

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA Y A LA FATIGA CORROSIÓN EN UN ACERO ESTRUCTURAL DEL TIPO AISI 4340 CON UN RECUBRIMIENTO MULTICAPA BASE-ALCr.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Santeliz V, Fabiana M.
Espinoza G, Ricardo A.
Para optar al Título
de Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA Y A LA FATIGA CORROSIÓN EN UN ACERO ESTRUCTURAL DEL TIPO AISI 4340 CON UN RECUBRIMIENTO MULTICAPA BASE-AlCr.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Crisanto Villalobos

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Santeliz V, Fabiana M.
Espinoza G, Ricardo A.
Para optar al Título
de Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2008

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Fabiana M. Santeliz V. y Ricardo A. Espinoza G., titulado:

“Estudio sobre el comportamiento a la fatiga y a la fatiga corrosión en un acero estructural del tipo AISI 4340 con un recubrimiento multicapa base- AlCr”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores.



Prof. José Chitty

Jurado



Prof. Maria de Prato.

Jurado



Prof. Crisanto Villalobos

Tutor Académico



Los suscritos, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres **FABIANA SANTELIZ**, Cédula de Identidad N° V.- 17.364.093 y **RICARDO ESPINOZA**, Cédula de Identidad N° V.- 17.058.605 y lleva por título:

“Estudio sobre el Comportamiento a la Fatiga y a la Fatiga-Corrosión en un Acero Estructural del tipo AISI 4340 con un recubrimiento multicapa AlCr-Base”

Decidimos otorgarle:

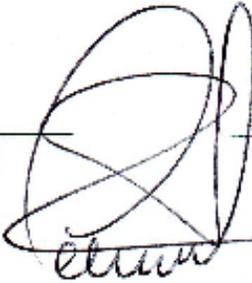
MENCION HONORIFICA

En reconocimiento al esfuerzo realizado y estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración de este Trabajo Especial de Grado, el cual constituye un aporte importante.

En fe de lo cual, se levanta la presente Acta en la ciudad de Caracas, a los veintidós días del mes de mayo del año dos mil ocho, dejando constancia que de acuerdo a la normativa vigente, actuó como Coordinador del Jurado Examinador el Prof. Crisanto Villalobos.


Prof. María de los A. Rodríguez
Jurado


Prof. José Chitty
Jurado


Prof. Crisanto Villalobos
Tutor-Coordinador



AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarnos en el camino hacia el éxito, durante toda la carrera.

A nuestros padres, por darnos el apoyo y estar siempre ahí en todos los momentos.

A la Universidad Central de Venezuela.

Al gremio de profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por darnos todos los conocimientos necesarios para la realización de este trabajo.

Al Prof. Crisanto Villalobos, por guiarnos como tutor en la realización de este proyecto de investigación y por su apoyo incondicional ante todas las adversidades.

Al Fonacit S1-2000000640, por el financiamiento de los gastos del proyecto.

A todos nuestros compañeros que de una u otra manera estuvieron relacionados y colaboraron en la ejecución de este proyecto.

Santeliz V, Fabiana M., Espinoza G, Ricardo A.

ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA Y A LA FATIGA CORROSIÓN EN UN ACERO ESTRUCTURAL DEL TIPO AISI 4340 CON UN RECUBRIMIENTO MULTICAPA BASE-AlCr.

Tutor Académico: Prof. Crisanto Villalobos. Tesis, Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2008. Número de Pag: 84

Palabras claves: Acero AISI 4340. Recubrimiento base-AlCr. PAPVD. Fatiga. Fatiga Corrosión.

Se estudió el comportamiento a la fatiga, en aire y fatiga corrosión en una solución de NaCl al 3%, de un acero AISI 4340 templado y revenido recubierto con una película de base-AlCr de 1 μm de espesor, depositado por deposición física en fase de vapor asistida por plasma (PAPVD). Los resultados que se obtuvieron demostraron que la presencia de la capa proporciona un aumento significativo, entre 169%, en la vida a la fatiga, en comparación con el sustrato sin recubrimiento. También se demostró que cuando el material se ensaya con una solución de NaCl existe un incremento del 90% en el número de ciclos observado para que falle, lo que sugiere que el conjunto es susceptible al efecto corrosivo de la solución bajo acción combinada de la carga cíclica. El incremento en el número de ciclos para que ocurra la falla en aire se puede explicar en términos de la alta resistencia mecánica de la película, de su estado de esfuerzos residuales compresivos y de su excelente adherencia al sustrato. Se observó que la nucleación de las grietas por fatiga en la superficie del recubrimiento se genera en los poros presentes en la película, los cuales son producto del proceso de síntesis de la misma, y su propagación de forma normal a la interfaz sustrato-recubrimiento.

INDICE GENERAL

	Pág.
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS	viii
INTRODUCCIÓN	2
CAPITULO I	
MARCO TEÓRICO	3
1.1 Aceros de Media y Micro Aleación	4
1.1.1 Clasificación de los Aceros	4
1.1.2 Composición Química del Acero AISI 4340	6
1.1.3 Propiedades del Acero AISI 4340	6
1.2 Fatiga	7
1.2.1 Tipos de Esfuerzo en Fatiga	9
1.2.2 Característica de las Fracturas por Fatiga	11
1.2.3 Curvas S-N (Curvas de Wöhler)	12
1.2.4 Resistencia a la Fatiga (Modelo de Weibull)	14
1.2.5 Resistencia a la Fatiga (Modelo de Basquin)	15
1.2.6 Dispersión de los Resultados de los Ensayos de Fatiga	15
1.3 Factores que Afectan la Vida a la Fatiga	16
1.3.1 Factores de Forma y Dimensiones de las Piezas	16
1.3.2 Factor de Carga	17
1.3.3 Factor de Concentración de Tensiones	17
1.3.4 Factores Microestructurales y Tratamientos Térmicos	19
1.3.5 Factores de Temperatura	20
1.3.6 Efecto de la Corrosión	20
1.3.7 Factor de Superficie	24
1.3.7.1 Recubrimientos	25
1.3.7.2 Esfuerzos Residuales	27
1.3.7.3 Procesamiento por Plasma	34
1.3.7.4 Técnicas de Procesamiento por Plasma	35

INDICE

CAPITULO II	40
METODOLOGÍA	
2.1 Calibración de la Máquina de Fatiga por Flexión Rotativa	41
2.2 Material Base	42
2.3 Dimensionamiento y Maquinado de las Probetas	43
2.4 Deposición del Recubrimiento	45
2.5 Ensayo de Tracción	46
2.6 Ensayo de Fatiga	48
2.7 Ensayo de Dureza	51
2.8 Ensayo de la Calota Esférica	52
2.9 Análisis Fractográfico	54
CAPITULO III	
RESULTADOS Y ANALISIS	56
3.1 Caracterización Preliminar	57
3.2 Ensayos de Fatiga	59
3.3 Microscopia Electrónica de Barrido	72
CAPITULO IV	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
4.1 Conclusiones	78
4.2 Recomendaciones	80
BIBLIOGRAFÍA	82

INDICE DE TABLAS

	Pág.
CAPITULO I	
MARCO TEÓRICO	3
Tabla 1.1. Intervalos de composición química del acaro 4340 en % en peso.	6
Tabla 1.2. Propiedades Mecánicas del 4340 según el tratamiento térmico.	7
CAPITULO II	
METODOLOGÍA	40
Tabla 2.1. Composición química del AISI 4340 en % en peso.	42
Tabla 2.2. Propiedades del recubrimiento Base AlCr.	45
Tabla 2.3. Cantidad y Tipo de Probetas utilizadas.	46
CAPITULO III	
RESULTADOS Y ANALISIS	56
Tabla 3.1. Ensayos de dureza sobre el Acero AISI 4340.	58
Tabla 3.2. Ensayos de dureza sobre el Acero AISI 4340 + AlCr.	58
Tabla 3.3. Ensayos de Tracción para Acero AISI 4340 y 4340 + AlCr	59
Tabla 3.4. Resultado de los ensayos de fatiga al aire AISI 4340 sin recubrimiento.	60
Tabla 3.5. Resultado de los ensayos de fatiga al aire AISI 4340 con recubrimiento.	60
Tabla 3.6. Resultado de los ensayos de fatiga corrosión AISI 4340 sin recubrimiento.	61
Tabla 3.7. Resultado de los ensayos de fatiga corrosión AISI 4340 con recubrimiento.	61

INDICE

Tabla 3.8. Parámetros de la ecuación de Basquin para el acero AISI 4340 sin recubrimiento en fatiga al aire.	66
Tabla 3.9. Parámetros de la ecuación de Basquin para el acero AISI 4340 con recubrimiento en fatiga al aire.	66
Tabla 3.10. Parámetros de la ecuación de Basquin para el acero AISI 4340 sin recubrimiento en fatiga corrosión.	66
Tabla 3.11. Parámetros de la ecuación de Basquin para el acero AISI 4340 con recubrimiento en fatiga corrosión.	67
Tabla 3.12. Parámetros de la ecuación de Weibull para el acero AISI 4340 sin recubrimiento en fatiga al aire.	68
Tabla 3.13. Parámetros de la ecuación de Weibull para el acero AISI 4340 con recubrimiento en fatiga al aire.	69
Tabla 3.14. Parámetros de la ecuación de Weibull para el acero AISI 4340 sin recubrimiento en fatiga corrosión.	70
Tabla 3.15. Parámetros de la ecuación de Weibull para el acero AISI 4340 con recubrimiento en fatiga corrosión.	71

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
CAPITULO I	
MARCO TEÓRICO	3
Fig. 1.1. Variación de la tensión en las cargas por fatiga.	10
Fig. 1.2. (a) y (b) Característica de la superficie de falla típica de un metal dúctil sometido a carga cíclica	12
Fig. 1.3. Curva S-N para metal ferroso.	13
Fig. 1.4. Curva S-N para metales no ferrosos.	14
Fig. 1.5. Curvas con valores de Kt.	18
Fig. 1.6. Curva S-N que muestra como afecta el ambiente corrosivo a la resistencia a la fatiga.	23
Fig. 1.7. Variación de los esfuerzos intrínsecos con el momento normalizado.	30
Fig. 1.8. Deposición química en fase vapor.	36
Fig. 1.9. Esquema y detalle de una cámara de PVD.	38
Fig. 1.10. Procesamiento por técnica PAPVD Sputtering.	39
CAPITULO II	
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	40
Fig. 2.1. Maquina de Fatiga por Flexión Rotativa.	41
Fig. 2.2. Probeta de fatiga.	43
Fig. 2.3. Probeta de tracción.	44
Fig. 2.4. Especímenes	44
Fig. 2.5. Características del recubrimiento Base AlCr.	45
Fig. 2.6. Maquina Instron 8502.	47
Fig. 2.7. Maquina de Ensayo de Fatiga.	49
Fig. 2.8. Durómetro marca Leco.	51
Fig. 2.9. Plantilla de indentaciones para el ensayo de Microdureza.	52

Fig. 2.10. Equipo de Calotest.	53
Fig. 2.11. Esquema de la abrasión producida por la técnica Calotest.	54
Fig. 2.12. Microscópico Electrónico de Barrido.	55
CAPITULO III	
RESULTADOS Y ANALISIS	56
Fig. 3.1. Gráfica Dureza vs Carga.	58
Fig. 3.2. Curvas S-N para condiciones de Fatiga al aire.	62
Fig. 3.3. Curvas S-N para la condición de Fatiga Corrosión.	63
Fig. 3.4. Curvas S-N para todas las condiciones de ensayos y tipos de especímenes.	64
Fig. 3.5. Curva S-N por el modelo de Weibull para 4340 en fatiga al aire.	67
Fig. 3.6. Curva S-N por el modelo de Weibull para 4340 + AlCr en fatiga al aire.	68
Fig. 3.7. Curva S-N por el modelo de Weibull para 4340 en fatiga corrosión.	69
Fig. 3.8. Curva S-N por el modelo de Weibull para 4340 + AlCr en fatiga corrosión.	70
Fig. 3.9. (a) Vista general del conjunto substrato recubrimiento ensayado a un esfuerzo de 757MPa, en condiciones de fatiga al aire. (b) Detalle del punto de nucleación principal.	73
Fig. 3.10. (a) Vista general del conjunto substrato recubrimiento ensayado a un esfuerzo de 711MPa, en condiciones de fatiga al aire. (b) Detalle del punto de nucleación principal.	74
Fig. 3.11. (a) Vista de la superficie de fractura. (b) Detalle de las estriaciones por fatiga durante la propagación de la grieta.	75
Fig. 3.12. (a) Vista de la superficie de fractura y el recubrimiento. (b) Detalle de las grietas y los poros en el recubrimiento.	76

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una gran variedad de nuevos materiales y aleaciones, y a su vez se han desarrollado numerosas técnicas de recubrimientos superficiales para mejorar las propiedades mecánicas, como son la resistencia al desgaste, a la abrasión, a la corrosión, aumento de la dureza y otras propiedades de carácter superficial. Sin embargo en algunos casos estas técnicas afectan el comportamiento del material cuando se trabaja bajo la aplicación de cargas cíclicas.

El Acero AISI 4340 templado y revenido presenta un excelente comportamiento bajo la aplicación de cargas cíclicas. Razón por la cual el propósito de este proyecto es estudiar el comportamiento a la fatiga y a la fatiga bajo ambiente corrosivo de dicho acero recubierto con un depósito, aplicado por deposición física en fase de vapor asistido por plasma (PAPVD). El recubrimiento es fabricado por la empresa OERLIKON BALZERS, y su estructura es: base- AlCr.

La finalidad de aplicar este recubrimiento es mejorar las propiedades superficiales del conjunto sustrato-recubrimiento en condiciones donde se requiere resistencia al desgaste, a la abrasión entre otras, y a su vez sugerir otras aplicaciones para estas aleaciones.

Por lo tanto, tomando en consideración que la evaluación de las propiedades de fatiga y fatiga corrosión del conjunto sustrato recubrimiento constituye una cuestión de suma importancia en relación a la evaluación del comportamiento de cualquier sistema recubierto, este trabajo se basó en una comparación entre el comportamiento del conjunto sustrato recubrimiento y el sustrato. Este recubrimiento fue seleccionado para realizar esta investigación debido a su importancia en la industria de herramientas de corte, donde son requeridos materiales de alta resistencia al desgaste y bajo coeficiente de fricción.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1.1 Aceros de Media y Micro Aleación

Los aceros aleados son aquellos que además de contener elementos como: Carbono, Silicio y Manganeso, contienen en cantidades relativamente importantes, otros elementos como el Cromo, Níquel, Molibdeno, Vanadio, Tungsteno, Cobalto, Titanio, Zirconio, Selenio, Boro y Niobio, que ayudan a mejorar algunas de sus características fundamentales. La influencia que ejercen estos elementos es muy variada, y empleados en proporciones adecuadas, se logran aceros con características que no se podrían obtener de un acero ordinario al carbono.

Los aceros microaleados se desarrollaron para mejorar la resistencia a la fluencia, la tenacidad, la ductilidad, la formabilidad y la soldabilidad. Su desarrollo ha combinado conocimientos metalúrgicos que permiten el control de las microestructuras y propiedades mecánicas, ya que los elementos se adicionan en pequeñas cantidades y se usan para formar carburos y modificar las propiedades.

Con la adición de estos elementos aleantes, es más fácil la fabricación de piezas de gran espesor, con gran resistencia en su interior, aún cuando están sometidas a elevadas temperaturas, y obtener mejoras en la resistencia a la corrosión, resistencia a la abrasión y resistencia a la fatiga.

1.1.1 Clasificación de los Aceros

Las clasificaciones del acero se determinan en función de sus características, una de las más empleadas es la clasificación por el uso. Esta clasificación presenta subdivisiones o hace parte de otros grupos, como lo son:

a) *Aceros Estructurales*: se deriva de la aleación de hierro, carbono y pequeñas cantidades de elementos como el silicio, que le aportan características específicas. Entre las propiedades y cualidades que presenta este acero se encuentran su alta resistencia, soldabilidad y ductilidad, en condiciones normales. Cuando este acero es sometido a elevadas temperaturas, sus propiedades mecánicas fundamentales se ven gravemente afectadas.

b) *Aceros Inoxidables*: contienen Cromo y Níquel, además de otros elementos como el Molibdeno, que poseen gran afinidad por el Oxígeno y reaccionan con él, formando una capa pasivadora que evita la corrosión del hierro. Algunos de estos aceros son duros y resistentes, y son capaces de mantener esa resistencia por largo tiempo a altas temperaturas. Los aceros inoxidables son muy usados para las tuberías y tanques de refinerías de petróleo o plantas químicas, debido a su alta resistencia a la corrosión. También se usan para la fabricación de instrumentos, equipos quirúrgicos y para la sustitución de algunos huesos, ya que resisten a la acción de los fluidos corporales.

c) *Aceros de elementos de máquinas*: el contenido de carbono es superior a 0.30%, pero en ocasiones se usan para la fabricación de ciertas herramientas, en las que es necesario emplear aceros con mas bajo contenido de carbono (0.1% a 0.30%). Contienen Tungsteno, Molibdeno y otros elementos de aleación que le proporcionan gran dureza, resistencia al desgaste, tenacidad y durabilidad. Dentro de estos aceros se encuentra el AISI 4340, el cual es muy usado en la fabricación de elementos de máquina que requieren alta resistencia al impacto y una dureza superior, como lo son: ejes traseros de transmisión, mandriles y portaherramientas.

1.1.2 Composición Química del Acero AISI 4340

Los componentes químicos del acero AISI 4340 se muestran en la tabla 1.1 [1], haciéndose notar que el elemento que presenta en mayor cantidad es el níquel, aunque en general todos los elementos están entre el 1 y 2%.

Tabla 1.1. Intervalos de composición química del acero 4340 en % en peso.

AISI	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
4340	0,38 – 0,43	0,60 – 0,80	0,15 – 0,30	1,65 – 2,00	0,70 – 0,90	0,20 – 0,30

Este acero es capaz de conservar su dureza y su resistencia, aún estando a altas temperatura, debido al cromo, manganeso y molibdeno. La unión del níquel a los elementos mencionados, le brinda una mejor resistencia al desgaste de la superficie endurecida y una mayor ductilidad del núcleo; además de que aumenta la templabilidad del mismo. Las tensiones que se crean sobre él por la acción del cromo, níquel y molibdeno, pueden ser eliminadas al recocerlo a altas temperaturas.

1.1.3 Propiedades del Acero AISI 4340

Este tipo de acero es empleado en distintas aplicaciones e industrias, como por ejemplo en la industria aeronáutica, para crear estructuras rígidas como los ejes para las hélices, entre otros. En general es utilizado en elementos de máquinas que estén sometidos a grandes esfuerzos dinámicos.

El acero AISI 4340 presenta excelentes propiedades mecánicas, sin embargo es necesario aplicarle distintos tratamientos para darle nuevas propiedades o mejorar las que ya presenta. En la tabla 1.2 [2], se muestran las propiedades mecánicas de este acero, cuando es sometido a distintos tratamientos:

Tabla 1.2. Propiedades Mecánicas del 4340 según el tratamiento térmico

AISI 4340	Tratamiento Térmico			Propiedades Mecánicas				
	Tratamiento	Temp. (°C)	Medio Enfriam.	Resist. tracción MPa	Limite Elástico MPa	Alarga- miento (%)	Reducc. de área (%)	Dureza Brinell
Forja	850/1100	Ceniza	637/735	441	20	50	210/240	
Temple	820/860	Aceite	735/833	637	10	30	240/260	
Normalizado	850/870	Aire						
Recocido	690/720	Horno	882/1078	784	16	45	260/320	
Revenido	540/660							

1.2 Fatiga

Este fenómeno es definido de un modo más general por la norma ASTM como: “el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un punto del material sujeto a tensiones y deformaciones de amplitudes variables y que produce grietas que conducen a una fractura total luego de un cierto número de ciclos” (ASTM-1979).

La característica principal de este evento es la falta de deformación en la región donde ocurre la fractura, esto indica que al estar un material sometido a fatiga, no tendremos un indicio de un fallo inminente. Las grietas que se producen por la fatiga son por lo general finas, lo que dificulta su detección, y que al seguir aplicando la carga de manera repetitiva, hacen que aumenten de tamaño y produzcan la fractura del material. La mayoría de estas grietas se nuclean en las zonas donde hay discontinuidades en la superficie del material, ya que cualquier cambio en la sección produce una concentración de tensiones, estas concentraciones aumentan a medida que aumenta la curvatura en la superficie. La resistencia estática se ve muy poco afectada por estos cambios de sección, ya que las concentraciones de tensiones se liberan por deformación plástica. Sin

embargo, bajo cargas cíclicas, hay menos deformación plástica; en consecuencia, el valor del esfuerzo permanece considerablemente más alto en los concentradores de esfuerzo que en el material que lo circunda, dando por resultado una resistencia a la fatiga reducida [3].

En los ensayos de fatiga las probetas son sometidas a cargas cíclicas, hasta que se produce la fractura de las mismas. Sin embargo, hay algunos materiales que no presentan fallos después de un número específico de ciclos, y a esto se le conoce como límite de fatiga. Los aceros y en general todos los materiales ferrosos presentan un límite de fatiga, que depende de diversos factores como lo son: la composición química, la microestructura, los tratamientos térmicos, la rugosidad superficial y los recubrimientos entre otros. Específicamente en los aceros el comportamiento bajo cargas cíclicas se ve notablemente influenciado por el contenido de carbono, por los elementos aleantes y por la condición superficial, haciendo referencia específicamente a la colocación de recubrimientos duros, que en los últimos años han evolucionado en gran proporción, buscando incrementar propiedades mecánicas como la dureza, la resistencia a la abrasión, a la erosión y a la corrosión, sin afectar o mejorando el comportamiento a la fatiga de dichos aceros [4].

