésticos y maquinaria en general, así como en las estructuras de las viviendas que habitamos y en la gran mayoría de los edificios modernos. Entre los campos de la ingeniería, los mayores consumidores de acero que podemos citar son: fabricantes de medios de transporte automotriz y maquinaria agrícola, transporte

ferroviario, construcción de diversos tipos de infraestructura, fabricación de material rodante, industria de armamento, vehículos blindados y acorazados, industria naval, etc.

Específicamente, el Acero AISI 4340 constituye un material muy importante en ingeniería ya que es de alta resistencia a la tracción y la torsión y de muy buena resistencia al desgaste y al impacto. Se utiliza para partes y en general elementos de máquina sometidos a altos esfuerzos dinámicos, tales como cigüeñales, ejes de leva, árboles de transmisión, barras de torsión, ejes cardán, discos de freno, bielas para motores, tuercas de alta tensión, piñones, ruedas dentadas, moldes para inyección de plásticos, etc. Debido a su composición química tiene un gran rendimiento en piezas sometidas a ciclos de trabajo.

1.2. TÉCNICAS DE DEPOSICIÓN. GENERALIDADES

Las técnicas de modificación superficial, permiten adaptar las propiedades superficiales de los materiales tratados en función de las condiciones de servicio, siendo en muchos casos difícil de obtener por los métodos convencionales. Específicamente, los procesos de deposición pueden ser divididos en cuatro categorías, dependiendo del estado en que este se realiza: gaseoso, en solución, fundido o semifundido y sólido.

Los procesos de estado gaseoso cubren técnicas de ingeniería de superficies en las cuales el recubrimiento o el material empleado para el tratamiento pasa a través de una fase gaseosa o fase vapor antes de ser depositado sobre la superficie a modificar. Los principales subgrupos genéricos de estos procesos de recubrimiento son la deposición química en fase vapor (“Chemical Vapor Deposition” o CVD) y la deposición física en fase vapor (“Physical Vapor Deposition” o PVD).

En el proceso CVD se utilizan gases reactivos como fuente de especies para el recubrimiento, mientras que en el proceso PVD las especies para formar el

recubrimiento son evaporadas o atomizadas desde un sólido (blanco o “target”) dentro de la cámara. Estos métodos son de considerable interés por varias razones, entre la que destaca el hecho que permiten el depósito de películas cerámicas de alta pureza. ^[5]

1.2.1. Deposición física en fase de vapor

La deposición física en fase vapor (PVD) involucra la atomización o vaporización de un material desde una fuente sólida y el depósito de ese material sobre un sustrato para formar el recubrimiento. La técnica PVD se usa en la aplicación de una alta variedad de recubrimientos orgánicos e inorgánicos sobre sustratos que pueden ser metales, vidrios, cerámicos, plásticos, etc.

Los recubrimientos depositados por PVD conducen a un crecimiento lento pero muy bien controlado de los materiales que constituyen la película depositada sobre el sustrato. En algunas situaciones el PVD requiere de algún medio para aumentar la energía de las especies del recubrimiento. Esta energía típicamente se incrementa ionizando y acelerando los iones hacia la película en crecimiento, lo cual se puede lograr utilizando una fuente de haz de iones o excitando un plasma alrededor del sustrato. ^[5]

En los procesos de PVD, dado que el transporte de las especies de recubrimiento se realiza por medios físicos, es necesario emplear una cámara de alto vacío para que haya un camino libre por el cual los átomos y moléculas superen la distancia entre el material de recubrimiento que se encuentra en el *blanco* (fuente del recubrimiento) y el sustrato.

Entre las diferentes técnicas PVD se encuentran la evaporación en vacío y el espurreo (“sputtering”). Con la posibilidad del manejo del plasma se suma a estas una nueva técnica llamada plateado iónico (“ion plating”), además de los procesos de

evaporación o espurreo reactivos que permiten realizar deposición de nuevos materiales. ^[6]

1.2.3. Procesamiento por Plasma

En general, se dice que existe un cuarto estado de la materia que es llamado plasma. Si se considera un gas formado por átomos y moléculas neutras al que se le proporciona suficiente energía, los átomos comienzan a ionizarse y aparecen en el gas partículas cargadas eléctricamente. Cuando el número de partículas cargadas es lo suficientemente grande como para que el comportamiento dinámico del sistema esté determinado por fuerzas electromagnéticas de largo alcance y no por colisiones entre las partículas neutras, como ocurriría en el caso de los gases ideales, entonces se dice que el gas se ha transformado en un plasma. ^[6]

Se puede definir como plasma una clase particular de gas ionizado, que está constituido prácticamente por igual cantidad de partículas con cargas positivas y negativas que presentan un comportamiento colectivo, lo cual se entiende como la capacidad de las cargas libres de distribuirse espacialmente en caso de producirse una perturbación electrostática en el gas, de modo de aislar al plasma de dicha perturbación y preservar su condición de gas neutro.

Se denomina procesamiento por plasma a un conjunto de técnicas que utilizan a este último para la modificación superficial o volumétrica de los materiales. En el caso de procesos superficiales, los mismos incluyen tanto la deposición de un recubrimiento delgado sobre un sustrato de un material diferente, como la modificación de las capas superficiales de un material, alterando su morfología, estructura o composición química ^[6]. Asimismo, es posible mejorar la resistencia al desgaste y/o corrosión de un material dado, su compatibilidad físico-química con determinados medios y su apariencia estética.

En ambos casos, el objetivo de la modificación es adaptar de la manera más efectiva posible las propiedades superficiales del material tratado, a los requerimientos durante el servicio.

1.2.3. Ventajas del procesamiento de materiales por plasma

Las principales ventajas de las técnicas de procesamiento de materiales por plasma son:

- Posibilidad de obtener recubrimientos con composición química y estructura controlada (morfología, estequiometría, tensiones residuales, dureza, etc.) como resultado del control de las condiciones de deposición durante el proceso.
- Posibilidad de obtener recubrimientos de adherencia superior, como resultado de procesos de limpieza por bombardeo iónico antes y durante la deposición; alto grado de reproducibilidad y control de los parámetros del proceso y de las propiedades del recubrimiento.
- Posibilidad de utilizar temperaturas menores para los procesos de deposición, comparadas con otros métodos convencionales.
- Menores tiempos necesarios para el procesamiento de endurecimiento superficial asistido por plasma.
- Posibilidad de depositar una amplia variedad de materiales inorgánicos tales como metales, aleaciones y compuestos, así como materiales orgánicos.

1.2.4. Técnicas de procesamiento por plasma

Se puede establecer una división entre las técnicas de procesamiento por plasma en base al tipo de plasma utilizado. Por una parte, se tienen los plasmas de

alta presión o *plasmas térmicos*, en los cuales las especies presentes (electrones libres, iones positivos, átomos y moléculas neutras) se encuentran a la misma temperatura. Por otra parte, también se tienen los plasmas de baja presión o *plasmas fuera de equilibrio o de baja densidad*, en los cuales los electrones libres no están en equilibrio térmico con las especies pesadas. Todos los procesos de deposición en vacío utilizan este último tipo de plasma. ^[7]

Al referirnos a los plasmas de baja densidad, nuevamente se puede establecer otra clasificación dependiendo del tipo de técnica de deposición a utilizar, bien sea PVD o CVD, siendo la diferencia más relevante la forma de introducción de las distintas especies de la mezcla gaseosa en el reactor de plasma. Si alguna de estas especies se produce por evaporación a partir de un material sólido ubicado dentro del reactor, o bien como resultado del bombardeo del mismo con iones positivos (espurreo), se habla de técnicas PAPVD. ^[1]

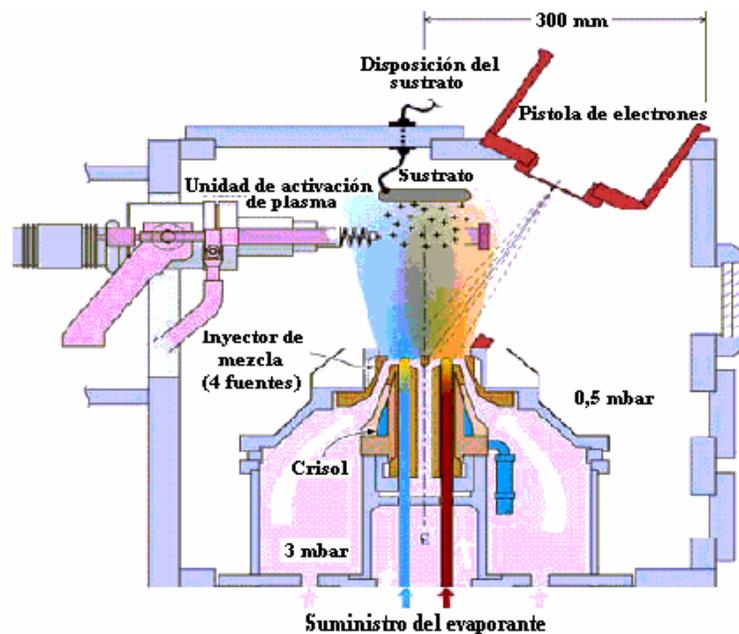


Figura N° 1.1, Procesamiento por técnica PAPVD. ^[8]

Para el caso de PACVD las especies se introducen como gases puros o como vapores de compuestos moleculares que contienen especies propias del recubrimiento a ser producido.

1.2.5. Deposición Física en Fase Vapor Asistida por Plasma

En algunos casos, el PVD requiere de algún medio para aumentar la energía de las especies del recubrimiento. Si el plasma actúa como el agente que aporta la energía necesaria para transportar las especies del recubrimiento y asiste en la deposición del mismo sobre el sustrato, el proceso se conoce como deposición física en fase vapor asistida por plasma (PAPVD). En esta técnica las especies se producen como consecuencia de la evaporación del material sólido que se encuentra dentro del reactor de plasma o por espurreo.

Las técnicas PVD asistidas por plasma han reemplazado en gran parte las técnicas convencionales de recubrimiento y modificación superficial ya que han significado un aumento importante en la eficiencia de las técnicas tradicionales. Esto se debe fundamentalmente a la condición de cuasi equilibrio del plasma, lo que ha permitido generar especies reactivas a temperaturas relativamente bajas y aumentar la velocidad de deposición, debido a la presencia de iones que pueden ser acelerados eléctricamente hacia el sustrato. Se prevé que su campo de aplicación industrial crecerá y se diversificará significativamente en el futuro.

1.3. TECNOLOGÍA DE RECUBRIMIENTOS

Se entiende por recubrimientos duros aquellas películas delgadas cuya dureza es mayor que aproximadamente 15-20 GPa, con las que se recubren las superficies de muchas piezas de uso técnico con la finalidad de proporcionarles mayor resistencia al desgaste y abrasión. Los materiales que constituyen los recubrimientos duros pueden

ser fundamentalmente de composición metálica o mejor cerámica, entendiendo aquí por composición cerámica las distintas fases de óxidos, nitruros o carburos de metales de transición y también aluminio, boro y silicio. Todos estos compuestos presentan en mayor o menor medida, durezas elevadas combinadas con estabilidad térmica, química y resistencia a la corrosión. ^[5]

Los recubrimientos duros han sido utilizados comercialmente para incrementar la vida útil de algunos elementos industriales, como por ejemplo, las herramientas de corte, piñones, rodamientos y componentes de maquinaria industrial; con el fin de realizar mejoras de las propiedades mecánicas y tribológicas de la superficie, tales como resistencia al desgaste y a la corrosión, mejoras de la lubricación, reducción del coeficiente y mejoramiento de la textura, brillo y estética de la superficie.

La posibilidad de combinar sustratos de alta dureza y recubrimientos duros ha ido creando más y más interés en la optimización de las propiedades de las películas duras delgadas utilizadas en ambientes severos donde altas tensiones estáticas o dinámicas aplicadas están presentes. ^[9]

Específicamente en el campo de la industria del utillaje y herramientas de corte, recubrimientos del tipo CrN, CrAlN, TiN, TiAlN o TiCN entre otros, han demostrado su utilidad, aumentándose de manera apreciable la vida media de estos útiles. ^[10]

1.3.1. Nitruro de Cromo. CrN

Es un recubrimiento de película delgada, de relativa alta dureza e inerte, de poca rugosidad, que posee una elevada resistencia al desgaste, una buena resistencia a la corrosión, así como un buen comportamiento deslizante en condiciones de falta de lubricación, que se aplica principalmente a las piezas metálicas de precisión. Estas características hacen del nitruro de cromo, un sustituto popular de los recubrimientos

galvanoplásticos de cromo y níquel. En comparación con el cromo duro, el CrN, muestra una resistencia a la corrosión similar pero tiene una dureza mayor y una mejor adhesión del recubrimiento. ^[11]

Si bien el nitruro de titanio (TiN) sigue siendo el revestimiento de PVD más utilizado en aplicaciones industriales, el nitruro de cromo (CrN) está ganando popularidad. Esto se debe al hecho de que el CrN tiene mejores propiedades antioxidantes y anticorrosivas que el TiN ^[9]. Por otra parte, entre los materiales utilizados como recubrimientos antidesgaste en capa fina, el CrN presenta un buen comportamiento mecánico trabajando a altas temperaturas, buena adhesión y puede ser depositado a baja temperatura, superando en muchos aspectos a los recubrimientos convencionales de TiN. ^[12]

Además, la posibilidad de sustituir los recubrimientos electrolíticos de cromo duro con depósitos PVD de CrN, menos perjudiciales para el medio ambiente y con elevados esfuerzos residuales compresivos, pueden considerarse ventajas adicionales en términos comportamiento mecánico de capas delgadas. ^[9]

De hecho, los esfuerzos residuales compresivos mejoran en gran medida la resistencia a la fatiga. Sin embargo, la reducción de la adhesión del recubrimiento al sustrato metálico, a veces se relaciona a este tipo de estado de estado residual. En general, los defectos, como poros y agujeros, típicos de los procesos de deposición PVD, también deben tenerse en cuenta porque afectan significativamente el comportamiento de estos recubrimientos, no sólo desde el punto de vista de la protección en ambientes químicamente agresivos sino también en términos de zonas de esfuerzos localizados que favorecen la nucleación de grietas ^[9]. La tabla 1.3 presenta las principales características del recubrimiento:

Tabla 1.3. Características del recubrimiento CrN. ^[11]

Propiedades del recubrimiento	
Material de recubrimiento	CrN
Dureza* (HV 0.05)	1.750
Coefficiente de fricción* contra acero (seco)	0,5
Temperatura máxima de servicio (°C)	700
Esfuerzos residuales	-5,5 GPa
Color del recubrimiento	gris plata

Los recubrimientos PVD basados en CrN se caracterizan principalmente por su alta dureza y resistencia a la oxidación así como un buen comportamiento frente al desgaste. Estas propiedades le han convertido, en los últimos años, en un material usualmente empleado para matrices de conformado en la industria del automóvil y de embutición de acero inoxidable, moldes de inyección de termoplásticos especialmente en baquelita y resinas de naturaleza similar, machos de roscar de aleaciones no férricas, herramientas para troquelar, componentes de titanio en deportes de motor y la industria aeronáutica, componentes de maquinaria textil, etc. ^[10]. También es una solución para aplicaciones médicas, además de ser bio-compatible y apto para el uso en la industria alimenticia.

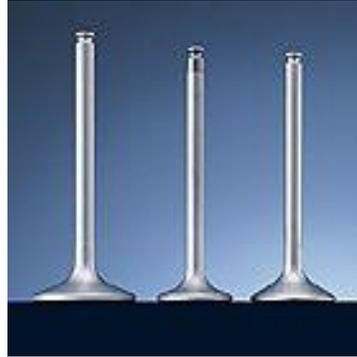


Figura N° 1.2, Recubrimiento BALINIT® CNI basada en CrN^[11]

1.4.FATIGA

1.4.1. Definición de fatiga. Fatiga de metales

La falla de los materiales de ingeniería es casi siempre un hecho indeseable por varias razones, las que incluyen, seguridad de vidas humanas, pérdidas económicas y la interferencia con la disponibilidad de productos y servicios. Aún cuando las causas de la falla y el comportamiento de materiales pueden ser conocidos, la prevención de dicho fenómeno puede ser difícil de garantizar. Las causas usuales de ello son la selección de materiales, procesado y diseño inadecuados de los componentes o su mal manejo. Es responsabilidad del ingeniero anticipar y planificar las posibles fallas y, en el caso de que ocurran, determinar sus causas y tomar medidas preventivas apropiadas para futuros incidentes.

Muchos componentes y estructuras, en servicio están sometidos a cargas variables y si bien los esfuerzos promedios son a menudo bajos, las concentraciones locales de tensiones, que no reducen mucho la resistencia estática, pueden a veces producir el fallo por fatiga, la cual se estima que comprende aproximadamente un 90 % de todas las fallas de componentes metálicos, siendo de tipo catastrófica y ocurriendo rápidamente sin aviso. ^[13]

La fatiga se define como un cambio estructural progresivo, localizado y permanente que ocurre en un material sometido a cargas repetidas o fluctuantes que tienen valores máximos menores que el esfuerzo de fluencia del material, que pueden culminar en la formación de grietas o en la fractura total tras un número suficiente de ciclos.

Las fracturas por fatiga son causadas por la acción simultánea de esfuerzos cíclicos, esfuerzos de tracción y deformación plástica; si alguno de estos tres elementos no está presente, el agrietamiento por fatiga no se iniciará y propagará. Existen otro tipo de variables que afectan la vida de la fatiga como las concentraciones de esfuerzo, temperatura, corrosión, microestructura, tensiones residuales y tensiones combinadas. ^[14]

Las fallas por fatiga comienzan con una pequeña grieta, causada por los esfuerzos cíclicos, que crece a partir de alguna discontinuidad y se propaga en cada fluctuación debida a esfuerzos de tracción, hasta que la sección remanente es muy pequeña para soportar la carga y se produce la fractura por sobrecarga. Este tipo de fallas son muy peligrosas ya que no se observa ningún indicio como en las fallas producidas por cargas estáticas en las cuales se observa deformación plástica de la pieza.

