

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA Y
CORROSIÓN-FATIGA DE UN ACERO SAE 4340
RECUBIERTO CON UN DEPÓSITO DE CROMO DURO**

Presentado ante La Ilustre
Universidad Central De Venezuela
Por los Brs. Naspe B. Luis A.,
Sanchez P. José J
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA Y
CORROSIÓN-FATIGA DE UN ACERO SAE 4340
RECUBIERTO CON UN DEPÓSITO DE CROMO DURO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera

Presentado ante La Ilustre
Universidad Central De Venezuela
Por los Brs. Naspe B. Luis A.,
Sanchez P. José J
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

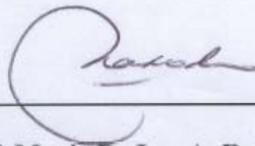
Caracas, 2009

ACTA

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 **Naspe B. Luis A., Sánchez P. José J.**, titulado:

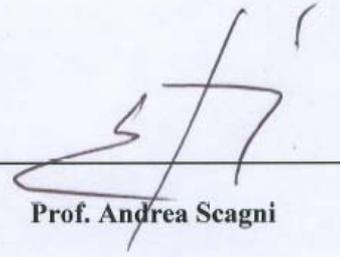
“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA Y CORROSIÓN-FATIGA DE UN ACERO SAE 4340 RECUBIERTO CON UN DEPÓSITO DE CROMO DURO”

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



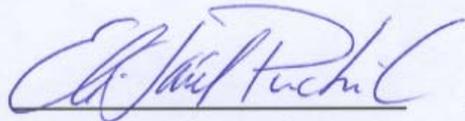
Prof. María De Los A. Rodríguez

Jurado



Prof. Andrea Scagni

Jurado



Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera

Tutor

DEDICATORIA

Yo Luis Naspe le dedico esta tesis primeramente al **Dios Todo Poderoso** y a mi difunto hermano **Pedro Manuel Naspe** que en paz descansa , que hizo todo lo posible por graduarse de Ingeniero Mecánico, pero que lamentablemente la vida se le apagó en un desafortunado día, pero aun sigue viviendo en la memoria de sus seres queridos, hermano este titulo va a nombre tuyo, por inculcarnos los primeros valores de la vida. Gracias hermano. También se la dedicó a mi madre **Ysabel de Naspe** que tuvo fe en mi, una Santa que siempre nos apoya desinteresadamente y a mi difunto padre **Pedro Horacio Naspe**, que en paz descansa, por haber tenido fe en mi y haberme ayudado, igualmente a mis **demás hermanos y hermana**, como a **otros amigos**, por la confianza que tuvieron en mi

¡GRACIAS A TODOS!

RECONOCIMIENTO MUY ESPECIAL

Al profesor (Dr.) Eli Saúl Puchi Cabrera, por su don de que, a parte de ser un insigne y excelente académico, es sobre todo un gran humanista, que nos estimulo y nos brindo desinteresadamente sus sabios consejos.

Un distinguido baluarte que siempre estuvo a la disposición cuando solicitamos su colaboración y asesoría en compartir con nosotros sus conocimientos, y lo mejor, su paciencia y sapiencia, confianza y espera depositadas en nuestras personas, en especial guiarnos a que este presente trabajo haya culminado felizmente.

Apreciado profesor Puchi, de todo corazón, no hay palabras para expresar nuestro agradecimiento. Sinceramente diremos

MUCHAS GRACIAS.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los buenos y excelente amigos, Ingenieros José G. La Barbera, Engels Ochoa y Pablo Pimentel por su valiosa colaboración y apoyo desinteresado en el desarrollo y culminación de este trabajo especial de grado.

Agradecemos a los excelentes amigos e Ingenieros, Freddy Virgos y Onciber Caraucan (pipa 1 y pipa 2), aparte de su apoyo y estímulo para el logro de esta meta, en especial por habernos presentado al profesor Eli Saúl Puchi Cabrera. Gracias muchachos.

Agradecemos a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por habernos dado las herramientas útiles y necesarias para luchar en procura de un mayor bienestar en beneficio de nuestras familias y contribuir al progreso y desarrollo de nuestra amada patria.

Agradecemos a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, por habernos permitido conocer e investigar un poco ese mundo del área de la metalurgia, de sus laboratorios (CITALA, CETEND, TRIBOLOGÍA), los cuales nos permitieron realizar los ensayos y posterior análisis para nuestro trabajo de grado.

Agradecemos el apoyo recibido por parte del Fondo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas a través de las subvenciones N°: LAB – 97000644, S1 – 2000000642 y G – 2000001591.

Agradecemos a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a la culminación de esta investigación, demostrando con ello que cuando hay voluntad, esfuerzo y perseverancia, todo se puede. Y como dijo Pitágoras: No desprecies a nadie; un átomo hace sombra.

Naspe Betancourt, Luis A

Sánchez Patete, José J

REACTION ON THE FATIGUE AND CORROSION-FATIGUE OF A
STEEL SAE 4340 RECOVERED WITH A HARD CHROMIUM DEPOSIT

Academic Tutor: Prof. Eli Saúl Pucchi C. Thesis.

Engineering Faculty. Mechanic Engineering School. U.C.V.

Caracas, 2009, page N° 115

Key words: Fatigue, Corrosion-Fatigue, hard Chromium, Recovering, Fractography.

SUMMARY

A study was carried out with the purpose of evaluating the reaction on the fatigue and corrosion-fatigue of a steel SAE 4340 in tempered and revenid conditions, with or without recovering of hard chromium electrolytically deposited. On that purpose traction pressure gauges were mechanized according to the norm ASTM A370 and Fatigue pressure gauge According to the norm ASTM E606. All of these samples were recover with a thickness of 24 μ m, according to the company specifications. The traction testing's were done in a universal testing machine, INSTRON Bran, with a heading speed of 3mm/min. The testing's of fatigue on open air for the base material and recovered material as well as corrosion-fatigue testing for the base material and the recovered material were done in rotative bending machine, Fatigue Dynamics brand, at a frequency of 50Hz and a loading relation of R=-1. For the corrosion-fatigue testing's a salt work solution of NaCl at 3% was used. The Wöhler's curves for testing's condition's were obtained by using a total of six pressure gauges for each of the four alternating effort leves applied which correspond to a base material effort fraction, what is: 0,68 ; 0,72 ; 0,76 ; and 0,80. The substrate fatigue limit was determined as well as the recoverd material using the scale method for which a total of 15 pressure gauges were destined in each case and it was applied a stepping of 5 MPa. . The reaction on the fatigue was evaluated as a parameter function of the equation of Basquin. The results indicate that the real effort and influence of effort mechanic properties at maximum load of steel 4340 with a hard chromium deposit are not significantly affected if compared with the substrate. However, the application of hard chromium recovering on the steel SAE 4340 surface generates a substantial decrease on the fatigue on the air life, respect the subtracts, similar to the one produced when the material with or without recovering is tested on corrosion-fatigue. This decreasement in the fatigue live varies from an 80% to the lowest effort level until a 40% for the highest effort level on the same form occurs a decreasement in the fatigue limit of the recovered material, on the order of 6%, at being compared with the pressure gauges without recovering.

Naspe Betancourt, Luís A.

Sánchez Patete, José J.

**COMPORTAMIENTO A LA FATIGA Y CORROSIÓN-FATIGA DE UN
ACERO SAE 4340 RECUBIERTO CON UN DEPÓSITO DE CROMO
DURO**

Tutor Académico: Prof. Eli Saúl Puchi C. Tesis.

Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. U.C.V.

Caracas, 2008. N° Pag: 115

Palabras claves: Fatiga, Corrosión-fatiga, Cromo duro, Recubrimientos, Fractografía.

RESUMEN

Se llevo a cabo un estudio con el objeto de evaluar el comportamiento a fatiga y corrosión-fatiga de un acero SAE 4340 en condiciones de templado y revenido, con y sin recubrimiento de cromo duro depositado electrolíticamente. Para tal fin se mecanizaron probetas de tracción según la norma ASTM A370 y probetas de fatiga según la norma ASTM E606. Todas las muestras fueron recubiertas hasta un espesor de 24 μm de acuerdo a las especificaciones de la empresa. Los ensayos de tracción se realizaron en una maquina de ensayos universal, marca INSTRON, con una velocidad de cabezal de 3 mm/min. Los ensayos de fatiga al aire para el material base y material recubierto; así como ensayos de corrosión-fatiga para el material base y material recubierto se ejecutaron en una maquina en flexión rotativa, marca Fatigue Dynamics, a una frecuencia de 50 Hz y una relación de carga de $R = -1$. Para los ensayos de fatiga-corrosión se empleo una solución salina de NaCl al 3%. Las curvas de Wöhler para condición de ensayo fueron obtenidas empleando un total de seis probetas para cada uno de los cuatro niveles de esfuerzo alternante aplicado y los cuales corresponden a una fracción del esfuerzo de fluencia del material base, a saber: 0,68, 0,72, 0,76 y 0,80. Se determinó el límite de fatiga del substrato así como del material recubierto empleando el método de la escalera para lo cual se destinaron un total de 15 probetas en cada caso y se aplico un escalón de 5 MPa. El comportamiento a la fatiga fue evaluado como una función de los parámetros de la ecuación de Basquin. Los resultados indican que las propiedades mecánicas de esfuerzo de fluencia y esfuerzo real a carga máxima del acero 4340 con un depósito de cromo duro no son afectadas significativamente si son comparadas con el substrato. Sin embargo, la aplicación del recubrimiento de cromo duro sobre la superficie del acero SAE 4340 genera una disminución sustancial en la vida a fatiga al aire, con respecto al substrato, similar a la producida cuando el material con y sin recubierto es ensayado en fatiga-corrosión. Esta reducción en la vida a fatiga varía desde un 80% para el nivel de esfuerzo más bajo hasta un 48% para el nivel de esfuerzo más elevado. Así mismo ocurre una disminución en el límite de fatiga del material recubierto, del orden del 6%, al ser comparado con las probetas sin recubrimiento.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
1.- MARCO TEÓRICO	3
1.1.- FATIGA	3
1.1.1.- Generalidades.....	3
1.1.2.- Definición de fatiga	4
1.1.3.- Aspectos fundamentales de la falla por fatiga.....	4
1.1.4.- Factores que afectan la vida a la fatiga.....	7
1.1.5.- Curva de Wöhler (S-N)	14
1.2.- CROMO DURO	19
1.2.1.- INTRODUCCIÓN	19
1.2.2.- APLICACIONES DEL CROMO DURO	20
1.3.- SELECCIÓN DE ELEMENTOS PARA EL USO DEL CROMO DURO	21
1.3.1.- Dureza	23
1.3.2.- Metal base.....	23
1.3.3.- Observaciones respecto al comportamiento a la fatiga del cromo duro	23
1.4.- SOLUCIONES UTILIZADAS PARA HACER EL RECUBRIMIENTO DE CROMO DURO ^[5]	24
1.4.1.- Soluciones de sulfato convencional.....	24
1.4.2.- Soluciones de catalizadores mezclados	25
1.4.3.- Soluciones libres de fluoruro	26

1.5.- ASPECTOS PRINCIPALES DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO ^[5]	26
1.5.1.- Contenido de ácido crómico	26
1.5.2.- Contenido de sulfato	27
1.5.3.- Agentes contaminantes	27
1.5.4.- Ánodos	28
1.5.5.- Conductividad eléctrica	28
1.5.6.- Densidad de corriente y eficiencia de corriente	28
1.5.7.- Temperatura de la solución	29
1.5.8.- Velocidad de deposición	29
1.6.- EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS PARA LAS LABORES DE RECUBRIMIENTO CON CROMO DURO EMPLEANDO UNA SOLUCIÓN ADECUADA ^[5]	31
1.6.1.- Tanque y revestimiento	31
1.6.2.- Método de control de temperatura	32
1.6.3.- Fuente de poder: generador-rectificador	32
1.6.4.- Agitación	32
1.6.5.- Barra colectora	33
1.6.6.- Emisión y extracción de gases	33
1.7.- EFECTO Y RELACIONES DEL CROMO DURO	33
1.7.1.- Afinidad entre microgrietas, esfuerzos residuales y dureza	33
1.7.2.- Resistencia a la corrosión	34
1.7.3.- Efecto de la temperatura	35
1.7.4.- Costos	35
1.7.5.- Efectos adversos de los recubrimientos de cromo	36
1.8.- CONSECUENCIAS DEL CROMO DURO SOBRE LA	

RESISTENCIA A LA FATIGA DE LOS ACEROS	40
1.8.1- INTRODUCCIÓN	40
1.8.2.- Importancia del espesor del depósito	41
1.8.3.- Consecuencias de la densidad de corriente	43
1.8.4.- Consecuencias de los esfuerzos internos	43
1.8.5.- Consecuencias del post-tratamiento térmico.....	47
1.9.- ANTECEDENTES DE ESTUDIOS-ANÁLISIS	
REALIZADOS EN EL ÁREA	49
1.9.1.- Y. Wu et al. ^[5] (1995).	49
1.9.2.- Campillo et al. ^[6] (1996).....	49
1.9.3.- E. S. Puchi et al. ^[7] (1996).....	50
1.9.4.- Y. Z. Yang et al. ^[8] (1996).....	50
1.9.5.- J. Chitty et al. ^[13]	50
1.9.6.- J. A. Berríos et al. ^[16] (1998).....	51
1.9.7.- A. Pertuz et al. ^[17] (2000).....	51
1.9.8.- Mariño y Ortiz ^[18] (2001).	52
1.9.9.- Campillo et al. ^[19] (2002).	53
1.9.10.- Moreno y Cabeza. ^[20] (2004).	54
1.9.11.- Pimentel P. ^[21] (2005).....	54
CAPÍTULO II	56
2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	56
2.1.- FLUJOGRAMA METODOLÓGICO DE TRABAJO	56
2.2.- Obtención del material base – Acero SAE-4340	57
2.3.- Preparación de las probetas de fatiga y tracción	58
2.4.- Pulido de las probetas.....	60
2.5.- Recubrimiento.....	60
2.6.- ENSAYOS DE TRACCIÓN	61

2.6.1.- Corrección por deformación elástica	62
2.7.- ENSAYO DE FATIGA Y CORROSIÓN-FATIGA	64
2.7.1.- Equipo y procedimiento de ensayos	64
2.7.2.- Ensayo de fatiga-corrosión.....	66
2.7.3.- Determinación de los parámetros de la Ecuación de Basquin.....	67
2.7.4.- Determinación del límite de fatiga por el método de la escalera.....	68
2.8.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO	
(Microscopia Electrónica de Barrido: MEB)	70
2.8.1.- Preparación de las muestras	71
2.8.2.- Limpieza de las muestras	72
2.8.3.- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) – Observación de las muestras	73
2.8.4.- Ensayo de dureza	73
2.8.5.- Ensayo de rugosidad.....	73
2.8.2.- Limpieza de las muestras	72
CAPÍTULO III.....	56
3.- RESULTADOS Y ANÁLISIS	74
3.1.- ENSAYOS DE TRACCIÓN	74
3.2.- ENSAYOS DE FATIGA	76
3.3.- ENSAYOS DE DUREZA	84
3.4.- MEDICIÓN DE RUGOSIDAD APARENTE	87
3.5.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO MEDIANTE	
MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)	88
3.5.1.- Fatiga al aire del acero SAE 4340 recubierto con cromo duro.....	88

3.5.2.- Fatiga-corrosión del acero SAE 4340 recubierto con cromo duro.....	90
3.5.3- Análisis de cortes longitudinales.....	94
4.- CONCLUSIONES	100
5.- RECOMENDACIONES	101
6.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

INTRODUCCIÓN

Es una constante universal realizar investigaciones que permitan determinar con mayor precisión y seguridad las fallas que ocurren en los componentes de máquinas. Esta incesante búsqueda de la optimización de las propiedades de los materiales ha conducido a la modificación de sus condiciones superficiales, por diversos métodos, ya que la mayoría de los fenómenos que afectan a los materiales empiezan en la superficie. Estas investigaciones han determinado que, en su mayoría, las fallas en las máquinas se deben a cargas que varían con el tiempo y no a cargas estáticas. Estas fallas suelen ocurrir a niveles de esfuerzos muy por debajo del límite elástico de los materiales.

Es inmensa la cantidad de elementos mecánicos en el campo de aplicación ingenieril (aeronáutica, aeroespacial, automotriz, naval, maquinarias en general) que están sometidos a esfuerzos no estáticos, es decir, esfuerzos cíclicos, que son cargas que fluctúan entre dos o más niveles de esfuerzos. Estos esfuerzos fluctuantes, que son menores al esfuerzo de fluencia del material, producen un daño sin deformación observable, que generalmente conduce a la falla de la pieza, esta falla se conoce como “falla por fatiga”.

Las fallas por fatiga siempre empiezan en una grieta. La grieta pudiera haber estado presente en el material desde su manufactura o haberse presentado a lo largo del tiempo, por causa de las deformaciones cerca de las concentraciones de esfuerzos. Esta grieta, un poro, una simple raya, que actúan como concentradores de esfuerzos que combinados con esfuerzos dinámicos desencadenan el proceso que termina con la falla del material.

En la actualidad se han desarrollado diversas técnicas de recubrimientos de los materiales que mejoren las propiedades del material, para aumentar la resistencia al desgaste y a la corrosión.

La deposición de recubrimientos en los metales básicamente busca mejorar las propiedades del material, generalmente para aumentar la resistencia al desgaste y a la corrosión. Las investigaciones han demostrado mejoras en un medio agresivo, pero no siempre ocurre así, cuando el material recubierto es sometido a la acción combinada de fatiga con corrosión, han dado como resultado que las propiedades de fatiga una veces disminuye y otras veces son mejoradas, por lo que el tipo de recubrimiento y la técnica de deposición sobre el metal entran a juzgar un papel fundamental a ser tomado en cuenta a la hora de estudiar la fatiga y la corrosión-fatiga de un metal recubierto, por lo que se hace muy necesario conocer cómo afecta a estos componentes el hecho de estar recubiertos.

El cromo duro es uno de los recubrimientos más utilizados en la industria por las excelentes propiedades de resistencia al desgaste y a la corrosión que imparte a los materiales. Se deben tomar precauciones necesarias en el proceso de recubrimiento del cromo duro, en especial por ser un elemento nocivo para la salud y contaminante al medio ambiente. Es por ello, que existen estudios avanzados que permiten sustituir al cromo duro por otros recubrimientos menos contaminantes, como el electroless de níquel, termo rociado, etc. Sin embargo presenta sus desventajas, ya que estos recubrimientos no presentan todo el beneficio que en si tiene el cromo duro, tales como facilidad de aplicación, excelente relación costo-beneficio y otras garantías.

El presente trabajo tiene como objetivo primordial determinar el comportamiento a la fatiga y corrosión-fatiga de un acero comercial SAE 4340, ampliamente utilizado en los procesos industriales, en el diseño de partes funcionales, recubiertos con un depósito de cromo duro, a fin de suministrar datos actualizados que permitan evaluar y comparar el cromo duro con otros recubrimientos que estos producen sobre la resistencia a la fatiga de aceros de alta resistencia mecánica y de que manera afecta al recubrimiento en el proceso.

CAPÍTULO I

1.- MARCO TEÓRICO.

1.1.- FATIGA

1.1.1.- Generalidades.

Es una constante aseveración que en la mayoría de las veces las fallas en las máquinas se deben a cargas estáticas que varían con el tiempo y no a cargas estáticas. Estas fallas suelen ocurrir a niveles de esfuerzos muy por debajo del límite elástico de los materiales. Por lo tanto, de manejar sólo las teorías de fallas estáticas, puede llevar a diseños poco seguros cuando las cargas sean dinámicas.

Son muchos los elementos que intervienen para que una pieza falle por fatiga, es decir, es un fenómeno muy complejo, que involucran a:

- La grieta pudo haber estado presente desde la manufactura del componente.
- Desarrollarse en el transcurso del tiempo, por causas de las deformaciones cíclicas cerca de las regiones de alta concentración de esfuerzos.
- El material al ser fabricado, no presenta grietas, pero tiene la colección normal de partículas, inclusiones, porosidad, etc., comunes en materiales de ingeniería.
- Existencia de huecos o inclusiones preexistentes que servirán como elevadores de esfuerzos para la iniciación de grieta.
- Presencia de esfuerzos residuales.

- Existencia de superficies lisas o rugosas.
- Tratamientos térmicos aplicados.
- Piezas sujetas a entornos corrosivos.
- Condiciones ambientales perjudiciales.
- Daños por sobrecarga.

Uno o varios de los elementos descritos anteriormente, pueden conducir a la falla imprevista del material. Es por ello que en este Trabajo Especial de Grado, estudiaremos algunos de los detalles relacionados con los acontecimientos, tanto teóricos como prácticos involucrados en el proceso.

1.1.2.- Definición de fatiga

Aunque son muchas las definiciones del término “fatiga”, tan solo analicemos dos de estos: (I) “Desde el punto de vista estructural, este representa el cambio permanente y progresivo que suelen ocurrir en los materiales sometidos a esfuerzos fluctuantes (menores que el esfuerzo de fluencia), los cuales pueden conducir a la generación de microgrietas o fractura después de un elevado número de fluctuaciones”^[2] ; (II) “La falla por fatiga es producto de la aplicación de un esfuerzo alternante mayor que el límite de resistencia a la fatiga que soporta una pieza o componente; bajo este estado de solicitud mecánica se genera un efecto acumulativo del daño sobre la pieza debido a los cambios irreversibles que se producen en la microestructura del material. La detección temprana de grietas por fatiga y el estudio de su crecimiento son factores de importancia relevante en el diseño de piezas sometidas a esfuerzos cíclicos. El comportamiento del crecimiento de grietas por fatiga, puede ser descrito mediante la ecuación de Paris:

$\left[\frac{da}{dN} = C (\Delta k)^m\right]$, donde los coeficientes C y m son constantes del material y de las condiciones a los que está sometida.