A pesar de todos los estudios y avances que se han hecho sobre la fatiga, esta no deja de ser un problema que puede afectar cualquier componente o parte que este en movimiento. Los automóviles en marcha, aeroplanos (principalmente las alas) en el aire, los barcos en alta mar que están sometidos constantemente al oleaje, reactores nucleares y turbinas bajo condiciones de temperatura variable (por ejemplo, esfuerzo cíclicos térmicos) y muchos otros ejemplos, son situaciones en donde el comportamiento a la fatiga de un material asume singular importancia [5].

1.2.1 Tipos de Esfuerzos en Fatiga

Los ensayos de fatiga proveen datos que son empleados para desarrollar criterios y tomar medidas en la prevención de fallas por fatiga. Estos ensayos son realizados bajo condiciones controladas, y para ello, se dispone de una amplia variedad de máquinas en las que se pueden adoptar diferentes métodos, desde los ensayos de laboratorio con probetas, bajo la más simple condición de esfuerzo, hasta los de escala natural de componentes y estructuras bajo condiciones simuladas de lo que ocurre en la práctica [3].

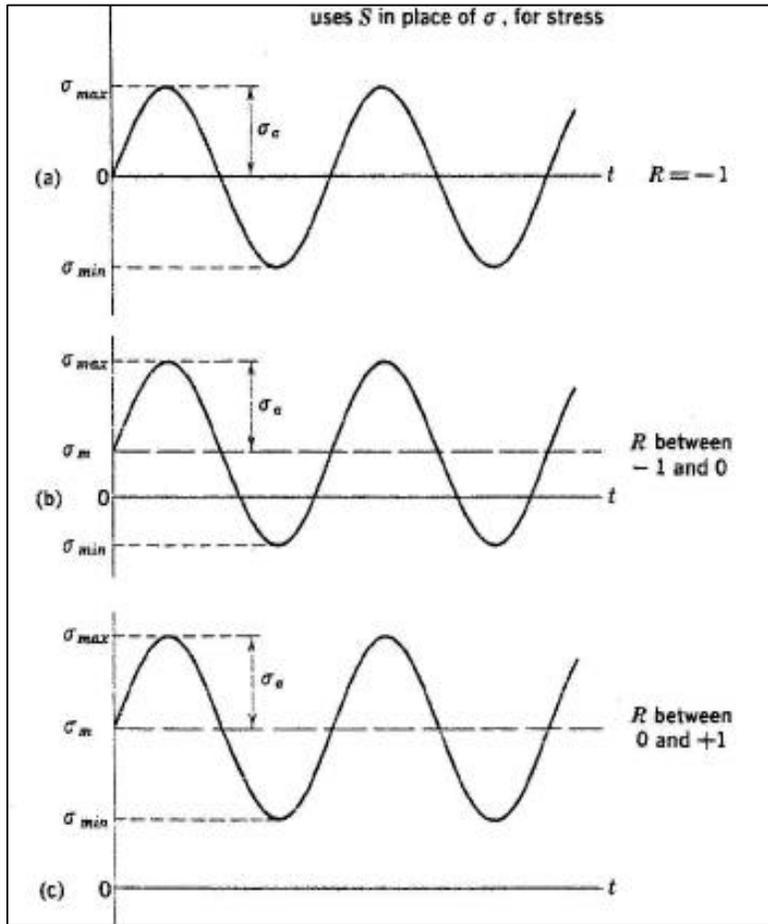
Para realizar cálculos de fallas por fatiga, es necesario conocer cuando se produce una variación de los esfuerzos a los que está sometida una fibra cualquiera de una pieza. La variación de los esfuerzos en función del tiempo, están expresados por una onda senoidal (ver Fig. 1.1), en donde se pueden definir algunos parámetros característicos del fenómeno de fatiga, como lo son: los esfuerzos máximos (σ_{\max}), mínimos (σ_{\min}), alternos (σ_a) y medios (σ_m), y que pueden definir las condiciones del esfuerzo al cual va a estar sometida la pieza, los cuales son:

a) Esfuerzos de inmersión completa: por lo general el esfuerzo medio se presenta con valor cero, y el intervalo de esfuerzo se produce en ambas direcciones, es decir, se llegan a producir esfuerzos de tracción y compresión, de igual magnitud pero con diferente dirección.

b) Esfuerzo tensión repetida: en este caso los valores del esfuerzo máximo y mínimo no son iguales y se producen en una sola dirección.

c) Esfuerzos de tensión pulsante: se producen cuando el esfuerzo mínimo es cero, y solo se producen incidencia de cargas a compresión o tracción.

c) *Esfuerzos irregulares o aleatorios*: ocurren cuando las frecuencias del esfuerzo no siguen un comportamiento senoidal y la distribución de los esfuerzos se presenta de forma desordenada o aleatoria. Donde R es la relación entre el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo, el cual afecta notoriamente la vida a la fatiga.



$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$
$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$
$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$

Fig. 1.1. Variación de la tensión en las cargas por fatiga.

1.2.2 Características de las Fracturas por Fatiga

Cuando un componente esta sometido a cargas cíclicas de suficiente magnitud, se puede formar una grieta o varias grietas de fatiga en alguna región de tensiones altas, corrientemente en la superficie, y progresará gradualmente a través del material hasta producir fractura total [3].

Las superficies de fractura de las partes que han sido sometidas a fatiga tienen por lo general, un aspecto característico por medio del cual se pueden reconocer dos o tres zonas o etapas progresivas (Fig. 1.2 a y b):

a) Primera Etapa: es la iniciación de la grieta, la cual tiene origen en un punto determinado, que se ha denominado Punto de Iniciación, que suele estar ubicado en las zonas de concentración de tensiones. La superficie tiene por lo general, un aspecto liso mostrando señales concoidales. En algunos casos, dependiendo del material, el ambiente y el nivel de esfuerzo, la fractura en esta etapa puede que no sea perceptible [6].

b) Segunda Etapa: la grieta comienza a crecer y a propagarse con más rapidez. La superficie de fractura es menos lisa y es irregular.

c) Tercera Etapa: ocurre durante el último ciclo de esfuerzo cuando la sección transversal se reduce y el metal no puede aguantar la aplicación de la última carga. Esta zona puede tener un aspecto cristalino indicando que la fractura final fue frágil o un aspecto fibroso indicando una fractura final dúctil.

Otra de las características típicas en los materiales que fallan por fatiga es la coloración u oxidación de parte de las superficies fracturadas indicando que ha existido una grieta durante algún tiempo [3].

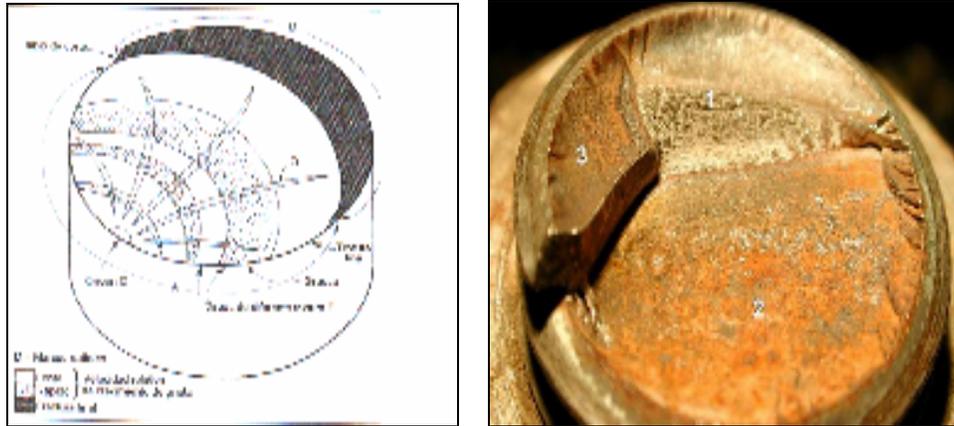


Fig. 1.2 (a) y (b). Característica de la superficie de falla típica de un metal dúctil sometido a carga cíclica.

1.2.3 Curvas S-N (Curvas de Wöhler)

Para realizar los ensayos de fatiga de un material, se deben someter cada una de las probetas estandarizadas a un valor de carga alternante hasta que la falla ocurre. Estos ensayos se repiten a diferentes niveles de carga, y de esta manera se obtiene una relación entre el esfuerzo fluctuante (S) y el número de ciclos a los que ocurrió la fractura (N). Estos valores son representados en una curva, donde el número de ciclos es colocado en el eje de las abscisas y los valores de los esfuerzos en el eje de las ordenadas. Esta curva fue desarrollada por Wöhler en 1860, cuando desarrolló diversas máquinas, para estudiar la influencia que tiene la reducción de las concentraciones de esfuerzos, sobre el alargamiento de la vida de los elementos de máquinas. Estos ensayos consistían en colocar una probeta lisa, entallada, y a veces hasta el mismo componente, en la máquina, para aplicar cargas de valores variables y de amplitud constante, hasta determinar el número de ciclos necesarios para que se produzca la iniciación de la fisura o un porcentaje de propagación de la misma. El número de ciclos debe ser representado en una escala logarítmica, ya que su valor puede llegar a ser de millones, el esfuerzo también puede ser representado en una escala logarítmica, para así obtener una línea recta.

Las figuras 1.3 y 1.4 muestran los dos tipos de comportamiento más común encontrados en materiales que fallan por fatiga. La figura 1.3 muestra una región horizontal bien definida por debajo de la cual la falla por lo general no ocurre, incluso en un ensayo con un tiempo prolongado; este nivel de esfuerzo se conoce como límite de fatiga, y es el comportamiento típico de muchos aceros [7]. Por otra parte, la mayoría de las aleaciones no férricas (figura 1.4) tienen una curva cuya pendiente disminuye a medida que aumenta el número de ciclos a falla, buscando aproximarse a una horizontal, pero sin llegar a serlo nunca. Esto trae como consecuencia, que estos materiales no tengan un límite de fatiga, pero sí un límite de resistencia, el cual está definido como el esfuerzo necesario para causar la falla en un número específico de ciclos. Este comportamiento es típico de materiales como el aluminio, magnesio y cobre.

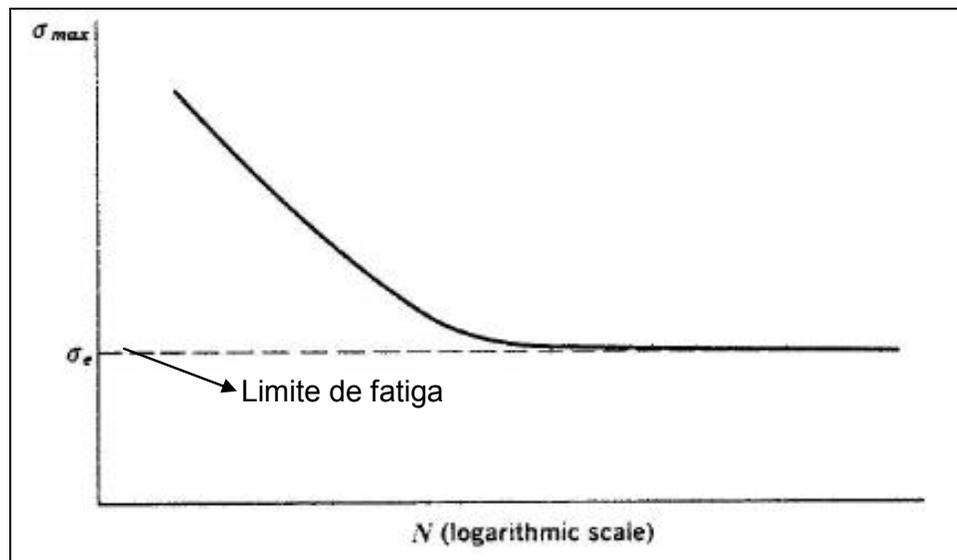


Fig. 1.3 Curva S-N para metal ferroso

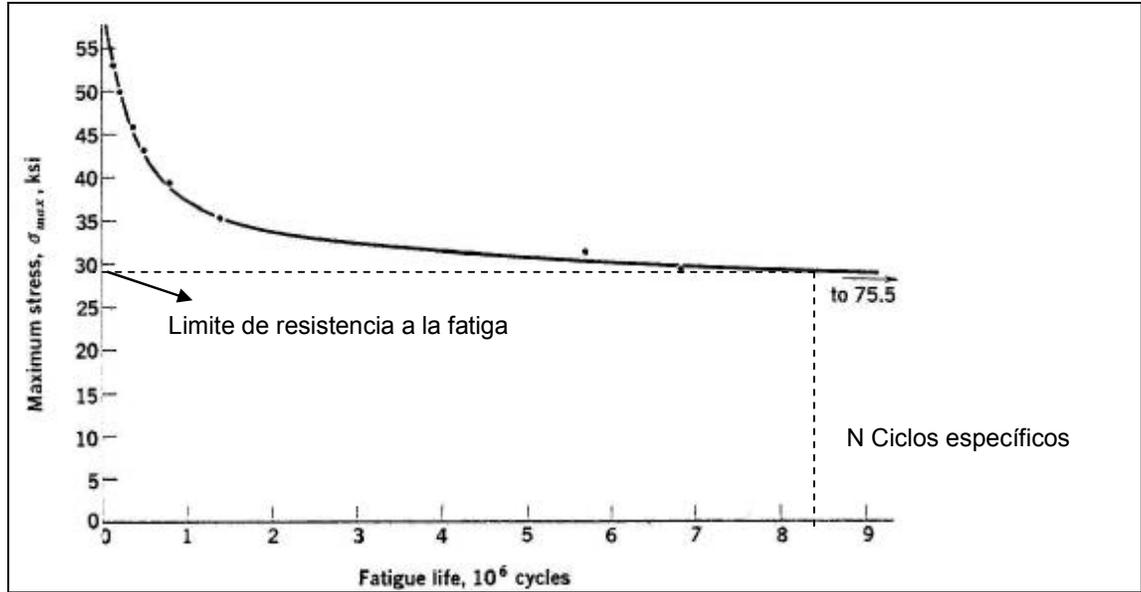


Fig. 1.4 Curva S-N para metales no ferrosos

1.2.4 Resistencia a la Fatiga (Modelo de Weibull)

Weibull propuso un modelo para el tratamiento de los datos en fatiga, además desarrollo otro modelo para realizar las curvas de fatiga esfuerzos vs número de ciclos, en escala semi-logarítmica, donde se tiene en cuenta la variación del límite de fatiga, esta ecuación se presenta a continuación:

$$S = S_e + \left(\frac{x}{C} \right)^{1/m} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde S_e es el límite de fatiga, C es una constante y m es el coeficiente de sensibilidad a la fatiga.

1.2.5 Resistencia a la Fatiga (Modelo de Basquin)

Los métodos para caracterizar la resistencia a la fatiga emergieron de los trabajos realizados por Wöhler, cuando estudió la fatiga sobre los ejes de vagones ferroviarios, sometiendo probetas cilíndricas a fatiga por flexión, flexión rotativa, tracción – compresión o tracción – tracción uniaxial. Estos resultados fueron graficados en curvas S – log N. El modelo de Basquin indica que si se utilizan todos los ejes coordenados en escala logarítmica y los esfuerzos reales, en sustitución de los ingenieriles, la curva puede ser linealizada, y la amplitud del esfuerzo puede representarse por la ecuación 1.2:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde σ'_f es el coeficiente de resistencia a la fatiga, que para la mayoría de los metales, es aproximadamente igual σ_f que es el esfuerzo real a carga máxima, N_f es el número de ciclos a falla, y b es el exponente de resistencia a la fatiga o exponente de Basquin, cuyo significado físico es la sensibilidad al cambio en los números de ciclos a fallas con variaciones en el esfuerzo alternante.

1.2.6 Dispersión de los Resultados de los Ensayos de Fatiga

Una de las características de los ensayos de fatiga, es la dispersión que se presenta en los resultados. Estas dispersiones, pueden atribuirse a errores experimentales, como mala alineación de la probeta o una determinación inexacta en el valor de esfuerzo; tolerancias dimensionales en la fabricación de las probetas; estado en el que se encuentra la superficie, el sentido y profundidad de las rayas de mecanizado; variación de la temperatura del material como consecuencia de la variación de temperatura que puede experimentar el medio ambiente o el calentamiento que se produce por los esfuerzos cíclicos.

Estas causas de la dispersión deben ser tomadas en cuenta cuando se realizan las investigaciones; ya que no se puede distinguir con precisión la dispersión causada por las variaciones en los ensayos y la dispersión causada por la variación del material. A excepción de la dispersión que se produce en las tolerancias de fabricación de las probetas y en el montaje de las mismas, no será posible determinar un valor exacto de los errores introducidos por las dispersiones que se producen debido a la variación del material.

1.3 Factores que Afectan la Vida a la Fatiga

Existen diversos factores que afectan el valor de la resistencia a la fatiga de un elemento mecánico, como lo es el tipo de material, su grado de aleación, método de fabricación, condiciones y atmósfera de trabajo, entallas, entre otras [8]. Estos factores son explicados a continuación:

1.3.1 Factores de Forma y Dimensiones de las Piezas

Los factores que intervienen en la forma de las piezas son principalmente entallas, roscas, es decir, todos los cambios bruscos de sección que, creando fibras cortadas y aumentando localmente los esfuerzos, ejercen una influencia importante sobre la fatiga [9]. Así mismo debe considerarse, la influencia que tiene la dimensión del elemento de máquina sobre la vida a la fatiga, para permitir realizar una comparación entre la resistencia a la fatiga de las piezas de máquinas y las obtenidas con las probetas, y entre la resistencia a la fatiga de probetas de secciones diferentes y de la misma forma.

La probabilidad de fractura por fatiga puede ser reducida, al reducir estas irregularidades, o haciendo modificaciones de diseños en aquellas partes donde la geometría cambia abruptamente, de manera de disminuir las tensiones que se pueden concentrar en esas zonas. Todo esto, dependiendo del material a usar en la construcción del elemento y de que estos cambios no afecten el buen desempeño del mismo.

1.3.2 Factor de Carga

Este factor considera si la carga es axial, corte, torsión o combinación de alguna de ellas. Hasta ahora el caso más estudiado es el que combina la tracción y compresión, donde se considera el factor del esfuerzo medio constantes ($\sigma_m = 0$). Sin embargo, estas tensiones afectan la vida a la fatiga, pudiendo aumentarla o disminuirla, dependiendo del caso en el que sea aplicado.

1.3.3 Factor de Concentración de Tensiones

Este factor es el responsable de la mayoría de las fallas por fatiga que ocurren en la práctica. El esfuerzo en una pieza bajo carga axial puede suponerse solo uniforme en su sección transversal, cuando la pieza tiene gran longitud y es de sección constante o que cambia su sección gradualmente [3]. Cualquier cambio brusco, produce una variación local en la distribución del esfuerzo, que va a depender de la reducción de área de la sección transversal en la discontinuidad, y de la forma que esta tenga.

El factor de concentración de tensiones bajo régimen elástico K_t , es el usado para medir la severidad de una concentración de tensiones. El mismo viene definido como la relación del esfuerzo local máximo en la región de la discontinuidad al esfuerzo local nominal [3]. El valor que puede tomar este factor, depende del tipo de discontinuidad que tenga la pieza, y por lo general se obtiene de curvas, como las que se muestran en la figura 1.5.

A pesar de que la resistencia a la fatiga se ve reducida por la aplicación de este factor, la reducción es a menudo menor que el factor de concentración de tensiones geométricas. Por ello se introdujo un factor de reducción de resistencia a la fatiga, llamado K_f , que se define como la relación de la resistencia a la fatiga de una probeta sin concentración de tensiones, a la resistencia a la fatiga con concentrador de tensiones [3]. Este factor se ve influenciado por variables como:

el tipo del material y tratamientos, la magnitud de la tensión, la cantidad de ciclos, y la forma y tamaño de la discontinuidad

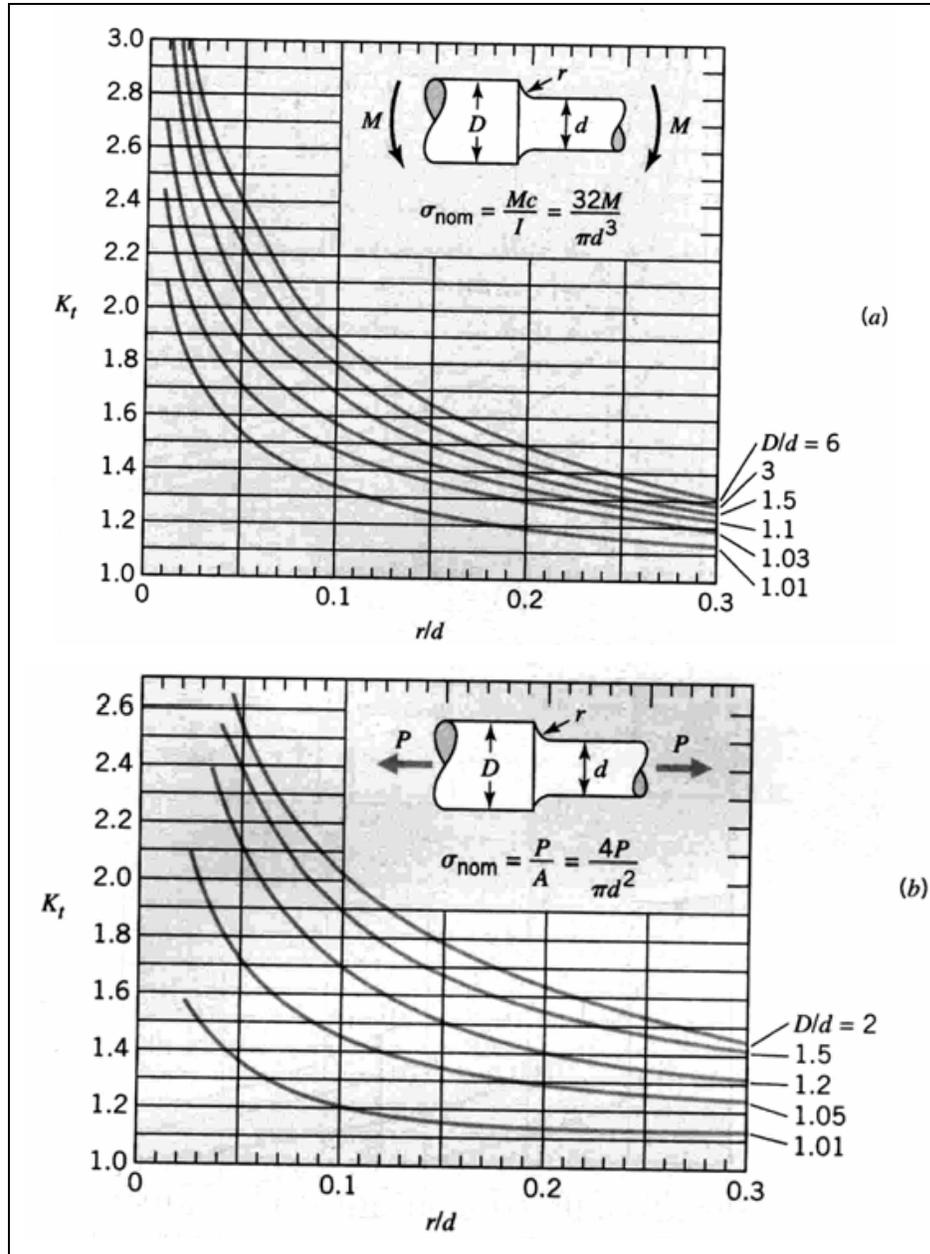


Figura 1.5. Curvas con valores de K_t .