Por otra parte, el daño por fatiga se puede asociar con los cambios que se producen en el material como consecuencia de la aplicación de cargas cíclicas, que a su vez, se traducen en cambios en la longitud de la grieta, endurecimiento o ablandamiento del material por deformación cíclica y generación de tensiones residuales. Por tanto, la acumulación del daño supone la suma de aquellos provocados en cada ciclo y se manifiesta en la propagación de la grieta ^[15]. Principalmente la fatiga produce tres efectos: pérdida de resistencia, pérdida de ductilidad y aumento de la incertidumbre en cuanto a la resistencia y a la vida útil del material.

La característica más notable de los fallos por fatiga es la falta de deformación en la región de las fracturas, siendo semejante en naturaleza a la fractura frágil, incluso en materiales como el acero suave, que son bastante dúctiles cuando se rompen por una carga estática. Este es uno de los peligros de la fatiga, que no hay ningún indicio de un fallo inminente. Las grietas producidas por fatiga son generalmente finas y dificultan su detección y una vez que se han desarrollado a tamaño macroscópico pueden difundirse y causar la fractura completa en un tiempo corto.

Es común encontrar que las grietas de fatiga se originan en alguna discontinuidad superficial. Esto es debido a que cualquier cambio en la sección, como un agujero, un cambio en el diámetro de un eje, una ranura, chavetero, o incluso una muesca de una herramienta produce una concentración de tensiones. La resistencia estática está muy poco afectada por tales cambios de sección, ya que las concentraciones de tensiones se liberan por deformación plástica. Sin embargo, bajo carga de fatiga, hay mucha menos deformación plástica; en consecuencia, el valor del esfuerzo permanece considerablemente más alto en las concentraciones de tensiones que en el material que le circunda, dando por resultado una resistencia a la fatiga reducida. ^[16]

1.4.2. Tipos de esfuerzos de fatiga

Como se mencionó anteriormente, para que ocurra el fenómeno de fatiga los sistemas deben estar solicitados por fuerzas que varíen en el tiempo. Los materiales de manera general pueden estar sometidos a sistemas de cargas complejas; estos pueden generar esfuerzos de naturaleza axial (tensión compresión), flexión o torsión.

A menudo, los esfuerzos fluctuantes sobre la maquinaria adoptan la forma de un patrón sinusoidal debido a la naturaleza de algunas máquinas rotatorias. Sin embargo, también ocurren otro tipo de patrones, algunos muy irregulares.

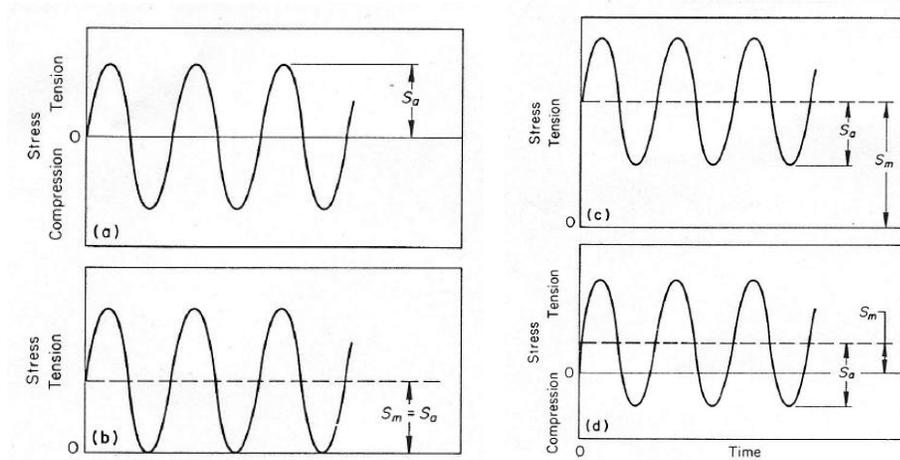


Figura N° 1.3, Tipos de Esfuerzos de Fatiga. ^[14]

Existen ciertas diferencias entre estos esfuerzos, los cuales se pueden representar en la figura 1.3, en la misma se describen los esfuerzos aplicados como $S_m + S_a$, donde S_m es el esfuerzo medio y S_a es el valor del esfuerzo alternante, pudiéndose observar que de acuerdo a la forma en la cual se aplique la carga, sí esta última produce esfuerzos alternantes pasando por un valor nulo de esfuerzo medio, entonces se obtiene la gráfica en la cual se ven reflejados solamente los esfuerzos alternantes de magnitud similar pero de signo contrario (Fig. 1.3.a). Cuando S_m es igual a S_a , el esfuerzo mínimo del ciclo es cero y se denomina esfuerzo de tracción (o compresión) repetido o pulsante (Fig. 1.3.b). Cualquier otra combinación se conoce como esfuerzo fluctuante que puede ser de tracción, compresión (Fig. 1.3.c), o puede fluctuar entre un valor de tracción a uno de compresión (Fig. 1.3.d). Las condiciones de los esfuerzos pueden definirse, alternativamente, en términos de los esfuerzos máximos y mínimos en el ciclo, $S_{m\acute{a}x}$ y $S_{m\acute{m}n}$. La relación de esfuerzos puede definirse como:

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} \quad (\text{Ec.1.1})$$

Donde:

S_{\min} : Es el esfuerzo mínimo.

S_{\max} : Es el esfuerzo máximo.

Nomenclatura de esfuerzos cíclicos o alternantes presentes en la fatiga:

$$\text{Esfuerzo alternante:} \quad Sa = \frac{\Delta S}{2} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

$$\text{Esfuerzo medio:} \quad Sm = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

$$\text{Esfuerzo máximo:} \quad S_{\max} = Sm + Sa \quad (\text{Ec. 1.4})$$

$$\text{Esfuerzo mínimo:} \quad S_{\min} = Sm - Sa \quad (\text{Ec.1.5})$$

$$\text{Intervalos de esfuerzos:} \quad \Delta S: (S_{\max} - S_{\min}) \quad (\text{Ec.1.6})$$

Cuando las condiciones de carga son tales que los esfuerzos en la probeta no están uniformemente distribuidos, los resultados se presentan, usualmente, en términos del esfuerzo nominal S , que es la sollicitación calculada por la teoría, sin tener en cuenta sus variaciones en las condiciones producidas por las discontinuidades geométricas tales como agujeros, muesca y roscas.

1.4.3. Etapas del proceso de fatiga

La superficie de fractura que resulta de una falla por fatiga tiene una apariencia característica que puede ser dividida en tres zonas o etapas progresivas bien definidas desde el punto de vista morfológico.

Etapa I: Es la iniciación de la grieta y su propagación por el plano de deslizamiento de la fractura, extendiéndose desde la superficie hacia el centro aproximadamente a 45° de la dirección del esfuerzo axial; en esta etapa la fractura nunca se extiende por más de 2 o 5 granos de alrededor del origen. En cada grano, la superficie de fractura está a lo largo de un plano cristalográfico bien definido. Usualmente no existen estriaciones de fatiga asociadas con la superficie de fractura en esta etapa. En algunos casos, dependiendo del material, el ambiente y el nivel de esfuerzo, la fractura de la etapa I puede que no sea perceptible.

Etapa II: El crecimiento de la grieta no está gobernado por el esfuerzo cizallante local sino por el esfuerzo normal máximo principal en la vecindad de la punta de la grieta. Así, la punta de la grieta está obligada a desviarse desde su camino de deslizamiento y propagarse en una dirección perpendicular a la dirección del máximo esfuerzo normal.

Etapa III: Ocurre durante el último ciclo de esfuerzo cuando la sección transversal no puede soportar la carga aplicada. La fractura final, la cual es el resultado de una sobre carga, puede ser frágil, dúctil, o una combinación de ambas.

[16]

1.4.4. Curva S-N

Comúnmente las propiedades de fatiga son medidas bajo condiciones controladas en laboratorios bajo ensayos de flexión rotativa, donde el esfuerzo medio S_m es nulo y la

relación de fatiga $R = -1$. Es así donde se empiezan a niveles altos de esfuerzo pero siempre por debajo del límite de fluencia del material, usualmente dos tercios de este y se contabiliza el número de ciclos (N) que resiste la probeta bajo el nivel de carga establecido, utilizando un determinado lote de muestras para un mismo nivel, del cual el valor final de ciclos se contabiliza mediante el uso de distribuciones estadísticas. Este procedimiento se repite en otras probetas disminuyendo progresivamente la amplitud de las tensiones máximas. El equipo de ensayo debería ser diseñado para duplicar tanto como sea posible, las condiciones de servicio (nivel de tensiones, frecuencia de aplicación de carga, patrón de tensiones, etc.). Contándose el número de ciclos a la rotura.

Los datos obtenidos son representados en escala logarítmica o semi-logarítmica, formando el gráfico conocido como **Curva S-N** o **Curva de Wöhler**. En la abscisa se representa el número de ciclos (N), mientras que en la ordenada se representa el esfuerzo (S_f), y es un valor que siempre debe reportarse junto con el correspondiente número de ciclos.

Los dos tipos de comportamiento observados en la relación $S - N$, son representados en la Figura 1.4.

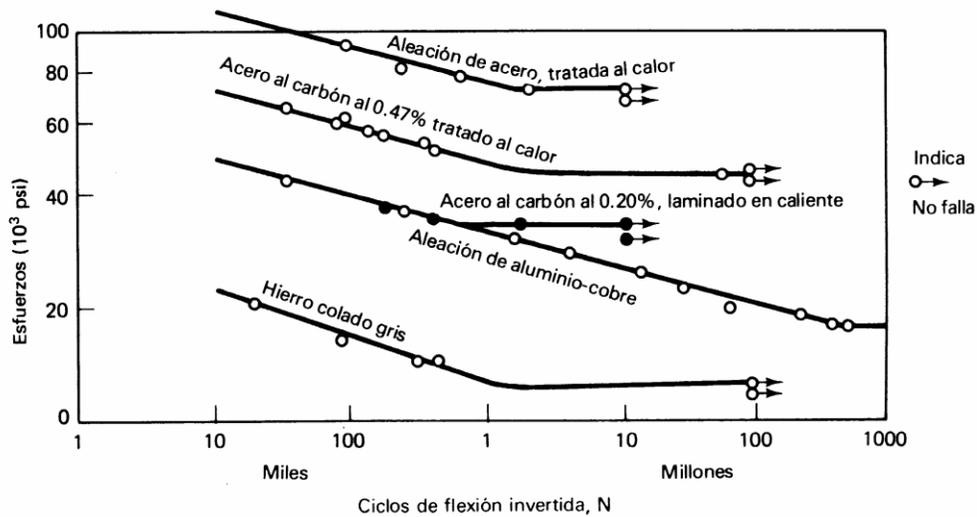


Figura N° 1.4, Comportamiento S–N de algunos materiales tecnológicos (gráfica Log-Log).
[14]

En este gráfico se indican las magnitudes de tensiones más altas y el menor número de ciclos que el material es capaz de soportar antes de su fractura. Para algunas aleaciones ferrosas y de titanio, las curvas de Wöhler mostrada en la figura 1.4 se hacen horizontales para altos valores de N, o hay un límite de nivel de tensiones, llamado límite de fatiga (S_e), debajo del cual la fractura por fatiga no ocurre. Este límite de fatiga representa el mayor valor de tensiones fluctuantes que no causará fractura para un número teóricamente infinito de ciclos.

Otro aspecto importante de la curva S-N, tal como se observa en la figura 1.5, es que la misma puede separarse en distintas secciones: a) en alto y bajo ciclaje y b) en vida finita e infinita. Se suele hablar de ciclaje bajo entre 1 y 10^3 ciclos, y está asociado con cargas relativamente altas que producen no sólo deformación elástica sino también deformación plástica durante cada ciclo; consecuentemente, la vida a la fatiga es relativamente corta; luego de los 10^3 ciclos se considera alto ciclaje, en el que para niveles de tensiones menores en las cuales sólo hay deformación totalmente elásticas, se obtienen vidas más prolongadas.

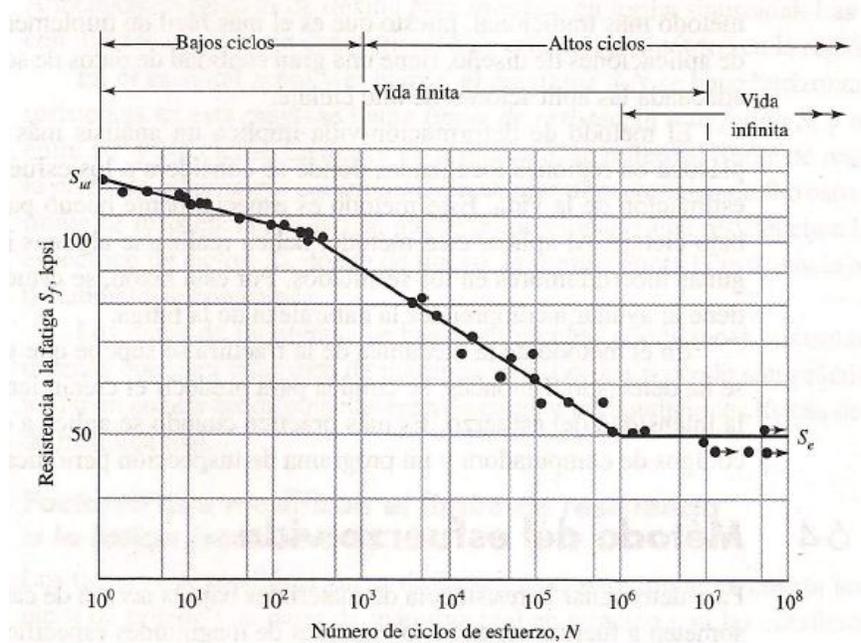


Figura N° 1.5, Diagrama S-N. ^[17]

Se observa que para el caso general de los aceros, se presenta un cambio brusco en la dirección de la gráfica en la zona de cambio entre vida finita y vida infinita (establecida entre 10^6 y 10^7 ciclos), luego del cual no se observa daño apreciable; sí se aplica un esfuerzo menor se puede esperar una vida muy larga o infinita para la pieza en servicio. ^[18]

La curva S-N muestra la percepción natural de la fatiga en términos de resultados experimentales, pero, en cambio, no proporciona indicaciones sobre disminución de la rigidez, mecanismos de daño, presencia de grietas o cambio en las características de los materiales debido al proceso de degradación por fatiga. ^[19]

1.4.5. Resistencia y Límite de fatiga

La ASTM define la resistencia a la fatiga como el valor del esfuerzo bajo el cual no ocurre falla luego de N ciclos. Por otro lado se define que la vida a la fatiga es

el número de ciclos que puede alcanzar la muestra para un nivel de esfuerzo dado sin que esta falle. ^[20]

La resistencia a la fatiga se ve muy afectada en gran parte por las siguientes variables:

- Concentraciones de esfuerzo, debido a los radios de filetes en posibles muescas o melladuras.
- Rugosidad superficial, lo cual indica que los resultados dependen del tipo de maquinado utilizado.
- Esfuerzo residual en la superficie.
- Condiciones ambientales, tales como la corrosión.

El procedimiento para determinar dicha resistencia es ensayar un número de probetas similares, sometiendo cada una a un valor particular de carga fluctuante o alternante hasta su fractura; de esta forma, se obtienen valores de carga o esfuerzo fluctuante S y número de ciclos para la fractura N . A partir de esto datos se construye el diagrama S - N realizando el mejor ajuste de los puntos experimentales, que graficados en papel log-log se representa con una línea inclinada en la cual las probetas se rompen y otra horizontal, por debajo de la cual las probetas no fracturan. Ver Figura 1.6. (a).

Igualmente, de esta curva se puede obtener el valor del *límite de fatiga* que corresponde al valor del esfuerzo por debajo del cual la rotura por fatiga no ocurrirá, en número infinito de ciclos (en la práctica típicamente se consideran 10 millones de ciclos como vida infinita), que generalmente está comprendido entre el 35 y 60 % de la resistencia a la tracción. Muchas de las aleaciones no ferrosas (por ejemplo aluminio, cobre, magnesio) no presentan un límite de fatiga bien definido, es decir que se observa que la curva S - N continua decreciendo al aumentar N . Por consiguiente, la rotura por fatiga ocurrirá independientemente de la magnitud de la tensión máxima aplicada; como se observa Figura 1.6. (b). ^[21]

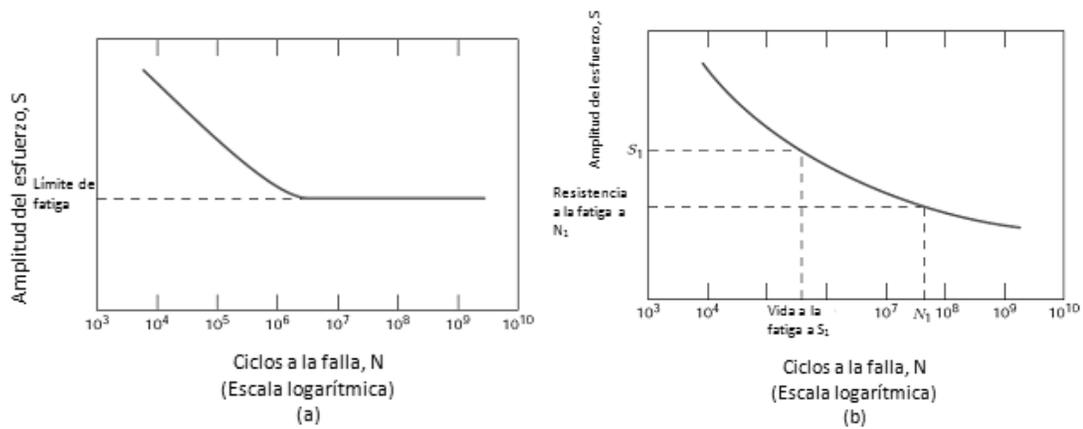


Figura N° 1.61.4.5. Curvas S-N. ^[21]

Vida a Fatiga:

Es un parámetro que indica el número de ciclos (N_f) necesarios para ocasionar la falla de un material sometido a esfuerzo. Se puede dividir en tres etapas las cuales son la iniciación de grietas (N_i), la propagación de grietas (N_p) y la fractura súbita. La vida en condiciones de fatiga se puede establecer entonces en términos de la cantidad de ciclos, tal como:

$$N_f = N_i + N_p \quad (\text{Ec. 1.7})$$

En donde:

N_i : Cantidad de ciclos que se requieren para iniciar una grieta discernible, lo que está influido principalmente por el nivel de esfuerzos, concentradores de esfuerzos, partículas de segunda fase, imperfecciones cristalinas y condiciones del medio ambiente.