1.1.3.- Aspectos fundamentales de la falla por fatiga

- 1.- La iniciación de la grieta (nucleación).
- 2.- Propagación de la grieta nucleada (crecimiento progresivo).
- 3.- Fractura súbita causada por el crecimiento inestable de la grieta ^[3].

En la figura 1. Se puede ver una representación de las tres etapas.

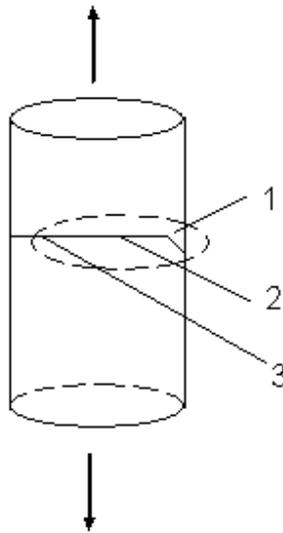


Fig. 1.- Las tres etapas de la falla por fatiga. 1 inicio, 2 Propagación, 3 Fractura.

1.1.3.1.- Etapa de iniciación de la grieta

Es muy común, desde su manufactura, que los materiales de ingeniería tengan la colección normal de partículas, inclusiones, muescas, porosidades, etc., que actúan como concentradores de esfuerzos. Una vez que el material ha sido sometido a esfuerzos fluctuantes, estos actúan en aquellas zonas donde existan concentradores de esfuerzos, por ejemplo una muesca, y como los esfuerzos en la muesca oscilan, puede ocurrir fluencia plástica local debido a concentración de esfuerzo, aún cuando el esfuerzo nominal en la sección esté muy por debajo del límite elástico del material. La fluencia o deformación plástica local causa dislocaciones, originando bandas de deslizamiento (regiones de deformaciones intensas producidas por movimientos cortantes). Aún en ausencia de muescas (como en las probetas lisas) este mecanismo sigue funcionando, siempre que en alguna parte del material se haya excedido el límite elástico. Los huecos o inclusiones preexistentes servirán como elevadores de esfuerzo para la iniciación de la grieta.

1.1.3.2.- Etapa de propagación de grietas.

Una vez nucleada una microgrieta o que esta se encuentre presente desde la manufactura del componente, se ponen en marcha los mecanismos de la mecánica de fractura. La grieta aguda crea concentraciones de esfuerzos superiores a los de la muesca original, lo que provoca el desarrollo de una zona plástica en el extremo de la grieta cada vez que el esfuerzo a tensión la abre, lo que achata su extremo y reduce la concentración efectiva de esfuerzo, por lo que “el crecimiento de la grieta se debe a esfuerzos a tensión”. Los esfuerzos

alternantes que sean siempre a compresión no causarán crecimiento de grietas, ya que en ese caso estas tienden a cerrarse.

En su mayoría, los materiales contienen defectos (partículas de fase secundarias) desde su manufactura, lo que ocasiona el inicio de grietas en la estructura del material. Esto contribuye al aumento de la velocidad de crecimiento de la grieta, al esfuerzo aplicado, lo que aumenta la longitud de la grieta, propagándose a cada ciclo de esfuerzo a tensión.

1.1.3.3.- Fractura súbita

Esta etapa es instantánea, en especial porque la grieta no dejara de crecer mientras estén presentes esfuerzos cíclicos a tensión, además si la parte está forzada cíclicamente en un entorno corrosivo, la grieta crecerá con mayor rapidez que como resultado de los factores solos. Llegará un momento que el tamaño de la grieta se hará lo bastante grande como para elevar el factor de intensidad de esfuerzo (K_I), en el extremo de la grieta al nivel de la tenacidad de fractura del material (K_{IC}), por lo que en el siguiente paso cíclico de esfuerzo a tensión ocurre, súbitamente la falla.

1.1.4.- Factores que afectan la vida a la fatiga

Es conocido que las fallas por fatiga siempre empiezan en una o varias grietas, las cuales pueden haber estado presente en el material desde su manufactura, por lo que el material se ve afectado por numerosos factores entre los que podemos citar: temperatura, concentración de esfuerzos, condiciones

superficiales, aspectos corrosivos, microestructura, tratamientos térmicos, etc. Es por ello que es muy importante conocer la forma en que estos factores afectan el comportamiento a fatiga de los materiales, en especial porque estos factores reportados en los ensayos de fatigas dan lugar a una variabilidad apreciable de los resultados, inclusive si el material es del mismo lote o colada.

1.1.4.1.- Condiciones superficiales

Por lo general las fallas por fatiga siempre se inician en las superficies libres. En diferentes métodos de carga tales como flexión y torsión, el esfuerzo máximo se produce en dichas superficies, creando el proceso de formación de grietas, por lo cual es obvio que la falla se inicie allí.

Los factores que afectan la superficie de una probeta de fatiga pueden resumirse en tres categorías ^[2]:

- 1) Rugosidad superficial: Los procedimientos de mecanizado y acabado superficial afectan considerablemente el comportamiento a fatiga, ya que probetas menos pulidas presentan menor resistencia a la fatiga debido a que las rayas presentes en la superficie del material actúan como concentradores de esfuerzo y por consiguiente son el sitio ideal para la nucleación de grietas.

- 2) Cambios en las propiedades superficiales del material: Cualquier variación que sufra un material con respecto a las condiciones sobre la resistencia a la fatiga, alterará significativamente las propiedades de fatiga. Por ejemplo, si los aceros son sometidos es a tratamientos superficiales tales como cementación y

nitruración, se suelen mejorar sus propiedades de fatiga. Al contrario, si se someten a otros tratamientos como la deposición de algunos recubrimientos o si sufren de carburación, se produce una disminución en las propiedades de fatiga de la superficie y por consiguiente del total del componente ^[11]; por ejemplo, los recubrimientos anódicos (zinc, cadmio) aplicados a las piezas de acero son usualmente beneficiosos, mientras los catódicos (cromo, níquel) producen disminución de las propiedades del material y tensiones residuales indeseables.

3) Esfuerzos residuales superficiales: Los esfuerzos residuales juegan un papel importante en las propiedades de fatiga; sin estos esfuerzos son de compresión, mejoran el comportamiento a fatiga de los materiales, debido a que los esfuerzos a compresión no causan crecimiento de grietas y por el contrario tienden a cerrarlas; caso contrario cuando resultan de tracción, los cuales disminuyen la resistencia a la fatiga ya que el crecimiento de la grieta se debe a esfuerzos a tensión y la grieta crece a lo largo de planos normales al esfuerzo máximo de tensión. Es por esta razón que las fallas por fatiga se consideran causadas por esfuerzos a tensión.

1.1.4.2.- Corrosión

En su mayoría, desde su manufactura los elementos metálicos están expuestos e interactúan con el medio ambiente: el aire, el agua en sus diferentes estados y el agua salada, son agentes corrosivos. El ataque corrosivo de estos elementos son mecanismos que facilitan la propagación de grietas, la cual produce generalmente la picadura de las superficies metálicas. Estas picaduras actúan como entallas y aminoran la resistencia a la fatiga. La combinación de cargas

cíclicas y de un entorno corrosivo tiene efecto sinérgico ya que material se corroe con mayor rapidez que si no estuviera sometido a esfuerzos, es decir, cuando corrosión y fatiga se presentan simultáneamente, se acelera la propagación de grietas de por causa del ataque químico. Esto también se conoce como “fatiga por corrosión”, aunque definir tal fenómeno no es nada sencillo, ya que como se señaló anteriormente, la corrosión puede ocurrir en cualquier medio oxidante, es por ello que la fatiga al aire normal puede considerarse como un caso especial de fatiga por corrosión, ya que al ir disminuir la concentración de aire en la superficie, se ha demostrado que se puede aumentar la resistencia a la fatiga de los metales^[5].

Se ha establecido que la fatiga-corrosión es un proceso electroquímico ya que algunas regiones de la superficie son anódicas respecto a otras debido a las irregularidades existentes o a las diferencias locales de concentración de oxígeno.

Este ataque localizado confirma que este fenómeno es electroquímico, por lo que se puede evitar con el uso de protección catódica además del empleo de inhibidores.

Posiblemente, las dos razones principales por las cuales el efecto de la combinación corrosión-fatiga sea más perjudicial que cuando estos actúan por separado, es que la formación de las películas protectoras van acompañadas de una rotura continua de estas por el esfuerzo cíclico y que las que las concentraciones de esfuerzo introducidas por las picaduras por corrosión disminuyen considerablemente la resistencia a la fatiga^[3].

1.1.4.3.- Recubrimiento

Por lo general, en los metales se utilizan recubrimientos no féreos para mejorar la resistencia al desgaste, corrosión, fatiga-corrosión, y además para restaurar piezas desgastadas. La electrodeposición de metales no féreos blandos como el cadmio, plomo, estaño y zinc producen un efecto pequeño sobre la resistencia a la fatiga; caso contrario es lo que ocurre con la deposición de cromo y níquel que reducen considerablemente la resistencia a la fatiga.

Como consecuencia de la deposición de cromo, la reducción de la resistencia a la fatiga, depende de las condiciones en las que se haya realizado esta deposición. Aun no existen suficientes conocimientos tecnológicos que permitan establecer condiciones óptimas. En general, el espesor del depósito afecta muy poco la resistencia a la fatiga, aunque otros estudios llevados a cabo han demostrado lo contrario.

Con respecto al depósito de níquel, es bien conocido que al aumentar el espesor de la capa depositada, la resistencia a la fatiga se reduce considerablemente. También es conocido que la disminución de la resistencia a la fatiga debida a los depósitos de cromo y níquel esta directamente relacionada con los esfuerzos residuales de tracción de la capa depositada; además la resistencia a la fatiga de probetas con depósitos de níquel puede aumentar si los esfuerzos residuales de tracción se reducen variando el proceso de deposición; por lo que la resistencia de piezas con depósitos de cromo puede modificarse considerablemente a través de un pos-tratamiento térmico; a temperaturas entre 200° y 300°C se consiguen reducciones en la resistencia a la fatiga, debido a un aumento en los esfuerzos residuales de tracción, mientras que a temperaturas por encima de 400°C se obtienen mejoras en la resistencia debido a la presencia de esfuerzos residuales de compresión, por lo que es posible recomendar un

tratamiento térmico posterior a la deposición no inferior a los 400°C, tolerando el ablandamiento del recubrimiento y que las propiedades mecánicas del metal no se vean afectadas. Por otro lado, calentando los depósitos de níquel a temperaturas inferiores sobre aceros de resistencia media y elevada, se aprecia un efecto reducido en la resistencia a la fatiga. La resistencia de los aceros recubiertos con estos depósitos puede aumentarse por nitruración, balinado o por laminación de la superficie.

Se ha señalado que la disminución de la resistencia a la fatiga debida a la electrodeposición, puede, en parte, asignársele al efecto que tiene en los aceros el hidrogeno absorbido durante la deposición, pero otros estudios han demostrado que la oclusión de hidrogeno tiene poca influencia sobre la resistencia a fatiga y la misma para probetas en las que el deposito de cromo o níquel ha sido, retirado es igual o casi igual a la resistencia inicial de la probeta sin deposito^[3].

1.1.4.4.- Factores metalúrgicos

Tal como se ha indicado anteriormente, cualquier factor que altere o incremente la resistencia a la tracción, puede aumentar la resistencia a la fatiga. Uno de estos factores es la adición de elementos aleantes a los metales; el aumentar el contenido de carbono de un acero, aumenta la resistencia a la tracción y también se presenta un aumento en el límite de fatiga; otro tipo de elemento que favorece el aumento de la resistencia a la fatiga del acero es la adición de cromo, níquel, y molibdeno ya que estos aceros presentan la característica de resistir altas temperaturas de revenido sin ablandamiento apreciable. En aleaciones de aluminio-magnesio se ha observado que la adición

de elementos que formen solución sólida produce mayor aumento de la resistencia a la fatiga que el envejecimiento y el trabajo en frío^[3].

1.1.4.5.- Concentración de esfuerzos

La existencia de concentradores de esfuerzo conduce a que disminuya la resistencia a la fatiga del material. Una medida del efecto de un concentrador de esfuerzo viene expresada por el factor de concentración de esfuerzo K_t , que se define como la relación del esfuerzo local máximo, en la relación de la discontinuidad, al esfuerzo local nominal aplicado al componente.

A pesar que la resistencia a la fatiga se reduce considerablemente por los concentradores de esfuerzo geométricos, la reducción es a menudo menor que el factor de concentración de esfuerzo geométrico, por lo que se ha introducido un factor de reducción de resistencia a fatiga K_f , que se define como la relación entre la resistencia a fatiga de una probeta sin concentrador de esfuerzo y la resistencia a fatiga de una probeta con concentrador de esfuerzo; se ha encontrado que este factor varía con la severidad y el tipo de entalla, el material, el tipo de carga y el nivel de esfuerzo.

La relación entre estos dos factores se calcula de la siguiente manera:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

donde q , es un factor llamado “factor de sensibilidad de entalla”.

El valor de q está comprendido entre 0 y 1. Cuando $K_f = K_t$, $q = 1$, se dice que el material es completamente sensible a la entalla. Si la presencia de una entalla no afecta a la resistencia a la fatiga entonces $K_f = 1$ y $q = 0$, por lo que el material no es sensible a la entalla, sin embargo se ha encontrado que el valor de q depende no solo del material, sino también de las condiciones del esfuerzo, del tamaño de la probeta y de resistencia a la fatiga de éste, así que no puede considerarse como una constante del material^[2].

1.1.4.6.- Ciclos de esfuerzo o cargas por fatiga.

La elección de modelos de falla por fatiga para fines de diseño de máquinas depende del tipo de maquinaria que se esté diseñando y cual es su uso pretendido. Cualquier carga que varíe con el tiempo puede causar falla por fatiga. El carácter de estas cargas llega a variar de manera importante de una a otra aplicación. En maquinaria rotativa, las cargas tienden a ser de amplitud uniforme a lo largo del tiempo y a repetirse con alguna frecuencia. En ausencia de corrosión la forma de onda de la función carga-tiempo no parece tener ningún efecto significativo en la falla por fatiga, por lo que se suele ilustrar esquemáticamente la función como una onda sinusoidal o en diente de sierra.

Las funciones típicas de esfuerzo-tiempo experimentadas por maquinaria rotativa se pueden modelar como se observa en la figura 2, mostrada de manera esquemática como ondas sinusoidales.

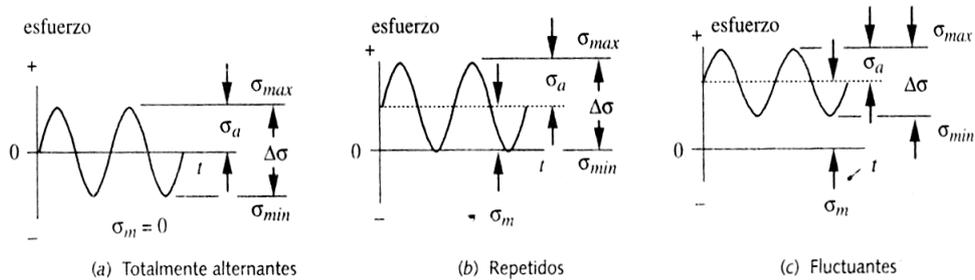


FIGURA 2.- Diferentes ciclos de cargas en función del tiempo

La figura 2a ilustra el caso totalmente alternante, en el cual el valor medio (σ_m) es igual a cero. La figura 2b muestra un esfuerzo repetido, en el cual la onda va desde cero hasta un valor máximo, con un valor medio igual al componente alternante. La figura 2c muestra una versión del caso más general (llamado esfuerzo fluctuante), en que todos los valores de los componentes son distintos de cero. Cualquiera de estas formas de ondas se puede caracterizar mediante dos parámetros, sus componentes medios y alternantes, sus valores máximos y mínimos o la relación entre estos valores.

1.1.4.7.- Solicitaciones de esfuerzos.

Es muy importante conocer el tipo de fluctuaciones de esfuerzo a que está sometido un determinado material dentro del estudio de la fatiga. Es por ello que definiremos ciertos conceptos que los describen, a saber:

- 1) Intervalo o rango de esfuerzo “ $\nabla\sigma$ ”:

$$\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Donde:

σ_{\max} = esfuerzo máximo en cada ciclo

σ_{\min} = esfuerzo mínimo en cada ciclo

2) Amplitud del esfuerzo “ σ_a ”:

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2}$$

3) Esfuerzo medio “ σ_m ”:

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

De aquí surgen dos relaciones de esfuerzo que se emplean para expresar los datos de fatiga, definidas como:

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad ; \quad R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

donde: A, es la relación de amplitud y R, es la relación de esfuerzos.

Cuando el esfuerzo es totalmente alternante (Fig. 2a), $R = -1$ y $A = \infty$.

Cuando el esfuerzo se repite (Fi. 2b), $R = 0$ y $A = 1$. Cuando los esfuerzos máximos y mínimos tienen el mismo signo (Fig. 2c), tanto R como A son positivos, y $0 \leq R \leq 1$. Estos patrones de carga pueden resultar de esfuerzos a flexión axial, torsional o una combinación de ellos. La presencia de un componente de esfuerzos medio de puede tener un efecto significativo en la vida a la fatiga.

1.1.4.8.- Esfuerzos residuales.

Los esfuerzos residuales son aquellos esfuerzos “internos” presentes en una pieza sin la aplicación de una carga externa. La mayor parte de las piezas contendrán algunos esfuerzos residuales, provenientes de sus procesos de manufactura. Cualquier procedimiento como por ejemplo el conformado, o el tratamiento térmico, crean deformaciones localizadas que originaran los esfuerzos residuales.. Un buen diseño necesita que el ingeniero trate de adecuar los esfuerzos residuales para, como mínimo, no crear defectos negativos en la resistencia y de preferencia, para crear efectos positivos.

1.1.5.- Curva de Wöhler (S-N)

En la actualidad existen variadas técnicas de prueba con la finalidad de medir la respuesta de los materiales a esfuerzos y deformaciones que varíen con el tiempo. El ingeniero alemán, Augusto Wöhler, fue uno de los primeros en hacer investigaciones científicas en lo que se conocía como fallas por fatiga, a

lo largo de un período de 12 años, probó los ejes hasta la falla, en el laboratorio, bajo cargas totalmente alternantes, publicando sus resultados en 1870.

Estos ensayos de fatiga permiten obtener gráficos o diagramas donde se ubican los esfuerzos (S) en las ordenadas y el número de ciclos (N) al cual falla el material en las abscisas, bajo este procedimiento se obtiene una curva la cual recibe el nombre de uno de los iniciadores del estudio del fenómeno de la fatiga, WÖHLER, que comúnmente también se conoce como la curva “S-N”; tal como se observa en la Figura 3.

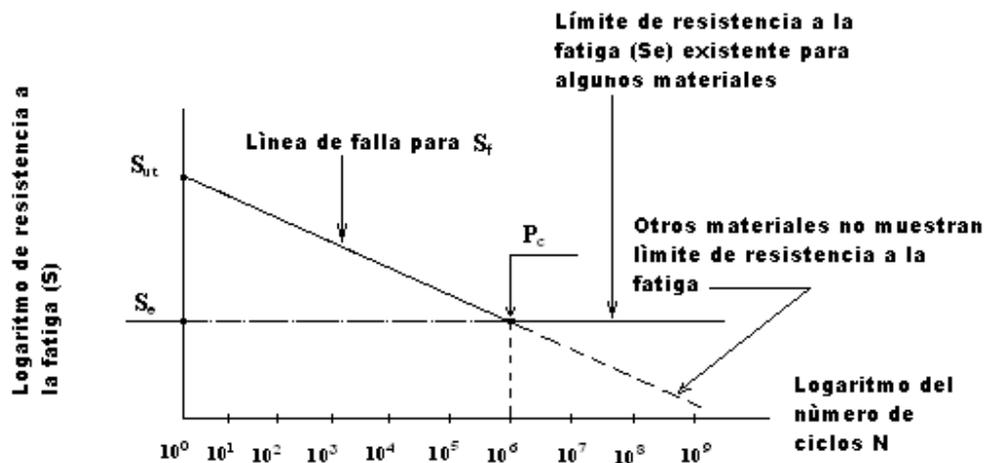


Fig. 3.- Diagrama S-N o curvas de Wöhler

La grafica se encuentra dividida en dos áreas, la que está por encima que representa el campo donde el material fallará y la zona por debajo que corresponde a las condiciones donde el material no fallará. Se observa que

existe un punto crítico (P_c) entre la zona de arriba y la de abajo, este punto se conoce como “límite de resistencia a la fatiga” (S_e).

En la figura 4, la curva inferior se refiere aquellos materiales que no muestran límite de fatiga, un caso típico es el aluminio.

Las dos curvas explican por si solas la cantidad de ciclos que un material puede resistir sin que se produzca falla súbita, el número de ciclos o de deformación que se supone va a sufrir la pieza durante su vida útil, representa la existencia o la resistencia a la fatiga del material sometido a ese nivel de esfuerzo.

Es muy importante que al ensayar un material y hallar un valor de límite de fatiga, la curva debe construirse en dos secciones: la primera sección referente a la resistencia a la fatiga, aplicando el modelo de Basquin, y la segunda sección se aplica para determinar el límite de fatiga por cualquiera de los métodos existentes; por ejemplo, “el método de la escalera”, siendo un método basado en la estadística del suceso menos frecuente, y con ello obtener una aproximación del valor por debajo del cual el material no presentará falla.