Estos factores vienen a relacionarse en la ecuación 1.3, por medio del factor de sensibilidad a la entalla (q), cuyo valor esta comprendido entre 0 y 1. Cuando K_f es igual a K_t , que será igual a 1 y se dice que el material es completamente sensible a la entalla. Si la presencia de una entalla no afecta la resistencia a la fatiga, es decir K_f es igual a 1 y q es igual a 0, se dice que el material no es sensible a la entalla [3]. Sin embargo se ha encontrado que el valor no solo depende del material, sino que también depende indirectamente de las condiciones del esfuerzo, del tamaño de la probeta y de la fatiga, al estar relacionado con el factor de tamaño y el factor de reducción de resistencia a la fatiga, por medio de la ecuación 1.3.

$$q = \frac{K_f - 1}{k_t - 1} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

1.3.4 Factores Microestructurales y Tratamientos Térmicos

La resistencia a la fatiga se incrementa usualmente por cualquier tratamiento térmico que aumente la resistencia a la tracción del material, pero la resistencia a la tracción depende de la microestructura del material. Por lo tanto la resistencia a la fatiga depende indirectamente de este factor [3].

Para aceros tratados con altas resistencias, las mejores propiedades de fatiga se han obtenido con martensita revenida. Comparando la resistencia a la fatiga de una estructura tipo martensítico, producida por un templado rápido, con otra estructura de ferrita y perlita, obtenida por un templado lento, y empleando acero al carbono y dos aceros aleados, que fueron todos revenidos para conseguir aproximadamente la misma resistencia a la tracción; se puede decir que las relaciones de fatiga para la martensita revenida fueron bastante superior, que para los de estructura mixta [10]. Esta baja resistencia que presenta la estructura mixta, puede atribuirse a “entallas metalúrgicas”, que podrían ser perlita, ferrita libre,

segregación de los elementos aleantes o austenita retenida durante el temple [3]. La influencia que tiene el tamaño de grano en la resistencia a la fatiga en los aceros, no es de gran importancia, sin embargo se considera que aquellos materiales que tienen grano fino tienen una resistencia a la fatiga mayor que los que tiene grano basto, sin embargo, los de grano fino tienen mayor sensibilidad a las entallas que los de grano basto, de esta manera queda compensada la tendencia.

1.3.5 Factores de Temperatura

Generalmente este factor se induce a temperaturas elevadas, debido a tensiones térmicas fluctuantes, sin embargo es necesario que estén presentes tensiones mecánicas de origen externo. Si la temperatura es elevada, el esfuerzo alternativo y el esfuerzo estático, que puede sufrir un material sin romperse, disminuye a medida que el tiempo de aplicación del esfuerzo aumenta. La causa de las tensiones térmicas que se producen en el material, se debe a la restricción a la dilatación o contracción, que normalmente ocurre en piezas estructurales sometidas a cambios de temperatura. La magnitud que tendrán estas tensiones térmicas, se van a deber a la magnitud de la variación de la temperatura, al coeficiente de dilatación y al módulo de elasticidad, todos estos factores relacionados por la ecuación 1.4, en donde σ , es la tensión térmica, α_t es el coeficiente de expansión térmica lineal, E es el módulo de elasticidad, y ΔT es el incremento de temperatura.

$$\sigma = \alpha_t E \Delta T \quad (\text{Ec. 1.4})$$

1.3.6 Efecto de la Corrosión

La acción corrosiva sobre la superficie de un metal, puede llegar a producir picaduras o grietas en ciertos puntos, lo que puede dar lugar a una pérdida considerable de la resistencia a la fatiga (ver Fig. 1.6.), si el metal es sometido a esfuerzos fluctuantes. La fatiga normal al aire puede considerarse

como una fatiga por corrosión, y se ha demostrado que la resistencia a la fatiga de algunos metales puede aumentarse si se limita la concentración de aire en la superficie, sin embargo, para fines prácticos la fatiga por corrosión puede considerarse como la que se origina por el efecto de los esfuerzos fluctuantes en un medio corrosivo además del aire [3].

Se han propuestos diversos mecanismos a fin de proveer una explicación del rol que cumple el ambiente circundante en la nucleación de grietas por fatiga [11]. Entre los mecanismos se encuentran: la ruptura de la capa protectora y el ataque electroquímico en los sitios de ruptura, formación de picaduras de corrosión y concentración de esfuerzos en la base de la picadura, la deformación promueve la disolución de bandas de deslizamiento y el descenso de la energía superficial debido al efecto de un ambiente específico. En el mecanismo de ruptura de la capa protectora, la nucleación de la grieta se intensifica por el daño mecánico que sufre la capa protectora, y cuando la misma se fractura, esas áreas quedan expuestas al medio corrosivo [12].

La acción corrosiva sobre la superficie del metal puede provocar una alteración en toda la superficie y también la formación de picaduras o grietas en ciertos puntos que actúan como concentradores de esfuerzos disminuyendo la resistencia a la fatiga, si el metal se somete continuamente a esfuerzos fluctuantes. Las características superficiales de materiales que fallan por fatiga corrosión son diferentes a las que fallan por fatiga normal. La primera de ellas, es que la superficie cambia de color debido al proceso corrosivo, aunque esta puede llegar a no ser una característica esencial. Los aceros comunes, presentan una capa ligera de óxido en la superficie, cuando se someten a pruebas de agua, y una capa más fuerte, cuando es agua salada. Los aceros inoxidable y los nitrurados, no presentan signos de corrosión, a pesar de que la resistencia a la fatiga se vea reducida por el efecto del medio salino, esto se debe a que el ataque electroquímico aumenta a medida que la grieta crece, produciendo que la velocidad de propagación de las mismas aumente. La otra característica, es la aparición de un mayor número de grietas cuando existe un medio corrosivo, en

comparación con la cantidad de grietas que tiene el material cuando la fatiga es al aire.

En cuanto al mecanismo de formación de picaduras de corrosión, se pueden distinguir dos casos:

- Cuando la corrosión produce un ataque específico en ciertos puntos, conocida como corrosión localizada, y se produce cuando las áreas anódicas (de oxidación) y las catódicas (de reducción) están separadas dando lugar a la disolución del metal en un área restringida. Este caso de corrosión puede ocurrir tanto a escala microscópica como a escala macroscópica, de diversas formas como lo son: la corrosión por picadura, la cual produce la ruptura de la capa protectora de óxido y ocasiona pequeños agujeros que son ocultados por productos de la corrosión, lo que la hace difícil de detectar y a su vez genera una falla inesperada del elemento. La otra es la corrosión por grietas, que ocurre cuando estas son expuestas al medio corrosivo, lo que hace que acelere el crecimiento y propagación de la misma y por lo tanto la fractura del material.
- Cuando la corrosión es intergranular, ocurre en los límites de granos, lo que origina una pérdida en la resistencia que desintegra los bordes de los granos, haciendo más fácil la penetración de la sustancia corrosiva.

Para evaluar el efecto que tienen las sustancias corrosivas sobre los materiales, Bogar y Crooker [13], ensayaron aleaciones de acero, aluminio y cromo, en agua de mar, agua de mar ASTM y solución al 3% cloruro de sodio. Ellos encontraron que la composición de las soluciones que se estudiaron, rara vez tienen un gran influencia en los resultados de fatiga corrosión, lo que indica que cuando un material está expuesto a un ambiente corrosivo, independientemente de su composición, el efecto será el mismo, es decir, el material fallará en menor tiempo.

Las comparaciones de los resultados de los ensayos de fatiga llevados a cabo en una atmósfera corrosiva con los realizados al aire, muestran que el efecto principal de la corrosión aumenta con la duración del ensayo [3]. Es por esto que la influencia sobre la resistencia a la fatiga bajo corrosión es mayor a medida que la frecuencia se reduce, es decir cuanto mayor sea la exposición al ambiente corrosivo.

La corrosión siempre es fruto de una heterogeneidad en el material o en el medio ambiente que genera pilas electroquímicas, por eso la estructura debe estar en una zona bien ventilada y evitar zonas cerradas en donde el ambiente pueda cambiar de composición y afectar el material. Los materiales que estén produciendo la pila, que da inicio a la corrosión, deben ser separados por medio de teflón, por ejemplo, para así cancelar este efecto.

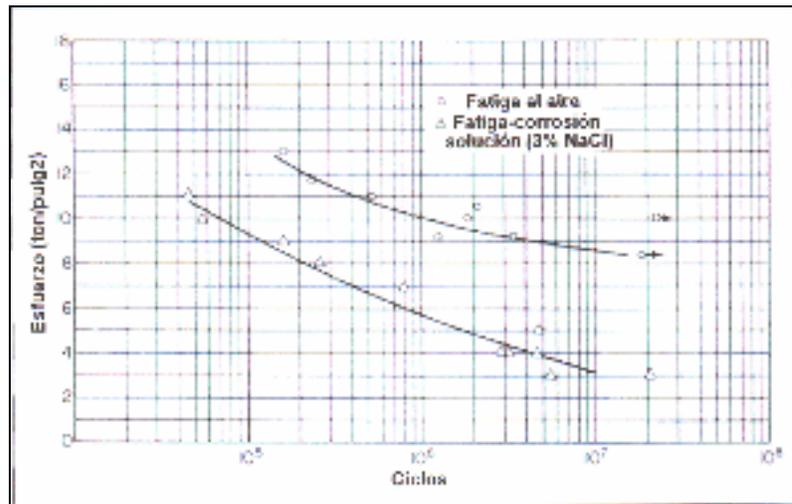


Fig.1.6. Curva S-N que muestra como afecta el ambiente corrosivo a la resistencia a la fatiga

1.3.7 Factor de Superficie

Durante el maquinado, numerosos rayones y entallas se introducen de manera inevitable en la superficie del material, debido a las herramientas de cortes. La superficie de las piezas sometidas a fatiga debe ser lisa y tener un buen acabado superficial. Realizando un pulido adecuado, se puede incrementar el valor de la resistencia a la fatiga, ya que se estaría eliminando gran cantidad de entallas y rayones en la superficie, que propician la formación de esfuerzos residuales y que pudieran llegar a ser el punto de inicio de la grieta.

Para obtener una mejora en la resistencia a la fatiga de los materiales, se han empleado tratamientos superficiales. Existen tres motivos fundamentales por los cuales los tratamientos superficiales influyen sobre la resistencia a la fatiga. En primer lugar por afectar la resistencia a la fatiga intrínseca del material próximo a la superficie, por ejemplo, por endurecimiento, por deformación o por un recubrimiento de la superficie, en segundo lugar por introducir o eliminar esfuerzos residuales en las capas superficiales, y por último por introducir o eliminar irregularidades en la superficie que actúan como concentradores de esfuerzos. En la práctica tenemos, normalmente, que tratar con el efecto combinado de estos tres factores [3].

En el caso de los procesos superficiales, los mismos incluyen tanto la deposición de un recubrimiento delgado sobre un substrato de un material diferente, como la modificación de las capas superficiales de un material, alterando su morfología, limpieza o composición química. En ambos casos, el objetivo de la modificación es adaptar de la manera más efectiva posible las propiedades superficiales del material tratado a sus requerimientos de comportamiento funcional [14].

1.3.7.1 Recubrimientos

En la actualidad existe en la tecnología de materiales, una gran cantidad de recubrimientos y técnicas, que han creado toda una industria en esta área, lo que se traduce en un campo de investigación muy amplio. Esencialmente lo que se busca con los recubrimientos es elevar las capacidades mecánicas, eléctricas y químicas del sustrato.

Los recubrimientos se realizan sobre el sustrato bajo ciertas condiciones superficiales, que dependen esencialmente de la técnica de deposición, logrando aumentar en muchos casos el desempeño mecánico de dicho sustrato, incrementando la resistencia al desgaste, a la abrasión, a la corrosión, la resistencia a la fatiga y su dureza. Es importante destacar que no siempre se logra un incremento de estas propiedades, esto va a depender del comportamiento que el conjunto sustrato-recubrimiento tenga ante las condiciones a las que estará expuesto. Como es el caso de la deposición electrolítica de cromo duro (EHC) en partes de acero de alta resistencia, el uso de depósitos autocatalíticos NiP y algunas técnicas de termorrociado, en donde se deteriora significativamente las propiedades en fatiga del sustrato [15-16].

En este contexto, la investigación de Nascimento [17] y sus colaboradores, realizaron un estudio con el fin de analizar los efectos de los recubrimientos de carburo de tungsteno, aplicados mediante técnicas de termorrociado HVOF y EHC, en la fatiga, la resistencia al desgaste abrasivo y en la corrosión, en un acero de alta resistencia AISI 4340. Los resultados obtenidos indicaron que los recubrimientos depositados propiciaron un deterioro en las propiedades a la fatiga del acero de alta resistencia, bajo condiciones de flexión rotativa, y el recubrimiento de carburo de tungsteno, aplicado por Termorrociado, obtuvo un mejor comportamiento entre los recubrimientos estudiados. Recientemente Ortiz y Manzilla [16], llevaron a cabo una investigación a partir del estudio de los efectos de un recubrimiento de cromo duro en las propiedades a la fatiga de un acero AISI 4140 templado y revenido. Los resultados mostraron que tanto la vida a la fatiga

como el límite de fatiga se redujeron sustancialmente en comparación con el material sin recubrimiento, la superficie de fractura de las muestras ensayadas mostraron múltiples lugares donde se nuclearon las grietas, arrojando como conclusión que el recubrimiento actúa como un nucleador de grietas en el sustrato de acero.

En cuanto al uso de recubrimientos duros depositados por PVD o CVD en aceros estructurales, la literatura indica resultados diferentes a los obtenidos con recubrimientos EHC, EN y Termorrociado [18]. Un ejemplo de esto es Jaeger [19] quien estudio el efecto de la fatiga, la dureza de los compuestos de la película, el espesor de la película, la morfología de la estructura de granos, los esfuerzos residuales y el módulo de Young, en un acero rápido de herramientas S6-5-2 recubierto por PACVD, donde se depositaron diferentes recubrimientos duros del sistema Ti-Al-C-N. Los resultados llevan a la conclusión de que los recubrimientos de este sistema aumentan la resistencia a la fatiga del conjunto sustrato recubrimiento. Según estos resultados, los cambios en la resistencia a la fatiga están bien relacionados con los esfuerzos residuales compresivos en la película.

Recientemente Baragetti [20], condujo una investigación a partir del estudio de la resistencia a la fatiga y del efecto de los esfuerzos residuales en un acero inoxidable duplex 2205, con un recubrimiento de base CrN depositado por PVD, por medio de ensayos de flexión en cuatro puntos. Los resultados de los ensayos de fatiga revelaron una mejora en la vida a la fatiga de los especímenes recubiertos. Además, de acuerdo con los autores, el parámetro más importante que influye en el aumento de la resistencia a la fatiga de los especímenes recubiertos son los esfuerzos residuales compresivos introducidos por las películas de PVD.

Todos estos resultados están de acuerdo con lo que reporto Berrios-Ortiz [21-22] y Puchi-Cabrera [23], con respecto a la deposición de diferentes películas de distinta estequiometría de TiN_x y ZrN_y, sobre un sustrato de acero inoxidable AISI 316L, por medio de un campo cerrado de Magnetron Sputtering

no balanceado (UCFMS) y de TiN sobre el mismo sustrato por medio de PVD asistido por plasma (PAPVD), respectivamente, esta investigación dio como resultado que en cualquiera de las muestras recubiertas se obtuvo un incremento en la vida a la fatiga, tanto al aire como bajo una solución de NaCl, en comparación con las muestras sin recubrir.

Por otra parte Puchi-Cabrera [18] en un estudio mas reciente, evaluaron el comportamiento a la fatiga de un acero SAE 4340 templado y revenido, recubierto con una película de TiCN depositada por PAPVD. Obteniendo como resultado un incremento en las propiedades de fatiga de los especímenes recubiertos, lo cual es atribuible a la alta resistencia mecánica de la película, a los altos esfuerzos residuales (entre 3 y 4 GPa) y a la excelente adhesión del recubrimiento al sustrato.

Es evidente la influencia de los esfuerzos residuales en la vida a la fatiga, por lo tanto es necesario indagar como se generan y los efectos que estos pueden causar.

1.3.7.2 Esfuerzos Residuales

El esfuerzo residual en los recubrimientos funcionales juega un papel importante en el desempeño en el tiempo de vida de los componentes recubiertos. La integridad mecánica de los recubrimientos protectores esta influenciada por los esfuerzos residuales que se originan por cuatro causas principales: crecimiento del esfuerzo, limitaciones geométricas, gradientes de temperatura y fatiga [24].

En los recubrimientos realizados mediante técnicas de PVD existen varias fuentes de esfuerzos residuales:

- Esfuerzos debido al crecimiento de los recubrimientos. En este caso, es necesario distinguir entre los esfuerzos intrínsecos y el esfuerzo inducido

geoméricamente. El esfuerzo intrínseco es debido a reacciones químicas, transformaciones de fase, bombardeo de partículas energéticas, etc.

- Esfuerzos inducidos térmicamente resultante de los cambios de temperatura, por lo tanto de la diferencia de los coeficientes de expansión térmica del sustrato y del recubrimiento.
- Esfuerzo externos debido a la deformación del conjunto sustrato recubrimiento.

La magnitud σ , de estos esfuerzos, resulta de tres grandes contribuciones:

$$\sigma = \sigma_{th} + \sigma_i + \sigma_e \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Donde σ_{th} , σ_i y σ_e son los esfuerzos térmicos, intrínsecos y extrínsecos respectivamente.

En el primer término los esfuerzos residuales térmicos se originan durante el enfriamiento del conjunto sustrato recubrimiento, desde una elevada temperatura de deposición, esto se puede explicar cualitativamente de la siguiente manera: cuando se impone un cambio en el diferencial de temperatura de las diferentes capas del material, resulta en una variación del esfuerzo residual a lo largo de la dirección del espesor de cada capa. El esfuerzo que se traslada entre el sustrato y el recubrimiento, por cizallamiento en la interfaz, causa que tanto el sustrato como el recubrimiento se contraigan, se alarguen o se doblen [24].

Debido a esto aparece una deformación biaxial ϵ , en las películas adherentes para los sustratos que tienen diferentes coeficientes de expansión térmica, a una temperatura T_r , más alta y más baja que la del sustrato o que la temperatura de deposición T_s . Cuando no existe ninguna deformación plástica en el conjunto sustrato recubrimiento, durante los cambios de temperatura, el esfuerzo térmico σ_{th} , está directamente relacionado con la deformación elástica en la película a través de la ley de Hooke:

$$\sigma_{th} = \left(\frac{E_f}{1-\nu_f} \right) \varepsilon = \left(\frac{E_f}{1-\nu_f} \right) (\alpha_s - \alpha_f) (T_r - T_s) \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Donde E_f y ν_f son el modulo de Young y la relación de Poisson de la película, respectivamente; α_s y α_f son los coeficientes de expansión térmica del substrato y de la película, respectivamente [25].

Para proporcionar una metodología de diseño de un conjunto substrato recubrimiento con falla segura, es importante incluir un modelo para el análisis de los esfuerzos térmicos en una estructura multicapa [26, 27, 28]. Para modelar los gradientes de temperatura en un recubrimiento multicapa durante el enfriamiento desde la temperatura de deposición o durante un proceso de tratamiento térmico en una estructura multicapa, la ecuación de transferencia de calor estacionaria en una dimensión debe ser numéricamente solucionable. Después del cálculo del número de los gradientes de temperatura dentro de las capas del recubrimiento, se utiliza el modelo del esfuerzo biaxial para determinar la distribución del esfuerzo térmico en cada instante de tiempo. El esfuerzo en cada elemento se obtiene resolviendo n ecuaciones resultantes de la condición de equilibrio (la sumatoria de las fuerzas F en los planos en cero en todas las capas [26, 29, 30].

$$\sum_{i=1}^n F_i = 0. \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Para simplificar, se asume un comportamiento elástico simple para el análisis de esfuerzos en una dimensión. También se asume que el esfuerzo en cada capa no debe exceder el esfuerzo de fluencia y no se deben considerar deformaciones plásticas en el modelo de esfuerzo biaxial.