N_p : Cantidad de ciclos que se requieren para propagar o hacer crecer la grieta en forma estable hasta un tamaño crítico, después del cual se presenta la fractura súbita;

Dicho número es afectado principalmente por el nivel de esfuerzos, orientación microestructural y medio ambiente.

1.4.6. Modelos que describen la curva S-N

Algunos autores ^{[22][23]} se han encargado de describir y evaluar distintos modelos propuestos en la literatura para representar la curva S-N, donde se señala que el uso más común es el correspondiente a la relación de Basquin, mostrada en la ecuación 1.8, en el que se modela la curva mediante una hipérbola y donde A es el coeficiente de resistencia a la fatiga y b es el llamado exponente de Basquin, el cual toma valores en el intervalo desde -0,05 hasta -0,012 para la mayoría de los metales.

$$\textit{Modelo de Basquin} \quad S_a = A (N_f)^b \quad (\text{Ecuación 1.8})$$

Una mejor aproximación para la zona de alto ciclaje, que involucra la incorporación del límite de fatiga, es la expresión propuesta por Stromeyer (Ecuación 1.9)

$$\textit{Modelo de Stromeyer} \quad S_a = S_e + \left(\frac{N_f}{C}\right)^m \quad (\text{Ecuación 1.9})$$

Donde S_e es el límite de fatiga del material y los factores C y m son valores constantes propias de cada material, que pueden ser halladas por medio de mínimos cuadrados.

Dada la limitación del modelo de Stromeyer para adaptarse con exactitud a los datos experimentales en bajo ciclaje, se incorpora otro parámetro constante (K) que ajusta dichos datos, conociéndose entonces como la relación de Palgrem, mostrada en la ecuación 1.10.

$$\textit{Modelo de Palgrem} \quad S_a = S_e + \left(\frac{N_f + K}{C}\right)^m \quad (\text{Ecuación 1.10})$$

De manera general, la selección de cada uno de los modelos representados corresponde a las necesidades de cada investigación y la cantidad de datos experimentales que se manejan. Como se observa, el caso general corresponde al modelo original propuesto por Basquin; los modelos de Stromeyer y Palmgren pueden ser considerados como modificaciones o generalización de dicho modelo original.

1.4.7. Factores que influyen el comportamiento de la curva S-N.

El comportamiento de los materiales sometidos a cargas fluctuantes se ve modificado por diversos factores que deben ser tomados en cuenta ya que estos cambian la resistencia a la fatiga, y al actuar en muchos casos en forma sinérgica podrían causar resultados no deseados en la respuesta del material. Entre estos factores se encuentran: la microestructura, tamaño, condición de la superficie, frecuencia de aplicación de carga y tensión media entre otros. ^[24]

En cuanto a la microestructura, en la mecánica de sólidos se suelen modelar los metales como materiales homogéneos, isotrópicos y elásticamente lineales. En un nivel microscópico algunas de estas suposiciones no son reales y la fatiga de metales es significativamente influenciada por la microestructura. ^[24]

La composición química, tratamiento térmico y trabajo en frío tienen una amplia influencia en el límite de fatiga de un material. Estos tres factores tienen un enorme número de variaciones sinérgicas y las generalizaciones concernientes a sus efectos en el comportamiento de la fatiga no son prácticas. Sin embargo, algunas consideraciones pueden ser formuladas para otros aspectos microestructurales. ^[24]

En lo que respecta al tamaño del grano, los granos finos generalmente proveen una mejor resistencia a la fatiga que los gruesos, excepto a elevadas temperaturas donde puede existir el efecto combinado de fatiga y fluencia lenta. Estos reducen las

deformaciones locales a lo largo de las bandas de deslizamiento disminuyendo la cantidad de deslizamiento irreversible y proveen de mayores bordes de grano para asistir la deflexión o detención de grietas transcristalinas, reduciendo de esta forma la tasa de crecimiento de estas. ^[24]

Igualmente, la anisotropía causada por el trabajo en frío incrementa la resistencia a fatiga cuando el material se somete a carga en la dirección del trabajo, a diferencia de cuando la carga es aplicada en una dirección transversal. Esto se debe al endurecimiento por deformación y también al producto de las estructuras orientadas en la dirección del trabajo en frío. ^[24]

También, las inclusiones y porosidades actúan como concentradores de esfuerzo y son sitio común para la nucleación de microgrietas de fatiga, aunque también se producen fisuras en estos lugares durante el tratamiento térmico o el trabajo en frío del material. Bajo cualquiera de estas condiciones la resistencia a la fatiga es reducida por dichas discontinuidades.

En lo que se refiere al tamaño de la pieza, si el diámetro o espesor del espécimen es < 10 mm, entonces el comportamiento a fatiga (curvas S-N) es razonablemente independiente al diámetro o espesor. A medida que el diámetro o espesor incrementa hasta 50 mm, el límite de fatiga disminuye hasta un factor límite de alrededor de 0.7 a 0.8 del límite de la fatiga para especímenes menores de 10 mm en diámetro o espesor. Lo anterior es válido para el caso de flexión alternativa. ^[24]

De la misma manera, en lo concerniente al acabado superficial, la mayoría de las fallas por fatiga se originan en la superficie, debido a que comúnmente el esfuerzo máximo se encuentra en esta zona, por lo tanto estas tendrán una influencia sustancial en el comportamiento a la fatiga. Los efectos de la superficie son causados por diferencias en la rugosidad, microestructura, composición química y esfuerzos residuales. La influencia será más pronunciada para vidas largas donde un mayor porcentaje de los ciclos transcurre en la nucleación de la grieta. ^[24]

En las operaciones de mecanizado se producen inevitablemente pequeñas rayas y surcos en la superficie de la pieza por acción de las herramientas de corte. Estas marcas superficiales pueden limitar la vida a fatiga. Se ha observado que mejorando el acabado superficial mediante pulido aumenta significativamente la vida a fatiga. ^[24]

Uno de los métodos más efectivos para aumentar la vida a la fatiga es mediante la introducción de esfuerzos residuales de compresión en una capa delgada superficial. Por consiguiente, cualquier tensión externa de tracción es parcialmente contrarrestada y reducida en magnitud por el esfuerzo residual de compresión. El efecto neto es que la probabilidad de nucleación de la grieta, y por tanto de fractura por fatiga se reduce. ^[24]

Por otra parte, en lo que concierne a la frecuencia de aplicación de carga, su influencia en el comportamiento a la fatiga de los metales es complicado por los efectos sinérgicos de la temperatura, ambiente corrosivo y sensibilidad del comportamiento esfuerzo-deformación del material con la tasa de deformación. Independientemente, las temperaturas elevadas y los ambientes corrosivos disminuyen la resistencia a la fatiga. El calentamiento del espécimen a frecuencias muy elevadas, debido al amortiguamiento de la histéresis, puede incrementar la temperatura del espécimen y cambiar el verdadero comportamiento a temperatura ambiente, lo cual es particularmente importante para metales de baja resistencia. En ausencia de corrosión y efectos de temperaturas y otros ambientes agresivos, los efectos de la frecuencia por encima de los 200 Hz pueden no ser tomados en cuenta. Mientras que para frecuencias en el rango de 1Hz a 200Hz los efectos en el comportamiento de fatiga son bajos para la mayoría de los aceros estructurales. Por lo contrario, si el intervalo de frecuencias es del mayor a los 1000 Hz, ocurren grandes cambios en la resistencia a la fatiga. ^[24]

La dependencia de la vida a la fatiga con la amplitud de la tensión media ($\sigma_m = \sigma_{\max} + \sigma_{\min} / 2$) (2.2) se observa en el diagrama S-N (Ver Figura 1.7), donde el aumento de la tensión media conduce a una disminución de la vida a fatiga. ^[21]

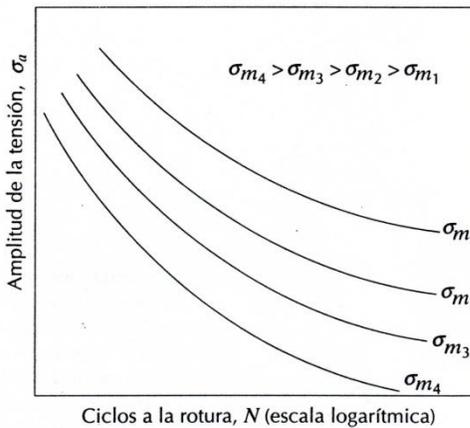


Figura N° 1.7, Influencia de la tensión media σ_m en el comportamiento a la fatiga. ^[21]

Asimismo, el diseño de un componente puede tener una influencia significativa en sus características de fatiga. Cualquier entalla o discontinuidad geométrica puede actuar como un concentrador de tensiones y como lugar donde se puede nuclear la grieta de fatiga; estos detalles del diseño incluyen orificios, ranuras de chavetas, roscas y otros. Cuanto más aguda es la discontinuidad (es decir, cuanto menor es el radio de curvatura), más severa es la concentración de tensiones. ^[21]

1.4.8. Superficie de fractura en Fatiga

La fatiga, por lo general, da por resultado una apariencia de fractura frágil (sin deformación notable) donde la superficie suele ser, macroscópicamente, normal al eje del esfuerzo principal. La superficie de fractura, en especial cerca de su origen es usualmente lisa, se vuelve más áspera a medida que la grieta original aumenta de tamaño y puede ser fibrosa durante su propagación final. Los exámenes microscópicos y macroscópicos revelan una superficie de fractura con estriaciones y un patrón de marcas anulares que parecen propagarse desde el punto de iniciación de

la falla similar a la del mar en la playa; esta zona es la que refleja el crecimiento de la grieta con relativa lentitud. ^[25] Ver Figura 1.8.

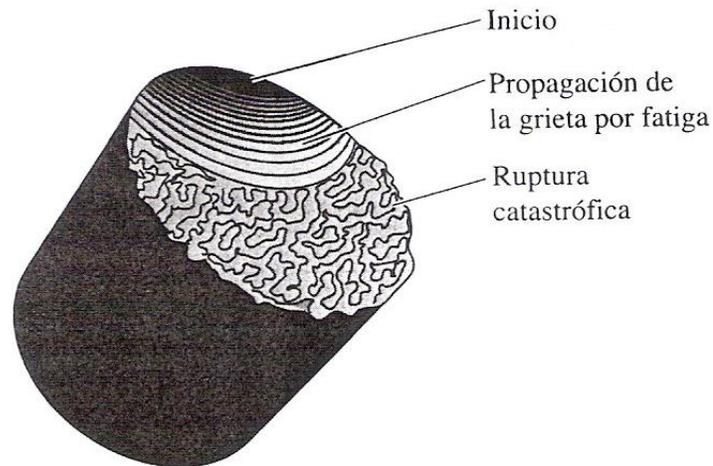


Figura N° 1.8. Superficie de fractura en fatiga. ^[26]

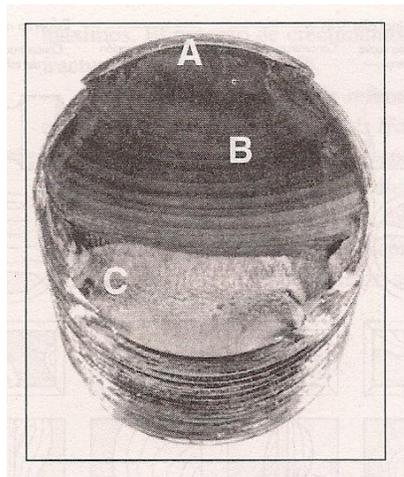


Figura N° 1.9. Falla por fatiga en un perno debida a la flexión unidireccional repetida. La falla comenzó en la raíz de la rosca en A, se propagó casi de lado a lado en la sección transversal, lo cual se muestra por las marcas de playa en B, antes de la fractura rápida final en C. ^[18]

Partiendo del hecho que todos los materiales tienen discontinuidades de uno u otro tipo, incluso, materiales manufacturados por métodos sofisticados contienen inclusiones, precipitados y poros, entre otros, se tiene que siempre existirán

concentradores de esfuerzo a partir de los cuales se pueden desarrollar las microgrietas en alto ciclaje. Dependerá del nivel del esfuerzo máximo el que estas microgrietas se propaguen hasta fracturar el componente o se detengan en alguna barrera microestructural (borde de grano, inclusión entre otras).

La superficie constituye otro lugar crítico para la iniciación de grietas en el sólido ya que usualmente en ésta se presentan los esfuerzos máximos, además de que esta zona puede tener concentradores de esfuerzo (picaduras de corrosión, marcas de mecanizados y la rugosidad del material) que propicien la aparición de grietas como consecuencia de la deformación plástica alternante.

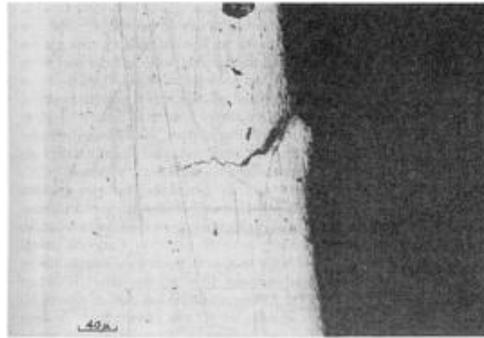


Figura N° 1.10. Crecimiento de grieta en sección transversal de un espécimen. ^[3]

La deformación plástica alternante causa surcos superficiales denominados extrusiones e intrusiones como consecuencia del afloramiento de las bandas de deslizamiento en la superficie. En el caso de deformación cíclica, estas bandas se denominan bandas de deslizamiento persistentes y a lo largo de las mismas se producen las denominadas grietas en etapa I, que se propagan a lo largo de los planos sujetos a esfuerzos de corte elevados. En esta fase la velocidad de crecimiento es muy pequeña (p.e 10^{-10} m/ciclo) y la microgrieta tiene mucha dificultad para atravesar los bordes de grano y/u otras barreras microestructurales, por lo cual puede detenerse. Si la carga es algo más alta o con suficiente número de ciclos, ésta podría reiniciar la propagación en el grano adjunto.

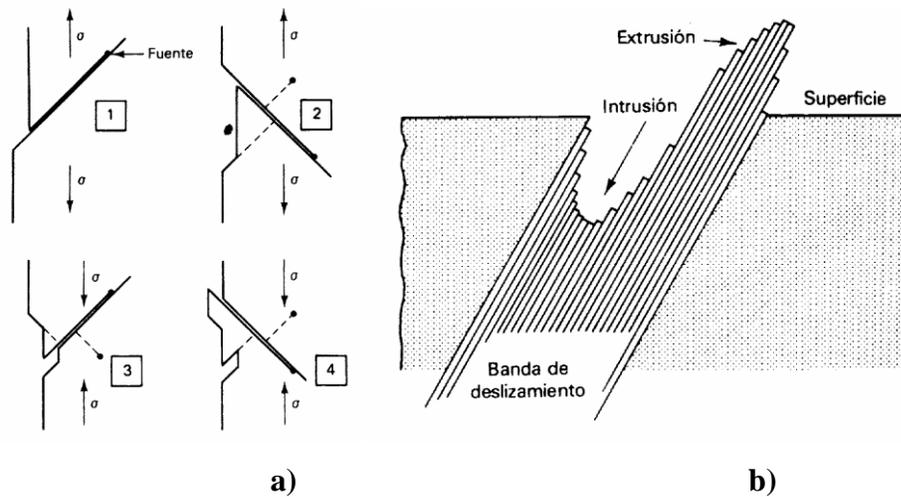


Figura N° 1.11. Esquemas de mecanismos que conducen al inicio de las grietas de fatiga: a) extrusiones e intrusiones en regiones de deslizamiento producidas por esfuerzos cíclicos. b) intrusiones y extrusiones de la banda de deslizamiento previas al inicio de la grieta (obsérvense los concentradores de esfuerzos que este proceso forma en la superficie).

En este período, la grieta se extiende en la mayoría de los planos favorablemente orientados en un determinado grano. Debido a que los granos en un metal policristalino tendrán muchas orientaciones diferentes, la grieta macroscópica tendrá una apariencia de zig-zag y puede crecer solo unos pocos diámetros de grano antes de que cambie su dirección, perpendicular al máximo esfuerzo normal. Cuando el tamaño de la zona plástica en la punta es del mismo orden o mayor que la correspondiente unidad microestructural, la tendencia hacia el agrietamiento de la banda de deslizamiento se suprime y la grieta tiende a crecer en etapa II. ^[3]

En la etapa II la grieta se propaga a una velocidad relativamente elevada y las conocidas estrías de fatiga se crean a medida que la grieta avanza a través de la sección transversal de la probeta. Estas estrías son útiles en el análisis de la falla por fatiga para determinar el origen, dirección de propagación de las grietas por fatiga y también para estimar la velocidad de propagación. ^[3]

La propagación puede ser caracterizada por tres tipos de marcas llamadas marcas de playas, estriaciones y marcas radiales. Las primeras indican la posición de la punta de la fisura en algún momento y aparecen como anillos concéntricos que se expanden a partir del punto o puntos de playas, son de dimensiones macroscópicas como se ve en la figura 1.12. y se pueden observar a simple vista. Estas pueden ocurrir como resultado de los cambios en la carga o la frecuencia, o por la oxidación de la superficie de fractura durante períodos de interrupción de la grieta. Muchas fallas por fatiga son producidas bajo condiciones de crecimiento de grietas no interrumpidas y sin variaciones de carga no exhiben marcas de playa. ^[16]

Por otro lado, las estriaciones de fatiga son de tamaño microscópico y solo son observadas con el análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y en algunos casos son requeridos el uso de réplicas fractográficas para su observación. La figura 1.13. muestra sus características. Se piensa que cada estriación representa la distancia de avance del frente de fisura durante un ciclo de carga simple. El ancho de las estrías depende y se incrementa con el aumento del intervalo de tensiones. Otro ejemplo de estriación se muestra en la figura N° 19 en la cual la amplitud de las tensiones máximas ha cambiado. La apariencia de las estrías cambia con el cambio de la amplitud de tensiones.