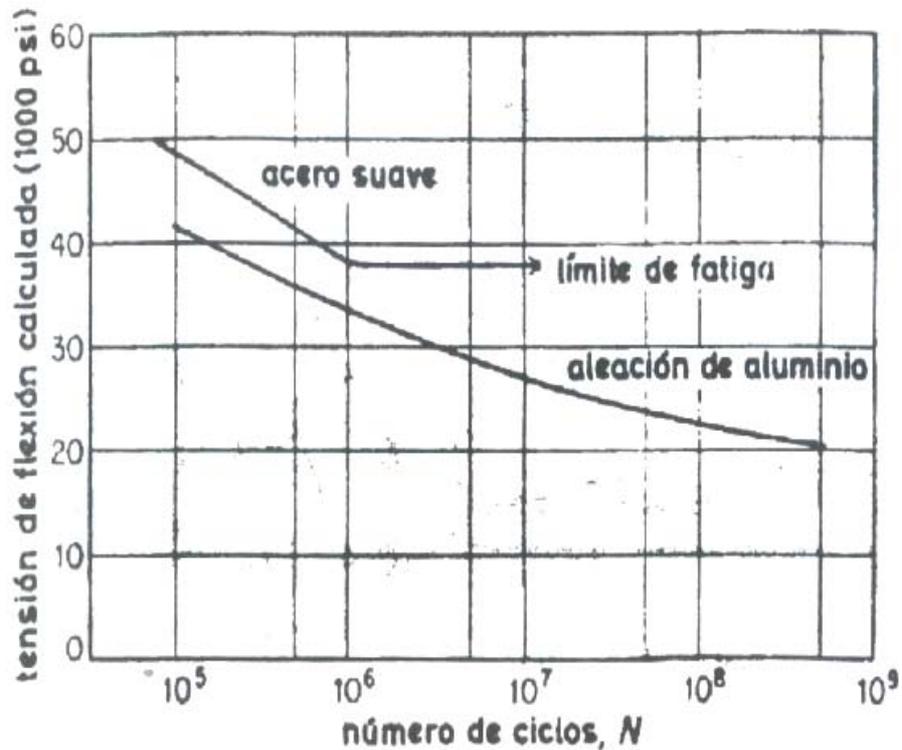


Fig. 4.- Curvas de Wöhler o curvas S-N^[2]

1.1.5.1.- Resistencia a la fatiga bajo el modelo de Basquin.

En 1871 Wöhler publica los resultados de 20 años de investigación, perfecciono la prueba a flexión rotativa, el diagrama S-N, y definió el límite de resistencia a la fatiga; sus resultados los hizo en una curva S-Log N, tal como se aprecia en la figura (4). Asimismo, pero 39 años después (1910), Basquin propuso una expresión paramétrica simple para describir la relación entre el esfuerzo alternante y el número de ciclos a falla ^[2], hoy día conocida como relación de Basquin; su método consistió en graficar los puntos en un papel

Log-Log con los que obtuvo al curva de Wöler y dedujo que el resultado se adaptaba muy bien a una línea recta para la región de alto ciclaje.

Tomando los esfuerzos reales en lugar de los ingenieriles, la amplitud de esfuerzo puede ser descrita como la resistencia a la fatiga o la vida a la fatiga, por la siguiente relación:

$$S = S_s (2N_f)^{-b}$$

donde: S = amplitud real de esfuerzo o resistencia a la fatiga del material.

S_s = coeficiente de resistencia a la fatiga.

$2N_f$ = numero de reversos a falla (1 ciclo = 2 reversos).

b = exponente de Basquin o de resistencia a la fatiga.

Tanto S_s como b son propiedades del material.

1.1.5.2.- Método de la escalera.

Uno de los métodos a considerar para evaluar el límite de fatiga del material del presente trabajo es usar el denominado método estadístico de la escalera, también llamado método ascendente y descendente, cuya expresión matemática viene expresada por:

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

donde: S = Límite de fatiga apreciado.

X_0 = Primer nivel de esfuerzo o nivel más bajo de esfuerzo para el cual ocurre el

Suceso menos frecuente.

d = Incremento o disminución del esfuerzo (escalón).

$A = \sum i(f_i)$ = Sumatoria de los sucesos menos frecuentes multiplicados por el

nivel de tensiones al cual ocurre el suceso.

i = Nivel de tensiones.

$N = \sum f_i$ = Sumatoria del número de probetas del suceso menos frecuente.

Observación: Cuando el análisis se basa en las probetas que no fallan, se emplea el signo negativo.

De esta manera, el método consiste en tomar una probeta y ensayarla usando el valor del esfuerzo estimado como límite de fatiga; si la probeta falla, la siguiente probeta se ensaya a un nivel de esfuerzo menor; por el contrario, si la probeta no falla se incrementa el nivel de esfuerzo aplicado. Así, la disminución o aumento del nivel de esfuerzo corresponderá a una cantidad designada como el escalón y que típicamente está alrededor de 5 MPa. Cuando se alcance un total entre 15 a 30 probetas ensayadas se da por terminada la experiencia y se procede al estudio estadístico de los datos.

La desviación estándar para el valor del límite de fatiga obtenido se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$D_s = 1.620 (d) \left[\frac{N(B) - A^2}{N^2} + 0,029 \right]$$

donde: $B = \sum i^2 * f_i$ = Sumatoria de los sucesos menos frecuentes multiplicados por el nivel de esfuerzo al cuadrado.

El método de la escalera permite tener una buena apreciación del límite de fatiga, por lo que es ampliamente utilizado en investigaciones de esta naturaleza.

1.2.- CROMO DURO

1.2.1.- INTRODUCCIÓN

El recubrimiento de cromo duro es un proceso electrolítico compuesta por una solución que contiene ácido crómico (CrO_3) y un anión catalítico en medidas convenientes. Este proceso permite aplicar capas de cromo en materiales donde se requiere una eficiente resistencia al desgaste, tales como: el acero, fundición, aleaciones de aluminio, cobre, latón, cilindros, pistones, engranajes, en el campo automotriz, aeronáutico y naval, etc., con un espesor variable según las necesidades, que oscila desde micras hasta varias décimas.

En el campo laboral al cromo duro se le conoce como un recubrimiento de cromo industrial ingenieril o funcional, además de decorativo. Se diferencian en los siguientes aspectos:

- El recubrimiento de cromo duro tiene como finalidad incrementar la vida en servicio de un metal en ejercicio funcional, al proveer una superficie con un bajo coeficiente de fricción que resiste la abrasión, el desgaste y la corrosión, así como restaurar el grosor de piezas desgastadas o con dimensiones no adecuadas; en cambio el cromo decorativo solo tiene aplicación estética en partes exteriores.
- El cromo duro es normalmente depositado en espesores que varían entre 1,2 a 500 μm y para aplicaciones especiales, hasta espesores considerablemente mayores. El cromo decorativo no excede de 1,3 μm de espesor.
- Con ciertas excepciones, el cromo duro es depositado directamente sobre el metal base; mientras que el cromo decorativo es aplicado sobre una capa de níquel o de cobre-níquel.

1.2.2.- APLICACIONES DEL CROMO DURO.

1.2.2.1.- Características principales:

- Dureza muy elevada: de 65 a 70 ROCKWELL C (900 a 1000 VICKERS).
- Gran resistencia al desgaste y a las inclemencias del tiempo.
- Resistencia a las altas temperaturas ya que el cromo duro funde a 1560⁰C.
- Resistencia a la corrosión, los ácidos, el salitre, etc.
- Bajo coeficiente de rozamiento.
- En casos de moldes y sinfines proporciona ayuda para que los materiales no se adhieran a las piezas y con la limpieza, las mismas no se dañen.

1.2.2.2.- Resistencia al desgaste y a la corrosión

Es muy extensa la información que señala la efectividad del cromo duro en la reducción al desgaste de piezas en usos diversos.

En la industria automotriz, el cromo duro es aplicado a diferentes componentes mecánicos, por ejemplo, en los anillos de pistones el promedio de vida de un anillo recubierto es cinco veces mayor a la de uno no recubierto. En su mayoría estos anillos vienen con un recubrimiento de cromo en el orden de 100 a 200 μm . Para motores de trabajo pesado o de alto rendimiento, se indican espesores hasta de 250 μm .

1.2.2.3.- Aplicaciones en herramientas

Son variados los tipos de herramientas que son recubiertos con cromo duro buscando minimizar el desgaste, la corrosión y/o reducir la fricción. Generalmente los moldes de acero y de cobre-berilio son recubiertos con cromo duro para prevenir la corrosión. Herramientas de corte profundo son recubiertas con cromo duro, con espesores hasta de 100 μm buscando mejorar el rendimiento de la herramienta y prevención de fallas. Los moldes de acero utilizados para estampar tubos y barras de acero, generalmente se recubren con cromo duro con unos espesores de hasta 250 μm , con ello minimizar el desgaste y reducir la fricción.

El recubrimiento de cromo duro no es recomendable para herramientas de extrusión en frío donde se produzcan aplicaciones de altas presiones debido a que el recubrimiento se puede agrietar y puede ser incompatible con lubricantes de fosfato.

1.2.2.4.- Reconstrucción de piezas

Los recubrimientos de cromo duro son muy útiles en la reconstrucción de piezas mal maquinadas o desgastadas por el uso continuo, destacándose la enorme cantidad que se ejerce en la restauración de cigüeñales de motores de combustión. En esta aplicación, los espesores varían entre 125 y 1.250 μm , lo que produce una excelente resistencia al desgaste debido a su bajo coeficiente de fricción. Es de destacar que este proceso de reconstrucción, antes señalado, desde el año 1970 ha sido sustituido por el proceso de termorrociado, siendo este método de fácil y rápida aplicación.

1.3.- SELECCIÓN DE ELEMENTOS PARA EL USO DEL CROMO DURO

Aspectos fundamentales que se deberían tomar para el uso del cromo duro sobre superficies de los materiales:

- Resistencia y dureza inherente al desgaste del cromo depositado.
- Espesor del depósito deseado.
- Aspectos superficiales.
- Aspectos dimensionales.
- Es muy importante la influencia de las formas de las piezas en el acabado final.

TABLA 1.- Aplicaciones Típicas del Cromo Duro ^[14]

Pieza	Metal Base	Espesor (μm)	Tiempo de Recubrimiento aprox.
Metal de impresión	Acero al carbono	25	60 min.
Sellos	Aceros y cobre	75-180	10 hr
Partes de motor de Avión	Aleaciones base níquel, aceros alta resistencia	75-180	10 hr
Moldes para plásticos	Aceros para Herramientas	5-13	30 min.
Guías textiles	Acero	5-100	20-240 min.
Aros de pistones	Acero o fundición	150-255	8 hr
Bolas para válvulas	Latón o acero	7,5-13	20 min.
Micrómetros	Acero	7,5-13	20 min.
Moldes de bolas de Golf	Latón o acero	7,5-25	20-60 min.
Herramientas de Corte	Acero para Herramientas	1,3	5 min.
Matrices de conformado y estampado	Acero	25	60 min.
Engranajes	Acero	125	150 min.
Cañones de pistolas	Acero	25	40 min.
Cilindros hidráulicos	Acero 1045	13	30 min.
Pines de desgaste	Acero	13	40 min.
Rodillos	Acero	13-255	20-300min.

1.3.1.- Dureza

Las condiciones de deposición y la dureza del cromo electrodepositado es una función que depende de la composición química utilizada en la solución del recubrimiento. En general, el recubrimiento de cromo brillante es el que presenta mayor dureza; estos depósitos, tomando como base las soluciones convencionales, tienen valores de dureza desde 850 a 950 HV, los obtenidos a partir de soluciones de mezclas catalíticas tienen valores de dureza entre 900 y 1000 HV; aquellos obtenidos a partir de soluciones libres de fluoruros tienen valores de dureza entre 950 y 1100 HV o más.

1.3.2.- Metal base

En su mayoría los depósitos de cromo duro son aplicados sobre metales y aleaciones ferrosas. Sin embargo, son numerosas las aplicaciones aeroespaciales que requieren los depósitos sobre aleaciones de base níquel y aluminio.

Desde el punto de vista del proceso, el recubrimiento de cromo duro puede ser aplicado a los aceros independientemente de su dureza y su composición química, con tal que el metal base sea suficientemente fuerte para soportar la capa de cromo en servicio.

1.3.3.- Observaciones respecto al comportamiento a la fatiga del cromo duro

Las investigaciones hechas respecto al tema, reportan disminución de la resistencia a la fatiga de los aceros recubiertos con cromo duro. En base a ello,

se advierte que el límite de fatiga de los aceros de alta resistencia (aceros con $\sigma_u \geq 1240$ MPa) puede ser reducido alrededor de un 50% cuando son recubiertos con cromo duro debido a la estructura de microgrietas inherentes a estos recubrimientos. Sin embargo, se puede recurrir a un tratamiento de granallado (Shot Peening) y post-tratamiento térmico, después del recubrimiento, para mantener gran parte de la resistencia a la fatiga original del material base.

1.4.-SOLUCIONES UTILIZADAS PARA HACER EL RECUBRIMIENTO DE CROMO DURO^[14]

La fuente principal utilizada para los recubrimientos es el “ácido crómico”. Sin embargo, de no existir cierta cantidad de catalizador, el ácido crómico no deposita el cromo, destacando que las cantidades deben ser precisas, una cantidad en exceso de una o, poca cantidad de la otra, no permite la deposición. El catalizador que ha permitido, con sobrado éxito esta deposición, ha sido una solución compuesta por aniones ácidos, los cuales provienen de un sulfato. Una sustitución de los iones de fluoruro por una porción de sulfato mejora la operación de deposición del cromo. Después de los años 80 se desarrolló una solución libre de fluoruro. El otro catalizador en la química de la deposición es un a especie orgánica estable.

De acuerdo al tipo de catalizador, las principales clases de soluciones son designadas como: sulfato convencional, catalizadores mezclados (una mezcla química entre sulfato y fluoruro) y catalizadores libres de fluoruro (cuya patente pertenece a una empresa química).

1.4.1.- Soluciones de sulfato convencional

La composición de las soluciones de ácido crómico convencional catalizadas por un sulfato puede variar en un espectro muy amplio, manteniendo la relación de peso de ácido crómico a sulfato, dentro de un intervalo entre 75 y 120 a 1. Operando con mayor poder, o corriente, se puede utilizar una relación entre 90 y 110 a 1. Sin embargo, en un margen entre 75 y 90 a 1 se obtienen depósitos brillantes y, se puede utilizar una alta densidad de corriente.

Las soluciones que contienen alrededor de 50g/l no representan una producción práctica ya que el ámbito de deposición es muy limitado, existe una mayor tendencia a la contaminación, hay mayor resistencia eléctrica y se requieren mayores voltajes para la operación.

Las soluciones con baja concentración (250g/l de CrO_3) son bastante utilizadas porque minimizan las pérdidas y los problemas ambientales relacionados con la deposición. Las soluciones de alta concentración (400 g/l de CrO_3) tienen la ventaja de ser menos sensibles a los cambios de concentración y son más fáciles de controlar, son más conductivas y pueden ser operadas a menores voltajes, por lo que desprenden menos calor.

TABLA 2.- Baños de sulfato convencional para recubrimientos de cromo
[14]

Tipo de baño	Ácido crómico (g/l)	Sulfato (g/l)	Densidad de Corriente (A/dm^2)	Temperatura Del baño ($^{\circ}\text{C}$)
Baja concentración	250	2,5	31-62	52-63
Alta concentración	400	4,0	16-54	43-63

1.4.2.- Soluciones de catalizadores mezclados

Estas soluciones son similares a las de sulfato en cuanto a la conductividad; sin embargo, producen depósitos más duros y tienen mayor eficiencia de corriente que las soluciones de sulfato convencional en las mismas condiciones. También son de alta concentración. Los catalizadores mezclados pueden aumentar la velocidad de producción de 40 a 60% o más, por encima de las soluciones de sulfato convencionales, debido a la gran eficiencia de corriente de los catalizadores mezclados y su capacidad para operar a altas densidades de corriente sin crear efectos dañinos en el depósito. Una de las limitaciones de estas soluciones es que causan grabados de superficie no recubierta en áreas de baja densidad de corriente, produciendo un incremento de la contaminación y reduciendo la vida de la solución.

1.4.3.- Soluciones libres de fluoruro

Estas soluciones, cuya composición química esta patentada, esta basada sobre acido crómico, sulfato y un catalizador orgánico. Estos proveen una velocidad de deposición y unos intervalos de densidad de corriente ligeramente mayores que las soluciones de catalizadores mezclados. Esto se debe a que no contienen fluoruro u otros halógenos, por lo que no causa grabados de superficie no recubierta o ataques a substratos de cobre o aluminio, como si ocurre en las soluciones de catalizadores mezclados.

La mayor dureza y resistencia a la corrosión se alcanza en las soluciones libres de fluoruro, luego siguen las soluciones de catalizadores mezclados y por ultimo las soluciones de sulfato convencional.

1.5.-ASPECTOS PRINCIPALES DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO^[14]

Los tres tipos de soluciones anteriormente señalados, continuamente deben ser sujetos a revisión al análisis químico para el control de la composición de la solución, a fin de garantizar una deposición de cromo uniforme a lo largo del proceso. A excepción del control del catalizador, los métodos de análisis son idénticos para las tres soluciones. Los análisis de la solución deben ser llevados a cabo de manera completa a intervalos de semanas, meses, etc., dependiendo de la capacidad de producción de la empresa, debido a que en el proceso los cambios que puedan surgir en la composición química dependen del número de Amperes/hora de corriente que circula a través de la solución, del movimiento de la solución y de las pérdidas por rociado. Las pérdidas de evaporación, si no son compensadas, pueden producir cambios en la concentración entre 2 y 5% durante un día de operación.

1.5.1.- Contenido de ácido crómico

Para determinar el contenido de ácido crómico en una solución es a través de un hidrómetro en la solución, procurando que agentes contaminante como hierro o cobre no estén presentes en la solución en cantidades apreciables. La calibración del hidrómetro se hace en onzas de ácido crómico por galón a la temperatura de la solución. Para hallar la cantidad de ácido crómico es a través de una conversión de la lectura del hidrómetro en gramos u onzas de ácido crómico. Periódicamente, deben hacerse análisis químicos cuantitativos para determinar las diferencias con las lecturas hechas con el hidrómetro.

1.5.2.- Contenido de sulfato

La cantidad de sulfato presente en la solución de cromo se puede determinar, con alto grado de precisión, a través de dos métodos, el gravimétrico y el centrifugado, éste último mucho más rápido. Regularmente se debe chequear el contenido de sulfato en la solución para garantizar una solución de primera calidad y de óptima deposición.

1.5.3.- Agentes contaminantes

En el proceso de operación de una solución de cromo, ésta debe estar libre de contaminantes. La inclusión de partículas de hierro, cobre o cromo trivalente hace decrecer negativamente la conductividad de la solución, lo cual implica un aumento en el voltaje de operación produciendo una determinada densidad de corriente.

La presencia del cromo trivalente puede ser por la descomposición de orgánicos, pero la manera más frecuente es como resultado de una baja relación de área de ánodo a cátodo. El cromo trivalente puede ser reoxidado a cromo hexavalente por la reducción electrolítica de la solución entre 60 y 66 °C con una relación ánodo-cátodo de 30 a 1.

Aparte de la composición de la solución, existen otros elementos principales que deben ser controlados para obtener un cromo duro óptimo y eficiente, son: los ánodos, la densidad de corriente y la temperatura de la solución.

1.5.4.- Ánodos

Las soluciones de cromo son operadas con ánodos insolubles de aleación de plomo. Usualmente, la aleación se hace con 7% de Sn ó Sb, o una combinación de ambos. Sobre el ánodo se forma una capa de peróxido de plomo durante la electrólisis; lo que indica que el funcionamiento del ánodo es correcto. Si la capa se torna de color naranja – amarillo, señala que por el ánodo no está circulando corriente adecuadamente. Es muy importante la limpieza regularmente de los ánodos para mantener un funcionamiento eficiente.

Cada ánodo debe tener una adecuada sección transversal para que circule la corriente sin el efecto Joule (sobrecalentamiento); las investigaciones y experiencias indican, por lo menos, una sección transversal de ± 150 mm para evitar un corto circuito eléctrico.

1.5.5.- Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de las soluciones de cromo está basada sobre la concentración de ácido crómico. Las concentraciones mayores de 250 g/L requieren de bajos voltajes de operación, sin embargo, la eficiencia de corriente decrece con el incremento de la concentración de ácido crómico. Concentraciones por debajo de 180 g/L son ineficientes, a menos que, se disponga de rectificadores de alto voltaje.

1.5.6.- Densidad de corriente y eficiencia de corriente

La eficiencia de corriente catódica varía con la densidad de corriente y temperatura de la solución. La eficiencia se incrementa significativamente a medida que se incrementa la densidad de corriente y decrece ligeramente con el aumento de la temperatura. Estas dos variables tienen un efecto decisivo en la apariencia y la dureza del recubrimiento.