Sin gradientes de temperatura y materiales homogéneos, con una ecuación simple para estimar el esfuerzo térmico debido a los desajustes ocasionados por

diferencia en el valor del coeficiente de expansión térmica y la diferencias de temperatura, se puede derivar que es incluso más simple si el espesor del recubrimiento es mucho mas pequeño que el espesor del sustrato.

$$\sigma_{th} = \frac{E_f(\alpha_s - \alpha_f)\Delta T}{(1 - \nu_f) + (2t_f E_f / t_s E_s)(1 - \nu_s)} \approx \frac{E_f(\alpha_s - \alpha_f)\Delta T}{1 - \nu_f} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

En segundo lugar encontramos los esfuerzos residuales intrínsecos cuya magnitud en las películas de PVD esta relacionada con la microestructura de la película, morfología, textura y tamaño de grano. La densificación de los recubrimientos producidos por una deposición asistida por ionización (IBAD), podría estar atribuido a la distorsión del crecimiento de las capas superficiales generado por la acción de partículas de alta energía. La variación de los esfuerzos intrínsecos con el momento normalizado P_n o energía de impacto, se puede representar por una curva idealizada (Figura 1.7) correspondiente con el estado de las películas continuas, amorfas y policristalinas depositadas a bajas temperaturas.

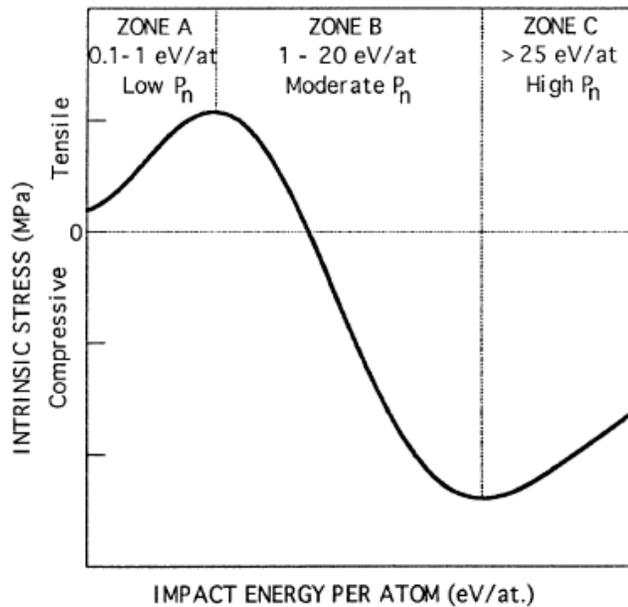


Fig. 1.7. Variación de los esfuerzos intrínsecos con el momento normalizado.

El momento normalizado esta dado por el producto entre el momento transferido por la partícula incidente, entre los flujos de partículas incidentes y átomos condensados. En este diagrama se presentan tres zonas distintas dependiendo del momento normalizado, que es el total de la energía cinética de las especies que chocan, con la superficie de la película por átomo condensado e incorporado a la misma [25].

Para explicar este fenómeno Hoffman y colaboradores [31-32] desarrollaron un modelo de relajación en límite de granos, para películas policristalinas, el cual es adaptable a películas amorfas que muestran una microestructura fibrosa o de columnas observadas muy a menudo para películas de PVD. La deformación elástica ε en la película esta relacionada con el parámetro de red no deformado “a” y la variación de la constante real (x-a), o por Δ y L_g , que es la distancia de relajación del crecimiento de grano y del tamaño final del grano, respectivamente. La deformación elástica es responsable de los esfuerzos intrínsecos de tensión σ_i , que esta dado por:

$$\sigma_i = \left(\frac{E_f}{1 - \nu_f} \right) \varepsilon = \left(\frac{E_f}{1 - \nu_f} \right) \frac{x - a}{a} = \left(\frac{E_f}{1 - \nu_f} \right) \frac{\Delta}{L_g} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Además de los esfuerzos térmicos e intrínsecos, un tercer termino llamado esfuerzos extrínsecos σ_e , puede ser distinguido en el conjunto de esfuerzos residuales en películas de PVD. Diversas moléculas pueden penetrar en los huecos o poros abiertos, presentes en las películas no densas y absorbidas por las paredes de los poros con lo que las fuerzas de interacción entre especies absorbidas, como las moléculas de agua, pueden actuar como modificador de los esfuerzos residuales. Un modelo para explicar el origen de los esfuerzos extrínsecos basado en la absorción de especies polares sobre las paredes de los poros fue propuesto por Hirsch [33] donde la fuerza total de interacción entre las especies polares absorbidas esta dado por:

$$F_{total} = \frac{1.74 \times 10^9 n^2 \alpha^2 t_f}{5\pi\epsilon\alpha} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

Donde n es el número de dipolos por unidad de área, α el momento dipolar, t_f el espesor de la película y ϵ la constante dieléctrica de los espacios libre.

Ahora bien, ha sido simplemente discutido que los esfuerzos residuales afectan directamente la velocidad de propagación de la grieta, como quedo demostrado anteriormente. Es conocido que el número de ciclos a falla no es más que la suma de los ciclos de nucleación de la grieta y los ciclos de propagación, como se muestra a continuación:

$$N_f = N_N + N_P \quad (\text{Ec. 1.11})$$

Por otra parte, la vida de una estructura finaliza con el crecimiento de la grieta. Por esta razón los mecanismos de fractura elástica lineal han demostrado ser un arma muy poderosa para el análisis del comportamiento a la fatiga de tales estructuras. La base para el análisis de los mecanismos de fractura es la ecuación de Paris-Erdogan [34] para el crecimiento de la grieta:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (\text{Ec. 1.12})$$

Forman modifiko [35] la ecuación para la región donde se produce el crecimiento inestable de la grieta, incluyendo una función de R , que no es más que:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (\text{Ec. 1.13})$$

Obteniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m f(R) \quad (\text{Ec. 1.14})$$

Donde ΔK es el factor de intensidad de la gama del esfuerzo, R es la relación del esfuerzo, “ a ” es la longitud de la grieta, N es el numero de ciclos, C y m son constantes del material.

En este particular Maddox [36] reportó un estudio extensivo del efecto de R sobre las tasas de crecimiento de grietas en estructuras de acero. Este trabajo arrojó los siguientes resultados: para dos de los aceros estudiados los valores positivos de R conducen a tasas de crecimiento ligeramente superiores que para $R=0$ con el mismo valor de ΔK . Sin embargo, como R se hace cada vez mas negativo la tasa de crecimiento disminuye, debido a que solo los esfuerzos que abren la grieta son capaces de propagarla, de manera que se puede asumir que solo la parte en tensión del ciclo propaga la grieta. Esto sugiere que si los esfuerzos residuales están en tensión, habrá un pequeño efecto en la aplicación externa de R , ya que esta será positiva.

Gurney [36] realizó un estudio sobre la propagación de la grieta sobre aceros con dos niveles de esfuerzos distintos, los esfuerzos residuales fueron incorporados en los especímenes y las pruebas fueron llevadas a cabo para dos relaciones de R , $R=0$ (compresión) y $R=-2$. Los resultados son comparados con los obtenidos en un ensayo cuando $R=0$ en tensión. Obteniéndose los siguientes resultados: a bajos valores de ΔK , que significan una longitud de grieta relativamente corta, da/dN para $R=0$ (compresión) y $R=-2$ es similar a da/dN para $R=0$ (tensión); a valores mas altos de ΔK da/dN es menor para intervalos de esfuerzo que son de compresión total o parcial; y para rangos de esfuerzo a compresión total o parcial la grieta realmente nunca se detiene y las muestras finalmente fallan. De esta manera queda claro que bajo la acción de las fuerzas de

tensión debido a los esfuerzos residuales la grieta tiende a abrirse, a pesar de estar sometido a cargas únicamente compresivas.

Aunque los experimentos se realicen bajos las mismas condiciones de carga, la tasa de crecimiento de la grieta fluctúa notablemente, por lo que es necesario un modelo estadístico. En este sentido Jung y Dong [37] modificaron la ecuación de Forman, para formular exactamente la relación entre la tasa de crecimiento de la grieta da/dN y ΔK , agregando una variable aleatoria Z , definida como una función de la longitud de la grieta o del tiempo. Definiendo que la tasa de crecimiento de la grieta esta dada por la siguiente expresión:

$$\frac{da}{dN} = Z \frac{C(\Delta K - K_o)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (\text{Ec. 1.15})$$

En donde K_o es un factor inicial de intensidad del esfuerzo, de manera que el crecimiento de la grieta no ocurre bajo este valor, y K_c es la tenacidad de fractura.

Concluyendo que la ecuación modificada de forman describió la relación sigmoideal $da/dN - \Delta K$, la variabilidad podría ser fácilmente estimada por la variable aleatoria Z . Y para las propiedades estadísticas de $\text{Log } Z$ y la ecuación modificada de Forman, la distribución de la vida a la fatiga fue predicha. Los resultados estuvieron similares a los resultados experimentales. El modelo propuesto es simple y suficiente para los propósitos prácticos.

1.3.7.3 Procesamiento por Plasma

Son técnicas que usan plasma para modificar la superficie o el volumen de los materiales. Un plasma es una clase particular de gas ionizado. El requisito para que el gas pueda definirse como un plasma es que sus especies con carga eléctrica tengan un comportamiento colectivo, en cuyo caso la concentración de cargas

positivas es prácticamente igual a la de cargas negativas y el gas es, por lo tanto, eléctricamente neutro [14].

Se entiende por comportamiento colectivo a la capacidad de las cargas libres de redistribuirse espacialmente en caso de producirse una perturbación electrostática en el gas, de modo de aislar al plasma de dicha perturbación y preservar su condición neutra. Así, por ejemplo, si se introduce un cuerpo cargado negativamente, se produce un flujo de iones positivos hacia el cuerpo y un flujo de electrones en dirección opuesta. Como resultado, se genera una delgada lámina alrededor del mismo con carga espacial positiva, la que cancela la perturbación y mantiene la neutralidad eléctrica del plasma. La región de carga espacial se denomina lámina de plasma; y debe tenerse presente que por el hecho de tener una carga neta positiva, el gas ionizado de la lámina no satisface la definición de plasma. Este efecto permite generar un bombardeo de iones positivos sobre un sustrato cuando se asigna al mismo un potencial negativo con respecto al plasma [14].

1.3.7.4 Técnicas de Procesamiento por Plasma

Las técnicas están clasificadas según el tipo de plasma utilizado, el cual puede ser a alta densidad, en el cual sus especies se encuentran a la misma temperatura (plasma térmico), o a baja densidad, en el cual sus especies no se encuentran a la misma temperatura, por lo tanto no están en equilibrio térmico con las especies pesadas. Los de baja densidad pueden clasificarse, a su vez, en PVD (Deposición Física en fase de vapor) y CVD (Deposición Química en fase de vapor), que son los dos subgrupos más importantes:

a) Deposición química en fase de vapor (CVD): este recubrimiento se forma como resultado de reacciones químicas sobre la superficie de un sustrato caliente inmerso en una mezcla gaseosa, cuyas especies pueden reaccionar químicamente entre sí para formar el compuesto del recubrimiento en base a la energía de activación aportada por el sustrato caliente, como se muestra

en la figura 1.8 [14]. Dependiendo de las condiciones en las que se realice el proceso de deposición, se pueden obtener formas alternas de este tipo de deposición, las cuales son: APCVD (Deposición Química en fase vapor a presión atmosférica), en el cual el proceso es realizado a presión atmosférica, y LPCVD (Deposición Química en fase de vapor a baja presión), en la cual el proceso es realizado a presiones menores que la atmosférica.

Las ventajas que ofrece este tipo de proceso es que se puede controlar el crecimiento del tamaño de grano, no se requiere el uso de una cámara de vacío, ya que el proceso se lleva a cabo a temperatura constante, se pueden depositar materiales refractarios a temperaturas debajo de su punto de fusión, y la unión entre el recubrimiento y el sustrato es bastante buena. La desventaja que tiene es que se necesita más tiempo para la realización de los ciclos, debido a que primero se debe calentar el sustrato, luego el tiempo que toma el proceso y al final se debe dejar enfriar la pieza a temperatura ambiente.

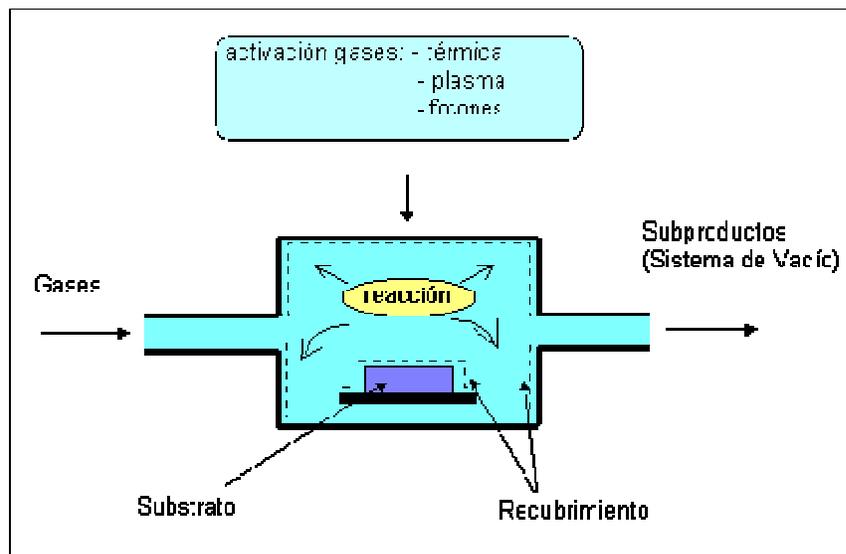


Fig. 1.8. Deposición química en fase vapor

b) Deposición física en fase de vapor (PVD): en este proceso un material contenido en un crisol se evapora por aporte de calor dentro de una cámara en condiciones de alto vacío, parte de las especies evaporadas se depositan y condensan sobre la pieza de interés, formando un recubrimiento [14]. En la figura 1.9 se muestran las partes y componentes de la cámara empleada en este proceso.

Para el año 1966 Mattox describió la utilización de este mecanismo en un método de deposición por evaporación en fase de vapor, en el que se introdujo un plasma de argón en la región comprendida entre el evaporador y el substrato; denominándolo ion plating [38]. Para este caso Mattox ubico el substrato sobre el cátodo, con lo que se producía el bombardeo de iones positivos provenientes del plasma sobre la superficie. Que produce los siguientes efectos:

- El bombardeo de iones de argón sobre el substrato produce antes de la deposición un efecto de limpieza que elimina capas de óxidos superficiales y gases adsorbidos, y durante la deposición produce un efecto permanente de limpieza que elimina impurezas y especies débilmente adheridas a la superficie.
- El aporte de energía térmica resultante del bombardeo iónico promueve la movilidad superficial de las especies depositadas, lo que conduce al desarrollo de un recubrimiento con mayor perfección estructural.
- El desarrollo del recubrimiento bajo efectos del impacto de iones positivos conduce a formar una red cristalina con átomos en posiciones mas próximas entre si que las que ocuparían en el caso de un sólido del mismo material formado metalúrgicamente; como resultado, se genera tensiones internas compresivas en el material del recubrimiento, cuya magnitud es controlable a través del potencial del substrato.

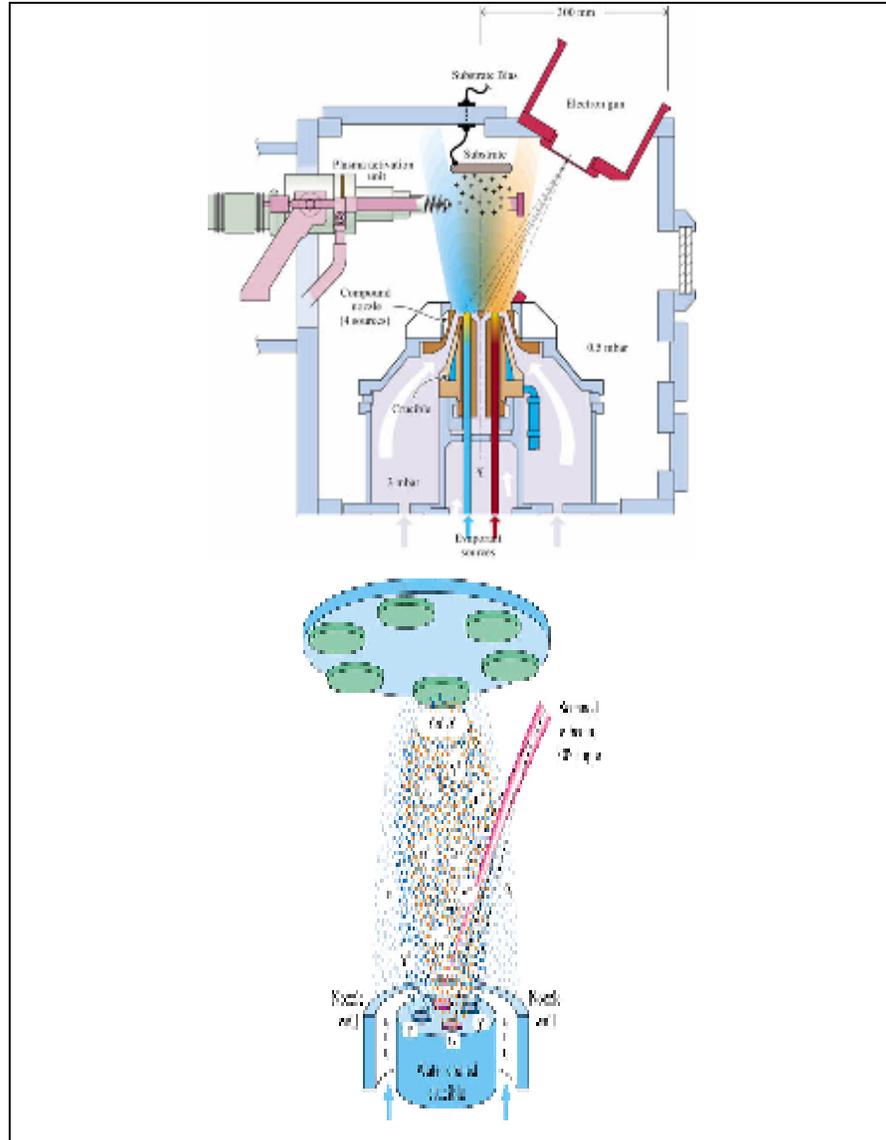


Fig.1.9. Esquema y detalle de una cámara de PVD

Una variación de los métodos de PVD, es el PAPVD (Deposición física en fase de vapor asistida por plasma). En este caso, algunas especies se producen como consecuencia de la evaporación del material sólido que se encuentra dentro del reactor o por bombardeo del material con iones positivos. Las ventajas de esta técnica es que se pueden 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 [39].

En esta técnica de PAPVD, se distinguen dos grandes clases de procesos según las especies provenientes del material contenidas en el reactor que se generan en base a la evaporación [40] o al proceso de sputtering (ver Fig. 1.10) [41]. En el proceso de evaporación, las especies que se evaporan pasan de un estado inicial sólido a un estado líquido, por el aporte de energía térmica, y luego, a la fase de vapor. Por el contrario, en el proceso de sputtering los átomos del material de interés pasan en forma directa a la fase de vapor como resultado de la cantidad de movimiento producida por colisiones con iones pesados incidentes con alta energía sobre el mismo. El material bombardeado se denomina “blanco” [14].

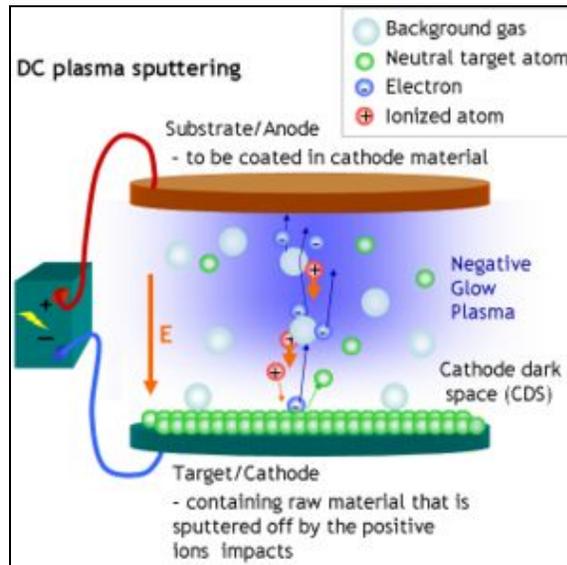


Fig.1.10. Procesamiento por técnica PAPVD Sputtering.

En general otra de las ventajas se genera dado que el calentamiento de un sustrato inmerso en el plasma depende fundamentalmente de la energía térmica que aportan las especies pesadas (neutras y positivas), entonces el calentamiento es mínimo como resultado de la baja temperatura de dichas especies, llegando en algunos casos a la temperatura ambiente, lo que amplía el rango de materiales que pueden ser procesados por estos métodos.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

CAPITULO II METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Calibración de la Máquina de Fatiga por Flexión Rotativa

Antes de comenzar los ensayos fue necesario verificar la calibración de la máquina de ensayo de fatiga por flexión rotativa en voladizo desarrollada por Ronnie Oropeza y Oswaldo Medina, que se muestra en la figura 2.1.