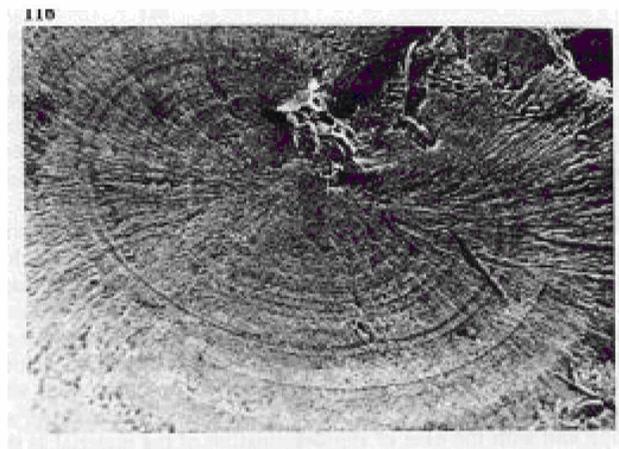


Figura N° 1.12. *Marcas de Playas y marcas radiales*

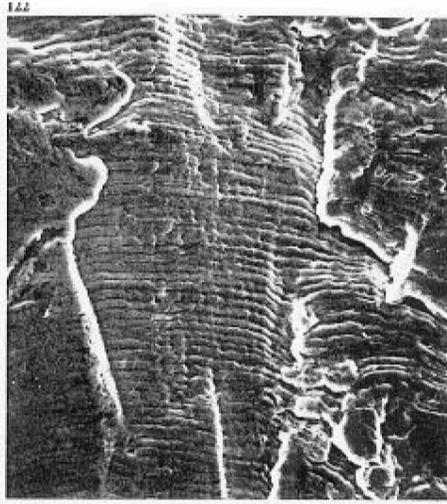


Figura N° 1.13. Estrías

Se debe enfatizar que aunque las marcas de playa y estrías, que son características de la superficie de fractura por fatiga, tienen apariencia similar, ellas son diferentes en cuanto a su origen y tamaño. Puede haber miles de estrías dentro de una sola marca de playa. Frecuentemente, la causa de la fractura por fatiga se puede deducir después del examen de la superficie de fractura. La presencia de marcas de playa y/o estrías sobre la superficie confirma que la causa ha sido por fatiga, no obstante la ausencia de una o de ambas marcas no excluye a la fatiga como causa de la fractura. Cuando la fractura se produce rápidamente, no aparecen marcas de playa y estrías.

La segunda etapa de propagación (Etapa II) comienza mientras la velocidad de propagación de la fisura aumenta pronunciadamente. Además, en este punto hay también un cambio en la dirección de propagación siendo globalmente perpendicular a las tensiones aplicadas. Durante esta etapa de propagación, el crecimiento de la fisura se produce por un proceso repetitivo de redondeo y afinado de la punta de la fisura, denominado comúnmente despuntes plásticos de la grieta

La zona A pertenece a la parte inicial de propagación lenta, presenta a veces un aspecto pulido debido al frotamiento de una cara de la grieta con la otra, puede también exhibir cierto grado de oxidación si el ambiente es corrosivo y el tiempo que tarda en propagarse la grieta es elevado (Ver Figura 1.14.). Las tensiones de corte inician el fenómeno de deslizamiento produciendo daño permanente en el material y la formación de grietas. Esta fase de iniciación puede durar incluso miles de ciclos, cada uno de los cuales produce un pequeño cambio en la disposición cristalina del material. En los materiales con comportamiento frágil, la iniciación de las grietas suele producirse en defectos del material tales como inclusiones, poros y otros tipos de discontinuidades

La zona B corresponde con el crecimiento rápido de la grieta, presentando una superficie irregular. El aspecto de la zona B se parece en cierta medida al de una rotura frágil y en esta región los modos estáticos de rotura tienen una gran importancia, ya que cuando la grieta ha adquirido un tamaño relativamente importante, son generalmente las componentes normales de la tensión quienes continúan su propagación; a partir de este momento la grieta es una fuente muy elevada de concentración de tensión y por ello se propaga ciclo a ciclo, tal y como se representa en la zona B de la figura 1.14.^[26]

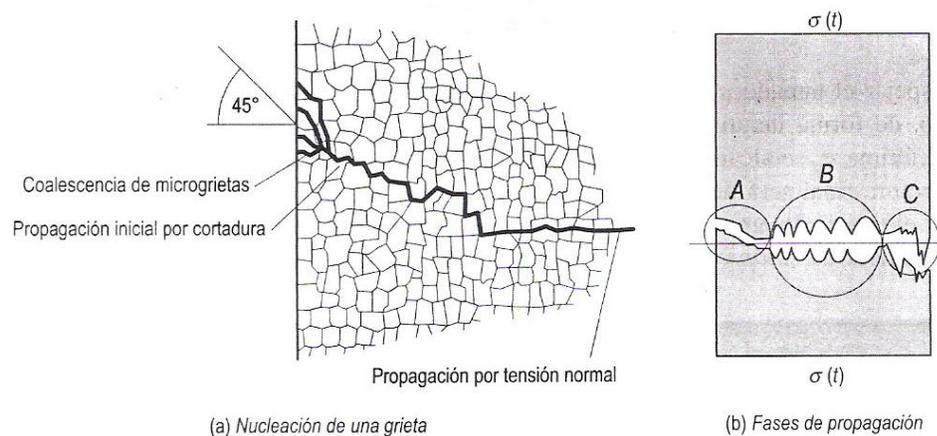


Figura N° 1.14. Zonas de iniciación (A), propagación (B) y fractura (C).^[26]

Finalmente, cuando la sección transversal restante del material resulta demasiado pequeña para soportar la carga aplicada, éste falla súbitamente por fractura. Esto ocurre en una tercera zona (Zona C) en donde se produce la fractura final cuando se reduce la sección y el metal no puede soportar la aplicación última de la carga. Ver Figura 1.14. Esta última etapa de la fatiga carece de interés debido a que la velocidad de crecimiento es tan grande que el número de ciclos consumidos en la etapa III apenas cuenta en la vida de la pieza. ^[26]

Esta zona puede tener un aspecto cristalino indicando que la fractura final fue frágil o un aspecto fibroso indicando una fractura final dúctil. El tamaño de la zona final de la fractura depende de la magnitud de las cargas y su forma depende de la forma, tamaño y dirección de la carga de la parte fracturada. ^[14]

1.5. ANTECEDENTES

Entre las investigaciones anteriores relacionadas al tema de este Trabajo Especial de Grado podemos hacer referencia a las que a continuación se exponen:

- **Schulund et al. (1999)**, ^[27] estudiaron el comportamiento mecánico de metales duros recubiertos por PVD y CVD bajo cargas cíclicas, donde analizaron muestras de una aleación WC-(Ti, Ta, Nb, W) C-Co recubierta por películas de TiN obtenida por PVD y de TiN-Ti (C,N) obtenida por HTCVD (“High temperatura chemical vapour deposition”, o deposición química en fase de vapor a altas temperaturas). Las muestras fueron ensayadas bajo cargas estáticas y bajo cargas dinámicas a temperatura ambiente, para luego ser analizadas microestructuralmente a través de Rayos X. Como resultado se obtuvo que para las probetas recubiertas mediante el método HTCVD, la vida a la fatiga disminuyó de manera considerable, principalmente por efecto de

esfuerzos residuales de tensión en el recubrimiento, producto de la diferencia de coeficientes de expansión térmica entre la película y el sustrato, lo que facilitó el avance de la grieta. En cambio para las muestras recubiertas por el método PVD, se determinó que el comportamiento a fatiga se mejora producto de la existencia de esfuerzos residuales compresivos en la película. Estos esfuerzos proveen un obstáculo a la propagación subcrítica de las grietas de fatiga.

- **Baragueti et al. (2005),** ^[28] estudiaron las variables que afectan la resistencia a la fatiga de materiales recubiertos por PVD. Estos autores estudiaron como son afectadas las propiedades intrínsecas de los materiales con un recubrimiento de CrN sobre el comportamiento a fatiga. La microdureza de la capa de recubrimiento y los esfuerzos residuales que caracterizan la película superficial fueron medidos y los resultados obtenidos fueron presentados en un modelo numérico que predice el procedimiento de vida a la fatiga de componentes recubiertos. Investigaron el efecto de una película monocapa de CrN sobre muestras de acero inoxidable dúplex 2205. Para determinar el límite de fatiga del sustrato y del conjunto sustrato recubrimiento se desarrollaron modelos de elementos finitos (FEM), el cual es muy utilizado en la actualidad para predecir con gran exactitud para predecir la vida de fatiga de componentes. Los resultados de este estudio mostraron un incremento moderado de aproximadamente un 15% del límite de fatiga del conjunto sustrato recubrimiento con respecto al sustrato.
- **Puchi et al. (2007),** ^[29] estudiaron el comportamiento a la fatiga de un acero AISI 4340 en condiciones de temple y revenido recubierto con una película cerámica de TiCN depositada mediante la técnica PAPVD. Realizaron ensayos de fatiga en flexión rotativa tanto al aire como en ambiente corrosivo, utilizando para ello una solución al 3% de NaCl. Comparando los ensayos de

fatiga al aire, observaron un incremento en el orden de los 140-180% para valores de esfuerzos alternantes de 500–700 MPa. Asimismo, para los ensayos en ambiente corrosivo el incremento observado fue alrededor del 25%, asociado a un esfuerzo alternante de 570 MPa. Estos resultados sugieren que la película afecta positivamente el número de ciclos a falla por fatiga, impidiendo que la grieta se nuclea o interviniendo en la tasa de crecimiento de esta. Sin embargo, en condiciones de ambiente corrosivo este recubrimiento no provee un incremento significativo de la resistencia a la fatiga. Finalmente, mediante la observación por medio de la microscopía electrónica de barrido observaron que las grietas se nuclean en la superficie libre del recubrimiento y una vez propagadas se transfieren al sustrato. Además de ello, encontraron la presencia de poros superficiales que podrían estar actuando como concentradores de esfuerzos generando la multiplicidad en los eventos de nucleación.

- *Li Chen et al. (2008)*,^[30] investigaron la Microestructura y Propiedades mecánicas de recubrimientos Ti (C, N) y multicapa TiN/Ti (C, N) obtenidos por PVD. Evidenciaron que la dureza de los revestimientos multicapa se debe a un endurecimiento de la intercara de los distintos estratos, en un trabajo destinado a la investigación de la. También determinaron que la adhesión en los recubrimientos multicapa es mayor, puesto que las intercaras medias absorben la energía de la propagación de microgrietas y previenen su formación durante la deformación del conjunto sustrato-recubrimiento. Sin embargo, en comparación con los recubrimientos monocapa, se constata que ambos presentan un mismo rendimiento, pero diferentes formas de falla, cuando van adheridos a un acero al carbón como sustrato.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. DIAGRAMA DE FLUJO



2.2. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Para la realización del presente trabajo fue necesaria la preparación de probetas de fatiga. Para ello fue primordial obtener una barra de acero AISI 4340 templado y revenido de aproximadamente 12,7 mm de diámetro y 6 m de longitud, cuya composición química, en porcentaje en peso, se describe en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química del acero AISI 4340 en % en peso.

COMPOSICIÓN QUÍMICA ACERO AISI 4340 % EN PESO								
C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	P	S	Cu
0.38-0.43	0.7-0.9	1.65-2.0	0.6-0.8	0.2-0.3	0.15-0.35	0.009	0.002	0.093

Una vez obtenido el material se procedió al mecanizado de 15 probetas de fatiga siguiendo la Norma ASTM E-606 ^[31], la cual especifica las dimensiones necesarias para su mecanizado y se determinaron las medidas correspondientes, tal como se ilustra en la Figura 2.1.

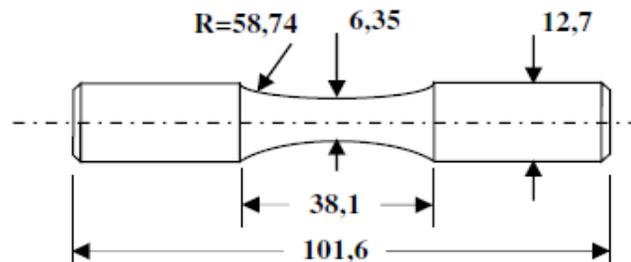


Figura N° 2.1. Diagrama de las probetas para ensayos de fatiga en flexión rotativa según la norma ASTM E 606. ^[29]. (Medidas en mm)

Después del mecanizado de las probetas de fatiga, se procedió a realizarle un desbaste fino, puliendo cada una de ellas con el fin de eliminar las marcas circunferenciales obtenidas en el proceso de mecanizado previo que podrían

modificar el comportamiento a la fatiga del material. Además, es necesario mejorar el acabado superficial lo cual brinda una mejor adherencia del recubrimiento sobre el sustrato. Esto se realizó empleando un torno marca MYFORD, el cual posee un plato de mordaza graduable en el que se fija un lado de la probeta mientras que el lado opuesto se apoya al centro punto. El proceso de pulido consistió en un movimiento longitudinal del papel de lija en la sección de ensayo mientras que la probeta rota a baja velocidad. Este proceso fue realizado empleando una secuencia de lijas desde 240 hasta 1500.



Figura N° 2.2. Torno marca Myford con plato de mordaza graduable.

2.3. DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO

Las probetas mecanizadas fueron enviadas a la empresa, Oerlikon Balzers Coating en USA, con el fin de realizar el proceso de deposición del recubrimiento de CrN. Dicha empresa es una de las más renombradas a nivel mundial en el proceso de deposición de recubrimientos duros mediante técnicas de PVD. El proceso se efectúa en alto vacío y a temperaturas de 200°-500°C. Para el proceso no reactivo, se emplean gases inertes como el argón para la formación del plasma y bombardeo de electrones. Para el proceso reactivo, se utilizan oxígeno y nitrógeno. Tanto los gases del proceso inerte como los del proceso reactivo deben estar libres de contaminantes.

La técnica consiste en un arranque de partículas provenientes del crisol, por evaporación al vacío, que proporciona parte del material de recubrimiento. Este proceso se efectúa por un calentamiento, logrando desprender los átomos y moléculas que luego pasarán a formar parte del recubrimiento en el sustrato. Las partículas energizadas pueden provenir de un haz de electrones. Se suministra gas argón, se energizan las partículas positivamente mediante un campo eléctrico y luego ocurre un bombardeo de partículas atómicas en el sustrato.

La pieza es rotada en todo momento en distintas direcciones manteniendo una velocidad constante con el fin de garantizar un recubrimiento homogéneo a lo largo de toda su superficie. Este tipo de técnicas han tenido un gran crecimiento ya que se realizan a temperaturas relativamente bajas y no producen residuos propios de las reacciones químicas.



Figura N° 2.3. Probeta de acero AISI 4340 recubierta con CrN.

La técnica PAPVD es una de las variantes de las técnicas PVD, ya que utiliza los mismos principios de operación pero con la incorporación de un plasma como agente ionizante para favorecer el proceso.

2.4. ENSAYOS MECÁNICOS

2.4.1. Ensayo de Fatiga

Los ensayos de fatiga se realizaron en una máquina de flexión rotativa tipo viga en voladizo a temperatura ambiente, marca Fatigue Dynamics, modelo RBF-200, la cual se puede observar en la figura 2.4



Figura N° 2.4. Máquina de flexión rotativa marca FATIGUE DYNAMICS, modelo RBF-200.

Dicha máquina está diseñada para aplicar ciclos de carga de inversión completa, en condiciones de flexión en voladizo, empleando probetas de forma cilíndrica. El equipo dispone de un contador de revoluciones para determinar los ciclos a falla y una barra calibrada con un contrapeso, la cual se utiliza para aplicar el momento flector responsable de generar el esfuerzo al cual están sometidas las probetas durante el ensayo, por este motivo se debe calcular el valor de dicho momento, por medio de la siguiente ecuación:

$$S = \frac{M \times C}{I} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$M = \frac{S \times I}{C} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

M : Momento flector [Nm].

S : Esfuerzo aplicado [MPa].

I : Momento polar de inercia [mm^4].

C : Distancia desde el eje neutro de la carga hasta la superficie de la probeta [mm].

Para una barra circular se tiene que:

$$I = \frac{\pi \times D^4}{64} \quad (\text{Ec.2.3})$$

$$C = \frac{D}{2} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

D : Diámetro de la probeta [mm].

Sustituyendo la ecuación 2.10 y la ecuación 2.11 en la ecuación 2.9, se tiene como resultado la siguiente ecuación:

$$M = \left(\frac{S \times \left(\frac{\pi \times D^4}{64} \right)}{\frac{D}{2}} \right) = \frac{S \times \pi \times D^3}{32} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Es por ello que la ecuación para el momento flector será:

$$M = 11,0955 \times S \times D^3 [\text{MPa} \times \text{mm}^3] \quad (\text{Ec.2.6})$$

El montaje de las muestras se realizó sujetando sus extremos mediante mordazas acopladas al eje del motor y a un eje cónico, a través del cual se aplica la carga respectiva, ya que dicho eje está unido a una barra graduada en función del momento flector (M) producido por un contrapeso móvil.