Una alta temperatura de solución produce, a baja eficiencia de corriente, un recubrimiento suave y blando de color mate; de incrementarse la densidad de corriente progresivamente, mejoraría la dureza y apariencia del mismo. A medida que se aumente la densidad de corriente a la misma temperatura, la dureza y el brillo del recubrimiento del cromo duro aumentan y con ello mantener una misma dureza. Si se aumenta la temperatura, también se debe aumentar la densidad de corriente

1.5.7.- Temperatura de la solución

La conductividad eléctrica se ve afectada por la demanda de corriente y la temperatura de la solución. A medida que la temperatura del baño aumente, así mismo se debe aumentar se debe aumentar la densidad de corriente requerida para obtener un depósito adecuado. Si la energía es limitada, se puede hacer un adecuado recubrimiento a bajas temperaturas, en cambio si se dispone de útil corriente es provechoso trabajar a temperaturas más elevadas para favorecer una deposición más rápida y un recubrimiento más duradero. En cualquier temperatura, el incremento de la agitación permitiría densidades de corriente más elevadas.

Es importante destacar, que el control de la temperatura de solución, en un intervalo conveniente, es muy influyente, debido a que la temperatura contribuye de manera precisa la calidad del depósito. Un incremento de 2 °C en la temperatura promedio del baño puede reducir en 5 °C o más el espesor promedio del depósito. Por ello, la temperatura de la solución debe mantenerse dentro de un intervalo de no más de 1 °C, controlado automáticamente.

1.5.8.- Velocidad de deposición

A medida que aumenta la eficiencia de la corriente, el tiempo de deposición disminuye, por lo que se requiere menos tiempo para depositar el mismo espesor de recubrimiento aumentando la eficiencia de corriente. De esta manera, la velocidad de deposición aumenta de manera reveladora si se aumenta la densidad de corriente. Debido a que el tiempo en el tanque es un factor económico muy importante; elevadas velocidades de deposición, producidas por la alta disponibilidad de corriente pueden conducir a tener una temperatura de recubrimiento más adecuada.

1.5.2.- Contenido de sulfato

La cantidad de sulfato presente en la solución de cromo se puede determinar, con alto grado de precisión, a través de dos métodos, el gravimétrico y el

centrifugado, éste último mucho más rápido. Regularmente se debe chequear el contenido de sulfato en la solución para garantizar una solución de primera calidad y de óptima deposición.

1.5.3.- Agentes contaminantes

En el proceso de operación de una solución de cromo, ésta debe estar libre de contaminantes. La inclusión de partículas de hierro, cobre o cromo trivalente hace decrecer negativamente la conductividad de la solución, lo cual implica un aumento en el voltaje de operación produciendo una determinada densidad de corriente.

La presencia del cromo trivalente puede ser por la descomposición de orgánicos, pero la manera más frecuente es como resultado de una baja relación de área de ánodo a cátodo. El cromo trivalente puede ser reoxidado a cromo hexavalente por la reducción electrolítica de la solución entre 60 y 66 °C con una relación ánodo-cátodo de 30 a 1.

Aparte de la composición de la solución, existen otros elementos principales que deben ser controlados para obtener un cromo duro óptimo y eficiente, son: los ánodos, la densidad de corriente y la temperatura de la solución.

1.5.4.- Ánodos

Las soluciones de cromo son operadas con ánodos insolubles de aleación de plomo. Usualmente, la aleación se hace con 7% de Sn ó Sb, o una combinación de ambos. Sobre el ánodo se forma una capa de peróxido de plomo durante la

electrólisis; lo que indica que el funcionamiento del ánodo es correcto. Si la capa se torna de color naranja – amarillo, señala que por el ánodo no está circulando corriente adecuadamente. Es muy importante la limpieza regularmente de los ánodos para mantener un funcionamiento eficiente.

Cada ánodo debe tener una adecuada sección transversal para que circule la corriente sin el efecto Joule (sobrecalentamiento); las investigaciones y experiencias indican, por lo menos, una sección transversal de ± 150 mm para evitar un corto circuito eléctrico.

1.5.5.- Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de las soluciones de cromo está basada sobre la concentración de ácido crómico. Las concentraciones mayores de 250 g/L requieren de bajos voltajes de operación, sin embargo, la eficiencia de corriente decrece con el incremento de la concentración de ácido crómico. Concentraciones por debajo de 180 g/L son ineficientes, a menos que, se disponga de rectificadores de alto voltaje.

1.5.6.- Densidad de corriente y eficiencia de corriente

La eficiencia de corriente catódica varía con la densidad de corriente y temperatura de la solución. La eficiencia se incrementa significativamente a medida que se incrementa la densidad de corriente y decrece ligeramente con el

aumento de la temperatura. Estas dos variables tienen un efecto decisivo en la apariencia y la dureza del recubrimiento.

Una alta temperatura de solución produce, a baja eficiencia de corriente, un recubrimiento suave y blando de color mate; de incrementarse la densidad de corriente progresivamente, mejoraría la dureza y apariencia del mismo. A medida que se aumente la densidad de corriente a la misma temperatura, la dureza y el brillo del recubrimiento del cromo duro aumentan y con ello mantener una misma dureza. Si se aumenta la temperatura, también se debe aumentar la densidad de corriente

1.5.7.- Temperatura de la solución

La conductividad eléctrica se ve afectada por la demanda de corriente y la temperatura de la solución. A medida que la temperatura del baño aumente, así mismo se debe aumentar se debe aumentar la densidad de corriente requerida para obtener un depósito adecuado. Si la energía es limitada, se puede hacer un adecuado recubrimiento a bajas temperaturas, en cambio si se dispone de útil corriente es provechoso trabajar a temperaturas más elevadas para favorecer una deposición más rápida y un recubrimiento más duradero. En cualquier temperatura, el incremento de la agitación permitiría densidades de corriente más elevadas.

Es importante destacar, que el control de la temperatura de solución, en un intervalo conveniente, es muy influyente, debido a que la temperatura contribuye de manera precisa la calidad del depósito. Un incremento de 2 °C en la temperatura promedio del baño puede reducir en 5 °C o más el espesor

promedio del depósito. Por ello, la temperatura de la solución debe mantenerse dentro de un intervalo de no más de 1 °C, controlado automáticamente.

1.5.8.- Velocidad de deposición

A medida que aumenta la eficiencia de la corriente, el tiempo de deposición disminuye, por lo que se requiere menos tiempo para depositar el mismo espesor de recubrimiento aumentando la eficiencia de corriente. De esta manera, la velocidad de deposición aumenta de manera reveladora si se aumenta la densidad de corriente. Debido a que el tiempo en el tanque es un factor económico muy importante; elevadas velocidades de deposición, producidas por la alta disponibilidad de corriente pueden conducir a tener una temperatura de recubrimiento más adecuada.

TABLA 3. Efecto de la temperatura del baño y densidad de corriente sobre la apariencia y dureza de los depósitos de cromo a partir de una solución convencional de alta concentración ^[14].

Temperatura de baño (°C)	Densidad de Corriente (A/dm²)	Apariencia del depósito	Dureza (DPH)^(a)
43	< 8,53	Mate	(b)
	8,53	Semibrillante	695
	17,1	Brillante	900
	25,6	Brillante	> 940
	34,1	Opaco, nodular^(c)	> 940
49	< 10,9	Mate	510-595
	10,9	Semibrillante	695
	21,7^(d)	Brillante	900
	32,6	Brillante	> 940
	43,4	Opaco, nodular^(c)	> 940
54	< 14,0	Mate	510-595
	14,0	Semibrillante	695
	27,9^(d)	Brillante	900
	41,9	Brillante	> 940
	55,8	Opaco, nodular^(c)	> 940

(a) La dureza se determinó con un Indentador de diamante Vickers, con una carga de 200gr.

(b) La densidad de corriente fue muy baja para recubrir suficiente cantidad que permitiera hacer el ensayo de dureza.

(c) Especímenes pulidos ligeramente hasta suavizar los nódulos

(d) Densidad de corriente óptima.

1.6.- EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS PARA LAS LABORES DE RECUBRIMIENTO CON CROMO DURO EMPLEANDO UNA SOLUCIÓN ADECUADA ^[14].

1.6.1.- Tanque y revestimiento

El equipo esta constituido principalmente por un tanque, el cual, generalmente viene fabricado en acero de bajo carbono, revestido con un material resistente a la corrosión de ácido crómico (Fig. 5). El material de recubrimiento suele ser de una aleación de plomo que contiene antimonio, ya que este es efectivo contra la corrosión. Otros usan unos ladrillos resistentes al ácido en combinación con el revestimiento, y así evitar las pérdidas de corriente. El tanque debe estar colocado como mínimo a 100 mm del piso, situado sobre unas vigas. Una manera de aislar el tanque es colocando una fibra de vidrio entre el piso y la viga. Para aislar los electrodos del tanque se utilizan unos ladrillos de vidrio. Las dimensiones del tanque son de acuerdo a especificaciones relacionadas de manera apropiada, de acuerdo al largo, ancho, espesor y profundidad requerida. Así mismo, el recubrimiento está sometido a este tipo de especificaciones.

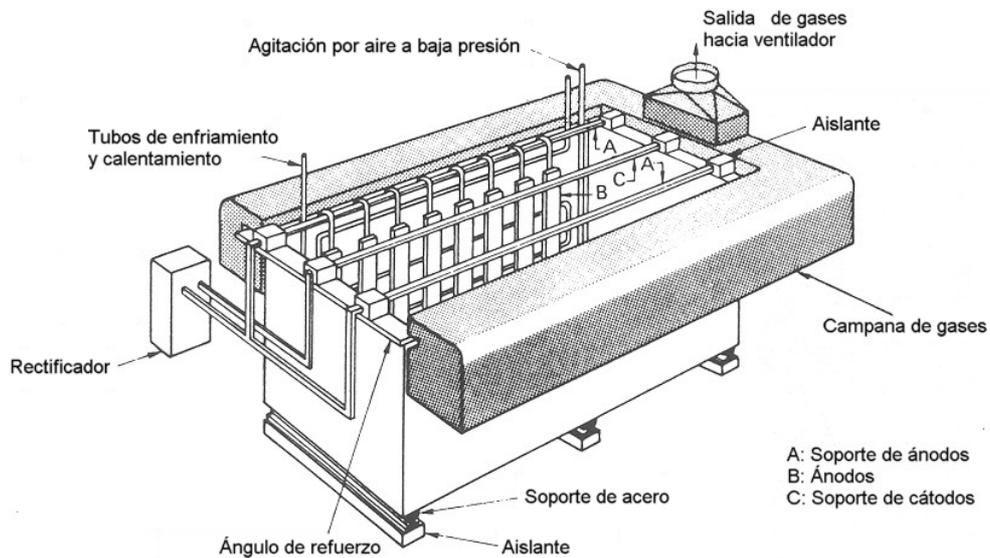


FIGURA 5. Tanque utilizado para la aplicación del recubrimiento de Cromo Duro ^[14].

1.6.2.- Método de control de temperatura

El método empleado para el calentamiento y enfriamiento de la solución es a través de tubos espirales construidos de plomo o de plomo-antimonio, los cuales conducen vapor de agua para el calentamiento y agua para el enfriamiento. De igual manera se usan espirales de titanio para soluciones convencionales y soluciones libres de fluoruro por su relativo bajo costo y duración. Estas espirales se mantienen sobre la pared del tanque, detrás de los ánodos tienen una sección no conductora para que no interfieran eléctricamente con el sistema de poder.

1.6.3.- Fuente de poder: generador–rectificador

Actualmente se utilizan rectificadores de manera persistente para depositar recubrimientos, mientras que los generadores se utilizan para instalaciones grandes y permanentes. Generalmente se debe trabajar con una fuente de poder de 9 a 12 V, aunque se puede trabajar hasta con 6 V; para ello se requiere un rectificador de onda completa con una entrada trifásica sin interrupción de corriente. Si la fuente de poder falla durante la operación se producen depósitos laminados y suaves.

1.6.4.- Agitación

La solución de ácido crómico constantemente debe ser agitada, desde el principio de la operación de recubrimiento, para evitar gradientes de temperatura. Generalmente se utiliza una agitación con aire, el cual es suministrado por una bomba de baja presión y libre de aceite para evitar cualquier contaminación de la solución. El aire llega a la solución a través de un tubo perforado hecho con un material polimérico, el cual distribuye el aire adecuadamente.

1.6.5.- Barra colectora

La barra colectora de ánodos a utilizar, generalmente fabricada de cobre, debe soportar el peso y el trabajo de los ánodos. Para ello debe determinarse sus dimensiones en función del amperaje a emplear y el peso de los ánodos que debe soportar. Esta barra se coloca sobre el borde del tanque, aislada con ladrillos de porcelana o plástico.

1.6.6.- Emisión y extracción de gases

El proceso laborioso de recubrimiento con cromo duro produce gases tóxicos, y de acuerdo a las recomendaciones de la Conferencia de Americana de Higienistas Industriales, la máxima concentración permitida para una labor de 8 horas continuas no debe exceder de 0,1 mg de niebla de ácido crómico/m³ de aire. Para obtener una extracción apropiada de gases se debe usar un mínimo de ventilación de 60 m³/min., por m² de área de superficie de solución. Generalmente los ventiladores de extracción se colocan a lo largo de ambos lados del tanque. El sistema de extracción debe contener un recipiente especial para atrapar los gases tóxicos o la niebla de ácido crómico, a fin de reciclarlo o usarlo en otra tarea. Jamás se debe permitir que el ácido crómico se propague al medio ambiente por ser un elemento sumamente tóxico.

1.7.- EFECTO Y RELACIONES DEL CROMO DURO

1.7.1.- Afinidad entre microgrietas, esfuerzos residuales y dureza

Generalmente los depósitos de cromo electrolítico, como el cromo duro, presentan microgrietas. Estas micogrietas se originan durante la deposición cuando los esfuerzos internos de tracción, propios del proceso de electrodeposición del cromo, exceden la fuerza de cohesión de este. En síntesis, la formación de microgrietas es un mecanismo de liberación de tensiones internas durante la deposición del recubrimiento^[3]. Las microgrietas son relativamente muy delgadas, aproximadamente de 0,1 μm de ancho, de muy poca penetración en el recubrimiento, menor de 8 μm . Estas grietas no están solas, sino repletas de cromo u óxido de cromo. Las microgrietas forman redes de grietas, visibles a gran extensión de aumento.

Las grietas del recubrimiento influyen los valores de dureza, dependiendo del tipo de indentador utilizado y de la carga aplicada. En general, las cargas ligeras son más sensibles a las variaciones de dureza y esto resulta en valores más altos. Las grietas influyen más los valores obtenidos con cargas elevadas que los valores obtenidos con cargas ligeras. También, debido a que el indentador piramidal de diamante 1360⁰ Vickers cubre menos área, los valores de dureza determinados con este indentador están menos influenciados por las grietas que los valores obtenidos con el indentador Knoop^[14].

TABLA 4. Valores de dureza del Cromo Duro con distintos indentadores
^[14].

Carga (gr)	Indentador Vickers	Indentador Knoop
100	950 – 1100 (1040 prom.)	940 – 1090 (1025 prom.)
500	780 – 905 (850 prom.)	685 – 890 (830 prom.)

1.7.2.- Resistencia a la corrosión

El cromo duro electrodepositado, sobre 1,2 μm de espesor, protege al sustrato a través de una barrera, en contraposición al recubrimiento de zinc, el cual se sacrifica para proteger al sustrato. El cromo es electroquímicamente más activo que el acero. Sin embargo, este forma una densa capa de óxido sobre la superficie. El cromo duro es químicamente resistente a la mayoría de los compuestos y ofrece una excelente protección contra la corrosión en la mayoría de los ambientes.

Debido a que el cromo duro protege al sustrato formando una barrera, los recubrimientos deben ser más gruesos que las microgrietas para proveer una buena resistencia a la corrosión. Aunque los recubrimientos delgados pueden no formar microgrietas, éstos pueden ofrecer una buena resistencia a la corrosión como los recubrimientos más gruesos. Las microgrietas no disminuyen la resistencia a la corrosión como podría esperarse. Existen dos razones para ello: primero, las microgrietas no están vacías, sino que están llenas de cromo u óxido de cromo; segundo, debido a que las microgrietas son muy delgadas, alrededor de 0,1 μm , y que el agua no moja al cromo, entonces, no hay penetración de líquido en la grieta.

Los recubrimientos delgados libres de grietas pueden ser depositados a partir de baños a bajas densidades de corriente y altas temperaturas. Estos depósitos libres de grietas proveen mejor resistencia a la corrosión que los depósitos de cromo microagrietados. Sin embargo, estos depósitos presentan altos esfuerzos internos de tracción y no son tan duros como los depósitos de cromo microagrietados. Los depósitos libres de grietas pueden utilizarse cuando la protección contra la corrosión es el único requerimiento para el depósito.

1.7.3.- Efecto de la temperatura

La temperatura cumple un papel fundamental sobre la dureza del cromo, especialmente donde este involucrada la resistencia al desgaste. A temperaturas por encima de los 205⁰C la dureza del recubrimiento comienza a decrecer, es decir, que al incrementarse la temperatura, la dureza decrece progresivamente. Como la dureza del cromo duro decrece, entonces su resistencia al desgaste puede verse afectada en forma muy negativa. En síntesis, los recubrimientos de cromo duro no deben ser empleados en aplicaciones de resistencia al desgaste cuando la temperatura de servicio excede los 400⁰C.

1.7.4.- Costos

Son muy beneficiosos los depósitos de cromo duro, sus recubrimientos tienen una relación costo-ganancias muy favorable para los productores, sus ganancias muy productivas y su calidad no deja dudas que los recubrimientos son de alta capacidad tecnológica. Es destacable que elemento integrantes de esta producción como son: capital, electricidad, productos químicos y gastos operativos son de bajo costos. Los costos químicos van en aumento a partir de la solución convencional, seguido de los catalizadores mezclados y luego las soluciones libres de fluoruro. Sin embargo, estos costos se ahorran en los costos eléctricos y en la calidad de los depósitos. No así en la pieza a recubrir, porque debido a su complejidad, los costos del recubrimiento aumentan, necesitan de una conducción especial o requieren más trabajo, incluso de operatividad.

Otros factores que incrementan los costos de operatividad, son los ánodos, que deben ajustarse a la forma de las piezas a recubrir y así asegurar y controlar el espesor del recubrimiento. Los recubrimientos de alta calidad, tales como dureza, acabado y apariencia brillante son muy costosos.

1.7.5.- Efectos adversos de los recubrimientos de cromo

El cromo duro aparte de sus excelentes propiedades que imparte al sustrato, de la calidad de su recubrimiento y de todo lo anteriormente señalado, ha sido muy cuestionado por agencias reguladores de los Estados Unidos y organismos ambientalistas de la ONU. El uso indiscriminado y la emisión del cromo hexavalente ha generado efectos adversos al medio ambiente y a la salud, por lo que estas instituciones han decretado los parámetros específicos a fin de reducir en su máxima capacidad las emisiones de este elemento^[12].

En el mercado existen recubrimientos que por sus características, se aproximan como posibles reemplazos del cromo duro. Sin embargo, ninguno reúne todas las condiciones deseables del cromo duro. No obstante, cada uno de ellos presenta excelentes propiedades específicas, que pueden ser aprovechadas en casos especiales.

Características generales de posibles potenciales substitutos del cromo duro.

1.7.5.1.- “Electroless” de Níquel

Este recubrimiento no es nada nuevo, ha existido desde varias décadas. Es un proceso autocatalítico (no requiere fuente de energía externa), donde iones de níquel son reducidos a metal por la acción química de un agente reductor, sin la necesidad de una corriente eléctrica. Este recubrimiento como posible sustituto del cromo duro está profundamente limitado por sus pobres dotes físicas. Los recubrimientos EN de bajo fósforo presentan una relativa buena dureza y resistencia al desgaste, pero esta es menor que la del cromo duro. Una ventaja del EN es que el recubrimiento sigue perfectamente el contorno del sustrato, con un espesor bastante uniforme, por lo que se pueden recubrir piezas de alta complejidad. El EN es más susceptible a las impurezas y desequilibrios en el baño que el cromo duro, por tanto, necesita de un control estricto para mantener la estabilidad del mismo.

El EN se puede emplear como una alternativa al cromo duro en limitadas aplicaciones, tales como en condiciones de muy buena lubricación. La relación costo-beneficio del EN tampoco es muy favorable. La principal desventaja del EN es su menor dureza, pero haciéndole un pos-tratamiento térmico se mejoran mucho estas propiedades. La principal ventaja del EN es que la resistencia a la corrosión es mejor que la del cromo duro y además, puede presentar una menor disminución de las propiedades de fatiga que el recubrimiento de cromo.

1.7.5.2.- Proceso electrodepositado de Níquel-Tungsteno

Existen dos procesos separados de compuesto de níquel-tungsteno que son potenciales alternativas al cromo duro: el níquel-tungsteno-boro (Ni-W-B) y, el níquel-tungsteno-carburo de silicio (Ni-W-SiC). Ambos procesos son similares ya que son depositados electrolíticamente. Los dos procesos fueron desarrollados recientemente y aún no son ampliamente utilizados. Cada uno de estos recubrimientos exhibe muchas de las características del cromo duro, pero son necesarias todavía muchas pruebas antes de que el proceso sea ampliamente utilizado en aplicaciones críticas. El proceso utiliza menos energía que la deposición del cromo y también produce un recubrimiento más uniforme, lo que representa un ahorro de costos. Además, el proceso es parecido al del cromo, ya que se realiza en un tanque, por lo que una transición hacia este nuevo proceso es muy viable.

El recubrimiento de Ni-W-B es aproximadamente 60% Ni, 39% W, y 1% B. Este recubrimiento tiene un brillo plateado-blanco, de apariencia muy brillante y de espesores hasta 0,25 mm (250 μm), además presenta una apariencia mate. El recubrimiento presenta buena resistencia química y a la abrasión, posee alta ductibilidad y bajo coeficiente de fricción. También presenta buena uniformidad y suavidad. Sin embargo, el recubrimiento es menos duro que el cromo duro, pero con pos-tratamiento térmico se logran durezas mayores que las del recubrimiento de cromo.