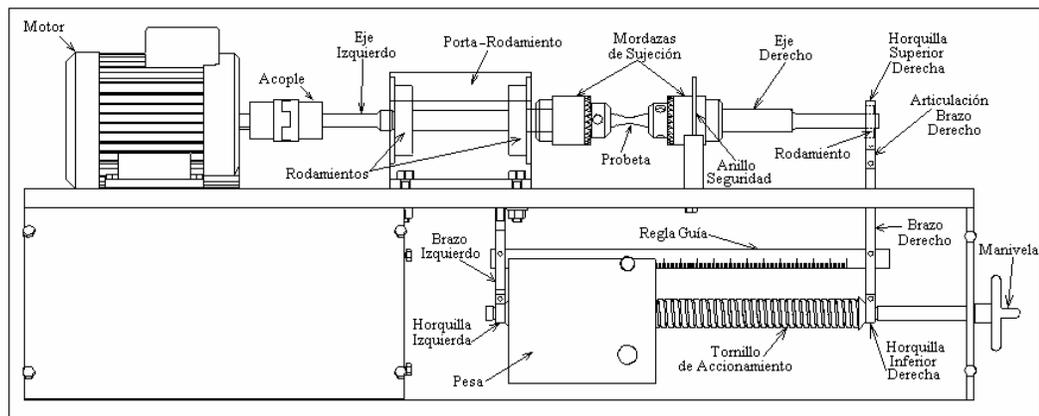


Figura 2.1. Máquina de Fatiga por Flexión Rotativa

La calibración comenzó con una documentación del diseño de la máquina, en donde se estudio el funcionamiento y dimensionamiento del mecanismo completo responsable de aplicar la carga a la probeta. Posteriormente se realizó la corroboración de las medidas indicadas en los planos con las de la máquina, colocando una probeta estándar que cumple con la norma ASTM E 606, observando que el tornillo de accionamiento es aproximadamente 16 mm. mas largo que lo indicado en los planos. Este alargamiento genera que el brazo derecho se desplace hacia esa dirección, ocasionando un desplazamiento del eje derecho en la misma proporción, que trae como consecuencia que la superficie de sujeción en la mordaza de este lado de la maquina se reduzca, generando un déficit en la sujeción de la probeta y que en algunos casos puede llegar a soltarse.

El mecanismo para la aplicación de la carga consta de un tornillo sin fin con una pesa que al desplazarse varia la fuerza aplicada en el brazo derecho, por lo tanto para el calculo del momento en el cuello de la probeta fue necesario usar el diagrama de cuerpo libre del eje derecho, de manera tal de poder calcular el momento aplicado para diferentes posiciones de la pesa, y para lograr esto se colocaron una serie de marcas de referencia en la barra guía. Luego de obtener estos datos es posible calcular el esfuerzo aplicado a la probeta con la ayuda de la ecuación característica de la maquina que se presenta a continuación:

$$M[N.m] = \sigma[MPa] \cdot d^3[mm] \cdot 9,817 \cdot 10^{-5} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Con los valores de momento calculados se obtuvo una ecuación de momento en función de la variación de la posición de la pesa, y con esto fue posible obtener la distancia a la cual se encuentran los valores enteros de momento, y así poder realizar la escala. Que se elaboro en AutoCAD y luego se fijo en la barra guía.

2.2. Material Base

Para la realización de esta investigación, se utilizó una aleación de acero del tipo AISI 4340. Las probetas y especimenes se fabricaron a partir de un barra de 12.7 mm de diámetro y 6 m de largo, cuya composición química según el proveedor (FERRUM) se presenta a continuación:

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

AISI	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
4340	0,34	0,3	0,50	1,50	0,20	1,5

2.3. Dimensionamiento y Maquinado de las Probetas

Las probetas empleadas para la realización de los ensayos de fatiga se elaboraron en un torno de control numérico bajo la norma ASTM E 606, en lo que respecta a la sección calibrada, ya que las dimensiones generales están condicionadas por el equipo. A continuación se presentan dichas dimensiones: diámetro de los hombros de 12.7 mm, diámetro menor de la sección de ensayo (d) igual a 6.35 mm, radio continuo de la sección de ensayo (R) igual a 78.54 mm, diámetro de la sección de ensayo igual a 6.35 ± 0.01 mm y una longitud de 115,6 como se observa en la figura 2.2, debido a los problemas de agarre presentes en las moradaza derecha de la maquina donde se realizaran los ensayos.

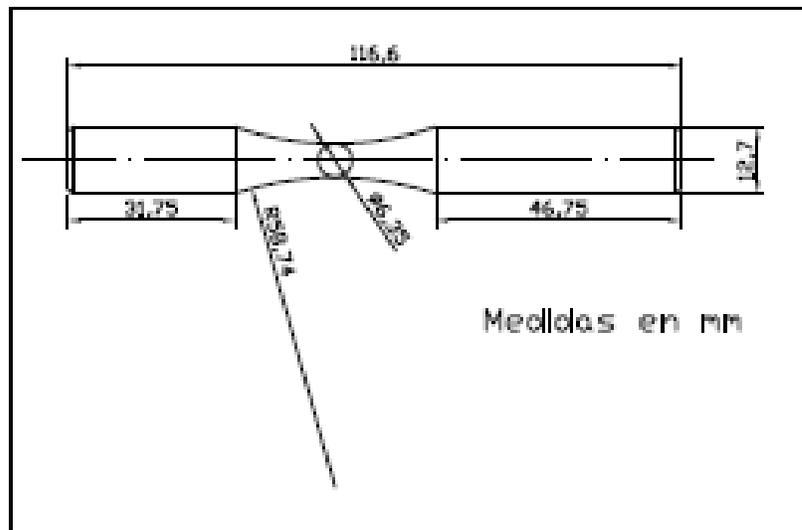


Fig. 2.2. Probeta de fatiga

Las probetas para el ensayo de tracción se elaboraron bajo la norma ASTM A 370 también en un torno de control numérico, con las siguientes dimensiones: diámetro de la sección de ensayo (d) igual a $6,25 \pm 0,12$ mm, longitud de la sección de ensayo de 32 mm, y radio de filete entre la sección de ensayo y el hombro de la probeta (R) igual a 5 mm, como se muestra en la figura 2.3. Además el diámetro de los hombros de estas probetas con y sin recubrimiento es de 12,7

mm, ya que serán extraídas de las misma barras de acero utilizada para la construcción de las probetas de fatiga.

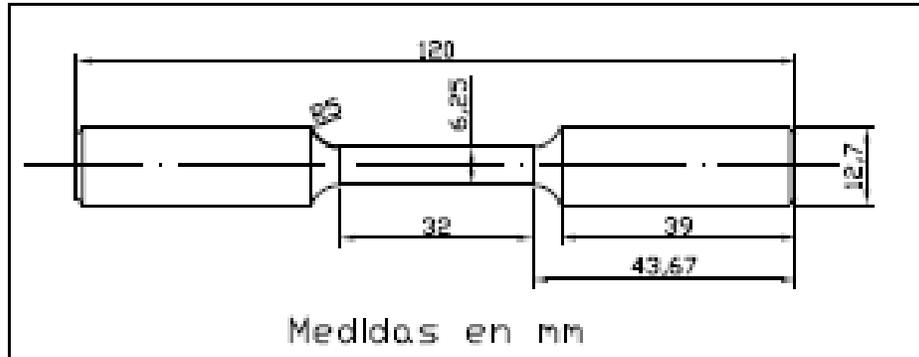


Fig. 2.3. Probeta de tracción

Tanto las probetas de tracción como las de fatiga se lijaron y pulieron en un torno a baja velocidad, con papel de lija de una granulometría entre 300 y 1200, siguiendo una dirección de lijado longitudinal con la finalidad de producir un lijado diagonal libre de entallas circunferenciales que luego podrían ser puntos de nucleación de las grietas y obtener una mejor homogeneidad en el espesor, en la rugosidad y en la adhesión del conjunto sustrato recubrimiento.

Los especímenes para la realización de las mediciones de dureza se elaboraron a partir de las misma barra de acero de 12.7 mm con una altura que varia de 10 mm a 15 mm, que luego fueron lijados y pulidos por ambas caras (Figura 2.4).

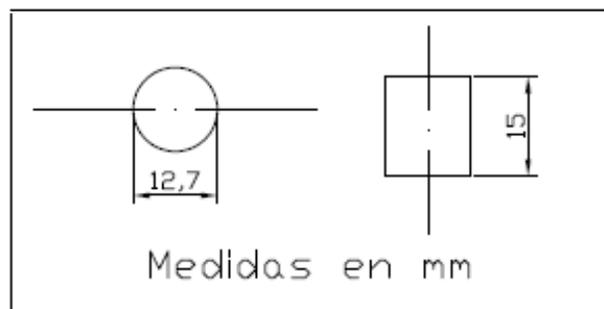


Fig. 2.4. Especímenes

2.4. Deposición del Recubrimiento

Una vez maquinadas y pulidas las probetas, se enviaron a la empresa Oerlikon Balzers en los Estados Unidos, en donde se recubrieron con una película multicapa base-AlCr (ver Fig. 2.5), elaborada a través del método de deposición física en fase de vapor asistido por plasma (PAPVD), el cual ha hecho posible optimizar y mejorar de forma decisiva las características clave de un recubrimiento dirigido a aplicaciones de taladrado. Una mayor resistencia a la abrasión y a la cizalladura, una menor tendencia a la adhesión, una gran tenacidad y la suavidad de su superficie nos permiten avanzar claramente en el rendimiento del taladrado [42]. Las propiedades de la película se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Propiedades del recubrimiento Base AlCr [42]

Propiedades del recubrimiento	
Material del recubrimiento	Base AlCr multicapa
Microdureza (HV 0.05)	3000
Coefficiente de fricción contra acero seco	0.25
Temperatura máxima de servicio (C°)	1100
Esfuerzo residual (GPa)	-3.0
Color	Cobre

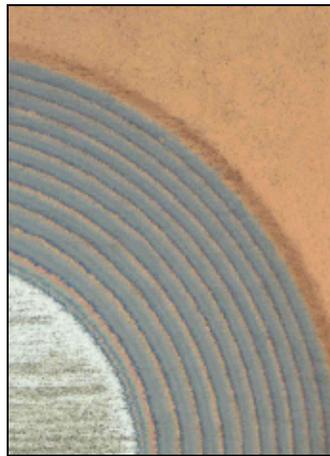


Fig. 2.5. Características del recubrimiento Base AlCr [42]

Para la realización de la investigación fueron necesarias un total de 96 probetas de fatiga, 6 probetas de tracción y 10 especímenes para dureza. En la tabla 2.3 se especifica la distribución y el número de probetas.

Tabla 2.3. Cantidad y Tipo de Probetas utilizadas.

Probeta	Condición	Cantidad	Norma ASTM
Dureza	Con recubrimiento	5	-----
	Sin recubrimiento	5	-----
Tracción	Con recubrimiento	3	A 370
	Sin recubrimiento	3	
Fatiga al Aire	Con recubrimiento	24	E 606 E 739 E 468
	Sin recubrimiento	24	
Fatiga Corrosión (sol. 3% NaCl)	Con recubrimiento	24	
	Sin recubrimiento	24	

2.5. Ensayo de Tracción

Los ensayos de tracción se llevaron a cabo en máquina de ensayo universal fabricada por la empresa Instron, modelo 8502 (Figura 2.6), que además posee una computadora encargada de controlar los ensayos y su vez de registrar los resultados de alargamiento y de carga aplicada. Se utilizó una velocidad de desplazamiento en la mordaza móvil de 3 mm/min. y los resultados se registraron con una frecuencia 3 s^{-1} . Se realizaron mediciones tanto del diámetro inicial como del diámetro final de las probetas, con la ayuda de un vernier digital, con el fin de determinar el área inicial (A_0) y final (A_f) de la sección transversal de la probeta.

Los datos de carga vs. alargamiento obtenidos durante el ensayo fueron corregidos por el efecto de la deformación elástica de los elementos mecánicos de la máquina, a continuación se presenta la ecuación utilizada para realizar dicha corrección:

$$(\Delta L_i)_{corr} = \Delta L_i - \Delta F_i \left(\frac{1}{K_{exp}} - \frac{1}{K_{prob}} \right) \quad (\text{Ec. 2.2})$$



Fig. 2.6. Maquina Instron 8502

Donde K_{exp} y K_{prob} son la rigidez experimental del conjunto y la rigidez teórica del material de la probeta, respectivamente. Estas se expresan como:

$$K_{exp} = \frac{\sum F_i}{\sum \Delta L_i} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$K_{prob} = \frac{A_0 E}{L_0} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

En donde:

A_0 : área inicial de la sección transversal de la probeta.

E: modulo de elasticidad del material.

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

Con el ensayo de tracción se determinó en límite de fluencia y la resistencia a la tracción tanto para el substrato como para el conjunto substrato-recubrimiento, lo que permitió seleccionar los niveles de esfuerzo necesarios para diseñar los ensayos de fatiga.

2.6. Ensayo de Fatiga

Los ensayos de fatiga y fatiga-corrosión se llevaron a cabo en la máquina de fatiga por flexión rotativa desarrollada por Ronnie Oropeza y Oswaldo Medina, que se ilustra en la figura 2.7. Esta máquina esta diseñada para aplicar ciclos de carga de inversión completa, en condiciones de flexión rotativa en voladizo, empleando probetas de forma cilíndrica. Dicha máquina esta equipada con un Controlador Lógico Programable (PLC) capaz de controlar la velocidad de rotación, la cámara de corrosión, y el contador de revoluciones, entre otras funciones. Adicionalmente posee una cámara conectada a una bomba de desplazamiento positivo encargada de generar el ambiente corrosivo que en este caso se logró con una solución de NaCl al 3%. Dicha cámara posee una boquilla en la parte superior que coincide con el cuello de la probeta manteniéndola húmeda durante todo el proceso.

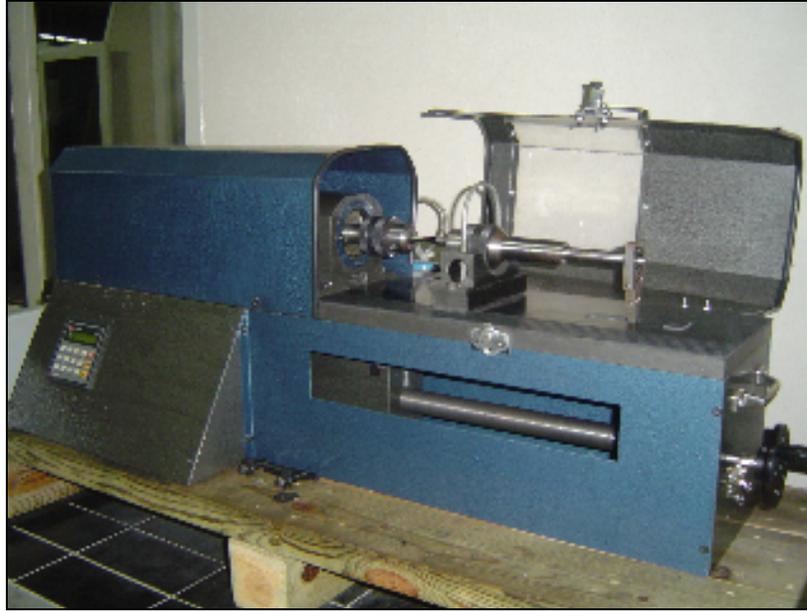


Fig. 2.7. Maquina de Ensayote Fatiga

Para el caso de los ensayos de fatiga y fatiga-corrosión se ensayaron 24 probetas en cuatro niveles de esfuerzo (60, 70, 80 y 90% del esfuerzo de fluencia), como lo indica la norma ASTM E 739 la cual establece que para determinar la resistencia a la fatiga así como la ecuación de Weibull en forma confiable, es necesario ensayar de 12 a 24 probetas. Además, es importante destacar que la norma ASTM E 468 recomienda precisar la reproducibilidad del estudio de Weibull con la siguiente expresión:

$$\% \text{ de Reproducibilidad} = (1 - N^{\circ} \text{ de niveles de } eS / N^{\circ} \text{ de probetas ensayadas}) * 100\%$$

(Ec.2.5)

El nivel de esfuerzo necesario para cada ensayo se aplica con la carga colocada en el tornillo sin fin, teniendo como referencia la barra calibrada en función de un momento flector, el cual se calcula en función del nivel de esfuerzo deseado y el cuello de la probeta, con la ecuación 2.1 presentada anteriormente.

Todos los ensayos de fatiga se efectuaron a una velocidad de rotación de unas 3000 rpm, lo que sugiere una frecuencia de 50 Hz. De los ensayos realizados se obtuvieron como datos el número de ciclos de falla para cada nivel de esfuerzo.

Los datos obtenidos se representaron gráficamente mediante una curva de Whöler, es decir una curva en escala doble logarítmica del esfuerzo alternante ($\log S_a$) en función del número de ciclos a falla ($\log N$). Con estos datos pueden ser evaluados dos modelos para determinar la vida a la fatiga: el de Basquin y el de Weibull.

El modelo de Basquin propone que la curva puede ser linealizada, y que se puede estimar la resistencia o vida a la fatiga por la siguiente expresión:

$$S_a = S_f (2 N_f)^b \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde S_f es el coeficiente de resistencia a la fatiga y b el exponente de Basquin, los cuales se determinan a partir de los datos experimentales, mediante una regresión por mínimos cuadrados.

Weibull propuso un modelo para el tratamiento de los datos en fatiga, además desarrollo otro modelo para realizar las curvas de fatiga esfuerzos vs número de ciclos, en escala semi-logarítmica, donde se tiene en cuenta la variación del límite de fatiga, esta ecuación se presenta a continuación:

$$S = S_e + \left(\frac{x}{C} \right)^{1/m} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde S_e es el límite de fatiga, C es una constante y m es el coeficiente de sensibilidad a la fatiga.

2.7. Ensayo de Dureza

Los especímenes cilíndricos tanto del sustrato como del conjunto sustrato recubrimiento fueron evaluados para determinar su dureza (Vickers Hv), y de esta manera verificar si se ve afectada por la deposición del recubrimiento. Para lograr esto se empleó un durómetro marca Leco (Fig. 2.8), con un penetrador Vickers, aplicando un barrido de cargas de: 300, 500 y 1000 g. Para la elaboración de este ensayo se dispuso de un software para el control de la pletina motorizada del equipo, con la finalidad de diseñar una plantilla que reproduciría los puntos donde se hicieron las indentaciones.



Fig. 2.8. Durómetro marca Leco

La plantilla se diseñó para realizar 20 medidas por carga, con una distribución de 5 x 4 puntos, separados a una distancia de 300 μm (ver Fig. 2.9), con la finalidad de evitar que el endurecimiento por deformación de una indentación afecte a su vecina. Una vez realizadas las indentaciones, con el

software se midieron las diagonales de cada huella, y a partir de estas medidas y el valor de carga aplicada, se estimó la dureza del conjunto sustrato recubrimiento.

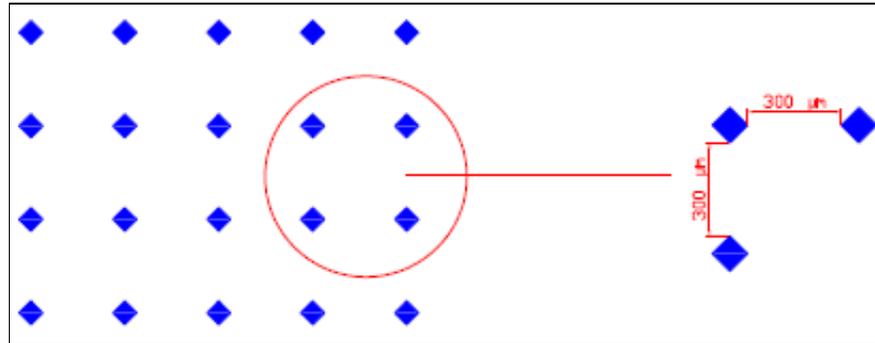


Fig. 2.9. Plantilla de indentaciones para el ensayo de Microdureza

Con estos datos de dureza compuesto, y aplicando el modelo propuesto por Puchi en el 2004 [30] se obtiene la dureza absoluta de la película.

2.8. Ensayo de la Calota Esférica

El espesor del recubrimiento se determinó con la ayuda de un equipo CALOTEST, marca CSEM (Fig. 2.10). En este método, el espécimen se coloca y se fija sobre una base inclinada por medio de unas mordazas, que garantizan su inmovilidad. Luego se pone en contacto con la superficie recubierta, una esfera de acero con un diámetro de 30 mm., la cual reposa sobre un eje cilíndrico acoplado a un motor eléctrico. Se utiliza una suspensión abrasiva de diamante 1 micrómetro, la cual actúa en contacto con la esfera y la superficie recubierta durante el ensayo. El eje transfiere movimiento a la esfera y esta se desliza sobre la superficie del recubrimiento, ocasionando el desgaste del mismo. Una vez que ha transcurrido un minuto, se ha desgastado una porción del recubrimiento dejando expuesto el sustrato y generando una huella.

Finalmente el espesor se determina por relaciones geométricas simples (ver figura 2.11), en función de los radios de las circunferencias concéntricas observadas en la huella y el radio de la esfera utilizada, empleando la ecuación:

$$E_r = \frac{1}{2} \left(\sqrt{4R_b^2 - D_{cs}^2} - \sqrt{4R_b^2 - D_{cr}^2} \right) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

En donde D_{cs} es el diámetro externo de la superficie del recubrimiento, D_{cr} es el diámetro interno del sustrato, y R_b es el radio de la esfera de acero. Las mediciones se realizaron con la ayuda de equipo de análisis de imágenes, que determinaron los valores de los diámetros, que fueron el resultado de un promedio de 5 mediciones.



Fig. 2.10. Equipo de Calotest.

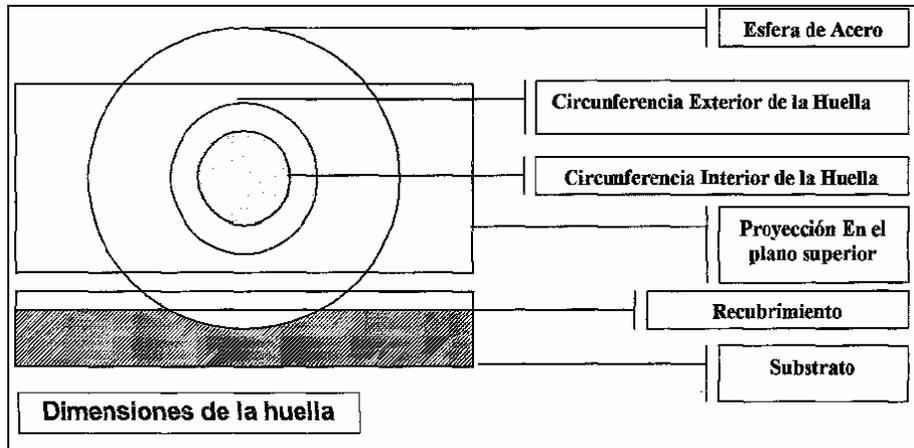


Fig. 2.11. Esquema de la abrasión producida por la técnica Calotest.