Todos los ensayos de fatiga al aire se realizaron a una frecuencia de 50 Hz, es decir, a una velocidad de rotación promedio de 3000 rpm. Los datos obtenidos de

estos ensayos fueron el número de ciclos de falla para cada nivel de esfuerzo alternante aplicado.

Determinación del límite de fatiga

Dado que el fin último de estos ensayos fue determinar el límite de fatiga del material recubierto y en virtud del número de probetas disponibles, se empleó un método de aproximaciones sucesivas que no se corresponde exactamente con el Método de la Escalera, en el cual la primera probeta se ensayó a un valor estimado de 520 MPa. Los ensayos se realizaron hasta alcanzar un número de ciclos a falla de 5×10^6 y las probetas que alcanzaron este valor se consideraron con vida infinita.

De acuerdo al procedimiento seguido, sí se produce un fallo antes de que la vida de la probeta alcance el valor preestablecido de 5×10^6 , la siguiente probeta se ensaya en un nivel de esfuerzos inferior. En cambio, sí la probeta no falla a ese nivel de esfuerzo, el próximo ensayo se ejecuta en un nivel superior. Para los ensayos se utilizó un escalón de 10 MPa y se continuó con este procedimiento aumentando el nivel de esfuerzo cuando la probeta ensayada no rompe y disminuyéndolo cuando falla. Para las últimas probetas se afinó el escalón, siendo este de 5 MPa. El límite de fatiga fue finalmente determinado a partir de la relación entre el máximo esfuerzo alternante y el número de ciclos a falla propuesta por Stromeyer.^[23]

2.4.2. Ensayos de tracción Post-Fatiga

Con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de cargas cíclicas al material recubierto, sobre las propiedades mecánicas estáticas del mismo, se ensayaron a tracción las probetas recubiertas que alcanzaron 5 millones de ciclos, consideradas con vida infinita. Debido a que las probetas de fatiga poseen un radio continuo en su sección de ensayo, la longitud inicial debe ser medida entre los hombros de la misma.

Los ensayos fueron realizados en el Departamento de Materiales de la Universidad Simón Bolívar, mediante el uso de una máquina de ensayos mecánicos marca MTS modelo 810 con capacidad de 25 toneladas (Figura N° 2.5), controlada servo hidráulicamente, empleando una velocidad de cabezal de 5 mm/min. Luego del montaje de la probeta en la maquina, sobre las mismas se colocó un extensómetro marca INSTRON, modelo G-51-12-M-A (Figura N° 2.5b) con el fin de medir el alargamiento de la muestra mientras se le aplicaba la carga.

Una vez obtenidos los datos concernientes al ensayo de tracción, estos se deben corregir debido a que a lo largo del ensayo existe una deformación elástica de los elementos de máquina. La corrección se realiza por medio de la ecuación:

$$(\Delta L_i)_{corr} = \Delta L_i - \Delta F_i \left(\frac{1}{K_{exp}} - \frac{1}{K_{prob}} \right) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

K_{exp} : Rigidez experimental.

K_{prob} : Rigidez de la probeta.

Los cuales se obtienen por medio de las siguientes ecuaciones:

$$K_{exp} = \frac{\sum F_i}{\sum \Delta L_i} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$K_{prob} = \frac{A_0 E}{L_0} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

A_0 : Área transversal inicial de la sección de ensayo de la probeta

E : Módulo de elasticidad del material ensayado.

L_0 : Longitud inicial de la sección de ensayo de la probeta.

Obtenidas las respectivas curvas de carga versus alargamiento, se procedió a obtener las correspondientes curvas de esfuerzo real versus deformación real de las cuales se obtuvieron los valores de esfuerzo de fluencia (siguiendo el criterio del 0,2 % de deformación), esfuerzo real a carga máxima y porcentaje de reducción de área.

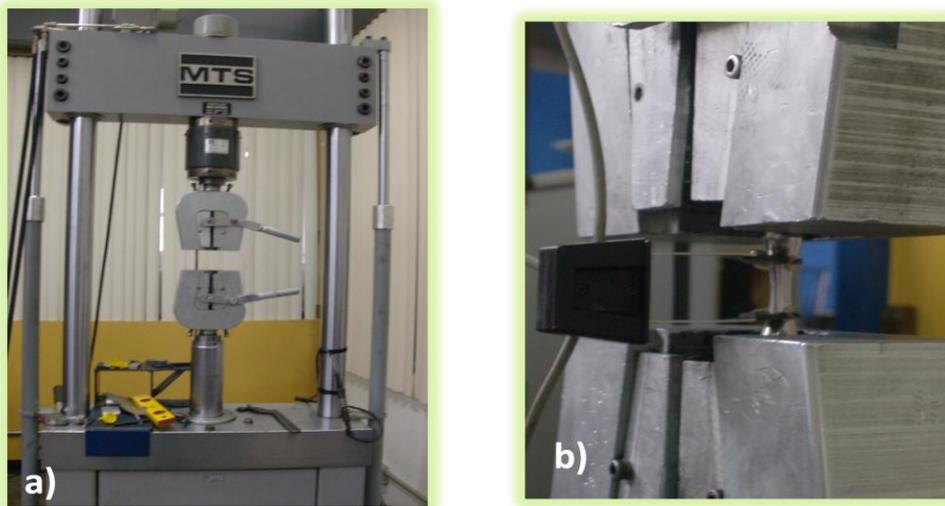


Figura N° 2.6. (a) Máquina de tracción MTS-810. (b) Extensómetro marca INSTRON

2.5. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO

El estudio fractográfico se realizó con la finalidad de caracterizar los mecanismos de falla que actuaron sobre las probetas del conjunto substrato recubrimiento ensayadas a fatiga al aire. El estudio fue conducido mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), la cual permite analizar los mecanismos de fatiga, así como la nucleación y crecimiento de grietas, este se realizó sobre las superficies de fracturas de las probetas escogidas.

Para este estudio se requiere de la selección y preparación previa de las muestras ensayadas en los puntos anteriores antes de someterlo al estudio fractográfico. Para ello se seleccionaron 5 probetas de fatiga recubiertas y 5 probetas ensayadas a tracción.

2.5.1. Preparación de las Muestras

Para la preparación de las muestras primero se deben seccionar transversal (paralelo a la superficie de fractura) y longitudinalmente (perpendicular a la superficie de fractura) las muestras ensayadas a fatiga y tracción empleando una cortadora de disco de diamante.

Para la realización de los cortes transversales se realizó la selección de las probetas a ser estudiadas, tomando en cuenta sólo las que fallaron a un número de ciclos próximo al promedio de falla. Se seleccionaron dos probetas ensayadas a fatiga al aire del conjunto substrato-recubrimiento a un esfuerzo de 560 MPa y 580 MPa.

2.5.2. Corte de las Probetas

El corte transversal se realizó a una distancia aproximada de 5-7 mm de la zona de fractura. Para realizar este corte se utilizó una cortadora de disco de diamante marca STRUERS modelo MINITOM.



Figura N° 2.6. Cortadora de disco de diamante marca STRUERS modelo MINITOM.

Se procedió a realizar el mismo corte transversal en la otra parte de la probeta, a la cual primeramente se le había hecho un corte longitudinal por la sección de la zona de fractura que indicaba el inicio de la grieta.

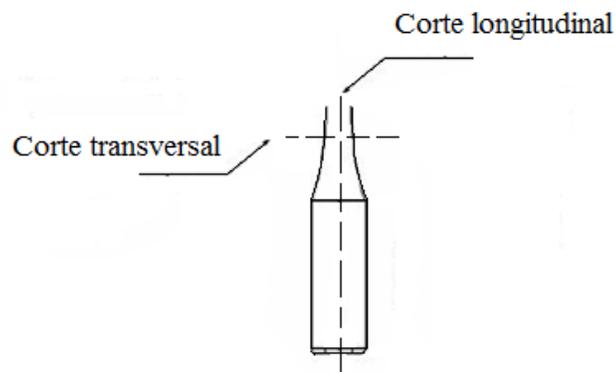


Figura N° 2.7. Tipos de corte realizados en las probetas de fatiga.

A las tres probetas restantes ensayadas a fatiga pero que no fallaron, se les realizó un corte longitudinal de aproximadamente 2 cm de largo, para así poder estudiar el sistema sustrato-recubrimiento. Cada muestra fue identificada y almacenada individualmente cuidando la superficie de fractura. Posteriormente, las muestras fueron limpiadas con acetona en un equipo de limpieza por ultrasonido, sumergiendo las mismas y manteniendo la zona de fractura hacia abajo para que los

desechos desprendidos de la superficie a estudiar caigan y no sean retenidos nuevamente. Finalmente, las muestras son limpiadas con alcohol y secadas con el secador de muestras.

2.5.3. Embutido de las Muestras Longitudinales

Luego se procedió al montaje de las mismas, ya que las muestras son muy pequeñas para manejarlas con la mano, para esto se utilizó embudidora marca Buehler modelo Simpliment que se muestra en la figura N° 2.10. Las muestras se colocaron con resina Phenolic a una temperatura de 132-149 °C y una presión de 4400 psi durante 7 minutos con precarga. Una vez finalizado el proceso se refrigeran las muestras mediante un sistema acoplado a la embudidora, dejando la muestra lista para su manipulación.



Figura N° 2.8. Embudidora marca BUEHLER modelo Simpliment.

2.5.4. Pulido de las Muestras

Una vez embutidas las muestras, se procedió a realizar un desbaste fino utilizando papel de lija de tamaño de grano desde 400 hasta 1200, para luego pulirlas con paños metalográficos de lona con suspensión de alúmina de $0,3\ \mu\text{m}$. Este proceso se realizó en una pulidora marca BUEHLER modelo METASERV 2000 variable “speed grinder-polisher” perteneciente al laboratorio de metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela (UCV), cuidando que el ataque fuese siempre en la misma dirección, para evitar así las fallas de borde.



Figura N° 2.9. Pulidora marca BUEHLER modelo METASERV 2000 variable “speed grinder-polisher”

2.5.5. Microscopia Electrónica De Barrido (MEB).

El estudio fractográfico se realizó con la ayuda de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), empleando un voltaje de aceleración de 25 KV, en el Centro de Microscopia Electrónica del Instituto Tecnológico Universitario (IUT).

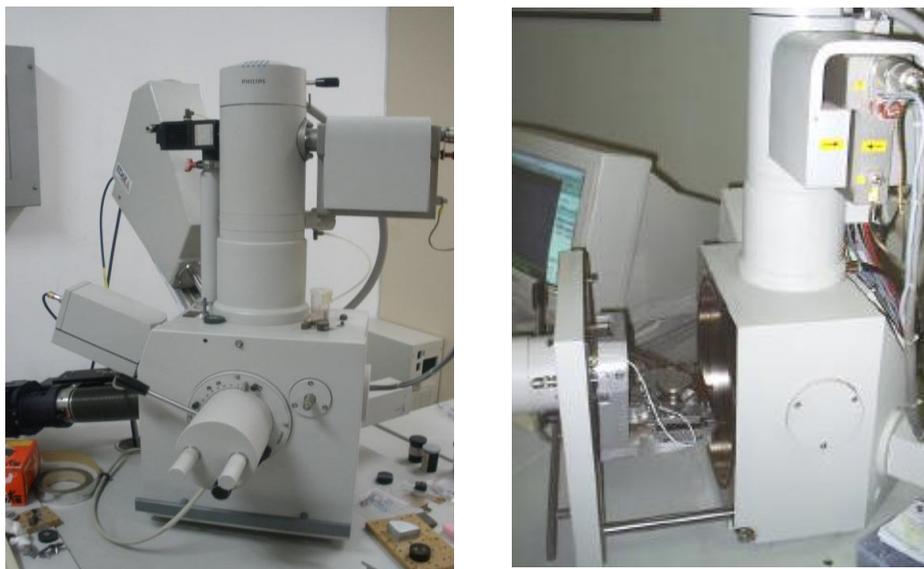


Figura N° 2.10. Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los estudios realizados en el marco de la presente investigación, con la inclusión de tablas y figuras que permiten el mejor entendimiento y soporte de lo analizado para cada uno de los estudios que fueron llevados a cabo.

3.1. ENSAYO DE FATIGA

Los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga al aire para el acero AISI 4340 con recubrimiento de CrN son reflejados a continuación en la tabla N° 3.1.

Tabla N° 3.1. Resultados de los Ensayos de Límite de Fatiga al aire en un acero AISI 4340 con recubrimiento de CrN.

Probeta	Máximo Esfuerzo Alternante (MPa)	Número de Ciclos (N_f)
1	520	5.000.000
2	530	5.000.000
3	540	5.000.000
4	550	5.000.000
5	560	493.300
6	550	5.000.000
7	560	5.000.000
8	570	5.000.000
9	580	97.700
10	570	5.000.000
11	580	2.099.200
12	580	307.200
13	570	5.000.000
14	575	317.700
15	575	261.600

Los ensayos fueron iniciados para un nivel de esfuerzo de 520 MPa. Debido al número limitado de probetas se comenzó con escalones de 10 MPa hasta acercarse al

valor del límite. Como se observó que el límite de fatiga se encontraba entre 570 y 580 MPa, se afinó el escalón en 5 MPa, ensayando dos probetas a un esfuerzo de 575 MPa.

Los resultados de las probetas ensayadas se representaron en un gráfico S-N, que nos muestra el límite de fatiga al aire para las muestras de acero AISI 4340 con recubrimiento, tal y como se observa en la figura N° 3.1, en la cual también se presenta una comparación del límite de fatiga de estas, con respecto al valor reportado recientemente en la investigación de Machado y Da Silva [19] para el AISI 4340 sin recubrir, de 560 MPa.

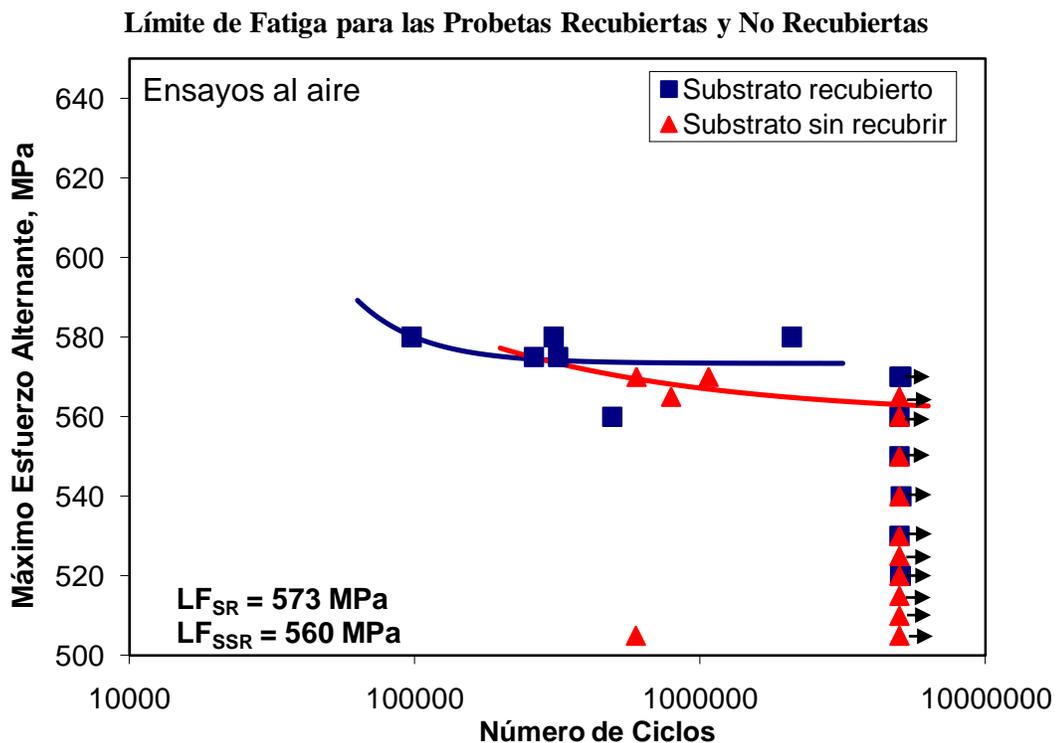


Figura N° 3.1. Curva Comparativa del Límite de Fatiga del acero AISI 4340 Recubierto con CrN y el acero AISI 4340 sin recubrir.

El límite de fatiga fue determinado a partir de la relación entre el máximo esfuerzo alternante y el número de ciclos a falla propuesta por Stromeier ^[22], siendo

este de 573 MPa, obteniéndose una variación incremental de sólo el 2%, en comparación con el valor de 560 MPa.

El hecho que el límite de fatiga presente una variación insignificante, demuestra que la presencia del recubrimiento de CrN no afecta de manera adversa las propiedades de fatiga del sustrato, en comparación con otros recubrimientos. Tal es el caso del Balinit Helica [19], el cual da lugar a una disminución del límite de fatiga en un 15% con respecto al del sustrato sin recubrir.

Este comportamiento podría ser explicado en base a dos hechos que deben ser comentados: (1) La presencia de esfuerzos residuales compresivos elevados en el recubrimiento, del orden de 3-4 GPa, derivados de la aplicación del recubrimiento por PAPVD, los cuales según estudios anteriores [9] retardan la iniciación y propagación de las grietas de fatiga. (2) La deposición del recubrimiento a temperaturas que no afectan las propiedades mecánicas del sustrato. En el caso del recubrimiento de Balinit Helica, se presume que esta es la razón de la disminución del límite de fatiga en el material recubierto ya que en el mismo se determinó experimentalmente la presencia de esfuerzos residuales compresivos de magnitud elevada. Sin embargo, la comprobación de esta última hipótesis no es fácil ya que las condiciones de deposición de este tipo de recubrimientos es información confidencial de la empresa Balzers.