El recubrimiento Ni-W-SiC es similar al Ni-W-B excepto que usa carburo de silicio dispersos en la matriz para aliviar los esfuerzos internos y mejorar la dureza de recubrimiento. El depósito resultante presenta 46,3% Ni; 46,1% W; 4,3% Si y 3,2% C. La apariencia es similar al anterior, con los carburos de silicio causando un ligero oscurecimiento. Las propiedades del depósito

presentan buena resistencia química y a la abrasión, con bajo coeficiente de fricción. La dureza de este recubrimiento es algo mayor que la d31 Ni-W-B y, con pos-tratamiento térmico esta excede la del cromo duro.

La principal desventaja de estos recubrimientos es que les falta maduración y que es más costoso que el cromo. Por otro lado, aún no ha sido adoptado en ningún proceso productivo. Por tanto, necesita todavía de muchas pruebas para que pueda ser utilizado en una aplicación en particular.

1.7.5.3.- Recubrimientos termorociados (High Velocity Oxygen Fuel →HVOF)

Los recubrimientos termorociados son potenciales alternativas al cromo duro. Entre sus variadas aplicaciones destacan: rociado por llama, rociado por arco, rociado por plasma y, el rociado con combustible de alta velocidad (HVOF). Actualmente el HVOF es utilizado en muchas aplicaciones industriales especialmente por su dureza, provee una superficie altamente resistente comparable a la que provee el cromo duro, además es el que tiene las mejores propiedades como recubrimiento.

Su operación se basa en la detonación de una pistola (proceso desarrollado por Praxair), en el proceso de recubrimiento, un gas explosivo es mezclado, produciendo su ignición en el cañón de la pistola y fundiendo el material de recubrimiento, bien sea en polvo o una varilla metálica, siendo proyectado hacia la superficie del sustrato a velocidades supersónicas. A mayor velocidad, mayor es el impacto sobre la superficie del sustrato y su penetración, con lo que se obtienen menores espacios vacíos y con ello un

recubrimiento perfectamente distribuido, de una calidad y acabado mejorando sus propiedades.

A nivel mundial existen numerosas empresas que fabrican equipos de HVOF y sus respectivos materiales para recubrimiento, cada una con su tecnología específica, si algo varía es en el diseño. Muchos recubrimientos de HVOF son de base cromo, sin embargo, el uso del sistema no necesariamente podría eliminar el uso del cromo duro. No obstante, estos procesos con HVOF emiten cantidades significativamente menores de cromo que los procesos de recubrimiento de cromo electrolítico como en el caso del cromo duro.

Este recubrimiento no es nada nuevo, ha existido desde varias décadas. Es un proceso autocatalítico (no requiere fuente de energía externa), donde iones de níquel son reducidos a metal por la acción química de un agente reductor, sin la necesidad de una corriente eléctrica. Este recubrimiento como posible sustituto del cromo duro está profundamente limitado por sus pobres dotes físicas. Los recubrimientos EN de bajo fósforo presentan una relativa buena dureza y resistencia al desgaste, pero esta es menor que la del cromo duro. Una ventaja del EN es que el recubrimiento sigue perfectamente el contorno del sustrato, con un espesor bastante uniforme, por lo que se pueden recubrir piezas de alta complejidad. El EN es más susceptible a las impurezas y desequilibrios en el baño que el cromo duro, por tanto, necesita de un control estricto para mantener la estabilidad del mismo.

El EN se puede emplear como una alternativa al cromo duro en limitadas aplicaciones, tales como en condiciones de muy buena lubricación. La relación costo-beneficio del EN tampoco es muy favorable. La principal desventaja del EN es su menor dureza, pero haciéndole un pos-tratamiento térmico se mejoran mucho estas propiedades. La principal ventaja del EN es que la resistencia a la

corrosión es mejor que la del cromo duro y además, puede presentar una menor disminución de las propiedades de fatiga que el recubrimiento de cromo.

1.7.5.2.- Proceso electrodepositado de Níquel-Tungsteno

Existen dos procesos separados de compuesto de níquel-tungsteno que son potenciales alternativas al cromo duro: el níquel-tungsteno-boro (Ni-W-B) y, el níquel-tungsteno-carburo de silicio (Ni-W-SiC). Ambos procesos son similares ya que son depositados electrolíticamente. Los dos procesos fueron desarrollados recientemente y aún no son ampliamente utilizados. Cada uno de estos recubrimientos exhibe muchas de las características del cromo duro, pero son necesarias todavía muchas pruebas antes de que el proceso sea ampliamente utilizado en aplicaciones críticas. El proceso utiliza menos energía que la deposición del cromo y también produce un recubrimiento más uniforme, lo que representa un ahorro de costos. Además, el proceso es parecido al del cromo, ya que se realiza en un tanque, por lo que una transición hacia este nuevo proceso es muy viable.

El recubrimiento de Ni-W-B es aproximadamente 60% Ni, 39% W, y 1% B. Este recubrimiento tiene un brillo plateado-blanco, de apariencia muy brillante y de espesores hasta 0,25 mm (250 μm), además presenta una apariencia mate. El recubrimiento presenta buena resistencia química y a la abrasión, posee alta ductibilidad y bajo coeficiente de fricción. También presenta buena uniformidad y suavidad. Sin embargo, el recubrimiento es menos duro que el cromo duro, pero con pos-tratamiento térmico se logran durezas mayores que las del recubrimiento de cromo.

El recubrimiento Ni-W-SiC es similar al Ni-W-B excepto que usa carburo de silicio dispersos en la matriz para aliviar los esfuerzos internos y mejorar la dureza de recubrimiento. El depósito resultante presenta 46,3% Ni; 46,1% W; 4,3% Si y 3,2% C. La apariencia es similar al anterior, con los carburos de silicio causando un ligero oscurecimiento. Las propiedades del depósito presentan buena resistencia química y a la abrasión, con bajo coeficiente de fricción. La dureza de este recubrimiento es algo mayor que la del Ni-W-B y, con pos-tratamiento térmico esta excede la del cromo duro.

La principal desventaja de estos recubrimientos es que les falta maduración y que es más costoso que el cromo. Por otro lado, aún no ha sido adoptado en ningún proceso productivo. Por tanto, necesita todavía de muchas pruebas para que pueda ser utilizado en una aplicación en particular.

1.7.5.3.- Recubrimientos termorociados (High Velocity Oxygen Fuel →HVOF)

Los recubrimientos termorociados son potenciales alternativas al cromo duro. Entre sus variadas aplicaciones destacan: rociado por llama, rociado por arco, rociado por plasma y, el rociado con combustible de alta velocidad (HVOF). Actualmente el HVOF es utilizado en muchas aplicaciones industriales especialmente por su dureza, provee una superficie altamente resistente comparable a la que provee el cromo duro, además es el que tiene las mejores propiedades como recubrimiento.

Su operación se basa en la detonación de una pistola (proceso desarrollado por Praxair), en el proceso de recubrimiento, un gas explosivo es mezclado, produciendo su ignición en el cañón de la pistola y fundiendo el material de

recubrimiento, bien sea en polvo o una varilla metálica, siendo proyectado hacia la superficie del sustrato a velocidades supersónicas. A mayor velocidad, mayor es el impacto sobre la superficie del sustrato y su penetración, con lo que se obtienen menores espacios vacíos y con ello un recubrimiento perfectamente distribuido, de una calidad y acabado mejorando sus propiedades.

A nivel mundial existen numerosas empresas que fabrican equipos de HVOF y sus respectivos materiales para recubrimiento, cada una con su tecnología específica, si algo varía es en el diseño. Muchos recubrimientos de HVOF son de base cromo, sin embargo, el uso del sistema no necesariamente podría eliminar el uso del cromo duro. No obstante, estos procesos con HVOF emiten cantidades significativamente menores de cromo que los procesos de recubrimiento de cromo electrolítico como en el caso del cromo duro.

TABLA 5.- Características de los recubrimientos de Cromo Duro y de los procesos alternativos ^[12].

Características	Cromo Duro	Electroless Ni-P (Bajo fósforo)	Ni-W-B	Ni-W-SiC	Plasma rociado	HV OF
Espesor (mm)	< 0.8	< 0.5	< 0.25	< 0.4	1.3	< 1.3
Adhesión (MPa) (ASTM C 633)	> 70	> 70	70	> 70	> 55	>
Dureza	800-1000 HV	670-750 DPH ₃₀₀ sin PTT 980-1050 DPH ₃₀₀ con PTT	600-950 DPH ₃₀₀	800 > 1000 DPH ₃₀₀	800-1200 DPH ₃₀₀	800-1450 DPH ₃₀₀
Resistencia a la Corrosión (h) (ASTM B 177)	> 24	> 96	> 400	> 24	> 24	< 48
Porosidad (%)	< 2	< 1	< 1	< 1	< 5-13	< 2
Coefficiente de Fricción	0.16	< 0.2 *	0.13	0.13	0.25 *	0.2 *
Resistencia Química	Regular	Buena	Excelente	Excelente	Buena	Excelente
Capacidad de Remoción	Rel. Fácil	Difícil	Difícil	Difícil	Difícil	Difícil
Pérdida de resistencia a la fatiga (%)	< 60	Menor a la del cromo	Menor a la del cromo	Menor a la del cromo	Menor a la del cromo	Menor a la del cromo

* Requiere de estudios adicionales

1.8.- CONSECUENCIAS DEL CROMO DURO SOBRE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LOS ACEROS

1.8.1.- INTRODUCCIÓN

El cromo duro ha desempeñado un papel fundamental en la industria y comercialización de los materiales ingenieriles, principalmente mejorando la capacidad de resistencia a la corrosión y al desgaste de los metales, de allí que sus usos sea muy variado y extenso en la industria automotriz y aeronáutica.

En su mayoría los recubrimientos electrodepositados, como el cromo duro, pueden ser producidos con unas propiedades mecánicas iguales o superiores al metal base, donde la resistencia de los componentes, bajo condiciones de carga estática, no se ve afectada adversamente por la presencia del recubrimiento, a menos que la naturaleza del metal sustrato se vea afectada por la fragilización por hidrógeno durante la deposición. Sin embargo, bajo condiciones de cargas cíclicas o alternantes la situación se presenta muy diferente. Desde que empezaron a usar los recubrimientos electrolíticos para modificar la superficie de los metales se ha encontrado una notoria disminución de la resistencia a la fatiga de los aceros; inclusive, llegándose al caso de una disminución hasta 80% bajo condiciones muy desfavorables, cuando el acero es recubierto con cromo electrolítico. Esta limitación de los depósitos de cromo y hasta del níquel, es de gran importancia en la industria automotriz y aeronáutica, en la cual, la pérdida de la resistencia a la fatiga incide directamente sobre los factores de seguridad en el diseño. Por esto, se han hecho innumerables estudios e investigaciones que buscan explicar las causas y la prevención de la pérdida de la resistencia a la fatiga de los metales recubiertos. Sobre esta base, los investigadores han trabajado para conocer el efecto que las condiciones del

depósito, de la deposición y de los subsecuentes tratamientos puedan tener sobre las propiedades de fatiga de los metales recubiertos con diferentes materiales, entre ellos, el cromo duro.

1.8.2.- Importancia del espesor del depósito

Es muy importante destacar la diferencia entre los depósitos tratados térmicamente y los no tratados térmicamente, así como tomar en cuenta la magnitud del espesor sobre la resistencia a la fatiga de los metales recubiertos con cromo duro. Los depósitos sin pos-tratamiento térmico en un intervalo entre 25 y 300 μm de espesor, pérdida de resistencia a la fatiga es en principio independiente del espesor, pero, para espesores menores a 25 μm la evidencia no es conclusiva (ver tabla 1.6). Con los depósitos con pos-tratamientos térmico, los ensayos realizados aconsejan que, para un sustrato dado, existe una marcada reducción de la resistencia a la fatiga en la medida en que aumenta el espesor del depósito. Este efecto es más acentuado a bajas temperaturas de tratamiento térmico (100 – 300 $^{\circ}\text{C}$) y los resultados recomiendan que el factor espesor puede ser completamente ignorado cuando la temperatura de tratamiento térmico está por encima de los 440 $^{\circ}\text{C}$ (Ver Fig.6).

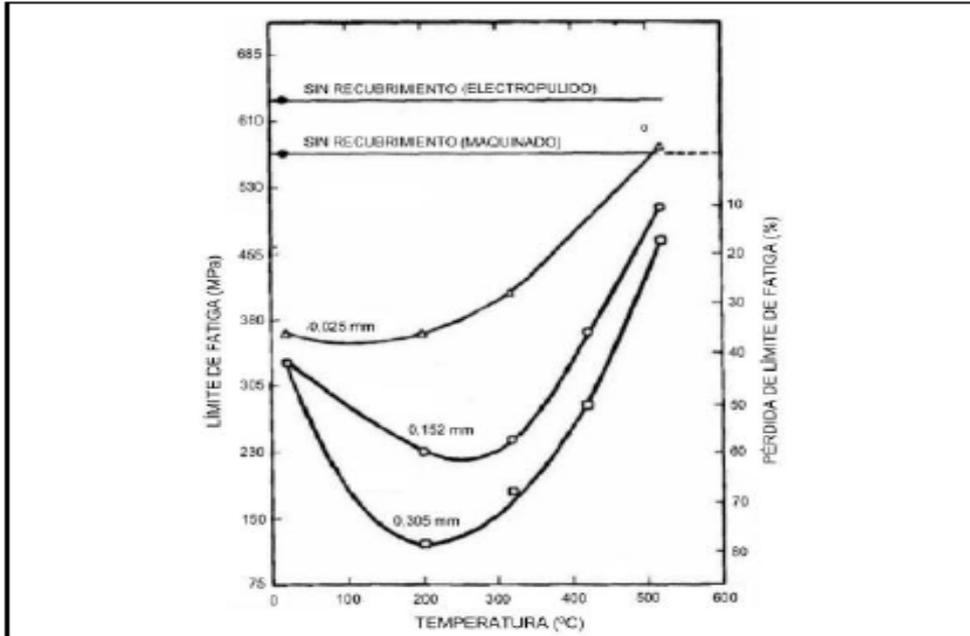


FIGURA 6. Efecto del post-tratamiento térmico sobre el límite fatiga de un acero ($\sigma_u = 1.215$ MPa) recubierto con Cromo Duro a diferentes espesores ^[1].

TABLA 6.- Efecto del espesor del depósito de cromo sin pos-tratamiento térmico sobre la resistencia a la fatiga del acero ^[1]

Acero substrato		Depósito de cromo		Límite de fatiga (MPa)	Pérdida de resistencia a la fatiga (%)
Tipo	σ_{uts} (MPa)	Tipo	Espesor (μm)		
1,6 % Cr	830	Sin Recubrimiento	-	440	-
		Sol. Conv.	30,5	312	29
		“	150	352	21
Cr-Ni-Mo	990	Sin Recubrimiento	-	500	-
		Sol. Conv.	40	460	8
		“	150	435	13
0,44 % C	680	Sin Recubrimiento	-	295	-
		Sol. Conv.	35	255	13
		“	175	260	11
0,45 % C	680	Sin Recubrimiento	-	320	-
		Sol. Conv. ; 230 amp/ft ²	6	255	20
		“ “	27	256	20
		“ “	63	274	14
		Sol.Conv. ; 460 amp/ft ²	4	246	23
		“ “	9	243	25
		“ “	71	281	12
		“ “	137	287	10
		Sol.Conv. ; 920 amp/ft ²	25	232	27
		“ “	100	246	23
		“ “	240	250	22
		Sol. CR110. ; 230 amp/ft ²	7	294	8
		“ “	63	312	2
		Sol. CR110. ; 460 amp/ft ²	165	292	9
“ “	88	314	1		
“ “	182	310	3		
Sol. CR110. ; 920 amp/ft ²	35	287	10		
“ “	39	310	3		

Continuación de la TABLA 6.- Efecto del espesor del depósito de cromo sin pos-tratamiento térmico sobre la resistencia a la fatiga del acero ^[1]

Acero substrato		Depósito de cromo		Límite de fatiga (MPa)	Pérdida de resistencia a la fatiga (%)
Tipo	σ_{uts} (MPa)	Tipo	Espesor (μm)		
En 25	1215	Sin Recubrimiento	-	570	-
		Sol. Conv.	2,5	425	25
		“	8	410	28
		“	12,7	410	28
		“	25,4	365	36
		“	150	328	42,5
	“	300	328	42,5	
	910	Sin Recubrimiento	-	422	-
		Sol. Conv	25	313	26
		“	150	328	22
“	300	320	23,5		
SAE 4130	1260	Sin Recubrimiento	-	553	-
		Sol. ; Conv.	25	410	26
		“	254	431	23
	Sin Recubrimiento	-	553	-	
		Sol. CR110	25	510	8
“	254	501	9		
SAE 4140	1470	Sin Recubrimiento	-	739	-
		Sol. Conv.	1,5	492	33,5
		“	3	492	33,5
		“	7,6	509	31,5
		“	254	498	32,5

1.8.3.- Consecuencias de la densidad de corriente

Las consecuencias de las variaciones de la densidad de corriente, durante la deposición del cromo, sobre la pérdida de resistencia a la fatiga de un acero ($\sigma_u = 680$ MPa) recubierto con cromo a partir de una solución convencional y una solución patentada revelan una relación directamente proporcional. Se produce un incremento en la pérdida de la resistencia a la fatiga con el aumento de la densidad de corriente.

TABLA 7. Efecto de la densidad de corriente sobre el porcentaje de pérdida de resistencia a la fatiga del acero recubierto con cromo a partir de una solución convencional y una solución patentada ^[1].

Condición de recubrimiento		% de pérdida de resistencia a la fatiga	
Densidad de Corriente (A/ft ²)	Temperatura (°C)	Solución convencional	Solución patentada
230	50	14,5	3,5
460	50	15,5	6,7
920	60	25,5	9,7

1.8.4.- Consecuencias de los esfuerzos internos

Normalmente el cromo electrodepositado contiene esfuerzos internos de tracción, los cuales varían para diferentes soluciones y para una determinada solución, así mismo los esfuerzos internos varían de acuerdo a las condiciones de operación, especialmente con la temperatura, (Ver Fig. 7). Hammond y Williams^[1] reportaron que para un recubrimiento de cromo duro de 25 µm de espesor, con unas condiciones de operación de 50 °C de temperatura del baño y de 200^a/ft² de densidad de corriente, el valor medio de esfuerzos internos de tracción (medidos a través del método bent-strip) se encuentra usualmente entre 60 y 120 MPa. Los esfuerzos internos quedan substancialmente constantes para espesores mayores de 25 µm pero, para espesores menores a 25 µm los esfuerzos se incrementan de manera muy aguda (Ver Tabla 8).

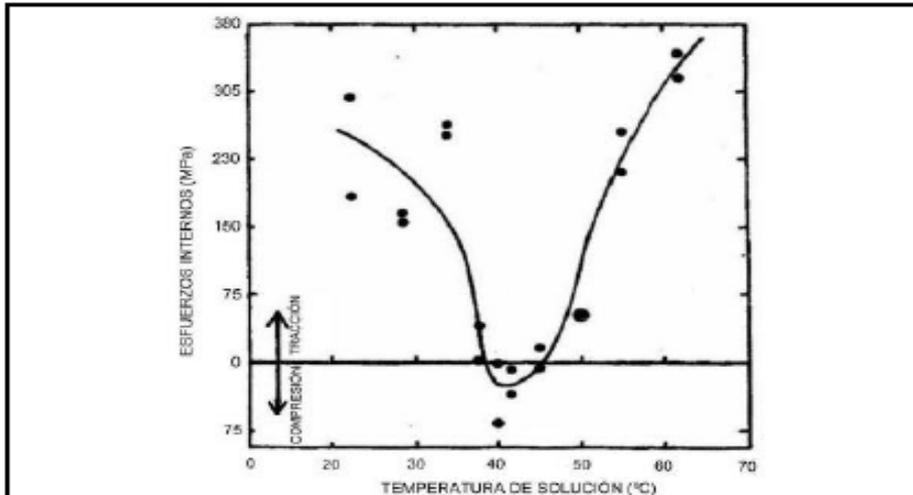


FIGURA 7. Efecto de la temperatura de la solución sobre los esfuerzos internos del depósito de cromo (Solución convencional) ^[1].

TABLA 8. Variaciones de los esfuerzos internos con el espesor de los depósitos de Cromo Duro ^[1].

Solución convencional : 250 g/L CrO ₃ , 2,5 g/L H ₂ SO ₄					
Condiciones de operación : Temp.. 50 ± 1 °C, d.c. 200 A/ft ²					
Espesor (µm)	52	7,6	12,7	25	152
Esf. Int. Tracción (MPa)	957	501	114	76	76

Hammond y Williams^[1], señalan en su investigación, que en otros estudios realizados anteriormente se concluyó, que la reducción de la resistencia a la fatiga de los aceros recubiertos con cromo duro es debido a los esfuerzos residuales de tracción inherentes al recubrimiento. Además, señalan que las características de agrietamiento del cromo producen una liberación de los esfuerzos internos de tracción ver parte (ver numeral: 1.7.1), donde, en las

muestras con alto número de grietas por unidad de área se podría esperar que presentaran esfuerzos residuales más bajos. Por tanto, se debería esperar una menor pérdida de resistencia a la fatiga bajo tales condiciones.