2.9. Análisis Fractográfico

El estudio fractográfico se llevó a cabo con la finalidad de evaluar la superficie de fractura de las muestras ensayadas a fin de establecer posibles mecanismos de propagación de grietas por fatiga, a través de técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido, en modo de imagen de electrones secundarios. Estas observaciones se realizaron en un microscopio electrónico de barrido, marca Hitachi, modelo S-200 (Fig. 2.12), con un voltaje de aceleración de 25 Kv y con un ángulo de incidencia no mayor de 60° , lo que garantiza un reporte de dimensiones reales a partir de las microfotográficas.

Se estudiaron las probetas con recubrimiento que fallaron a un número de ciclos cercano al promedio calculado para el nivel de esfuerzo correspondiente. Las observaciones se realizaron sobre la superficie de fractura de las muestras, para ubicar las zonas de avance de grietas por fatiga, las transiciones y los potenciales puntos de nucleación, estableciendo así la influencia del recubrimiento en el comportamiento a la fatiga y a la fatiga corrosión.

Por otra parte todas las muestras se limpiaron con acetona en el equipo ultrasonido, marca Buheler, durante 30 minutos, con la superficie de fractura completamente sumergida, luego se limpiaron con alcohol y se secaron con aire

caliente, con un secador de muestras metalográficas marca Buheler modelo Torremet. Todo esto con la finalidad de eliminar los óxidos y grasas depositados en la superficie de fractura.



Fig. 2.12. Microscópio Electrónico de Barrido.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS

CAPITULO III

RESULTADOS Y ANALISIS

3.1. Caracterización Preliminar

Una de las primeras evaluaciones realizadas al recubrimiento para su caracterización, fue la determinación de su espesor a través del método de la calota esférica, en el cual se obtuvo un valor de 1 μ m aproximadamente. Se puede destacar que el espesor fue uniforme a lo largo de toda la superficie recubierta, y este espesor se corresponde a los valores clásicos reportados en la literatura para este tipo de película, ya que la magnitud de los esfuerzos residuales generados en estos sistemas impedirían alcanzar mayores espesores, básicamente son reportados espesores entre 1 y 4 micrómetros

Adicionalmente, en las tablas 3.1 y 3.2 se muestran los resultados del ensayo de microindentación elaborado previamente, y luego se presenta la gráfica de dureza en función de la carga (Fig. 3.1). En dicha gráfica se puede observar que los valores de dureza para el sustrato y para el conjunto sustrato recubrimiento son similares, esto ocurre debido a que la dureza del sustrato no se vio afectada durante su estadía en el reactor donde se realizó el proceso de síntesis de la película, y que las condiciones de la misma no tuvieron influencia sobre esta propiedad, lo cual nos sugieren que el sustrato no debió experimentar cambio alguno microestructuralmente. Esto era de esperarse ya que no se alcanzan dentro del reactor temperaturas que sean capaces de eliminar el historial termomecánico previo.

Otra de las características a notar en este grafico, es que a medida que se aumenta la carga, aumenta también la dureza, debido al fenómeno de endurecimiento por deformación, que es mayor a medida que la carga es más grande.

Tabla 3.1. Ensayos de dureza sobre el Acero AISI 4340

AISI 4340					
Carga (g)	50	100	200	300	500
Dureza Hv	219,5	297,9	339,3	371,6	331,1
	241,6	303,3	378,8	317	343,2
	236,6	295	339,3	336,1	335,4
	236,6	303,3	378,8	330,5	357,5

Tabla 3.2. Ensayos de dureza sobre el Acero AISI 4340 + AlCr

AISI 4340 + Recubrimiento					
Carga (g)	50	100	200	300	500
Dureza Hv	264,2	311,8	368,6	363,4	376,5
	271,2	317,7	386	394,9	353,9
	261,3	317,7	365,1	366,2	365,6
	261,3	314,7	361,9	351,2	353,8

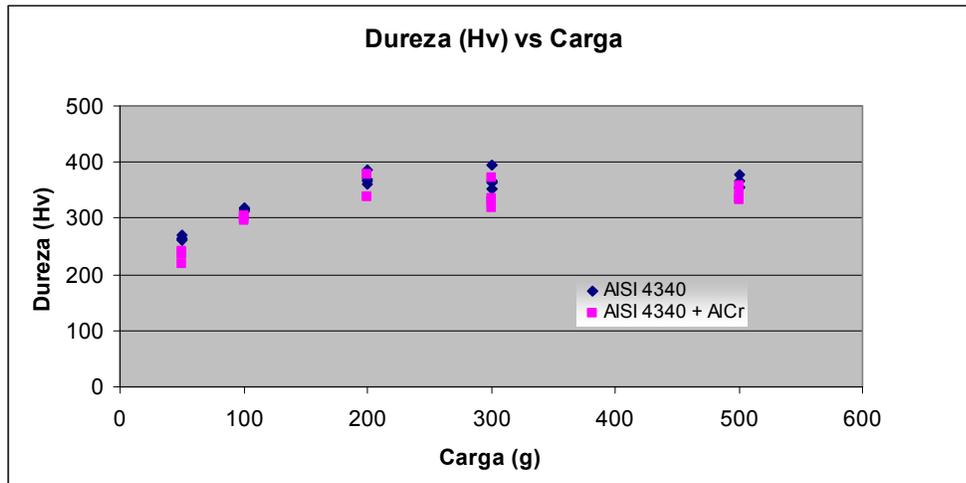


Fig. 3.1. Dureza vs Carga

A continuación se presenta la tabla del ensayo de tracción realizado para el material base y al conjunto substrato recubrimiento. De igual forma los datos de carga vs alargamiento para cada ensayo fueron tratados a fin de corregir la deformación elástica de los elementos de máquina.

Las variaciones que se perciben en las propiedades mecánicas del conjunto son muy pequeñas, y podrían estar asociadas a que el recubrimiento a pesar de ser una capa de aproximadamente 1 μm aporta un cierto aumento en la capacidad del conjunto a resistir la deformación plástica.

Tabla 3.3. Ensayos de Tracción para Acero AISI 4340 y 4340 + AlCr

<i>N° Probeta</i>	<i>Probeta</i>	<i>Longitud Cal.(mm)</i>	<i>Diámetro (i) (mm)</i>	<i>Carga Máx. (KN)</i>	<i>Ext. Fract. (mm)</i>	<i>Carga Fract. (KN)</i>	<i>Res.Fluencia (MPa)</i>	<i>Pto. Carga Máxima</i>
1	4340 + AlCr	32	6,39	34,85	4,267	24,88	990,5	69
2	4340 + AlCr	32	6,28	33,57	4,321	24,8	991,6	71
3	4340	32	6,39	30,982	4,4651	19,8	883,4	67
4	4340	32	6,28	34,501	5,3357	24,35	1024,94	79
5	4340	32	6,38	34,379	4,7692	23,44	942,4	69

3.2. Ensayos de Fatiga

Ahora se presentan los resultados de los ensayos de fatiga aire y fatiga corrosión, tanto del sustrato como del conjunto sustrato recubrimiento, los cuales se muestran en las tablas 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7, respectivamente. En dichas tablas se indica el diámetro del espécimen, el momento flector aplicado, el esfuerzo alternante asociado a dicho momento, el número de ciclos a falla para cada uno de los estados de esfuerzos, su promedio y la desviación estándar. Todos estos datos se encuentran reflejados en las curvas S-N (figuras: 3.2, 3.3 y 3.4), en donde se comparan el sustrato y el conjunto sustrato recubrimiento, para cada tipo de ensayo, y una grafica general donde se muestran todos los casos.

Tabla 3.4. Resultado de los ensayos de fatiga al aire AISI 4340 sin recubrimiento.

N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	6,35	21,7	865,8	5293	13	6,46	17,8	673,4	63377
2	6,29	21,1		5509	14	6,44	17,6		51168
3	6,29	21,1		11402	15	6,38	17,1		95156
4	6,3	21,2		5532	16	6,38	17,1		57334
5	6,31	21,3		4448	17	6,4	17,3		47384
6	6,36	21,8		4395	18	6,37	17		79484
Promedio				6096,5	Promedio				65650,5
Desviación estándar				2648,41	Desviación estándar				18328,56
N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
7	6,44	20,1	769,6	20123	18	6,4	16,1	625,3	295812
8	6,39	19,7		16784	20	6,4	16,1		68227
9	6,39	19,7		21616	21	6,44	16,4		132972
10	6,45	20,2		19134	22	6,42	16,2		126696
11	6,41	19,8		22990	23	6,43	16,3		140305
12	6,36	19,4		22185	24	6,38	16		191700
Promedio				20472	Promedio				165991,1
Desviación estándar				2284,59	Desviación estándar				77354,08

Tabla 3.5. Resultado de los ensayos de fatiga al aire AISI 4340 con recubrimiento.

N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	6,35	15,3	612	838465	13	6,41	17,7	688	139035
2	6,29	14,95		793500	14	6,40	17,7		106605
3	6,42	15,8		669760	15	6,38	17,5		120290
4	6,3	15		503700	16	6,39	17,6		193315
5	6,4	15,7		578910	17	6,40	17,7		78200
6	6,37	15,5		518420	18	6,37	17,4		149500
Promedio				650459,16	Promedio				131157,5
Desviación estándar				141613,04	Desviación estándar				39465,12
N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
7	6,42	16,8	650	177395	18	6,39	18,5	726	58420
8	6,37	16,4		150590	20	6,4	18,6		49220
9	6,43	16,9		286350	21	6,37	18,4		88090
10	6,41	16,8		334765	22	6,42	18,8		68310
11	6,41	16,8		163390	23	6,41	18,7		76245
12	6,39	16,6		258175	24	6,38	18,5		75210
Promedio				228444,16	Promedio				69249,16
Desviación estándar				75419,44	Desviación estándar				13847,53

Tabla 3.6. Resultado de los ensayos de fatiga corrosión AISI 4340 sin recubrimiento.

N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	6,46	23	865,8	4032	13	6,37	17,1	673,4	35720
2	6,44	22,8		8588	14	6,4	17,3		31795
3	6,45	22,9		10245	15	6,39	17,2		28666
4	6,45	22,9		8182	16	6,41	17,4		37228
5	6,46	23		7779	17	6,36	17		26602
6	6,41	22,5		4187	18	6,39	17,2		27364
Promedio				7168,83	Promedio				31229,16
Desviación estándar				2514,27	Desviación estándar				4458,55
N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
7	6,43	20	769,6	23690	18	6,37	14,6	625,3	76792
8	6,43	20		11125	20	6,39	14,7		56721
9	6,45	20,2		27493	21	6,42	14,9		66306
10	6,41	19,8		14965	22	6,38	14,7		70774
11	6,41	19,8		14257	23	6,39	14,7		66718
12	6,4	19,8		17182	24	6,4	14,8		73567
Promedio				18118,66	Promedio				68479,66
Desviación estándar				6221,97	Desviación estándar				7019,03

Tabla 3.7. Resultado de los ensayos de fatiga corrosión AISI 4340 con recubrimiento.

N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	6,43	16	612	214130	13	6,37	17,4	688	40825
2	6,44	16,1		99935	14	6,39	17,6		37950
3	6,42	16,2		92230	15	6,39	17,6		28520
4	6,45	16,2		68195	16	6,41	17,7		65550
5	6,44	16,2		92345	17	6,38	17,5		41400
6	6,41	15,9		81420	18	6,34	17,7		39790
Promedio				108042,5	Promedio				42339,16
Desviación estándar				53128,74	Desviación estándar				12317,87
N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Diámetro (mm)	Momento (Nm)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
7	6,43	16,9	650	22540	18	6,37	18,4	726	20585
8	6,4	16,7		47495	20	6,39	18,5		58995
9	6,45	17,1		51635	21	6,42	18,8		40940
10	6,42	16,8		38870	22	6,45	19,1		41055
11	6,41	16,8		92345	23	6,43	18,9		39560
12	6,4	16,7		59915	24	6,4	18,6		44390
Promedio				52133,33	Promedio				40920,83
Desviación estándar				23456,24	Desviación estándar				12281,09

En la figura 3.2, se observan las curvas S-N para el substrato y conjunto substrato recubrimiento, ensayados al aire, siendo evidente que el recubrimiento genera un desplazamiento hacia la derecha de la curva, lo que se traduce en un aumento en la vida a la fatiga de los especimenes recubiertos, y además, la pendiente de la curva para el 4340 + AlCr es menor, por lo tanto a medida que se disminuye el esfuerzo, el aumento de los ciclos a falla es mayor que en los esfuerzos mas altos. Por ejemplo, si comparamos el número de ciclos a falla para un esfuerzo de 708 MPa con los de un esfuerzo de 631 MPa, se observa un aumento de aproximadamente el 100%.

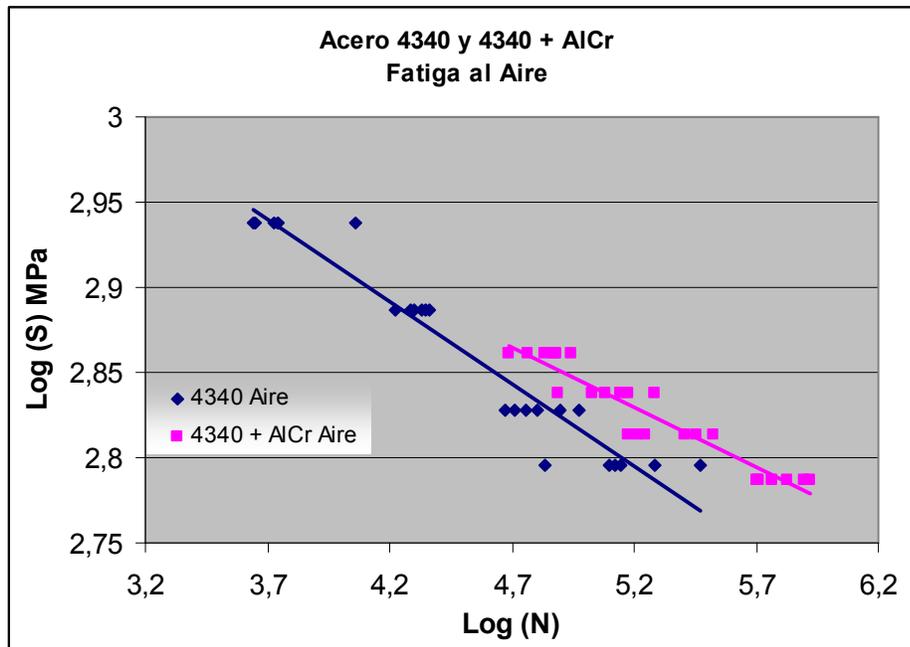


Fig. 3.2. Curvas S-N para condiciones de Fatiga al aire

En la figura 3.3, se ilustran las curvas S-N para el substrato y el conjunto substrato recubrimiento, ensayados en una solución de NaCl al 3%, donde se observa que el recubrimiento genera una disminución de la pendiente de la curva bastante pronunciado, lo que indica que para un valor de esfuerzo elevado el número de ciclos a falla tiende a igualarse al del substrato. Esto sugiere que el conjunto es mas susceptible al ambiente corrosivo cuando el esfuerzo al que esta sometido es mayor.

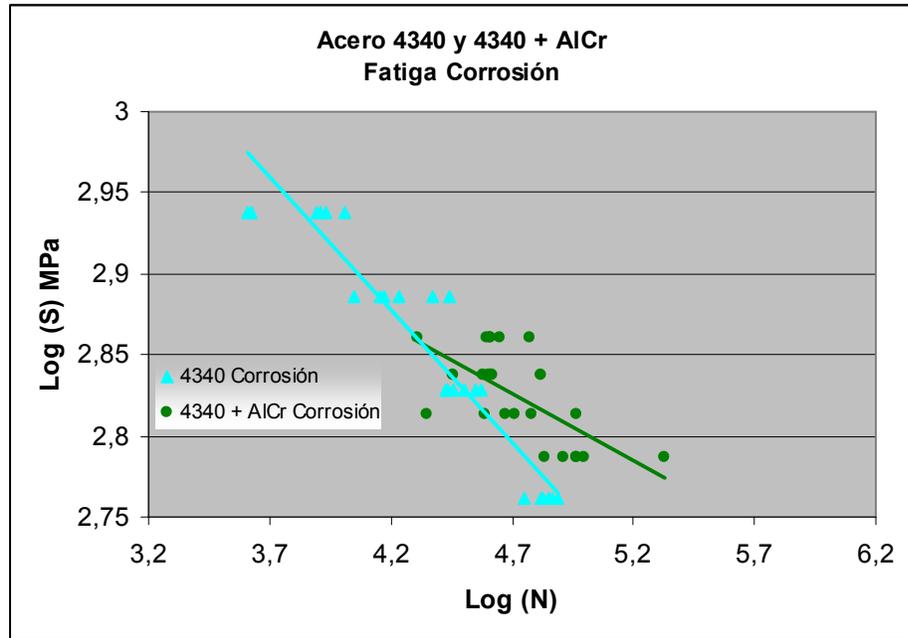


Fig. 3.3. Curvas S-N para la condición de Fatiga Corrosión

En la figura 3.4, se muestran las curvas S-N, para todos los ensayos realizados, es decir fatiga al aire y fatiga corrosión, del acero AISI 4340 y AISI 4340 + AlCr. En esta grafica se observa que el recubrimiento presenta un mejor comportamiento al aire en comparación al comportamiento en un ambiente corrosivo, esto se demuestra evaluando esta diferencia, por ejemplo para un esfuerzo de 653 MPa, en donde el incremento de los ciclos a falla bajo la condición de fatiga aire fue de 169%, y el de los ciclos a falla para un ambiente corrosivo fue del 90%, aproximadamente. Lo anteriormente expuesto podría sugerir que la presencia del recubrimiento no fue del todo efectiva en cuanto al aislamiento del espécimen del medio, adicionalmente si consideramos que el recubrimiento es noble entonces al fracturar dejaría expuestas zonas anódicas en las cuales se esperaría un aumento en la velocidad de corrosión y por ende un efecto del incremento en la velocidad de propagación de la grieta por efecto de la aireación diferencial. Sin embargo cabe destacar que pareciera que para niveles de esfuerzos muy elevados indistintamente que estemos en ambientes corrosivos o no, el evento de falla esta condicionado por el esfuerzo alternante, de manera que es tan bajo en numero de ciclos a falla que la interacción con el medio no es

determinante, esto queda demostrado al ver que las curvas se solapan para niveles elevados de esfuerzos, en el caso particular de la presente investigación este comportamiento se observo para niveles de esfuerzos cercanos al 90% del esfuerzo de fluencia.

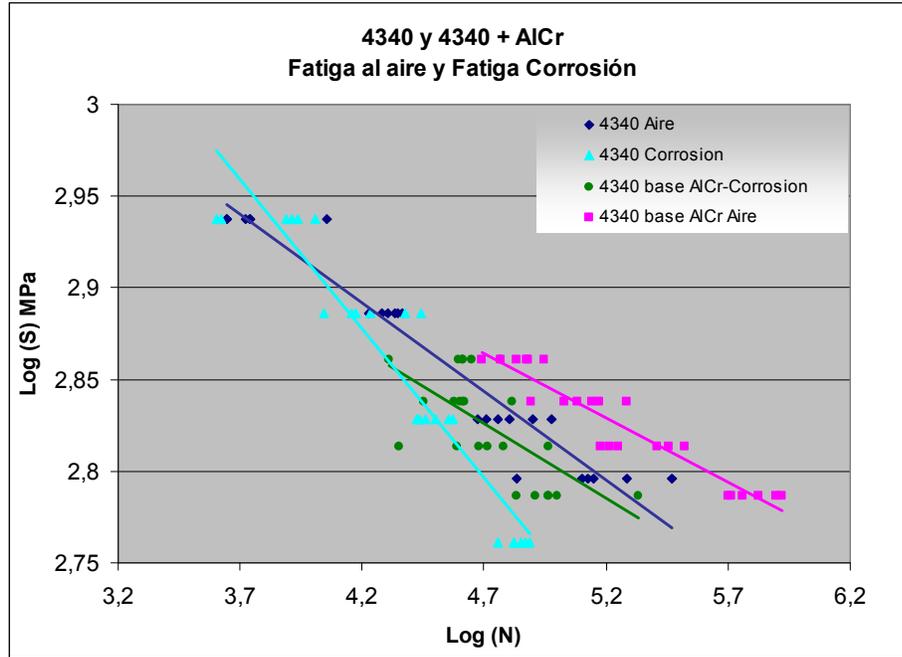


Fig. 3.4. Curvas S-N para todas las condiciones de ensayos y tipos de especímenes.

Es importante presentar un análisis del comportamiento de los valores de la desviación estándar de los datos obtenidos en los ensayos de fatiga, debido a que están estrechamente relacionados al fenómeno de nucleación de la grieta. En este sentido se puede observar que a medida que disminuye el esfuerzo alternante aplicado, la desviación estándar aumenta significativamente para el caso de fatiga al aire del material recubierto, lo que puede ser atribuido al hecho ampliamente discutido en la literatura especializada, en donde se afirma que para niveles de esfuerzos relativamente bajos el proceso de falla es controlado por el evento de nucleación, lo cual introduce gran dispersión en los datos, y esto se ve reflejado en los valores de desviación estándar para estos niveles de esfuerzo, indicando que el recubrimiento actúa como un condicionador en la nucleación de las grietas.

Ahora si se compara la desviación estándar del conjunto sustrato recubrimiento a un mismo nivel de esfuerzo (612 MPa), en fatiga al aire y en fatiga corrosión, se puede notar que es mucho mayor la desviación estándar para la fatiga al aire que en la fatiga corrosión, ya que el ambiente corrosivo afecta significativamente el proceso de nucleación de la grieta.