3.2. ENSAYOS DE TRACCIÓN POST-FATIGA

Luego de haber realizado los ensayos de fatiga en las probetas recubiertas, se procedió a evaluar el efecto del número de ciclos a falla en las propiedades mecánicas estáticas determinadas en tracción, empleando aquellas que alcanzaron 5.000.000 de ciclos. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla N° 3.2.

Tabla N° 3.2. Resultados Comparativos de las Probetas de Fatiga Ensayadas a Tracción.

Probeta	Esfuerzo de Fluencia, σ_y (MPa)	Esfuerzo Real a carga máxima, σ_{uts} (MPa)	Porcentaje de Reducción de Área (%)
Sin recubrir	876	1467	52
1	899	1130	55,6
3	1040	1075	46,2
7	990	1120	53,1
8	1018	1155	63,1
13	1005	1107	53,7
Promedio	990,4	1117,4	54,3
Desviación Estándar	54,3	29,5	6,1

La tabla muestra los valores del esfuerzo de fluencia (σ_y) y del esfuerzo real a carga máxima (σ_{uts}), obtenidos a partir de las curvas esfuerzo vs deformación real para cada ensayo realizado; cabe destacar que los valores del esfuerzo de fluencia reportados se obtuvieron según el criterio 0,2 % de la deformación de la probeta.

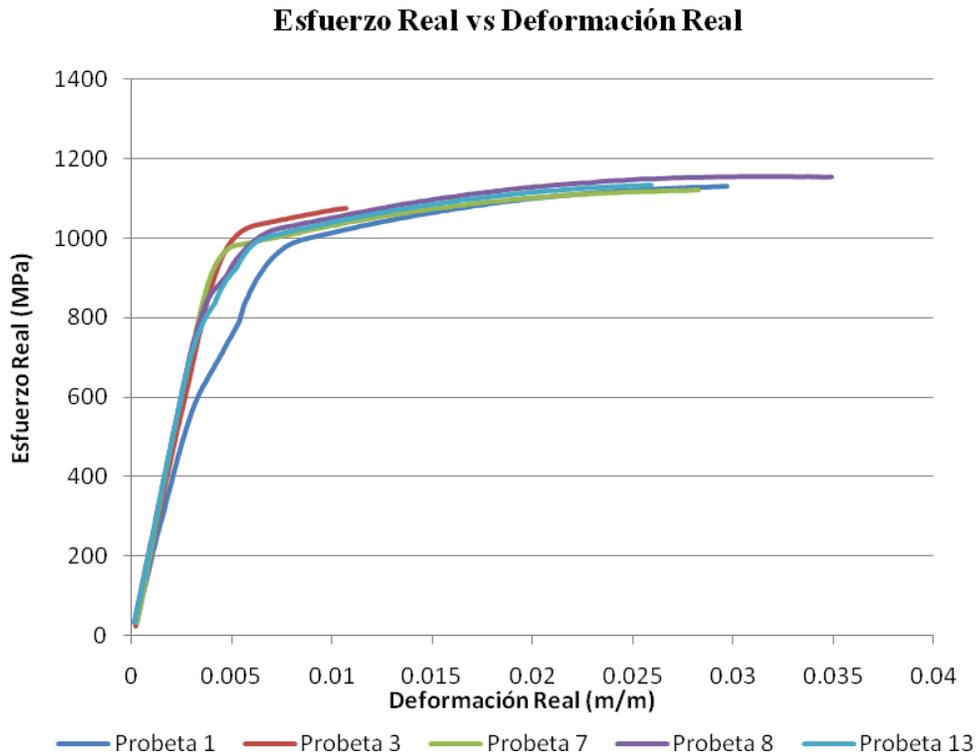


Figura N° 3.2. Gráfica Comparativa de los Resultados de Tracción para las Probetas de Fatiga Recubierta con CrN.

Las curvas obtenidas para cada una de las probetas se muestran en la figura N° 3.2; en ella se observa que presentan un comportamiento similar, exceptuando la probeta No. 3, la cual evidencia una disminución significativa en la ductilidad.

Según la ASM [3], los valores referenciales de σ_y y σ_{uts} para un acero AISI 4340 en condición de temple y revenido son de 876 MPa y 1467 MPa respectivamente, tal y como se muestran en la tabla 3.2. Esto evidencia un incremento aparente del esfuerzo de fluencia de aproximadamente 13% con respecto al material base y una disminución aparente del 31% con respecto al promedio del esfuerzo real a carga máxima, del conjunto substrato-recubrimiento. Sin embargo, es importante

enfaticar que las variaciones observadas son solo aparentes ya que en el presente trabajo solo se realizaron ensayos con probetas recubiertas de radio continuo.

3.3. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO

A continuación se presenta el análisis de las superficies de fractura realizado por medio de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) del Instituto Universitario Tecnológico. Se tomaron en cuenta para el estudio: 2 probetas recubiertas ensayadas a fatiga a mayor numero de ciclos de falla (cortes transversal y longitudinal), 1 probeta recubierta ensayada a fatiga que alcanzaron cinco millones de ciclos sin falla (corte longitudinal), así como 4 probetas recubiertas ensayadas a fatiga que alcanzaron cinco millones de ciclos sin falla y luego fueron ensayadas en tracción uniaxial.

El estudio general de la superficie de fractura se llevo a cabo con el fin de inferir los mecanismos de nucleación, propagación y fractura, a fin de determinar el rol del recubrimiento en los mecanismos de falla por fatiga, mediante las microfotografías que se tomaron a distintos aumentos, tanto en la modalidad de electrones secundarios (SE) como de electrones retrodispersados (BSE).

Fatiga (probetas con recubrimiento, vista transversal)

La figura N° 3.3 presenta la superficie de fractura de las probetas que fallaron a un número de ciclos de: (a) 493.300 a 560 MPa y (b) 2.099.200 ciclos a 580 MPa. En ambos casos, se observa una morfología similar, con un solo frente de propagación para la grieta dominante.

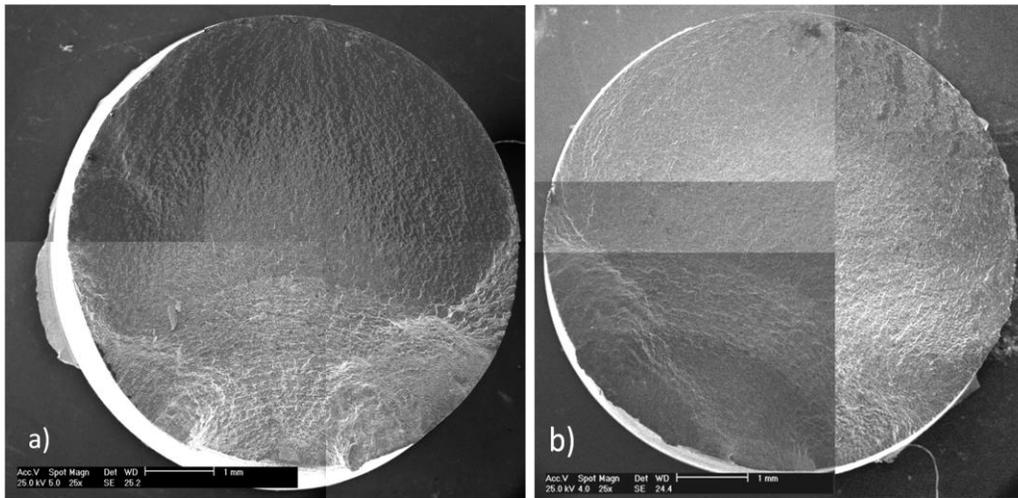


Figura N° 3.3. Vista general del área de fractura del conjunto sustrato recubrimiento ensayado a fatiga al aire sometido a un esfuerzo de 560 MPa (a) y a un esfuerzo de 580MPa b)

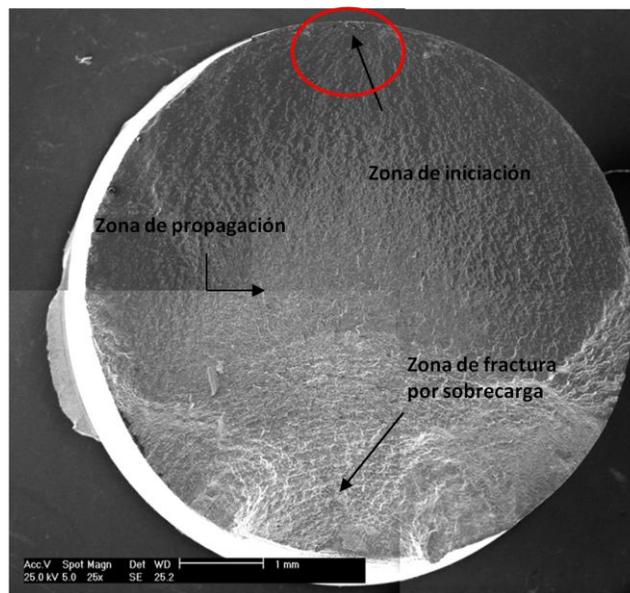


Figura N° 3.4. Vista general del área de fractura del conjunto sustrato recubrimiento ensayado a fatiga al aire, sometido a un esfuerzo de 560 MPa. La probeta falló después de 493.300 ciclos. Aspecto general de la superficie que muestra la existencia de una sola grieta dominante

En la Figura N° 3.4, se observa con mayor claridad la zona de inicio de la grieta dominante, cuya localización la determinan las marcas radiales que convergen en dicho punto. Luego se observa una zona de propagación estable de la grieta, de superficie relativamente lisa y finalmente la zona de falla por sobre carga, caracterizada por una superficie rugosa asociada a la deformación plástica del material, lo que a nivel microscópico se traduce en la presencia de microcavidades. En la Figura N° 3.5, se observa con mayor detalle la zona de iniciación de la grieta, ilustrando la delaminación parcial del recubrimiento en la periferia de la muestra.

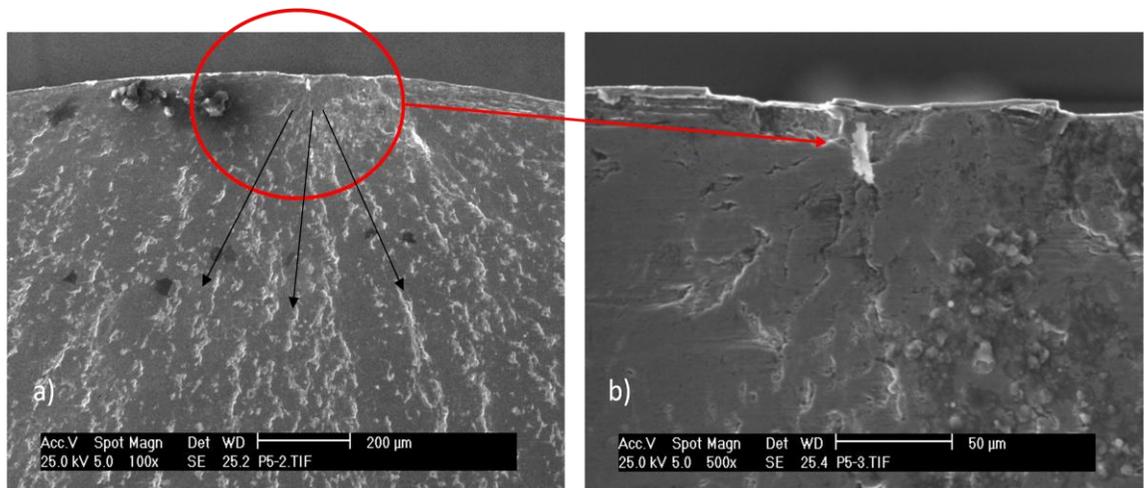


Figura N° 3.5. Vista ampliada de la zona de iniciación de grieta y su dirección de propagación a) y detalle de la apertura del sitio de grieta b).

Particularmente, en la figura N° 3.5a, se presenta una vista más cercana del sitio de iniciación de grieta, el cual se determina a partir de la convergencia de las marcas radiales. Las flechas negras dibujadas sobre la fotomicrografía indican la dirección de propagación de la grieta dominante. Analizando a un mayor aumento la zona de origen de la grieta, tal como se muestra en la figura N° 3.4b, es posible observar con mayor detalle la delaminación parcial del recubrimiento en el borde externo de la probeta.

La figura N° 3.6 muestra la superficie de fractura de una muestra ensayada a fatiga a un esfuerzo alternante de 580 MPa, el cual es el nivel de esfuerzo más alto al que se realizaron los ensayos. En ella se aprecia una morfología característica, tal como se discutió en el espécimen anterior y de manera similar se observa la existencia de una grieta dominante. La comparación de las fotomicrografías de las muestras ensayadas a altos y bajos niveles de esfuerzos indica que para esfuerzos elevados la zona de propagación de grieta es relativamente menor, tal como cabría esperar.

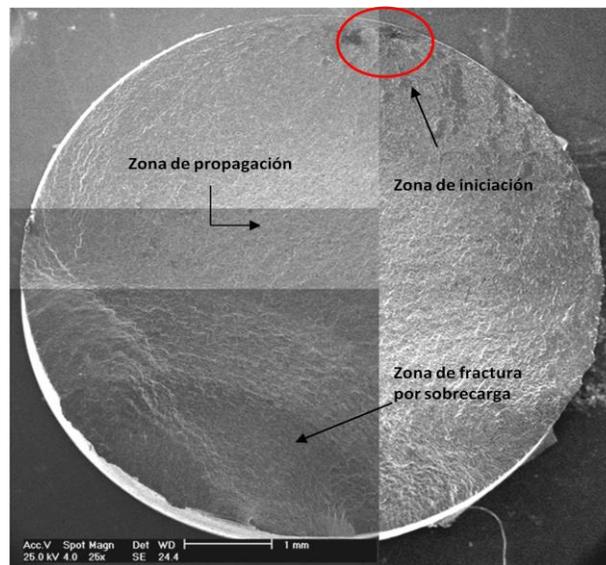


Figura N° 3.6. Vista general del área de fractura del conjunto sustrato recubrimiento ensayado a fatiga al aire, sometido a un esfuerzo de 580 MPa. La falla ocurrió después de 2.099.200 ciclos de aplicación de carga.

De igual forma, en la figura N° 3.7a, se muestra el sitio de iniciación de grieta y las direcciones de propagación de la grieta dominante, se muestran señaladas por las flechas dibujadas sobre la fotomicrografía. Analizando a un mayor aumento la zona de origen de la grieta, tal como se muestra en la figura N° 3.7b, es posible observar con mayor detalle las características de dicho punto. Es importante destacar la presencia de un posible defecto en el material base, en la zona de nucleación, de donde se puede inferir que este ha actuado como un concentrador de esfuerzos para facilitar el avance de la grieta.

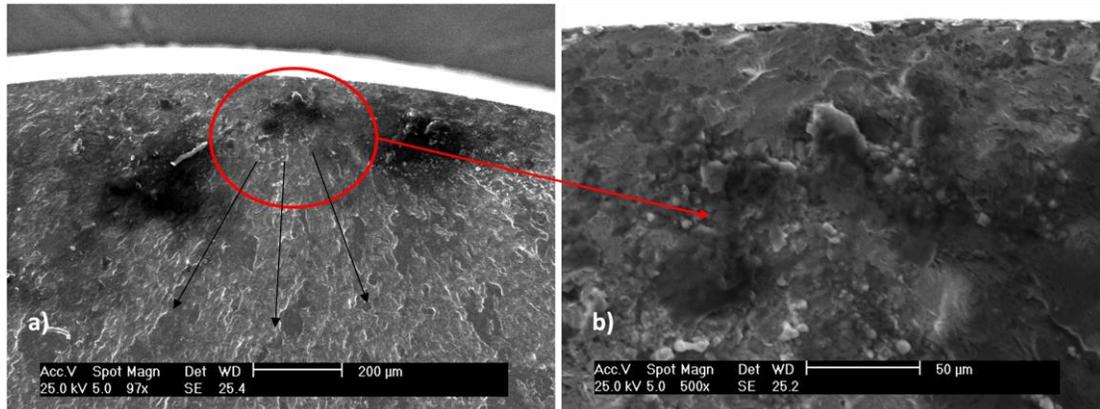


Figura N° 3.7. (a) Vista ampliada de la zona de iniciación de la grieta y su dirección de propagación. (b) Detalle de la zona de inicio de la grieta.

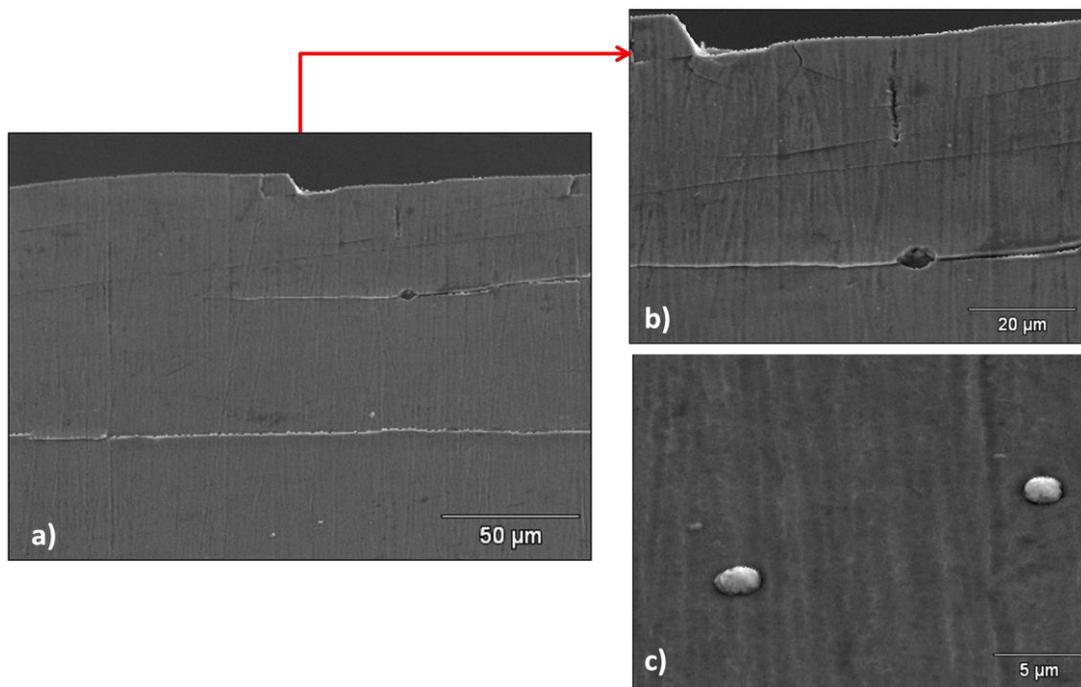


Figura N° 3.8. (a) Vista de la pared del recubrimiento cercana al sitio de iniciación, 600X. (b) Detalle de las grietas circunferenciales, 1500X y (c) Detalle de defectos en la superficie, 5000X.