Las fallas por fatiga son fundamentalmente un fenómeno de esfuerzos de tracción, es por ello, que no causa sorpresa que la pérdida de resistencia a la fatiga del acero recubierto con cromo duro haya sido asociada a los esfuerzos internos de tracción del depósito de cromo. Esta opinión ha sido tratada, discutida ampliamente debido a la abrumadora evidencia experimental, no solo en lo que respecta a los recubrimientos electrolíticos sino en la inmensa mayoría de los recubrimientos sometidos a fatiga.

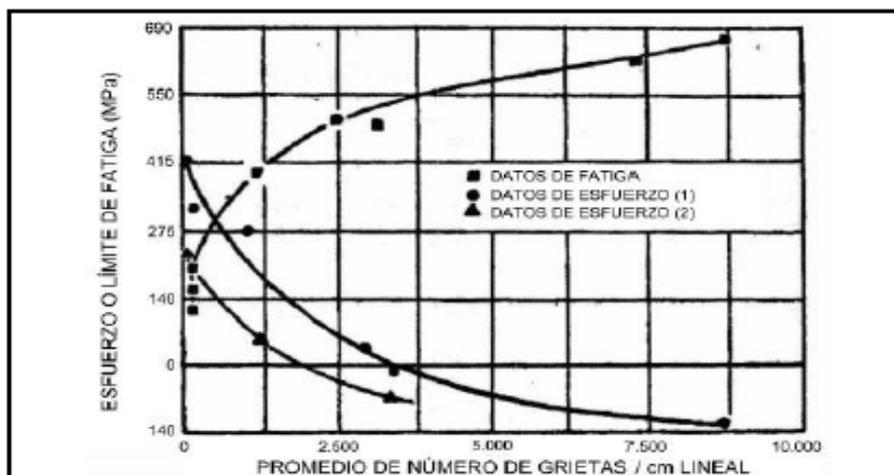


FIGURA 8. Interdependencia del límite de fatiga de un acero recubierto con cromo duro con los esfuerzos internos y la densidad de grietas del depósito ^[1].

Hammond y Williams^[1] corroboraron que el porcentaje de cambio en la resistencia a la fatiga de un acero recubierto con cromo duro, sin y con post-tratamiento térmico es parcialmente determinado por los esfuerzos residuales del recubrimiento. Para un acero dado, el porcentaje de cambio en la

resistencia a la fatiga es una función lineal de los esfuerzos residuales en el cromo (Ver figuras 9 y 10).

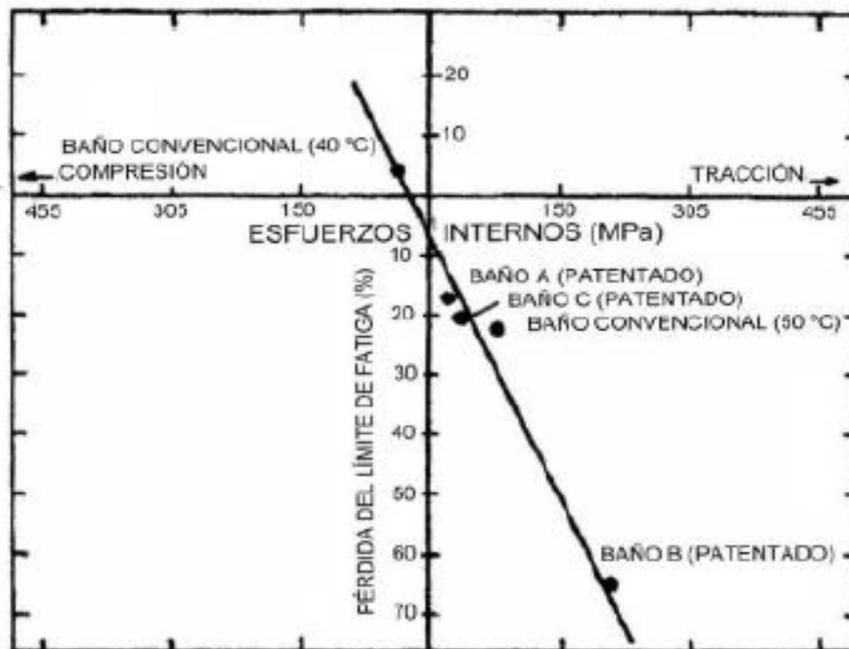


FIGURA 9. Relación lineal entre el porcentaje de cambio en la resistencia a la fatiga del acero recubierto con cromo y los esfuerzos residuales de varios tipos de depósitos de cromo sin post-tratamiento térmico ^[1].

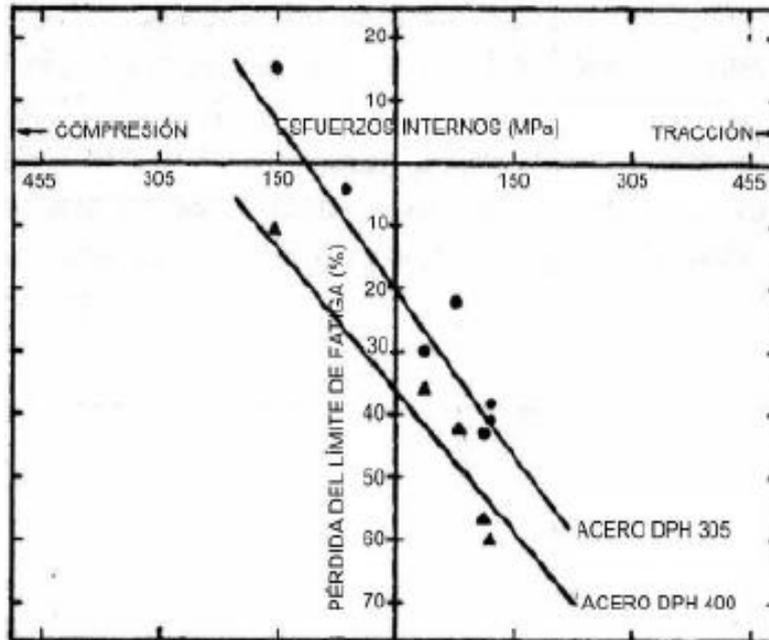


FIGURA 10. Relación lineal entre el porcentaje de cambio en la resistencia a la fatiga de un acero recubierto con cromo y los esfuerzos residuales del depósito con post-tratamiento térmico ^[1].

1.8.5.- Consecuencias del post-tratamiento térmico

El post-tratamiento térmico a temperaturas de 150 y 200⁰C ha sido universalmente descrito como un tratamiento de alivio de tensiones para evitar la fragilización por hidrógeno, el cual se hace inmediatamente después del recubrimiento se cromo. Sin embargo, este tratamiento reduce considerablemente las propiedades de fatiga del acero cuando el material es tratado en el intervalo de temperaturas previamente señaladas. No obstante, cuando se somete el material a temperaturas entre 400 y 440⁰C, se observa la

restauración de las propiedades de fatiga, a valores similares a los del acero no recubierto (Ver figura 11).

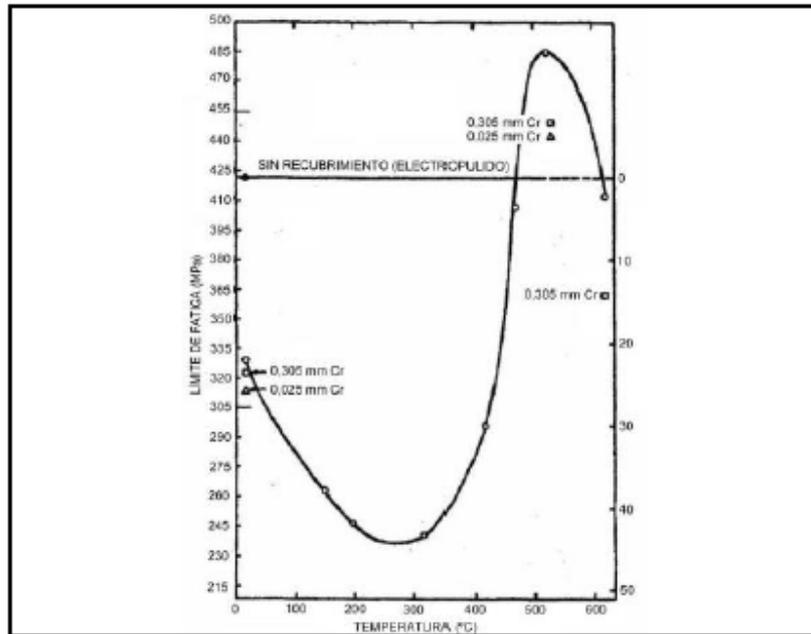


FIGURA 11. Efecto del tratamiento térmico sobre el límite de fatiga de un acero ($\sigma_u = 910$ MPa) recubierto con $152 \mu\text{m}$ de cromo ^[1].

Los experimentos de Hammond y Williams^[1] revelaron que la resistencia a la fatiga no disminuyó significativamente para el depósito de cromo más delgado ($25 \mu\text{m}$) después del post-tratamiento térmico, pero para depósitos de más de $150 \mu\text{m}$ se produce una caída pronunciada del límite de fatiga. Altas temperaturas de tratamiento térmico (450°C o más) dieron como resultado una resistencia a la fatiga tan alta o mayor que la del metal no recubierto. En estos experimentos se hizo una correlación entre la temperatura de tratamiento térmico y los esfuerzos residuales (Ver figura 12), donde se observó una

similitud con la forma de la curva de resistencia a la fatiga-temperatura de tratamiento (Figuras 6 y 11). Esto suministra más evidencia de la relación entre los esfuerzos residuales en el cromo duro y el porcentaje de pérdida de resistencia a la fatiga.

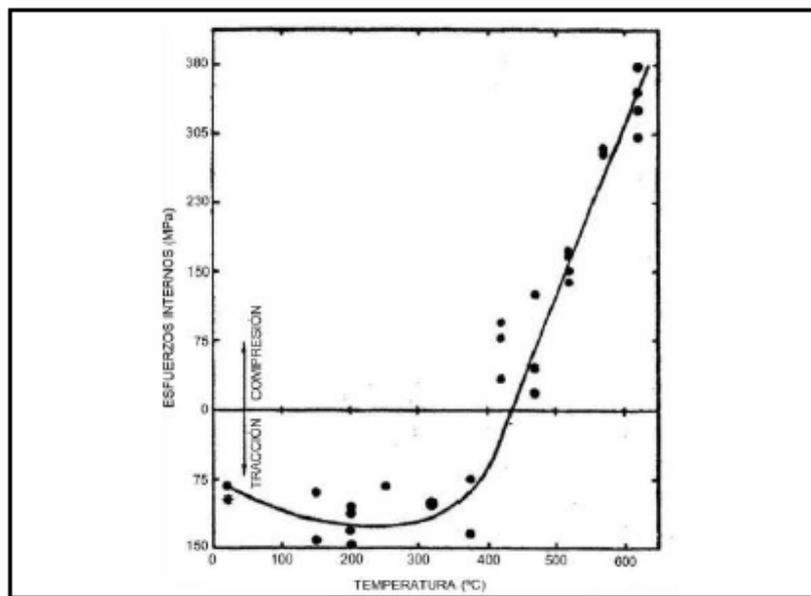


FIGURA 12. Efecto del tratamiento térmico sobre los esfuerzos residuales de tracción en un depósito de cromo de 25 μm de espesor ^[1].

Destaca que al incrementarse la temperatura de tratamiento térmico, después del enfriamiento, los esfuerzos residuales del cromo se convierten en esfuerzos de tracción, llegando a valores máximos de 200 y 300⁰C, a temperaturas más haya de 400⁰C los esfuerzos residuales de tracción disminuyen gradualmente a menores esfuerzos de tracción hasta convertirse en esfuerzos significativamente compresivos a altas temperaturas (Ver figura 11). Esta investigación llevada a cabo por Hammond y Williams^[1] destacan los siguientes principios: I) el aumento de los esfuerzos residuales de tracción

después del tratamiento térmico a bajas temperaturas se debe a la contracción permanente que sufre el cromo durante el calentamiento, II) que el desarrollo de los esfuerzos residuales compresivos después del tratamiento térmico a altas temperaturas ocurre a partir del alivio de tensiones a esas temperaturas, seguido del diferencial de contracción entre el acero y el cromo en el enfriamiento (el coeficiente de expansión del cromo es aproximadamente la mitad de el acero). También se sugiere que los esfuerzos compresivos del cromo, producidos por el tratamiento térmico a altas temperaturas, son los responsables de la recuperación de las propiedades de fatiga del material.

A partir de estos resultados, se puede específicamente señalar, que cuando se necesiten partes recubiertas con cromo a una máxima resistencia a la fatiga, como requisito fundamental, se debe evitar realizar tratamientos térmicos a bajas temperaturas (150→300⁰C), por lo que es recomendable hacer el tratamiento a temperaturas por encima de los 440⁰C aproximadamente 1 hora, tomando en cuenta que: I) la temperatura del tratamiento no debe excederse la temperatura de revenido del acero, II) el cromo se ablanda progresivamente al incrementarse la temperatura.

1.9.- ANTECEDENTES DE ESTUDIOS-ANÁLISIS REALIZADOS EN EL ÁREA

1.9.1.- Y. Wu et al.^[5] (1995).

Realiza un estudio del efecto del electroless de níquel de un acero “30CrMoA”, donde, en uno de sus análisis indica que se produce un decremento de 39% en el límite de fatiga del material recubierto comparado con el no recubierto. La baja resistencia a la fatiga del recubrimiento de Ni-P causa el decrecimiento del

límite de fatiga del acero recubierto, ya que la grieta si inicia primero en el recubrimiento y luego se extiende hacia el sustrato.

1.9.2.- Campillo et al.^[6] (1996).

Realizó una investigación donde determinó el comportamiento a la corrosión de la aleación electrolítica Ni-Co-B depositado sobre un acero de bajo carbono (AISI 1045). Las soluciones empleadas son: HCL 0.1 M; H₂SO₄ 0.1 M y KOH al 28%. Estos experimentos los realizó a temperatura ambiente. Los resultados arrojaron que la solución de ácido sulfúrico produce el daño más considerable en el recubrimiento cuando se le compara con las dos otras soluciones. En cambio los valores de corrosión registrados fueron muy bajos, indicando que la aleación Ni-Co-B asegura una buena resistencia a la corrosión. Esta conducta puede ser a la creación de una o varias capas de pasivación en el recubrimiento.

1.9.3.- E. S. Puchi et al.^[7] (1996).

En su estudio de la influencia del Electroless de níquel (EN) sobre el comportamiento a la fatiga de los aceros al carbono (AISI 1010 y AISI 1045) determinó que: I) para ambos aceros, el recubrimientos en ellos origina un incremento en la vida a la fatiga, lo cual se hizo más evidente si ha sido post-tratado térmicamente; II) Observó que el incremento a la vida a la fatiga es mucho más notable en el acero 1010 que en el 1045. Por lo que, la bonificación en la vida a la fatiga es mucho más trascendente en la medida en que la resistencia mecánica del acero decrece.

1.9.4.- Y. Z. Yang et al.^[8] (1996)

En su investigación en base a las propiedades de fatiga de los depósitos de Electroless de níquel sobre aceros, señaló que una vez que el recubrimiento es fracturado, la inmensa concentración de esfuerzos en la punta de la grieta provocará el daño en el substrato. Esto es compatible y profundiza lo expresado por Y. Wu et al.^[5]. En su recomendación señala que se debe mejorar el método de deposición y control de la composición del recubrimiento, además que, empleando un tratamiento térmico adecuado se puede mejorar la unión en la interfase, las propiedades físicas y los esfuerzos residuales de los recubrimientos.

1.9.5.- J. Chitty et al.^[13].

En su experimento en base a la influencia del electroless níquel sobre las propiedades de corrosión-fatiga de un acero AISI 1045 señala que: el depósito de 20 μm de espesor más el contenido de 10% de fósforo en el recubrimiento originan un aumento de las propiedades de corrosión-fatiga del material. Esto demuestra el acontecimiento, señalados frecuentemente por varios estudiosos de la materia^[7 - 8], quienes expresan que, para inclusiones de fósforo en torno al 10% en el recubrimiento de EN se producen esfuerzos compresivos en el mismo, dando lugar a mejoras en la resistencia a la fatiga del material recubierto bajo tales condiciones.

1.9.6.- J. A. Berríos et al.^[16]. (1998).

Llevo a cabo un estudio sobre las consecuencias del espesor de un depósito de EN sobre las propiedades mecánicas de un acero (AISI 1045). Este experimento dio como resultado que en los depósitos de aproximadamente 7 μm de espesor, después de un post-tratamiento térmico a 200°C por 1 hora, el material observa un comportamiento similar al sustrato no recubierto, lo cual es atribuido a un alto contenido de fósforo ($> 10\%$), a partir del cual se originan esfuerzos residuales de compresión y con ello una mejoría a la resistencia a la fatiga del material recubierto. Sin embargo, a medida que el contenido de fósforo en el depósito disminuye, los esfuerzos residuales predominantes en el recubrimiento son los de tracción, lo cual produce una disminución en la resistencia a la fatiga del material compuesto.

1.9.7.- A. Pertuz et al.^[17]. (2000).

En este experimento tomaron como muestras acero SAE 4140 templado y revenido, y llegaron a la conclusión, que recubriendo el material con un depósito de electroless de níquel se produce una representativa reducción a la fatiga del material. Esa reducción, para el caso de solo deposición, puede llegar hasta un 68% para una amplitud de esfuerzo de 580 MPa, mientras que para una amplitud menor (478 MPa) la reducción es más representativa (88%). En la prueba se usaron probetas entalladas y no entalladas, con un concentrador de esfuerzos de 0,5 mm de longitud, con y sin recubrimiento. Las pruebas realizadas sobre probetas entalladas sin recubrimiento revelaron que la presencia del concentrador de esfuerzos da lugar a una reducción en la vida a la

fatiga que varía entre 69 y 94%, dependiendo de los esfuerzos alternantes aplicados. Este decrecimiento en las propiedades de fatiga es comparable al reportado para las muestras recubiertas sin entallas, lo cual sugiere que el depósito de EN actúa como una superficie originaria de grietas de fatiga, causando un significativo decrecimiento en las propiedades de fatiga del substrato. Por el contrario, si las muestras a parte de ser entalladas son recubiertas, se incrementa, substancialmente la reducción a la vida a la fatiga más haya de un 78% a grandes esfuerzos, mientras que a bajos esfuerzos la pérdida es similar a la de las probetas entalladas y no recubiertas. En este experimento determinaron que el crecimiento a la vida a la fatiga de las muestras recubiertas sin entalla se origina como consecuencia del paso de las grietas desde el recubrimiento hacia el substrato. Así mismo demostraron haber hallado evidencia fractográfica de grietas secundarias a lo largo de la intercara, señalando un pobre adherencia del recubrimiento al substrato, por lo que la intercara no es capaz de soportar los esfuerzos aplicados.

1.9.8.- Mariño y Ortiz^[18]. (2001).

Analizaron el comportamiento a la fatiga y corrosión-fatiga de un acero SAE 4140 recubierto con un depósito de cromo duro. Los experimentos fueron realizados en condiciones de flexión rotativa. Efectuaron ensayos de fatiga, tanto para el material base, material recubierto, así como ensayos de corrosión-fatiga para el material base y para el material recubierto empleando una solución salina con 3% NaCl. Los esfuerzos a los cuales se hicieron los ensayos representaron una fracción del esfuerzo de fluencia del material base como del material recubierto.

Los resultados de fatiga al aire del material recubierto arrojaron una disminución de resistencia a la fatiga entre 80 y 88% respecto del material base sin recubrimiento. Así mismo, el límite de fatiga del material recubierto, disminuyó un 21%, pasando de 518 MPa para el material base, a 407 MPa para el material recubierto. Con respecto a la condición de corrosión-fatiga del material base, se produjo una disminución que oscila entre 81 y 92% respecto al material base ensayado al aire. En cuanto a corrosión-fatiga del material recubierto encontraron una disminución de hasta 90% respecto al material ensayado al aire.

El estudio fractográfico realizado en estos ensayos reveló una buena adherencia del recubrimiento y la formación de múltiples inicios de grietas de fatiga, lo cual es un indicio que aparentemente el recubrimiento actuó como un concentrador de esfuerzos en el contorno de toda la probeta, lo cual probablemente incida en la disminución de la resistencia a la fatiga.

1.9.9.- Campillo et al. ^[19]. (2002).

Llevaron a cabo un estudio donde analizaron la aleación Ni-Co-B y su posible empleo como recubrimiento tenaz a la corrosión en la electrolisis por agua. Como material base usaron un acero inoxidable del tipo 304, cuyo análisis químico arrojó los siguientes resultados:

I.-	Ni (% en peso)	Co (% en peso)	B (% en peso)
	71,28	26,26	1,96

II).- Microestructura: La interfase depósito-matriz exhibe un recubrimiento uniforme mostrando aparentemente una excelente adherencia.

III).- Dureza: La dureza promedio fue de 750-950 HVN (10 gr.)

IV).- Conductividad térmica: 0,7394 Cal/cmS⁰C.

V).- Conductividad eléctrica: 6,89*10⁻⁷ Mohs/m.

VI).- Resistencia eléctrica: 4,428*10³ Ω.

El análisis de la aleación Ni-Co-B reveló, que por su resistencia a la corrosión y su excelente eficacia electro catalítica, además de bajo costo, reúne las condiciones para sustituir con mucha utilidad a electro catalizadores como la plata y el platino, los cuales tienen elevados costos económicos.

1.9.10.- Moreno y Cabeza.^[20] (2004).

Evaluaron el comportamiento a la fatiga y fatiga-corrosión de un acero 4340 templado y revenido sin y con recubrimiento de BALINIT B (TiCN) depositado mediante la técnica de PAPVA.