Otro de los análisis que se debe presentar, es la influencia de los esfuerzos residuales compresivos en el incremento de la vida a la fatiga, como se reportó anteriormente. De acuerdo a lo mencionado en la literatura [19 - 20], los depósitos de películas mediante las técnicas de PVD y CVD, presentan esfuerzos residuales compresivos los cuales mejoran la vida a la fatiga, a diferencia de los esfuerzos residuales en tensión, que tienden a incrementar la velocidad de propagación de la grieta [38]. En este sentido, está claro que una vez que ocurre la nucleación de la grieta la falla por fatiga está condicionada a la velocidad de propagación de la misma. Incluso se podría establecer como influye la presencia de estos esfuerzos residuales, a partir de como afectan la relación de esfuerzo efectivo que esta imperando y luego ver como R está relacionado con la velocidad de propagación de la grieta. En la ecuación 1.14 se evidencia como influye el valor de R en la velocidad de propagación de la grieta, por lo tanto el incremento en la vida a la fatiga va a depender de la variación de este valor. En la presente investigación los ensayos de fatiga por flexión rotativa, se realizan bajo la condición de $R = 0$, además es claro que los recubrimientos duros depositados mediante la técnica de PAPVD, como es el caso de este trabajo, generan esfuerzos residuales compresivos, lo cual justifica el incremento en la vida a la fatiga, ya que la velocidad de propagación de la grieta debería verse disminuido.

En las siguientes tablas resumen se reportan los valores de los parámetros involucrados en el modelo de Basquin, para las distintas condiciones evaluadas:

Tabla 3.8. Parámetros de la ecuación de Basquin para el acero AISI 4340 sin recubrimiento en fatiga al aire

Obtención de la ecuación de Basquin para AISI 4340 sin recubrimiento			
Datos de la curva		Parámetros de Ec. Basquin	
			b
Pendiente	-0,0966	σ'_f	1983,35
Intersección (eje Y)	3,2974	Ecuación de Basquin	
R^2	0,9386	$\sigma_a = 1986,35(N)^{-0,0966}$	

Tabla 3.9. Parámetros de la ecuación de Basquin para el acero AISI 4340 con recubrimiento en fatiga al aire

Obtención de la ecuación de Basquin para AISI 4340 con recubrimiento			
Datos de la curva		Parámetros de Ec. Basquin	
			b
Pendiente	-0,0703	σ'_f	1565,66
Intersección (eje Y)	3,1947	Ecuación de Basquin	
R^2	0,8989	$\sigma_a = 1565,66(N)^{-0,0703}$	

Tabla 3.10. Parámetros de la ecuación de Basquin para el acero AISI 4340 sin recubrimiento en fatiga corrosión

Obtención de la ecuación de Basquin para AISI 4340 sin recubrimiento			
Datos de la curva		Parámetros de Ec. Basquin	
			B
Pendiente	-0,1633	σ'_f	3659,31
Intersección (eje Y)	3,5634	Ecuación de Basquin	
R^2	0,9045	$\sigma_a = 3659,31(N)^{-0,1633}$	

Tabla 3.11. Parámetros de la ecuación de Basquin para el acero AISI 4340 con recubrimiento en fatiga corrosión

Obtención de la ecuación de Basquin para AISI 4340 con recubrimiento			
Datos de la curva		Parámetros de Ec. Basquin	
		B	-0,0819
Pendiente	-0,0819	σ'_f	1626,29
Intersección (eje Y)	3,2112	Ecuación de Basquin	
R ²	0,4332	$\sigma_a = 1626,29(N)^{-0,0819}$	

A continuación se presentan tanto la grafica como las tablas resumen, en donde se reportan los valores de los parámetros de la ecuación utilizada en el modelo de Weibull. Esto con el fin de establecer una comparación entre el modelo de Basquin y el modelo de Weibull, de manera de indicar el modelo que mejor se ajuste a los datos experimentales y a su vez determinar cual de los dos es más confiable a la hora de predecir una falla.

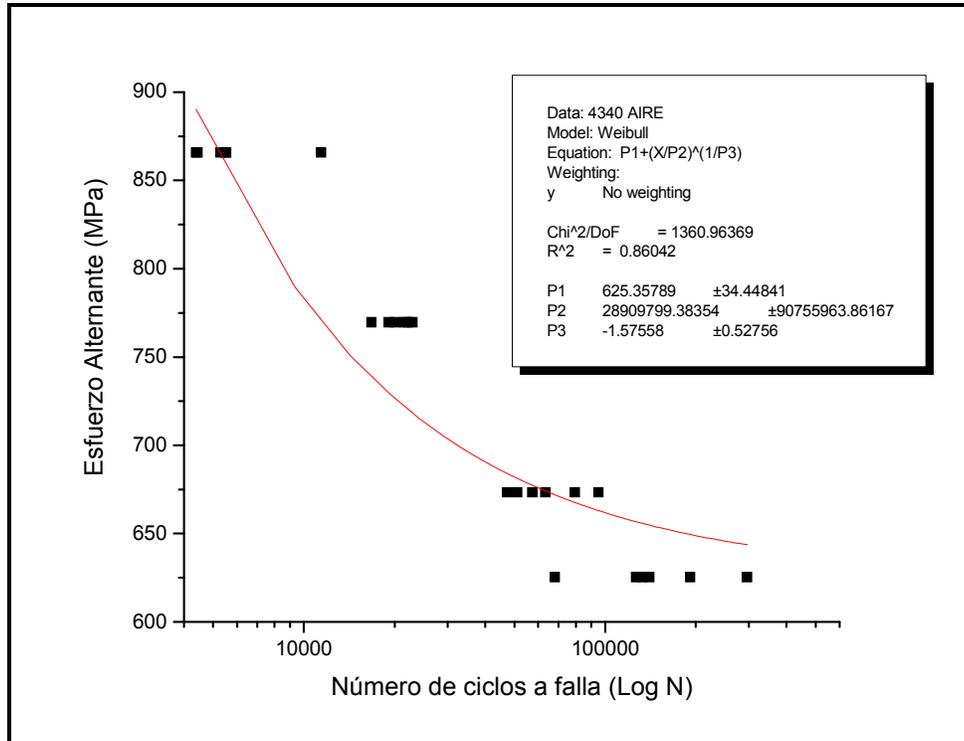


Fig. 3.5. Curva S-N por el modelo de Weibull para 4340 en fatiga al aire

Tabla 3.12. Parámetros de la ecuación de Weibull para el acero AISI 4340 sin recubrimiento en fatiga al aire

Obtención de la ecuación de Weibull para AISI 4340 sin recubrimiento			
Datos de la curva		Parámetros de Ec. Weibull	
R ²	0,8604	Se	625,35
Ecuación de Weibull		$S = S_e + \left(\frac{x}{C}\right)^{1/m}$	

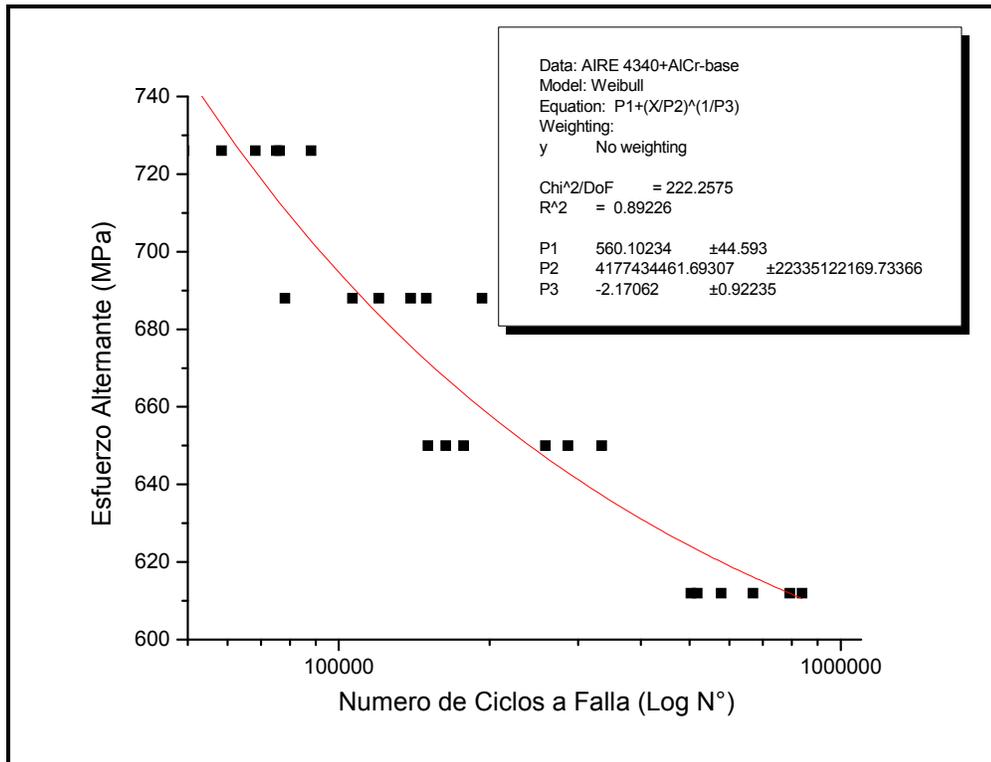


Fig. 3.6. Curva S-N por el modelo de Weibull para 4340 + AICr en fatiga al aire

Tabla 3.13. Parámetros de la ecuación de Weibull para el acero AISI 4340 con recubrimiento en fatiga al aire

Obtención de la ecuación de Weibull para AISI 4340 con recubrimiento			
Datos de la curva		Parámetros de Ec. Weibull	
			m
R ²	0,8922	Se	560,10
Ecuación de Weibull		$S = S_e + \left(\frac{x}{C}\right)^{1/m}$	

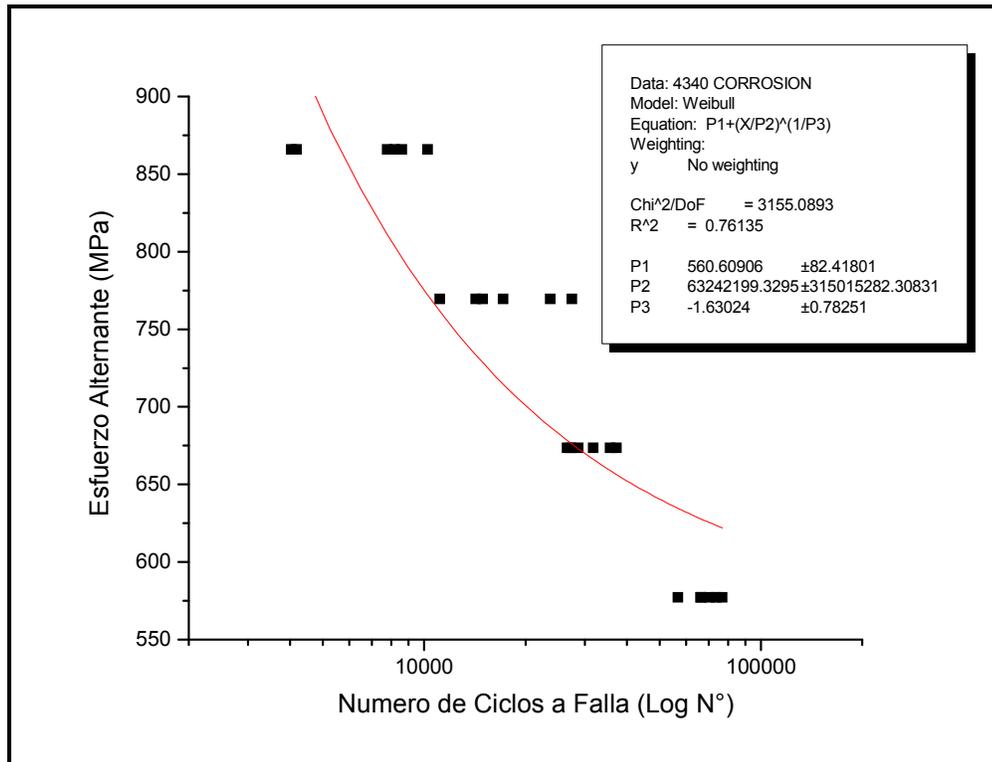


Fig. 3.7. Curva S-N por el modelo de Weibull para 4340 en fatiga corrosión

Tabla 3.14. Parámetros de la ecuación de Weibull para el acero AISI 4340 sin recubrimiento en fatiga corrosión

Obtención de la ecuación de Weibull para AISI 4340 sin recubrimiento			
Datos de la curva		Parámetros de Ec. Weibull	
			m
R ²	0,7613	Se	560,60
Ecuación de Weibull		$S = S_e + \left(\frac{x}{C}\right)^{1/m}$	

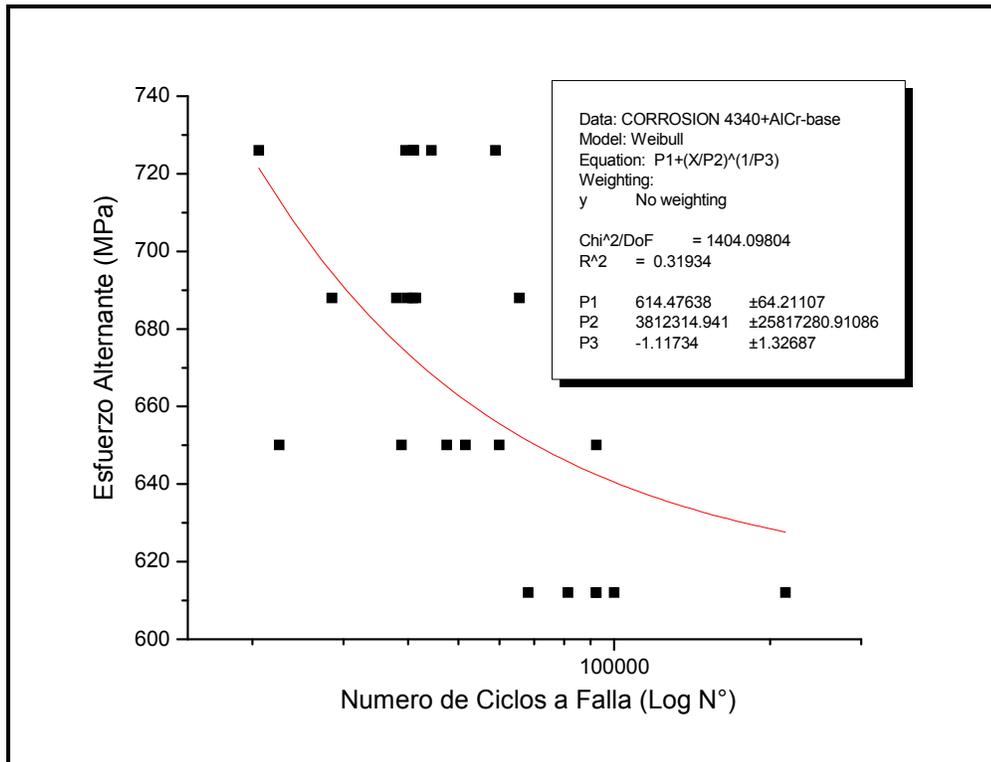


Fig. 3.8. Curva S-N por el modelo de Weibull para 4340 + AlCr en fatiga corrosión

Tabla 3.15. Parámetros de la ecuación de Weibull para el acero AISI 4340 con recubrimiento en fatiga corrosión

Obtención de la ecuación de Weibull para AISI 4340 con recubrimiento			
Datos de la curva		Parámetros de Ec. Weibull	
		m	-1,11
R ²	0,3193	Se	614,47
Ecuación de Weibull		$S = S_e + \left(\frac{x}{C}\right)^{1/m}$	

Una vez analizado los resultados derivados del tratamiento de los datos, a través del modelo presentado por Weibull, podemos decir que en general, el modelo de Basquin presenta un mejor ajuste, como se evidencia en los valores de R², por lo menos para el caso de los sistemas aquí evaluados, a pesar de que ciertamente el modelo de Weibull es un método mas elaborado y que incluso permite la estimación del limite de fatiga a partir de ensayos de vida, esto representa una gran ventaja si tomamos en consideración los métodos clásicos para la estimación de este parámetro los cuales son algo engorrosos. Ahora bien, otro análisis que pudiésemos abordar seria el relacionado con la comparación de cual de los modelos es mas conservador, y por ende minimizar la posibilidad de fallas inesperadas. En este caso parecieran ser similares ambos modelos, claro esta que ambos fueron estimados a partir de la media para cada nivel de esfuerzos, es importante destacar que para el caso del modelo de Weibull si realizáramos la distribución previa propuesta por el mismo autor, encontraríamos diferencias substanciales en cuanto a la seguridad de diseño.

3.3 Microscopía Electrónica de Barrido

Una vez concluidos los ensayos de fatiga se selecciono un número de probetas, para ser analizadas por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido, con el fin de estudiar las características de la superficie de fractura. Identificando los lugares de iniciación de las grietas y así tratar de determinar el rol del recubrimiento en el mecanismo de fractura por fatiga.

En la figura 3.9a y 3.10a, se observa la superficie de fractura de las probetas ensayadas en fatiga al aire a un esfuerzo alternante máximo de 711 y 757 MPa respectivamente. De la observación de estas figuras, se percibe una superficie típica de fractura, donde se aprecia que indistintamente del nivel de esfuerzo, los especímenes muestran múltiples inicios de grietas, como es evidente por la presencia de escalones de clivaje. No obstante, se aprecia claramente que en los dos casos existe una grieta principal, cuyo origen es señalado por la flecha blanca (figura 3.9b y 3.10b), la cual consume mayoritariamente la sección de la probeta, siendo esta la que controla el proceso de fractura, por lo que en todos los casos la zona de fractura por sobrecarga se ve desplazada en dirección diametralmente opuesta al inicio de la grieta.

En la figura 3.11a y b, se puede ver la superficie de fractura en la zona de propagación de la grieta, se evidencia claramente la presencia de estriaciones en fatiga, el cual es un aspecto morfológico que define claramente el tipo de falla por avance progresivo de una grieta bajo carga dinámicas.

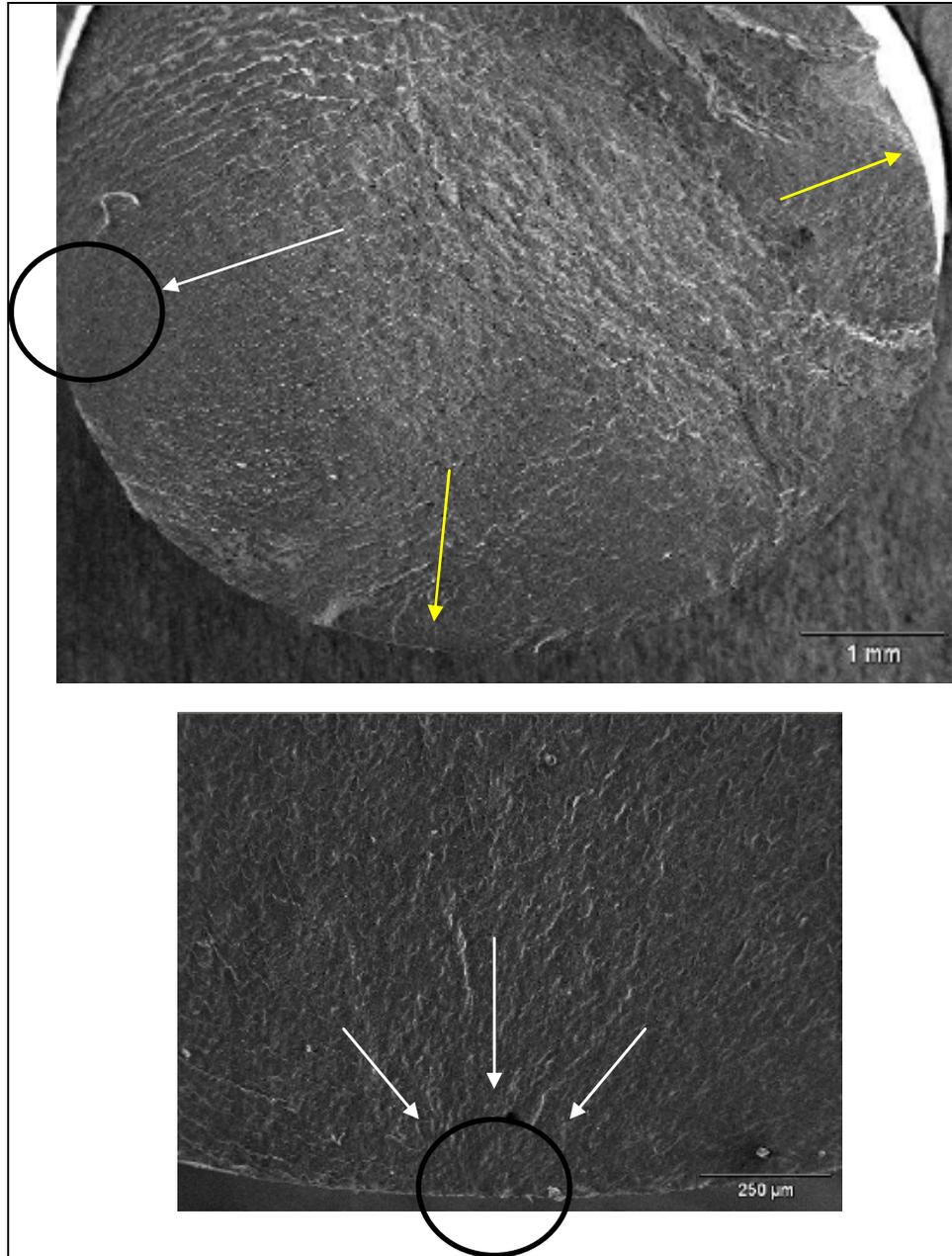


Fig. 3.9. (a) Vista general del conjunto sustrato recubrimiento ensayado a un esfuerzo de 757MPa, en condiciones de fatiga al aire. (b) Detalle del punto de nucleación principal.