En la Figura N° 3.8, se muestra una vista lateral de la pared del recubrimiento donde se ilustra la formación de grietas circunferenciales de fatiga que están asociados a ciertos defectos en la superficie, como se puede observar en la figura N°

3.8.b . En el detalle N° 3.8.c, se logra observar la existencia de partículas sin reaccionar, las cuales se manifiestan de manera extensa sobre lo pared del recubrimiento, y son posibles defectos asociados al proceso de deposición.

Fatiga (probetas con recubrimiento, vista longitudinal)

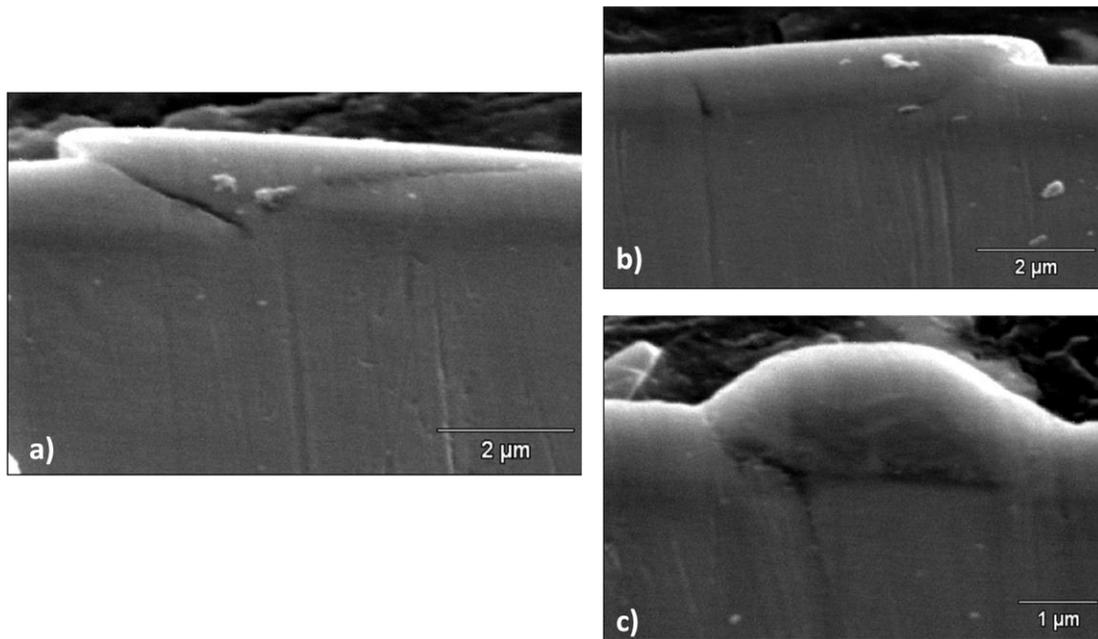


Figura N° 3.9. Vista longitudinal de una muestra ensayada a fatiga al aire, sometido a un esfuerzo de 560 MPa, la cual falló después de 493.300 ciclos. (a) 15.000X, (b) 15.000X y (c) 20.000X

En las Figuras N° 3.9.a, b y c, se ilustra la existencia de grietas que fracturan el recubrimiento formando un ángulo agudo con la intercara, así como grietas que se forman en la intercara misma. Esto caracteriza el tipo de daño por fatiga: grietas que se propagan desde la superficie exterior del recubrimiento y grietas que se forma en la intercara. Sin embargo, estas últimas tienen una orientación menos favorable para su crecimiento, con respecto a la dirección de aplicación de la carga alternante de tracción, ya que la orientación más favorable serían aquellas grietas perpendiculares al recubrimiento y en menor grado aquellas que forman un ángulo agudo con la intercara.

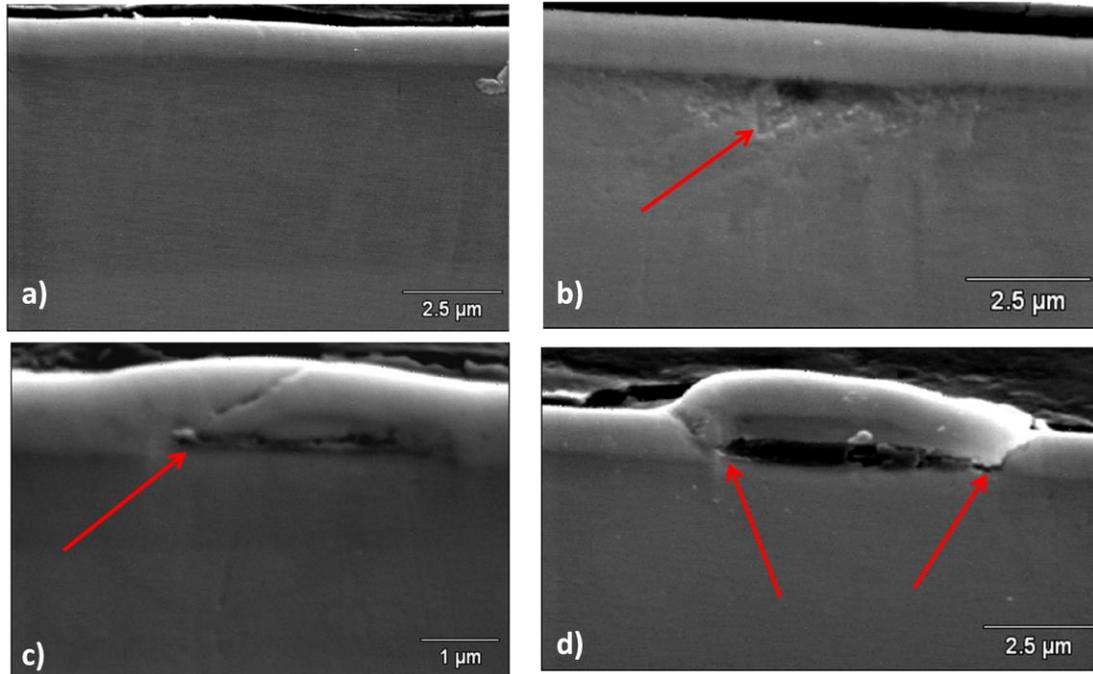


Figura N° 3.10. Vista longitudinal de una muestra ensayada a fatiga al aire, sometido a un esfuerzo de 550 MPa y un ciclaje de 5.000.000.(a) 10.000X, (b) 10.000X, (c) 20.000X y (d) 10.000X

En la Figura N° 3.10.a, se muestra claramente el espesor del recubrimiento, el cual fue medido en aproximadamente 1 micra, así como la regularidad que mantiene la intercara, al menos en esta región. En las Figuras N° 3.10.b, c y d, se ilustra la formación de grietas debajo del recubrimiento, cerca de la intercara, lo que demuestra que el daño por fatiga no solamente se origina a partir de grietas que se forman en la superficie del recubrimiento sino también por debajo de este, generando un abultamiento del recubrimiento o su delaminación parcial.

Tracción Uniaxial (probetas de tracción post-fatiga)

En la figura N° 3.11.a se observa la vista superior de la superficie de fractura de la probeta ensayada a tracción luego de ser ensayada a fatiga. La imagen revela una superficie altamente irregular, característica de la ocurrencia de una deformación plástica extensa, en concordancia con la disminución del área de la sección transversal de la probeta. En la figura 3.11b, se notan con detalle los microhoyuelos característicos de la fractura dúctil del material.

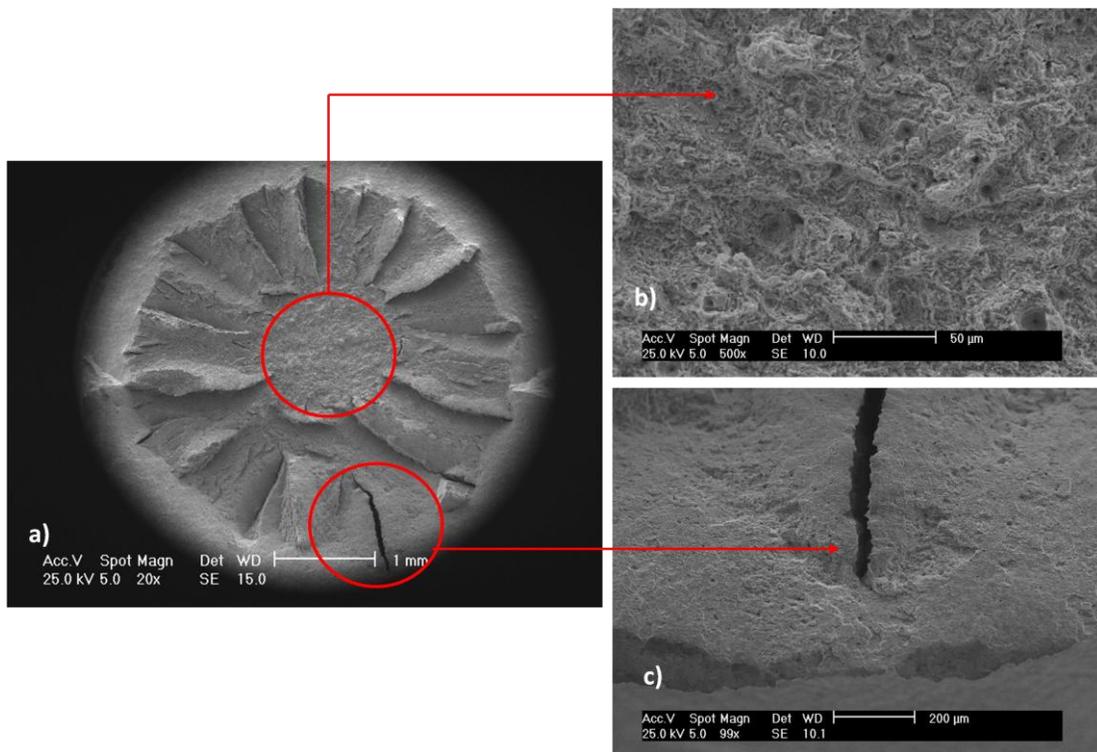


Figura N° 3.11. (a) Vista general de la probeta ensayada a tracción luego de ser ensayada a fatiga a un esfuerzo de 520 MPa y ciclaje de 5.000.000. (b)Detalle de la zona central (c) Detalle de una grieta presente en la misma.

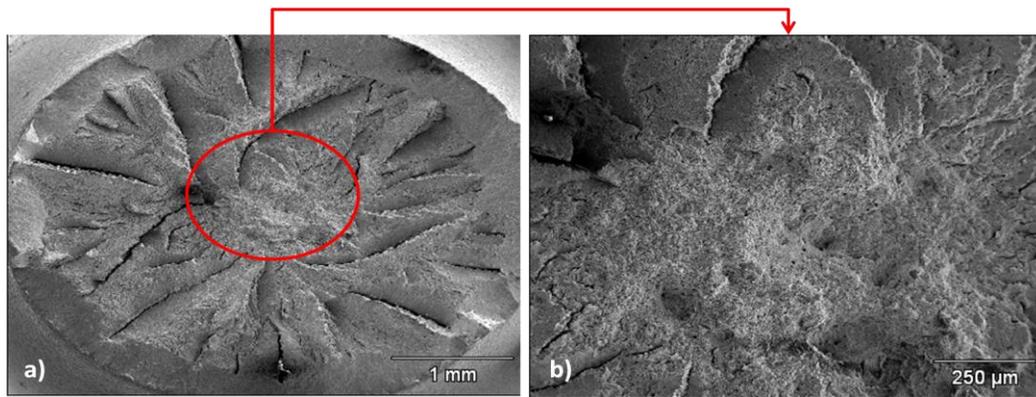


Figura N° 3.12. (a) Vista general de la probeta ensayada a tracción luego de ser ensayada a fatiga a un esfuerzo de 540 MPa y ciclaje de 5.000.000.(30X), (b) Detalle de la zona central (100X)

La figura N° 3.12, presenta una morfología similar a la anterior con presencia de microhoyuelos en la zona central. Sin embargo, vale la pena destacar que esta morfología no se corresponde exactamente a la típica superficie de fractura de tracción reportada por la literatura, ya que se ensayó una probeta de radio continuo no estandarizada, empleada para los ensayos de fatiga, en lugar de utilizar una muestra estandarizada de tracción con sección transversal constante, en la sección calibrada de la misma.

La figura N° 3.13, evidencia el estado de esfuerzo para un probeta de radio continuo cuando es ensayada en tracción uniaxial, en la que además del esfuerzo axial se generan un esfuerzo circunferencial o diametral y un esfuerzo radial, transformando el estado uniaxial en un estado triaxial. La existencia de este estado triaxial de tensiones es lo que explicaría la forma tan peculiar de la superficie de fractura de las probetas de fatiga ensayadas en tracción. Esto de alguna manera cuestiona la comparación de los valores de esfuerzo de fluencia obtenidos en estos ensayos con aquellos reportados en la literatura, ya que los de la literatura se obtuvieron con probetas de tracción estandarizadas, mientras que estos se obtuvieron con probetas de fatiga.

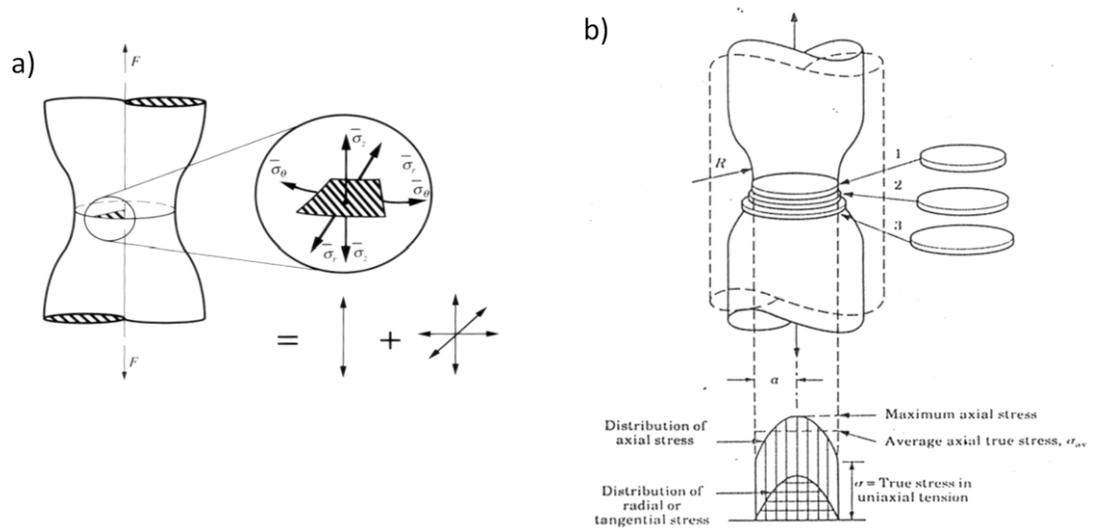


Figura N° 3.13. (a) Estado de esfuerzo para una probeta de radio continuo, (b) Gráfico esquemático que ilustra la variación de los esfuerzos a través de la sección transversal de la muestra.

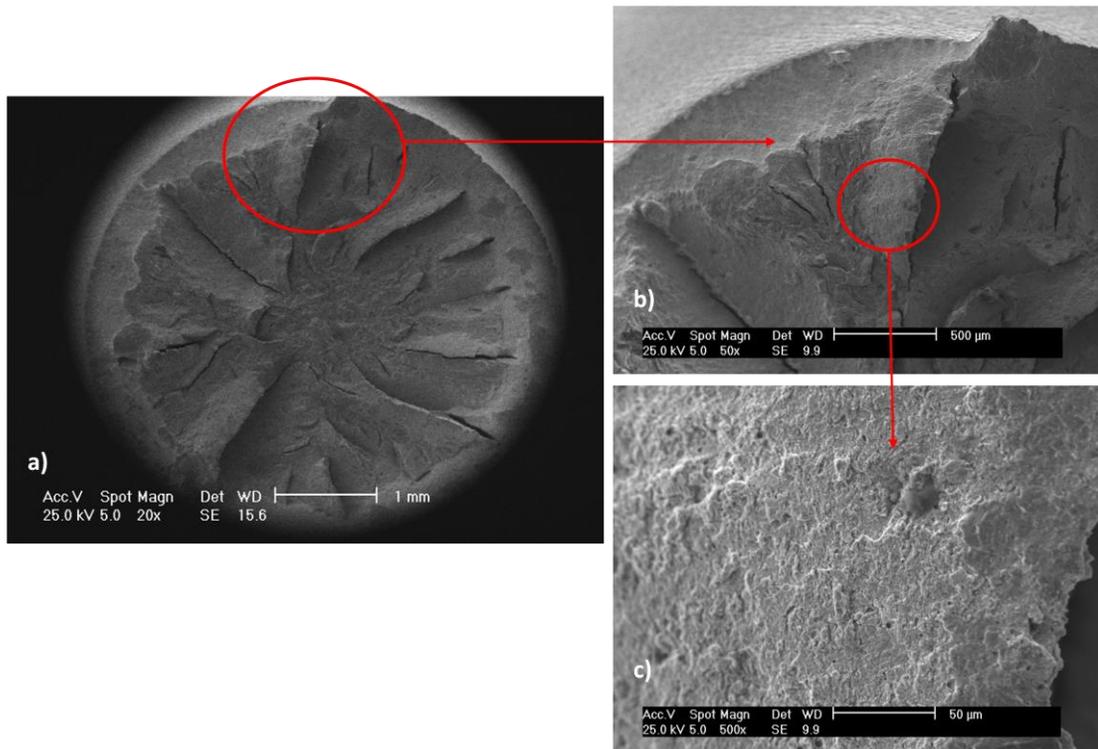


Figura N° 3.14. (a) Vista general de la probeta ensayada a tracción luego de ser ensayada a fatiga a un esfuerzo de 560 MPa y ciclaje de 5.000.000. (b)Detalle de la zona (c) Detalle de la zona

En la figura N° 3.14a se observa la vista superior de la superficie de fractura de otra probeta ensayada a tracción luego de ser ensayada a fatiga, la cual presenta una morfología similar a la anterior. La muestra recubierta sufre una deformación plástica extensa, como lo demuestra la presencia de un gran número de hoyuelos y grandes cavidades en la superficie. En la figuras N° 3.14b y c, se observa en detalle una de las crestas de la superficie de fractura y la posible presencia de facetas planas, indicativas del daño por fatiga producto del alto ciclaje acumulado en la muestra ensayada.