En los resultados de los ensayos de tracción encontraron que para el material recubierto ocurrió un aumento de las propiedades mecánicas de alrededor del 10% en el esfuerzo de fluencia y una disminución del 12% en la resistencia a la tracción en comparación con el material sin recubrir.

En los ensayos de fatiga encontraron un aumento en la resistencia a la fatiga del acero recubierto en comparación con el acero sin recubrir, con un incremento de 135-175% para esfuerzos entre 696 MPa y 539 MPa. Por otra parte para la vida a la fatiga observaron un incremento del orden del 6%. En los

ensayos de fatiga-corrosión prácticamente la resistencia a la fatiga no tuvo mayor modificación observándose un incremento de vida a la fatiga de 25% cuando la variación de esfuerzo se mantuvo entre los 696-539 MPa.

El análisis fractográfico realizado mostró múltiples inicios de grietas y que las mismas se originaron en la superficie del recubrimiento.

1.9.11.- Pimentel P. ^[21] (2005).

Analizó el comportamiento a la fatiga y corrosión fatiga de un acero SAE 4140 recubierto con una aleación de Ni-Co-B.

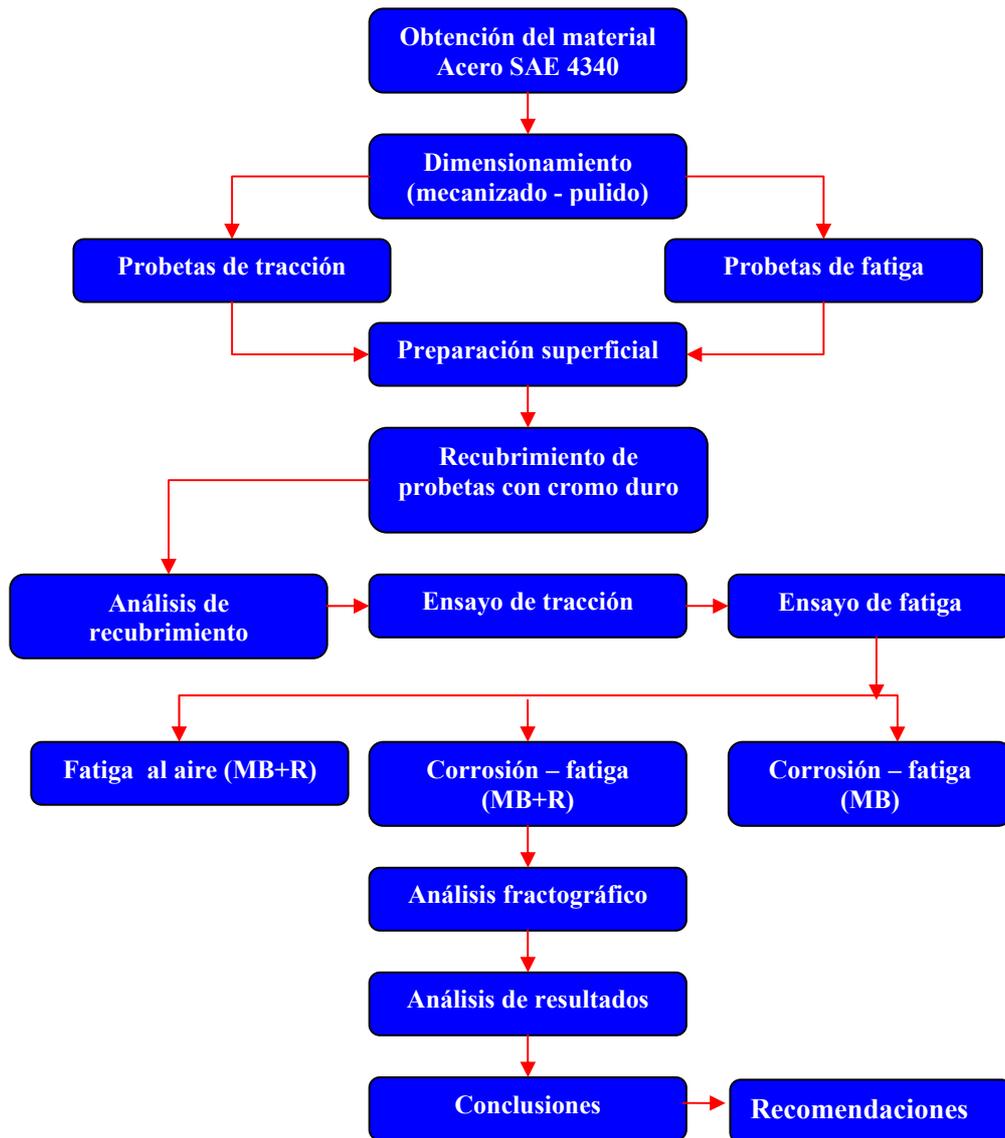
- Los ensayos fueron realizados en condiciones de flexión rotativa. Efectuó experimentos de fatiga al aire tanto para el material base como para el material recubierto, así mismo para corrosión-fatiga del material base y material recubierto empleando una solución de NaCl al 3%. Los esfuerzos a los cuales se hicieron los ensayos representaron una fracción del esfuerzo de fluencia tanto para el material base como del material recubierto. Los resultados de fatiga al aire del material recubierto presentaron una disminución de resistencia a la fatiga entre 7% y 61% respecto al material sin recubrimiento.
- El límite de fatiga del material recubierto disminuyó un 33%, pasando de 573 MPa para el material base, a 380 MPa para el material recubierto.
- Para la condición de corrosión-fatiga del material recubierto, observó que, para altos esfuerzos, este disminuye la resistencia a la fatiga en un 19% con respecto al material base en la misma condición de corrosión-fatiga.

- Para el caso de bajos esfuerzos el material recubierto eleva la resistencia a la fatiga en un 26% con respecto al material base en igual condición de corrosión-fatiga.
- Comparando los resultados de corrosión-fatiga del material recubierto con respecto al material recubierto ensayado al aire observó qué:
 - I) Para altos esfuerzos (764 MPa.) el material recubierto disminuye su resistencia su resistencia a la fatiga en el orden del 29%.
 - II) Para bajos esfuerzos (650 MPa.) la disminución en cambio es de 17%.
- El estudio fractográfico reveló que el recubrimiento significativamente no permite la formación de múltiples inicios de crecimientos de grietas, protegiendo al material sustrato de la solución salina.

CAPITULO II

2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1.- FLUJOGRAMA METODOLÓGICO DE TRABAJO



2.2.- Obtención del material base -Acero SAE-4340

El metal base, acero 4340 fue suministrado por la empresa SUMINDU, S.A. (aceros especiales inoxidables), cuya oficina principal esta ubicada en Caracas, esquina puente Yánez, edificio Beco piso 3, y su planta en la zona industrial de Carabobo, 9na. Transversal, edificio Sumindu, Valencia, Edo. Carabobo. El material fue recibido en forma de barras de 15,88 mm de diámetro y 6m de longitud cada una. La empresa proveedora posee el certificado ISO-9002, en ella especifican las propiedades mecánicas y su respectiva composición química.

Este acero SAE 4340, es de especial resistencia a la tracción y torsión. Muy buena resistencia al desgaste y al impacto. Se suministra en estado bonificado, lo que permite en la mayoría de los casos su aplicación sin necesidad de tratamiento térmico adicional. Utilizable a temperaturas de hasta 500°C. Sin perder su bonificación.

Su campo de aplicación, de este acero especial al cromo-níquel-molibdeno, en el sector industrial y petrolero, es único, para partes de maquinarias y repuestos sometidos a muy altos esfuerzos dinámicos; cigüeñales, ejes de levas, árboles de transmisión, barras de torsión, ejes cardan, ejes de bombas, ejes para hélices de aviones, pernos y tuercas de alta tensión, rodillos de transportadoras, vástagos y pines , muñones, brazos de dirección, engranajes, discos de embrague, piezas de chasis, acoples, ejes de piñones, ruedas dentadas, moldes para inyección de plásticos.

TABLA 9.- Composición química del acero SAE-4340 suministrada por el fabricante

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu
% en peso	0,39	0,22	0,65	0,014	0,007	0,76	1,71	0,24	0,016	0,19

TABLA 10.- Propiedades mecánicas del acero SAE-4340 suministrada por el fabricante

Resistencia a la tracción (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Elongación (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)
1033	913	16	58	337

2.3.- Preparación de las probetas de fatiga y tracción

Adoptando como normas ASTM A370^[9] y ASTM E739^[10], se prepararon 126 probetas de fatiga y 6 de tracción. Se hizo una distribución adecuada de las mismas con sus especificaciones y precisión de acuerdo a las normas antes señaladas.

TABLA 11. Distribución de probetas

Ensayos	Nº de probetas
Tracción	6
Fatiga al aire del material base (MB)	24
Fatiga al aire (MB+R) * *	24
Fatiga-corrosión (MB) *	24
Fatiga-corrosión (MB+R) * *	24
Fatiga al aire (Límite) (MB+R) * *	15
Material base (Límite)	15

(MB)* = Material Base.

(MB+R)* * = Material Base + Recubrimiento.

Las probetas de tracción y fatiga fueron cortadas a partir de las barras de acero adquiridas y posteriormente maquinadas en el taller de precisión J.V. c.a, ubicada en la Zona Industrial de Turumo Local 2B-Edo. Miranda, en el cual se

le dio el dimensionado con las especificaciones aplicada a las normas a fin de realizar los ensayos en las máquinas seleccionadas.

En las figuras 13 y 14 se muestran las probetas con sus dimensiones ajustadas a las normas antes señaladas.

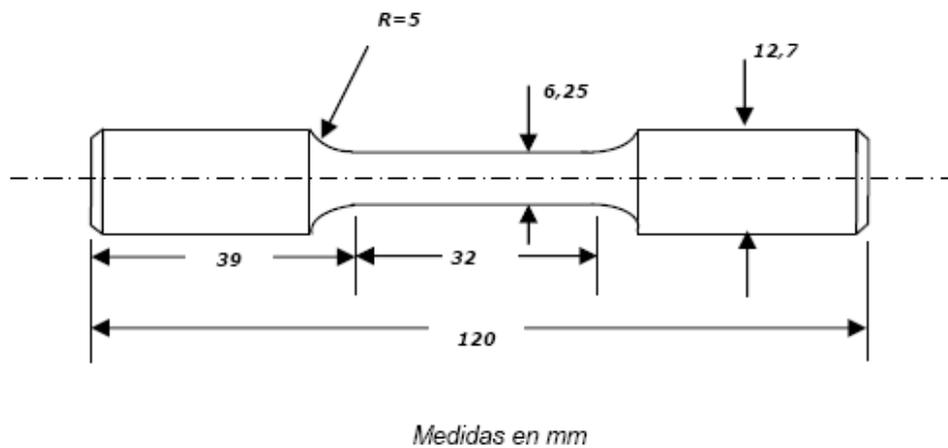


FIGURA 13.- Geometría de la probeta de tracción.

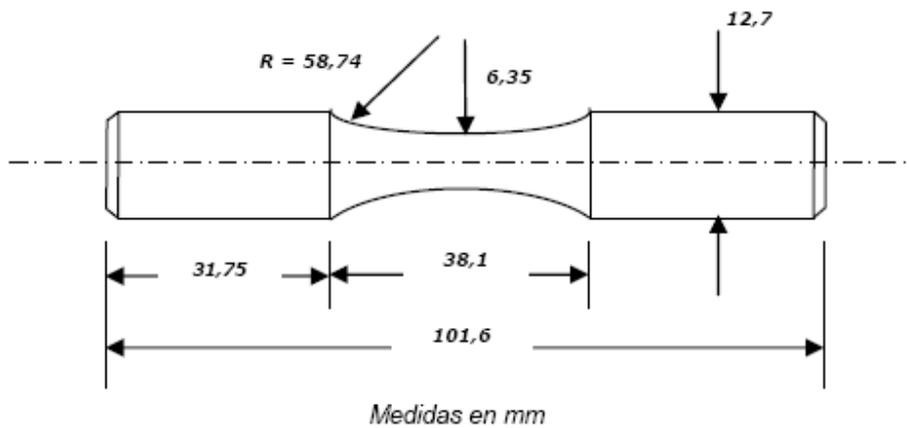


FIGURA 14.- Geometría de la probeta de fatiga.

2.4.- Pulido de las probetas

Una vez dimensionadas las probetas de fatiga y tracción se procedió a lijar cada una de ellas en un torno MYFORD modelo ML7-R, ubicado en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la U.C.V. El lijado se hizo con papel abrasivo esmeril de SiC en series de números 320-400-500-600-1200-2000, en seco y en dirección axial al eje de la probeta. Algunas de ellas hubo que pasarles lija 200 (muy abrasivas), por tener rayas un poco profundas. Con este lijado se busco eliminar en su totalidad las entallas circunferenciales generadas durante el maquinado, las cuales pudieran ser fuentes de inicio de grietas durante los ensayos de fatiga.



FIGURA 15. Torno MYFORD modelo ML7-R.

2.5.- Recubrimiento

Una vez culminado el proceso de pulido de cada probeta de fatiga y tracción, las mismas fueron cuidadosamente embaladas y enviadas a STEEL PLAST 2000, c.a, cuya planta se encuentra ubicada en la carretera Petare Santa Lucia,

Km 1, Villa García, galpón 1, Filas de Mariche, donde se les hizo un recubrimiento de cromado en duro con un espesor de 50 μm de acuerdo a las especificaciones de la empresa, necesarias para hacer los ensayos de tracción, fatiga y corrosión-fatiga. La deposición se basa en el tiempo, generalmente de 2 horas por décima de cromo, el espesor depende del uso que se le vaya a dar a la pieza.

2.6.- ENSAYOS DE TRACCIÓN

Los ensayos de tracción se efectuaron en una máquina de ensayos universal marca INSTRON modelo 8502, la cual tiene una fuerza máxima de 25 toneladas y un desplazamiento máximo de 10 cm. En total se ensayaron 3 probetas, los cuales fueron controlados por medio de un programa de computación para ensayos mecánicos a una velocidad de cabezal de 3mm/min. Estos ensayos de tracción se realizaron en base a las normas ASTM A370^[9]. Previo al ensayo, a las probetas se les hicieron las mediciones del diámetro con un vernier digital.

Los valores obtenidos para cada uno de los ensayos corresponden al alargamiento de la probeta (Δl_i) (sin corrección por deformación elástica de los componentes de la máquina) y a la carga aplicada (F_i). Estos datos fueron almacenados en la misma computadora que controla el ensayo. Se hicieron las mediciones del diámetro final de las probetas para calcular el área inicial y final de su sección transversal.



Figura 16.- Máquina INSTRON para ensayo tracción.

2.6.1.- Corrección por deformación elástica

Tal como se expresó anteriormente, el programa computarizado actúa sin la debida corrección por deformación elástica de los componentes de la máquina involucrados en el sistema de carga, por ello es preciso hacer una corrección del alargamiento de la probeta, cuya fórmula viene dada por:

$$(\Delta l_i)_{\text{corr}} = \Delta l_i - F_i * \left[\frac{K_{\text{teo}} - K_{\text{exp}}}{K_{\text{teo}} * K_{\text{exp}}} \right]$$

donde:

$(\Delta l_i)_{\text{corr}}$ = Elongación corregida de la probeta

Δl_i = Elongación sin corrección de la probeta

F_i = Fuerza con que se carga la máquina

K_{teo} = Rigidez teórica de la probeta

K_{exp} = Rigidez experimental del conjunto

Además, se tiene que :

$$K_{teo} = \frac{A_0 * E}{l_0} \quad ; \quad K_{exp} = \frac{\sum F_i}{\sum \Delta l_i}$$

donde:

A_0 = Área inicial de la sección transversal del ensayo ($A_0 = \frac{\pi * D^2}{4}$)

E = Módulo de elasticidad del acero

l_0 = Longitud inicial de la sección de ensayo

2.6.2.- Obtención de la curva Esfuerzo-Deformación Real

De acuerdo a los valores obtenidos de $(\Delta l_i)_{corr}$, para cada estado de carga correspondiente (F_i), se originó la construcción de la curva esfuerzo deformación real (σ vs. ϵ) a partir de la curva esfuerzo-deformación ingenieríl (S vs. e).

donde:

$$S_i = \frac{F_i}{A_0} \quad \text{Esfuerzo ingenieríl}$$

$$e_i = \frac{(\Delta l_i)_{\text{corr}}}{l_0} \quad \text{Deformación ingenieril}$$

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

$$\varepsilon_i = \text{Ln} (1 + e_i) \quad \text{Deformación real}$$

En base a estos resultados se obtuvo los valores de:

- Esfuerzo de fluencia (σ_i) a 0,02 % de la deformación total.
- Resistencia a la tracción (S_u).
- Resistencia a la fractura (S_f).
- Esfuerzo real a carga máxima (σ_u).
- Esfuerzo real a la fractura (σ_f).

Con los valores obtenidos se calculó un promedio y su desviación estándar, tanto para el material base como para el recubierto, que se utilizó para analizar la influencia sobre las propiedades mecánicas estáticas del material base.

2.7.- ENSAYO DE FATIGA Y CORROSIÓN-FATIGA

2.7.1.- Equipo y procedimiento de ensayos

Los ensayos de fatiga y corrosión fatiga se realizaron en una máquina de flexión rotativa marca Fatigue Dynamics Inc., modelo RBF – 200, la cual tiene una potencia de ½ HP. La máquina está diseñada para aplicar cargas

invertidas en voladizo sobre probetas cilíndricas con una longitud entre 80 a 90 mm.

Esta máquina viene constituida por las siguientes partes:

- Un regulador de velocidad, que puede variar de 500 a 10.000 r.p.m.
- Un contador de ciclos, que puede registrar desde 100 hasta 9.999.990.
- Una barra calibrada, con un contrapeso que permite aplicar el momento flector desde 0 hasta 200 lbf* pulg. (Kg-cm).
- Un interruptor de apagado automático.
- Mordazas de diámetros $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ pulg. (1 pulg. = 25,4 mm)

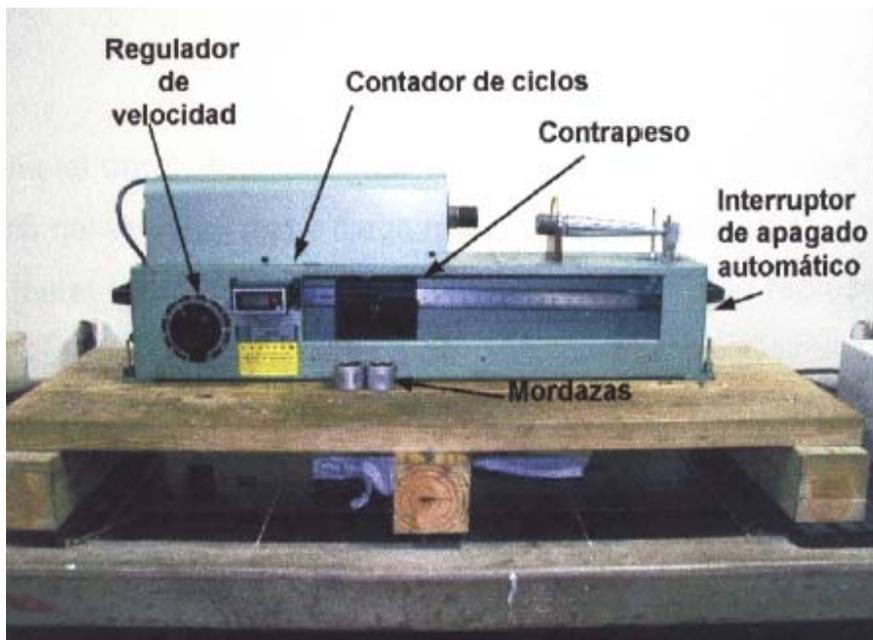


Figura 17.- Máquina para ensayo de fatiga RBF 200 en flexión rotativa

Al momento de montar una probeta en la máquina, sus extremos se ajustan mediante mordazas, unidas al eje del motor y a un eje cónico, el cual va

acoplado a una barra graduada en función del momento flector (M), siendo producido por la carga aplicada. Es imprescindible conocer el momento flector para cada nivel de esfuerzo. Para ello, se utiliza la ecuación que relaciona el momento flector con el esfuerzo aplicado, siendo esta:

$$S = \frac{M * C}{I} \Rightarrow M = \frac{S * I}{C}$$

donde :

M = Momento flector

S = Esfuerzo aplicado

I = Momento polar de inercia

C = Distancia desde el eje neutro de carga hasta la superficie de la probeta

C = D/2, D = Diámetro de la probeta

Para una barra de sección circular, se tiene que:

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

sustituyendo el valor de I en M, resulta :

$$M = \frac{S * \left(\pi * D_0^4 / 64 \right)}{D / 2} = \frac{S * \pi * D^3}{32}$$

$$M = 0,0982 * S * D^3 [\text{Lbf} * \text{pulg.}] \quad (\text{Ecuación del momento de la máquina})$$

Debido a que las unidades vienen expresadas en MPa., para el esfuerzo S y en mm. para el diámetro D, donde la barra que aplica el momento está calibrada en libras y pulgadas, entonces es necesario expresar el esfuerzo en Lbf/pulg² y el diámetro en pulgadas, de tal manera que se obtenga el momento flector en las mismas unidades en que esta calibrada la barra de momento de la máquina de fatiga.

- 1 Pascal = 1 N/m² = 0,000145 Lbf/pulg²
- 1 MPa = 145 Lbf/pulg²
- 1 mm = 0,0394 pulg

Una vez realizadas las operaciones correspondientes, resulta que :

$$M = 0,00087 * S * D^3 [\text{Lbf} * \text{pulg}]$$

Donde S[MPa] y D[mm].