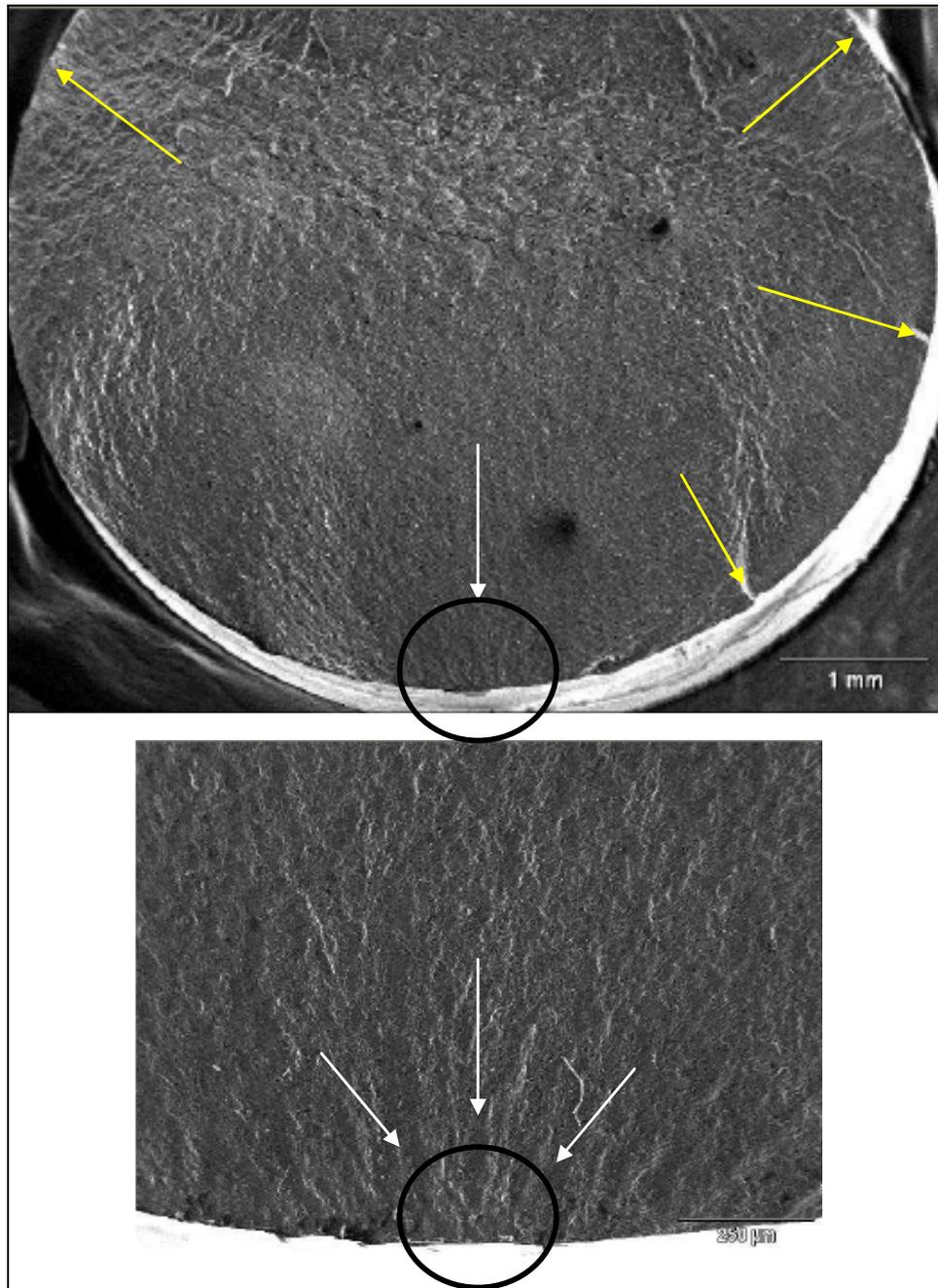


Fig. 3.10. (a) Vista general del conjunto sustrato recubrimiento ensayado a un esfuerzo de 711MPa, en condiciones de fatiga al aire. (b) Detalle del punto de nucleación principal.

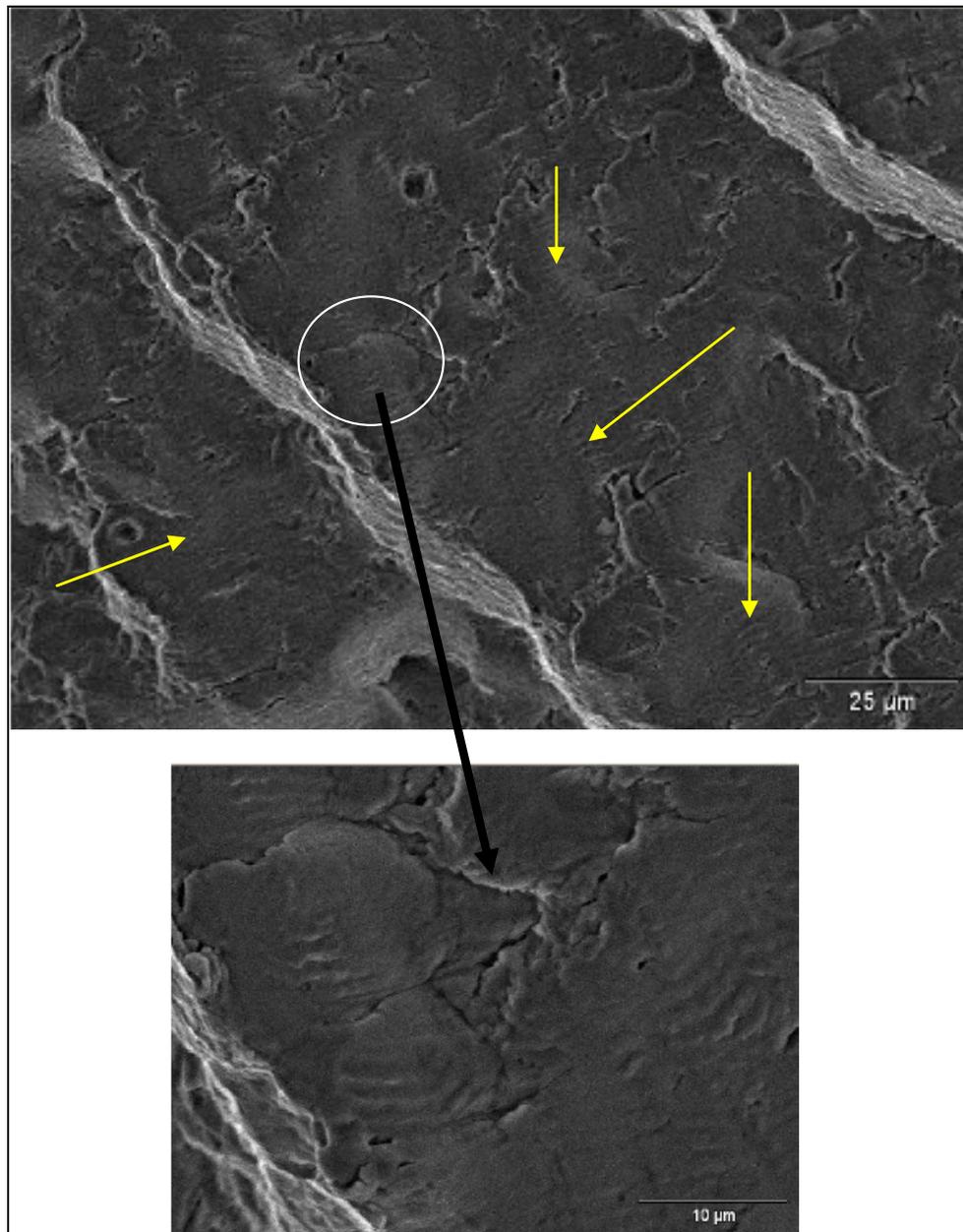


Fig. 3.11. (a) Vista de la superficie de fractura. (b) Detalle de las estriaciones por fatiga durante la propagación de la grieta.

Ahora bien, en la figura 3.12a, se puede observar que en la superficie libre del recubrimiento las grietas están asociadas a la presencia de poros, lo cual sugiere que estos están funcionando como sitios potenciales para la nucleación de las grietas por fatiga en el material, dichos poros de acuerdo a la literatura se generan debido al desprendimiento de moléculas débilmente adheridas a la película durante el proceso de deposición como consecuencia del proceso de Sputtering.

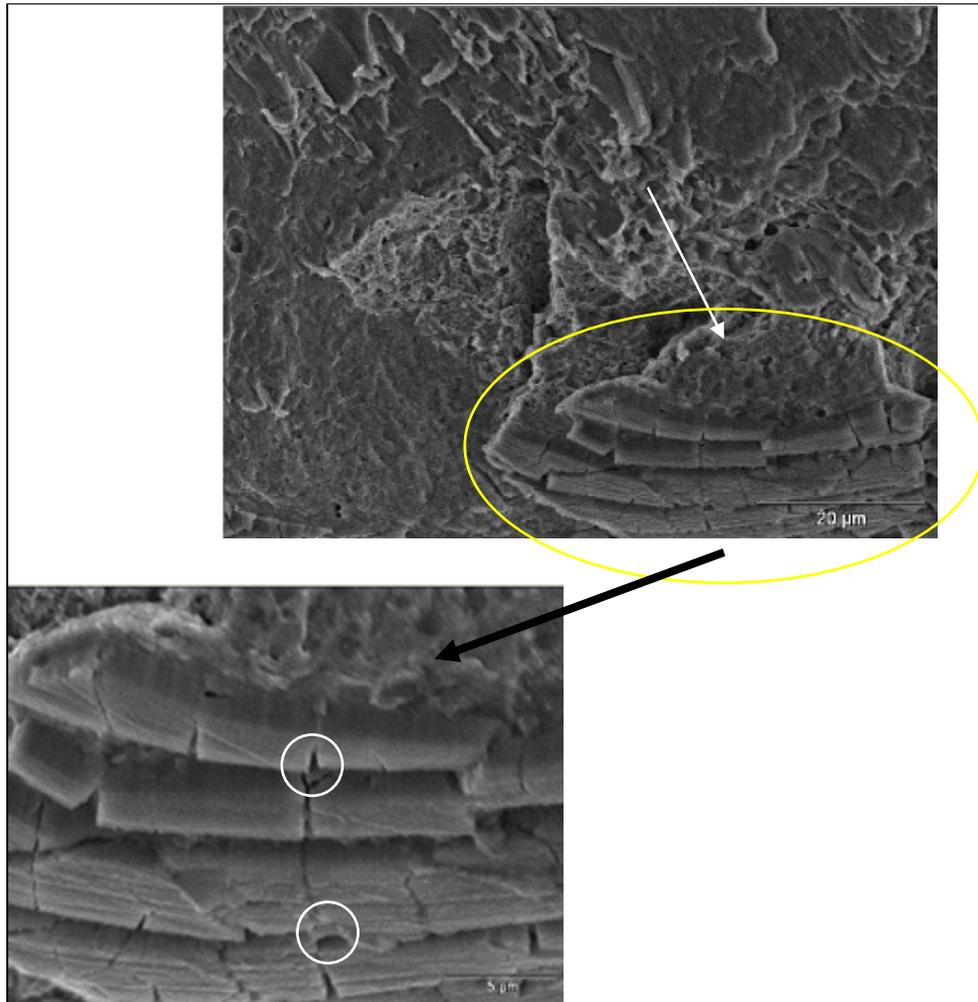


Fig. 3.12. (a) Vista de la superficie de fractura y el recubrimiento. (b) Detalle de las grietas y los poros en el recubrimiento.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Una vez realizado el análisis de los resultados obtenidos a partir de todas las evaluaciones experimentales realizadas en el presente estudio, se ha podido llegar a las siguientes conclusiones, las cuales se presentan a continuación:

1. El proceso de deposición por PAPVD garantiza uniformidad en el espesor de la película.
2. La dureza del sustrato no se ve afectada durante la deposición del recubrimiento, y a medida que se aumenta la carga, aumenta también la dureza, debido al fenómeno de endurecimiento por deformación.
3. Al parecer las propiedades en tracción son susceptibles a reflejar cambios y estos podrían estar asociados a que el recubrimiento aporta un cierto aumento en la capacidad del conjunto a resistir la deformación plástica.
4. Se puede observar que el recubrimiento, provee un incremento significativo, alrededor del 169%, en la vida a la fatiga, en comparación con el sustrato, cuando el material es ensayado al aire bajo condiciones de flexión rotativa. En el caso de fatiga corrosión, se observó un incremento del 90% en el número de ciclos a falla. Lo anteriormente expuesto podría sugerir que el conjunto es susceptible a al ambiente corrosivo cuando el esfuerzo al que esta sometido es mayor y que la presencia del recubrimiento no fue del todo efectiva en cuanto al aislamiento del espécimen del medio.
5. Para niveles de esfuerzos muy elevados indistintamente que estemos en ambientes corrosivos o no, el evento de falla esta condicionado por el esfuerzo alternante, en el caso particular de la presente investigación este

comportamiento se observo para niveles de esfuerzos cercanos al 90% del esfuerzo de fluencia.

6. A medida que disminuye el esfuerzo alternante aplicado, la desviación estándar aumenta significativamente para el caso de fatiga al aire del material recubierto, debido a que el proceso de falla es controlado por el evento de nucleación, indicando que el recubrimiento actúa como un condicionador en la nucleación de las grietas.
7. Los recubrimientos duros depositados mediante la técnica de PAPVD, como es el caso de este trabajo, generan esfuerzos residuales compresivos, lo cual justifica el incremento en la vida a la fatiga, ya que la velocidad de propagación de la grieta debería verse disminuido.
8. El modelo de Basquin presenta un mejor ajuste, como se evidencia en los valores de R^2 , que el modelo de Weibull.
9. Ambos modelos parecen ser similares en cuanto a la confiabilidad, pero para el caso del modelo de Weibull si realizáramos la distribución previa propuesta, encontraríamos diferencias substanciales en cuanto a la seguridad de diseño.
10. En la superficie libre del recubrimiento las grietas están asociadas a la presencia de poros, lo cual sugiere que estos están fungiendo como sitios potenciales para la nucleación de la grieta.

5.2. Recomendaciones

1. Tramitar la adquisición de un reactor donde sea posible realizar este tipo de recubrimientos en el país.
2. Tratar de evaluar la condición de esfuerzos residuales, valor promedio y perfil a través del espesor, para poder corroborar las hipótesis aquí planteadas.
3. Explorar para conjuntos similares el comportamiento en fatiga a altas temperaturas.
4. Realizar evaluaciones a nivel de microscopía electrónica de transmisión para la caracterización estructural de recubrimiento.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Askeland, D. (1987). La Ciencia e Ingeniería de lo Materiales. México. Grupo Editorial Iberoamérica. p 256.
- [2] <http://www.cga.com.co/pdfs/4340.pdf> (consultado 2007, 11, 10).
- [3] Forrest, P.G. (1972) Fatiga de los metales. Bilbao (España). Ediciones URMO.
- [4] Jaramillo, H.E y otros (2004). Síntesis y caracterización de recubrimientos de TiN, TiC y TiCN sobre acero AISI 4340. Revista de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, 71 (144): 93-102.
- [5] American Society for Metals, (1992) ASM Handbook.-Failure Analysis and Prevention, 4^{ta} Edición, Vol. 11, Ohio.
- [6] R.W.K. Honeycombe, “The Plastic Deformation of Metals”, Edward Arnold, London, 1975.
- [7] Mariño, C. y Ortiz, M. “Estudio de fatiga y corrosión fatiga de un acero SAE 4140 recubierto con un depósito de cromo duro”. Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2001.
- [8] <http://www.ing.unlp.edu.ar/aeron/catedras/materiales/fatiga.pdf> (consultado 2008, 01, 20).
- [9] Cazaud, R. (1957) La Fatiga de los Metales. Madrid. Editorial Aguilar.
- [10] Sinclair, G.M y Dolan, T.J (1950) Effects of Austenitic Grain Size and Metalurgical Structure on the Mechanical Properties of Steel. *Proc. Ame. Soc. Test. Mat.* 50. Vol 30, N° (4), pp625-657, 1995.
- [11] McAdam, D.J, Geil, G.W. Fatigue testing in natural marine corrosion environments substitute ocean waters. (1955).
- [12] Sudarshan, T. S., Srivatsan , T. S. y Harvey II D.P. Engineering Fracture Mechanics, Vol 36, N° (6), pp827-852, 1990.
- [13] Bogar, F.D, Crooker, T.W. “Fatigue testing in natural marine corrosion environments substitute ocean waters”. *Materials Performance*, 37, Aug. 1983.
- [14] Rodriguez, A. (2001) Procesamiento de Materiales por Plasma. Cuarto Curso Latinoamericano. Buenos Aires.
- [15] Garcés Y, Sánchez H, Berríos J, Pertuz A, Chitty J, Hintermann H, et al. *Thin Solid Films* 1999; 355–356.

BIBLIOGRAFÍA

- [16] Ortiz-Mancilla MJ, Marinño-Berroterán C, Berríos-Ortiz JA, Mesmacque G, Puchi-Cabrera ES. Surf Eng 2004; 20(5):345–52.
- [17] Nascimento MP, Souza RC, Miguel IM, Pigatin WL, Voorwald HJC. Surf Coat Technol 2001; 138:113–24.
- [18] Puchi – Cabrera, E.S, y otros. Fatigue properties of a SAE 4340 steel coated with TiCN by PAPVD. Universidad Central de Venezuela, Caracas 2006; 472p.
- [19] Jaeger G, Endler I, Bartsch K, Heilmaier M, Leonhardt A. Surf Coat Technol 2002; 150:282–9.
- [20] Baragetti S, La Vecchia GM, Terranova A. Int J Fatigue 2003; Vol 25, N° (5), pp 1229–38.
- [21] Berríos JA, Teer DG, Puchi-Cabrera ES. Surf Coat Technol 2001;148(2–3): 179–90.
- [22] Berríos-Ortiz JA, La Barbera-Sosa J, Teer D, Puchi-Cabrera ES. Surf Coat Technol 2004; N° (179), pp145–57.
- [23] Puchi-Cabrera ES, Martínez F, Herrera I, Berríos JA, Dixit S, Bhat D. Surf Coat Technol 2004;N° (182), pp276–86.
- [24] Teixeira, V. Residual stress and cracking in the PVD coatings. Universidad de Mihno, Portugal, 2002; N° (64), pp 393-399.
- [25] Pauleau, Y. Generation and evolution of residual stresses in physical vapour-deposited thin films. National Polytechnic Institute of Grenoble, Francia, 2001; 61: 175-181.
- [26] Teixeira V, Andritschky M, Fischer W, Buchkremer HP, St. over D. Surf Coat Technol 1999; 120/121:103–11.
- [27] Teixeira V, Andritschky M, Gruhn H, Mall!ener W, Buchkremer HP, St. over D. In: Berndt C, editor. Proceedings of the Eighth National Thermal Spray Conference. Houston, USA: ASM International, 1995. p. 515–21.
- [28] Teixeira V, Andritschky M, St .over D. Mater Sci Forum 1999;308/311:930–5.
- [29] Teixeira V, Andritschky M, St. over D. Multilayered and fibre-reinforce composites: problems and prospects. NATO Series EF Applied Sciences, vol. 3/34. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 393–408.
- [30] Olsen GH, Ettenberg M. J Appl Phys 1977;48:2543.
- [31] Hoffman RW. In: DupuyCH, Cachard A, editors. Physics of non-metallic thin films. NATO-ASI Series, Series B: Physics, vol. 14. New York: Plenum Publishing Corporation, 1976. p. 273.

BIBLIOGRAFÍA

- [32] Hoffman RW. Thin Solid Films 1976; 34:185.
- [33] Hirsch EH. J Phys D 1980;13:2081.
- [34] Paris PC, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws. Journal Basic Eng 1960; 85:528–34.
- [35] Forman RG, Keary VE, Engle RM. Numerical analysis of crack propagation in cyclic loaded structures. Journal Basic Eng 1967; 89:459–64.
- [36] Harrison, J. D. The effect of residual stresses on fatigue behaviour. Journal of the Mechanical behaviour of materials, 1989; 2 (1-2): 9-15.
- [37] Jung-Kyu, K., Dong-Suk, S. The variation in fatigue crack growth due to the thickness effect. Universidad de Hanyang, Korea del Sur. 2002; 22: 611-618.
- [38] Maddox, D.M. Deposition Technologies for Films and Coatings. Cap. 6. Ion Plating Technology. Parc Ridge, NJ. Noyes Publications. (1982).
- [39] Gómez, M.A. (2005). Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros. Trabajo de grado doctorado, Universidad de Barcelona. España. Disponible: http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UB/AVAILABLE/TDX-0517107-110032//01.MGB_INTRODUCCI%D3N.pdf. (consultado 2008, 2, 15)
- [40] Bunshah, R.F. Deposition Technologies for Films and Coatings. Cap. 4. Evaporation. Parc Ridge, NJ. Noyes Publications. (1982).
- [41] Thornton, J.A. Deposition Technologies for Films and Coatings. Cap. 5. Coating Deposition by Sputtering. Parc Ridge, NJ. Noyes Publications. (1982).
- [42] <http://www.balzers.com/bes/spa/01-products-services/02-balinit-coatings/151-balinit-helica/indexW3DnavidW261.php> (consultado, 2008, 03, 8)
- U.C.V Facultad de Ingeniería Comisión de Bibliotecas. Subcomisión de Bibliotecas para la normalización de la presentación de trabajos especiales de grado y subcomisión de depósito. Instructivo para la presentación de tesis de pregrado, postgrado, doctorado y trabajo de ascenso. Caracas, 2005.