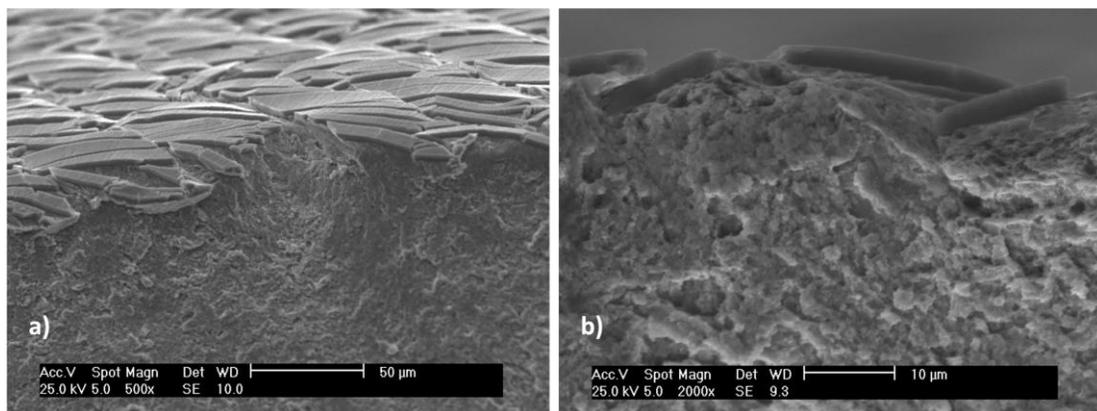


Figura N° 3.15. (a) Detalle del borde de la superficie de la fractura que ilustra que la película se ha mantenido bien adherida al sustrato después de la deformación. (b) Detalle de la zona

La figura N° 3.15 ilustra una vista detallada del borde de la superficie de fractura, donde se puede apreciar que incluso después de la deformación plástica de la probeta, el revestimiento se mantiene bien adherido al sustrato, aunque debido a su carencia de ductilidad se ha fracturado extensamente, produciendo una forma de tejido entrelazado. Es evidente que el recubrimiento no es capaz de deformarse plásticamente en la misma medida del sustrato y por lo tanto no puede acompañar a este último en su deformación.

Por último, se presenta un detalle de la intercara sustrato-recubrimiento cercano a la zona de fractura, mostrándose la deformación del mismo y la adherencia al sustrato, lo que produce la forma de tejido que se indicó anteriormente.

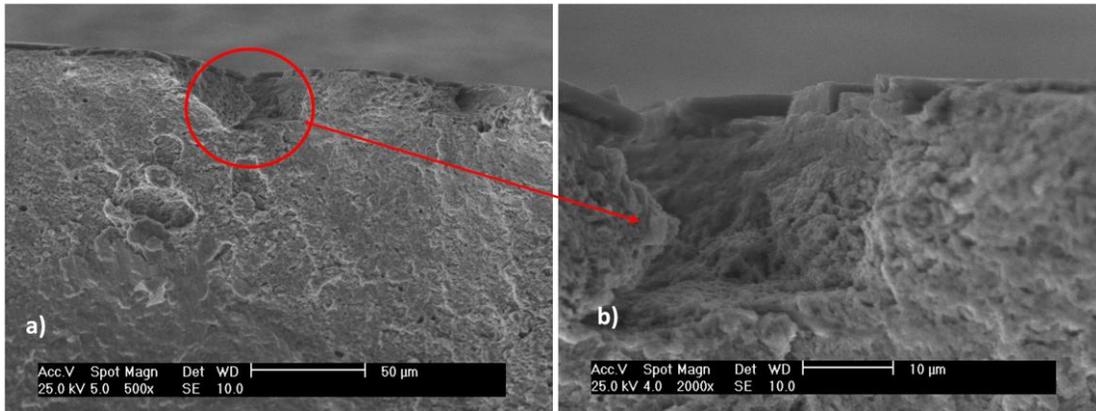


Figura N° 3.16. (a) Detalle del borde de la superficie de la fractura que ilustra un avance de grieta (b) Detalle de la zona

De la figura N° 3.16, se observa una grieta existente en la pared del recubrimiento evidenciando el deterioro del material producto del esfuerzo cíclico.

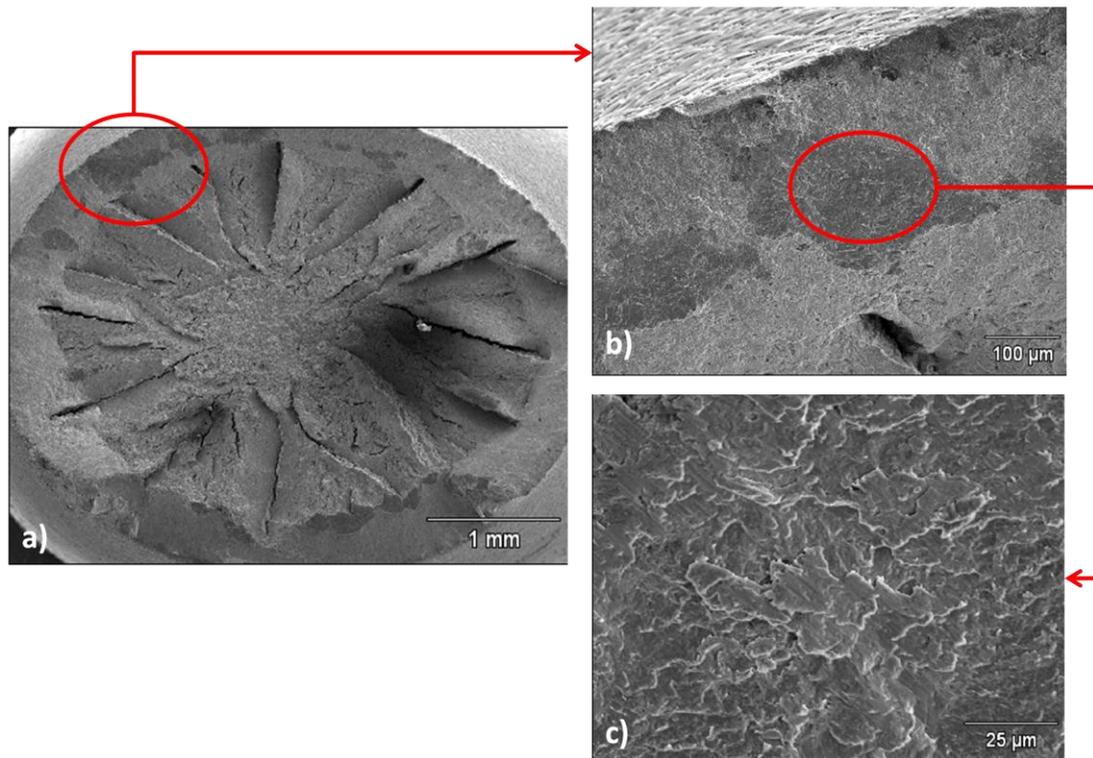


Figura N° 3.16. (a) Vista general de la probeta ensayada a tracción luego de ser ensayada a fatiga a un esfuerzo de 570 MPa y ciclaje de 5.000.000. (30X) (b) Detalle de la zona, 200X y (c) detalle de la zona, 1000X.

En la Figura N° 3.16.a, se presenta una morfología similar a las anteriores, pero a diferencia de las otras, en esta fotomicrografía se puede observar claramente que existen regiones de la superficie de fractura que poseen microhoyuelos y otras que no, tal y como se muestra en el detalle N°3.16.b. Las zonas que poseen microhoyuelos son características de una falla por fractura dúctil, mientras que las que no poseen microhoyuelos son características de áreas donde se formaron grietas de fatiga.

Sin embargo, es importante resaltar que estas grietas no alcanzaron un tamaño lo suficientemente grande para provocar su propagación, al menos a los niveles de esfuerzo alternante ensayados. Es decir, el factor de intensidad de esfuerzos en la punta de estas grietas es inferior a la tenacidad de fractura del acero y por ende las grietas no se propagan de manera catastrófica.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

1. El límite de fatiga para el acero AISI 4340 en condición de temple y revenido recubierto por una película de CrN estudiado en el presente trabajo es de 573 MPa, representando un aumento aparente de aproximadamente 2% con relación al del material sin recubrir. Dicho aumento pudiera estar asociado a la presencia de esfuerzos residuales compresivos elevados en el recubrimiento.
2. Producto del daño acumulado por fatiga pudiera haber tenido lugar una variación de propiedades estáticas, evidenciándose un incremento aparente del 13% en el esfuerzo de fluencia y una disminución aparente de 31% del esfuerzo real a carga máxima.
3. Las probetas ensayadas a fatiga y que no fallaron bajo condiciones de carga cíclica, alcanzando el nivel establecido de vida de 5.000.000 de ciclos, no presentan microgrietas superficiales visibles a observación sin aumento. Sin embargo mediante inspección en MEB se determinó que posiblemente hay presencia de facetas planas, lo que indicaría la existencia de grietas por fatiga dentro del material.
4. El estudio fractográfico de las superficies de fractura del acero recubierto mostró que la película de CrN se mantiene bien adherida al substrato, pero tiende a agrietarse severamente cuando el metal base se deforma plásticamente, lo que refleja su carencia de ductilidad. Igualmente, se observó que aparentemente las grietas se forman en la superficie libre del recubrimiento, posiblemente asociadas a la presencia de defectos

superficiales, así como también por debajo de este y en la intercara substrato recubrimiento.

5. En el caso de las probetas de fatiga que alcanzaron 5 millones de ciclos y fueron ensayadas a tracción, en la zona de fractura se determinó la presencia de microhoyuelos, característicos de la deformación plástica del material, así como la posible existencia de facetas planas, lo que demostraría el daño acumulado durante la aplicación de la carga cíclica.

4.2. RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio de vida y resistencia a la fatiga del conjunto substrato recubrimiento tanto al aire como a corrosión para flexión rotativa, de manera de poder evaluar las características del recubrimiento bajo estas condiciones.
2. Realizar un estudio previo al de fatiga de las propiedades estáticas del conjunto substrato recubrimiento, de manera de poder realizar una comparación real entre los resultados.
3. Realizar un estudio de las propiedades tribológicas del conjunto substrato recubrimiento, para determinar la influencia del recubrimiento en el comportamiento del acero bajo las condiciones de abrasión y desgaste.
4. Realizar el estudio del conjunto bajo otras modalidades de fatiga, como lo es la fatiga por flexión plana y fatiga por carga axial, de manera de poder evaluar las características del recubrimiento para otras condiciones de fatiga.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GARCÍA, F., PÉREZ, E. (2009) “Estudio del comportamiento a la fatiga a Corrosión de un acero estructural Recubierto por una película pseudo Cerámica obtenida por un proceso de Deposición física en fase vapor asistido por Plasma”, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Caracas.

- [2] FLINN, R. A.; TROJAN, P. K., “Materiales de ingeniería y sus aplicaciones”. Editorial Mc GRAW-Hill. Bogotá. 1989.

- [3] ASM HANDBOOK “Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys”, Volume 1, 1997. Estados Unidos de América.

- [4] MANGONON, P. (2001) “Ciencia de materiales: Selección y Diseño” Prentice Hall, México. pp 588

- [5] GÓMEZ, M. (2005) “Caracterización de las Propiedades Tribológicas de los Recubrimientos Duros” Tesis Doctoral. Inédito Universitat de Barcelona, España.

- [6] MORENO, CABEZAS. (2004) “Estudio de Fatiga y Fatiga Corrosión del Acero AISI 4340 con recubrimiento de TiCN empleando la técnica de PVD”. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- [7] RODRIGO, A. (2004) “Procesamiento de Materiales por Plasma, Departamento de Materiales, Comisión Nacional de Energía Atómico”, Buenos Aires: 20-56.

- [8] PAIVA, CORSI (2003) “Influencia sobre el Comportamiento a la Fatiga-Corrosión en Depósitos del Tipo Multicapa sobre Aceros Estructurales del Tipo AISI 4340”. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [9] BARAGETTI, S., LA VECCHIA, G.M., TERRANOVA, A (2003) “Fatigue behavior and FEM modeling of thin-coated components”, International Journal of Fatigue. N° 25. 1229–1238.
- [10] CRISTOBAL, A., CONDE, A., RODRIGUEZ, R. (2006) “Estudio para la recuperación de herramientas recubiertas con nitruro de cromo mediante ensayos galvanostáticos”, Revista de Metalurgia, Vol 42, N° 2, Marzo-Abril. 121-127.
- [11] [http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php?site=BALZERS EN balinit cni](http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php?site=BALZERS_EN_balinit_cni)
[consultado: 2010, marzo 20]
- [12] LOUSA, A., ROMERO, J., MARTINEZ, E. (2003) “Recubrimientos Multicapa Cr/CrN para aplicaciones mecánicas obtenidos por PVD”, IX Congreso Nacional de Tratamientos Térmicos y de Superficie TRATERMAT, San Sebastián.
- [13] ÁLVAREZ, P., HERNÁNDEZ, R. (2007). “Estudio del Comportamiento a la Fatiga y a la Fatiga Corrosión de un Acero Estructural AISI 4340 Recubierto por una Película de Diamante Policristalino Sintético”. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- [14] ASM METALS HANDBOOK, "Failure Analysis and Prevention". Vol 10. 8th edition. 1975. Estados Unidos de América.
- [15] ASTM E 206-72. "Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data". 1979. Estados Unidos de América.
- [16] ASM Handbook, "Failure Analysis and Prevention". Vol 10. 9na.edición. 1985. Estados Unidos de América.
- [17] BUDYNAS, R.; NISBETT, J. (2008) "Diseño en ingeniería mecánica de Shigley". 8ª ed. México: Editorial McGraw-Hill.
- [18] MACHADO, J.; DA SILVA, J. (2009) "Estudio del comportamiento a la fatiga de un acero estructural AISI 4340 con un recubrimiento nanoestructurado obtenido por PAPVD", Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Caracas
- [19] MIRAVETE. A. (2003) "Materiales Compuestos", Vol. II, Reverte, España. pp 523-24.
- [20] ASTM A 370 "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products". 2003. Estados Unidos de América.
- [21] CALLISTER, W. (2004) "Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales". Barcelona, España: Reverté.
- [22] BERCHEM, K.; HOCKING, M.G. (2007) "The Influence of Pre-Straining on the High Cycle Fatigue Performance of Two Hot-Dip Galvanised Cr Body Steels" Materials Characterization. Vol. 58, pp 593-602.

- [23] HANAOKI, S.; YAMASHITA, M.; UCHIDA, H.; ZAKO, M. (2008) "On Stochastic Evaluation of S-N Data Base on Fatigue Strength Distribution" Materials Science & Technology 2008 Conference and Exhibition, pp 762-770.
- [24] STEPHENS, R. ET AL (2000) "Metal fatigue in engineering". Nueva York: Wiley- IEEE.
- [25] ASKELAND, D Y PHULE, P. (2004) "Ciencia e ingeniería de los materiales". 4ta ed. México: Thomson International.
- [26] AVILES, R (2005) "Análisis de fatiga en máquinas". México: Thomson.
- [27] SCHLUND, P. KINDERMANN, P. SOCKEL, H-G. SCHLEINKOFER, U. HEINRICH, W. GORTING, K. (1999) "Mechanical Behaviour Of PVD- And CVD-Coated Hard Metals Under Cyclic Loads", International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials; Vol. 17, pp 193-199
- [28] BARAGETTI, S., LA VECCHIA, G.M., TERRANOVA, A., "Variables affecting the fatigue resistance of PVD-coated components", International Journal of Fatigue; Vol 27, 2005, pp.1541-1550.
- [29] PUCHI-CABRERA, E.S., ET AL, "Fatigue properties of a SAE 4340 steel coated with TiCN by PAPVD", International Journal of Fatigue; Vol 29, 2007, pp.471-480.
- [30] LI CHEN. WANG S.Q. ZHOU, S.Z.JIA LI.ZHANG, Y.Z. (2008) "Microstructure And Mechanical Properties Of Ti(C,N) and TiN/Ti (C, N) multilayer PVD Coatings", International Journal Of Refractory Metals & Hard Materials; Vol. 26, Pp 456-460.

- [31] ASTM E-606 “Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing”, 2004. Estados Unidos de América.