Una vez determinado el valor de M, se procede a montar la probeta en la máquina y efectuar el ensayo de fatiga, procurando, con sumo cuidado, evitar cualquier movimiento brusco, sobre todo la vibración durante el ensayo, que puedan afectar los resultados.

2.7.2.- Ensayo de fatiga-corrosión

El procedimiento a realizar para los ensayos de corrosión-fatiga es casi igual al ya mencionado, la diferencia radica que, en este caso se le adapta a la probeta

una cámara de corrosión conectada a una bomba de circulación que posee la máquina, la cual se ajusta alrededor de la sección de ensayo de la probeta. La bomba mantiene un suministro permanente de la solución corrosiva (NaCL-al 3%) conducida a través de mangueras a la cámara de corrosión, las mismas poseen una válvula que permite controlar el flujo de la solución, que constantemente gotea en la sección de menor diámetro.



FIGURA 18.- Cámara de corrosión

2.7.3.- Determinación de los parámetros de la ecuación de Basquin.

Mediante el modelo de Basquin, se obtuvieron 4 ecuaciones de vida a fatiga para cada una de las condiciones de ensayos realizados:

1. Fatiga al aire del material base.
2. Fatiga al aire del material recubierto.
3. Fatiga-corrosión del material base.
4. Fatiga-corrosión del material recubierto.

Para condición del material se ensayaron 24 probetas, distribuidas en 4 niveles de esfuerzo, es decir, 6 probetas por cada nivel.

Para los ensayos del material base, material recubierto y fatiga corrosión, del material base y material recubierto, los porcentajes fueron los siguientes: 68, 72, 76 y 80 % del esfuerzo de fluencia del material base ($\sigma_y = 785$ MPa)

Para calcular los parámetros S_f y b de la ecuación de Basquin para cada curva de la respectiva posición, se hallaron a partir de la siguiente ecuación:

$$S = S_f (2 * N_f)^b \quad \longrightarrow \quad (\text{Ec. De Basquin})$$

donde :

S = Esfuerzo de resistencia a la fatiga

S_f = Coeficiente de resistencia a la fatiga

N_f = N° de ciclos a falla

$2N_f$ = N° de reversos a falla

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

Esta ecuación de Basquin se obtuvo aplicando el método de regresión lineal a partir de los valores obtenidos en cada ensayo. Cada curva de Basquin se construyó a partir de los cuatro niveles de esfuerzos aplicados a cada condición, con su respectivo N° de ciclos a falla, cuyo número corresponde al promedio de ciclos a falla de las 6 probetas ensayadas para cada esfuerzo. Estos datos se llevan a una gráfica $\text{Log}(S)$ vs. $\text{Log}(2N_f)$, obteniendo cuatro puntos a los que se les aplica una regresión lineal para obtener la ecuación de una recta, donde el corte con las ordenadas es el parámetro S_f y la pendiente es el parámetro b , igualmente se obtiene el coeficiente de correlación lineal para esta recta.

2.7.4.- Determinación del límite de fatiga por el método de la escalera

Se llevaron a cabo varios ensayos tanto al material base como al recubierto a fin de determinar el límite de fatiga para ambas condiciones. El método empleado para evaluar el límite de fatiga es el método de la escalera, que es un método estadístico. En cada caso se utilizaron 15 probetas. El proceso se inicia ensayando una primera probeta a un nivel de esfuerzo igual a un valor del límite de fatiga estimado, si la probeta falla, la siguiente probeta se ensaya a un nivel de esfuerzo menor (en esta caso 5MPa). Esta práctica se repite hasta que la probeta no falle, hasta alcanzar un valor de $5 * 10^6$ ciclos. Al llegar la probeta a este número de ciclos sin fallar, entonces se aumenta el nivel de esfuerzo un escalón la siguiente probeta a ensayar, esto se repite, aumentando el esfuerzo cuando la probeta no falle y disminuyéndolo cuando falle, hasta ensayar el total de probetas señaladas.

Una vez realizada toda esta practica, se procedió a calcular el límite de fatiga a través de la siguiente ecuación:

$$S = X_0 + d \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad \text{NOTA: El signo negativo se emplea cuando el análisis}$$

se basa en las probetas que fallan.

donde:

S = Límite de fatiga

X_0 = Primer nivel de esfuerzo

d = Escalón de esfuerzo

$A = \sum (i * n)$ (i = N° de nivel de esfuerzo; i = 0 donde exista falla y n = N° de probetas en las que ocurre el suceso menos frecuente)

$$N = \sum (n)$$

La desviación estándar se calculó empleando la siguiente ecuación:

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

donde:

D_s = desviación estándar

$$B = \sum (i^2 n)$$

Debido a que se hizo un análisis estadístico, se calculó la reproducibilidad de las ecuaciones de Basquin a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{Reproducibilidad} = \left[1 - \frac{N^\circ \text{ de niveles de } S}{N^\circ \text{ de probetas ensayadas}} \right] * 100$$

Las cuatro condiciones se ensayaron con el mismo número de esfuerzos (4) e igual número de probetas (24), esto produjo un resultado de un 83% de reproducibilidad para cada una de las ecuaciones de Basquin.

2.8.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO (Microscopía Electrónica de Barrido: MEB)

El estudio fractográfico es un método que se hace con la finalidad de determinar los mecanismos de falla involucrados en las probetas ensayadas a

fatiga y corrosión-fatiga. El estudio se hizo a través de la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB). Esta técnica permite analizar y determinar los mecanismos o causas de fatiga y corrosión involucradas en la falla, además de la nucleación y crecimiento de grietas; a parte del estudio realizado en la superficie de fractura de las probetas escogidas, así como en la sección longitudinal de las mismas.

Otros detalles muy importantes de destacar en este estudio, es observar si el recubrimiento actuó como un concentrador de esfuerzos en todo el sustrato, en especial por que, generalmente suelen ser inicios de grietas. También se determinó el espesor del recubrimiento.

Se seleccionaron un total de ocho probetas (8), tomando en cuenta las que fallaron al más bajo esfuerzo (534 MPa) y al más alto esfuerzo (628 MPa), distribuidas de la siguiente manera:

Fatiga al aire del material base	2 probetas.
Fatiga al aire del material recubierto	2 probetas.
Fatiga corrosión del material base	2 probetas.
Fatiga corrosión del material recubierto	2 probetas.

2.8.1.- Preparación de las muestras

Se prepararon tres tipos de muestras:

- 1) Muestras a las que se les hizo el estudio en la superficie de fractura.
- 2) Muestras cortadas longitudinalmente.
- 3) Muestra cortadas transversalmente.

Las primeras se cortaron a unas 6 mm desde la zona de fractura, las segundas se le hizo dos cortes, primero longitudinalmente a una profundidad de 8 mm, luego se cortaron transversalmente para obtener la muestra de 3 mm de espesor; y después ser embutidas y pulidas sobre la cara longitudinal.



FIGURA 19.- Pulidora Buehler Ecomet 5

Los cortes se realizaron en una cortadora de precisión marca Buehler, modelo Isomet 2000. Fig. 20.-Esta cortadora esta provista de un disco con filo de diamante.



FIGURA 20.- Cortadora de precisión Buehler Isomet 2000

2.8.2.- Limpieza de las muestras

El procedimiento para emplear la técnica de MEB demanda que las muestras a ser observadas estén lo más posible libres de impurezas, ello con el fin de evitar que se produzcan distorsiones en las imágenes que originen falsas interpretaciones. Para cumplir con estas demandas todas las muestras se limpiaron con acetona, por un lapso de quince minutos usando un equipo de limpieza ultrasónico marca Buehler, modelo Ultramet II, (fig. 21). Por último se limpiaron con alcohol, todo este proceso para eliminar grasa u óxido depositado en la superficie de fractura.



FIGURA 21.- Equipo limpiador ultrasónico Buehler Ecomet II

2.8.3.- Microscopía electrónica de barrido (MEB) – Observación de las muestras

El procedimiento de MEB se llevo a cabo en el Instituto Universitario de Tecnología (IUT), ubicado en San Antonio de lo Altos, carretera panamericana Km. 8. Se utilizó un microscopio marca PHILLIPS, modelo XL30, el cual tiene acoplado un espectroscópico de rayos x por dispersión en la energía (EDS). Se observaron las superficies de fractura estudiando en detalle posibles zonas de inicio de grieta(s), sin descartar los detalles más insignificantes de las superficies.

Se tomaron fotomicrografías en las cuales se pueden visualizar los detalles de las zonas mencionadas.

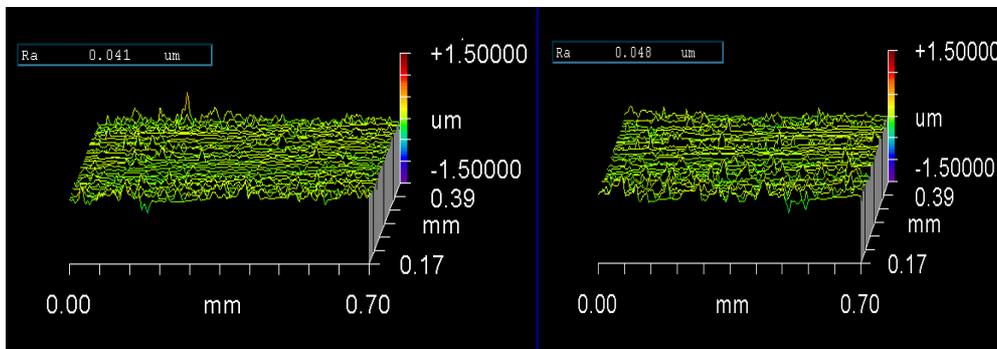
2.8.4.- Ensayo de dureza

Para medir la dureza del recubrimiento (cromo duro) se empleó un penetrador Vickers, el cual es un penetrador de diamante en forma de pirámide, de base

cuadrada, con un ángulo de 136° entre caras. La base de este método consiste en que con un material de dureza uniforme, todas las huellas para cualquier carga resultan semejantes, el área de la superficie es proporcional al cuadrado de la diagonal “d” de la huella y, para todas las cargas, los números de dureza son aproximadamente iguales.

2.8.5.- Ensayo de rugosidad

Para la ejecución de este ensayo se usó un interferómetro de luz marca ZIGO, modelo NEW VIEW 200, ubicado en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, U.C.V. Centro de Ciencia e Ingeniería de Nuevos Materiales y Corrosión (CENMACOR). La rugosidad se midió en probetas de fatiga con y sin recubrimiento.



CAPITULO III

3.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1.- ENSAYOS DE TRACCION.

Los resultados obtenidos durante los ensayos de tracción para el acero SAE 4340 ó material base y el material base recubierto con cromo duro son los siguientes:

Comenzaremos por presentar los resultados de los ensayos de tracción del material base y del recubierto. En las tablas 3-1 y 3-2 podemos observar los valores de esfuerzo real a carga máxima (σ_u), esfuerzo de fluencia (σ_y) y % de reducción de área del metal base; dichos valores se obtuvieron del análisis de las curvas de tracción mostradas en las Fig. 3.1 y 3.2 respectivamente.

Tabla 3.1. Resultados de los ensayos de tracción del material base (M.B.)

RESULTADOS DE ENSAYO DE TRACCIÓN Acero 4340 M.B.

Nº de Probeta	Esf. Fluencia (MPa)	σ_u (MPa)	% Reduc. Área
1	816	1268	30,8
2	792	1261	27,9
3	746	1297	29,4
Promedio	785	1275	29,4
Desv. Est	35,6	19,1	1,4

Tabla 3.2.- Resultados de los ensayos de tracción del material recubierto (M. R.), con cromo duro (Cr/Duro).

RESULTADOS DE ENSAYO DE TRACCIÓN Acero 4340 M.B. + REC

Nº de Probeta	Esf. Fluencia (MPa)	σ_u (MPa)	% Reduc. Área
1	777	1252	29,24
2	802	1245	30,07
3	786	1262	26,80
Promedio	788	1253	28,70
Desv. Est	12,7	8,5	1,70

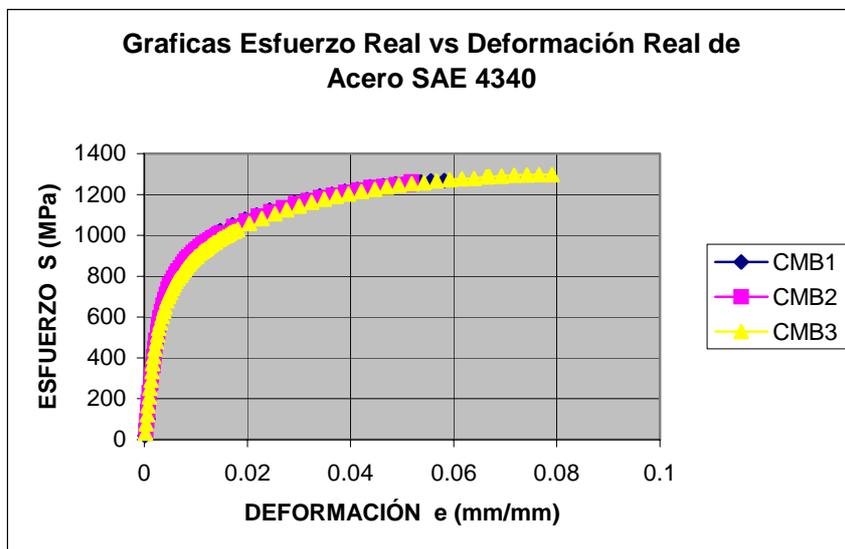


Fig.3-1. Gráfica de tracción del material base.

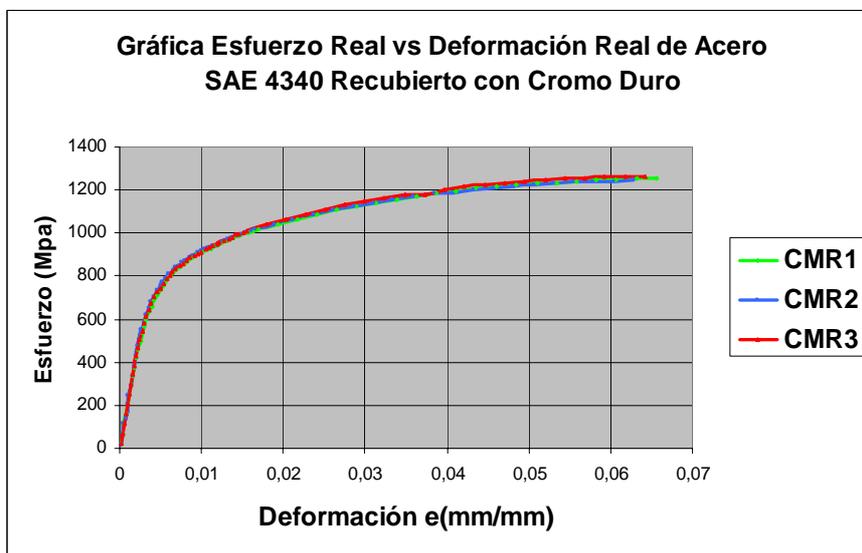


Fig. 3-2. Gráfica de tracción del material recubierto.

Analizando las graficas de las Figs. 3-1 y 3-2, se puede observar que el material base y el material recubierto tiene comportamientos similares; esto también se puede apreciar en los datos obtenidos en las tablas 3-1 y 3-2. Haciendo la respectiva comparación de los valores, encontramos que la diferencia de las propiedades estáticas de ambos materiales es mínima, no significativas; el esfuerzo real a carga máxima y la reducción de área son aproximadamente las mismas, mientras que el esfuerzo de fluencia tiene una disminución en el orden del 1% con respecto al material base. Podemos concluir que la aplicación del recubrimiento de cromo duro con un espesor aproximado de 24 μm , no afectó significativamente las propiedades mecánicas del material.

3.2.- ENSAYOS DE FATIGA.

Resultados de los ensayos de fatiga del acero SAE 4340 sin recubrimiento y con recubrimiento de cromo duro:

Tabla 3.3.- Resultados de los ensayos de fatiga al aire del acero SAE 4340 sin recubrimiento (M.B).

Esfuerzo (Mpa)	534	565	597	628
Ciclos a falla (N_f)	863.700	377.900	184.700	118.400
	960.400	521.700	187.400	199.400
	2.151.200	503.600	295.700	237.700
	1.076.900	370.900	266.700	238.100
	314.300	281.200	226.100	224.100
	676.500	319.000	192.000	204.900
Promedio	1.007.167	395.717	225.433	203.767
Desv. Est.	620.621	97.410	46.614	44.836

Tabla 3.4.- Resultados de los ensayos de fatiga al aire para la determinación del límite de fatiga del acero SAE 4340 sin recubrimiento (M.B).

Probeta	Esfuerzo (S en MPa)	N_f
1	510	1.253.300
2	500	1.934.400
3	495	5.000.000
4	500	1.409.900
5	495	5.170.700
6	500	3.960.800
7	495	5.070.100
8	500	5.000.000
9	505	5.017.900
10	510	1.242.400
11	505	5.000.000
12	510	2.847.200
13	505	5.000.000
14	510	5.028.400
15	515	5.032.900

Tabla 3.5.- Aplicación del método de la escalera para la determinación del límite de fatiga del acero SAE 4340 sin recubrimiento.

(Esfuerzo MPa.)	Nivel De Esfuerzo (i)	Nº De Probetas Rotas (n_i)	i x n_i	i² x n_i
515	4	0	0	0
510	3	3	9	27
505	2	0	0	0
500	1	3	3	3
495	0	1	0	0
		N = 7	A = 12	B = 30

$$S = S_0 + d * (A/N + \frac{1}{2})$$

$$S = 501 \quad DS = 11$$

$$S = 501 \pm 11$$

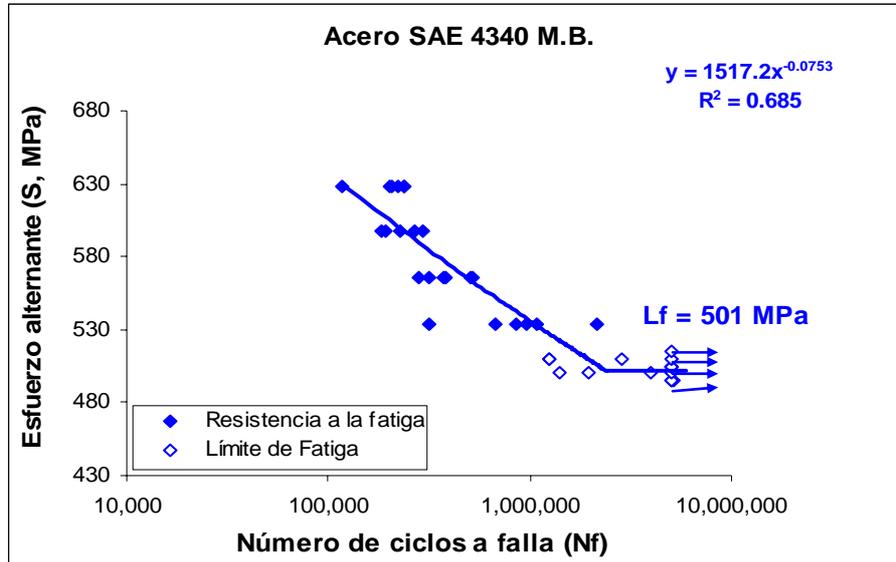


Fig. 3.3.- Curva de resistencia y límite de fatiga del acero SAE 4340 sin recubrimiento.

Tabla 3.6.- Obtención de la ecuación de Basquin para el acero SAE 4340 sin recubrimiento.

<i>Obtención de la ecuación de Basquin.</i>			
Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,0743	b =	-0,0743
Intersección (eje Y)	3,1750	Sf =	1.496,08
		Ecuación de Basquin	
R2 =	0,6847	$S = 1,496*(N_f)^{-0,0743}$	

Tabla 3.7.- resultados de los ensayos de fatiga al aire del acero SAE 4340 con recubrimiento.

Esfuerzo (MPa)	534	565	597	628
Ciclos a falla (N_f)	169.300	119.600	99.000	64.500
	104.900	104.000	69.900	60.500
	155.400	204.600	132.300	80.300
	155.100	67.600	115.100	35.100
	177.300	134.500	105.700	70.800
	139.900	126.000	105.500	63.900
Promedio	150316,6667	126.050	104.583,3333	62.516,66667
Desv. Est.	25723,01823	45.134,72056	20.567,00432	15.142,31378

Tabla 3.8.- Resultados de los ensayos de fatiga al aira para la determinación del límite de fatiga del acero SAE 4340 con recubrimiento.

Probeta	Esfuerzo (MPa)	N_f
1	490	437.200
2	485	1.003.800
3	480	699.800
4	475	5.000.000
5	480	382.100
6	475	399.500
7	470	5.000.000
8	475	5.000.000
9	480	331.400
10	475	432.700
11	470	665.800
12	465	656.700
13	460	5.000.000
14	465	484.300
15	460	5.000.000

Tabla 3.9.- Aplicación del método de la escalera para la determinación del límite de fatiga del acero SAE 4340 con recubrimiento.

(Esfuerzo MPa.)	Nivel De Esfuerzo (i)	Nº De Probetas No Rotas (n_i)	i x n_i	i² x n_i
------------------------	------------------------------	--	--------------------------	--------------------------------------

490	6	0	0	0
485	5	0	0	0
480	4	0	0	0
475	3	2	6	18
470	2	1	2	4
465	1	0	0	0
460	0	2	0	0
		N = 5	A = 8	B = 22

$$S = S_0 + d * (A/N + 1/2)$$

$$S = 471 \quad DS = 15$$

$$S = 471 \pm 15$$

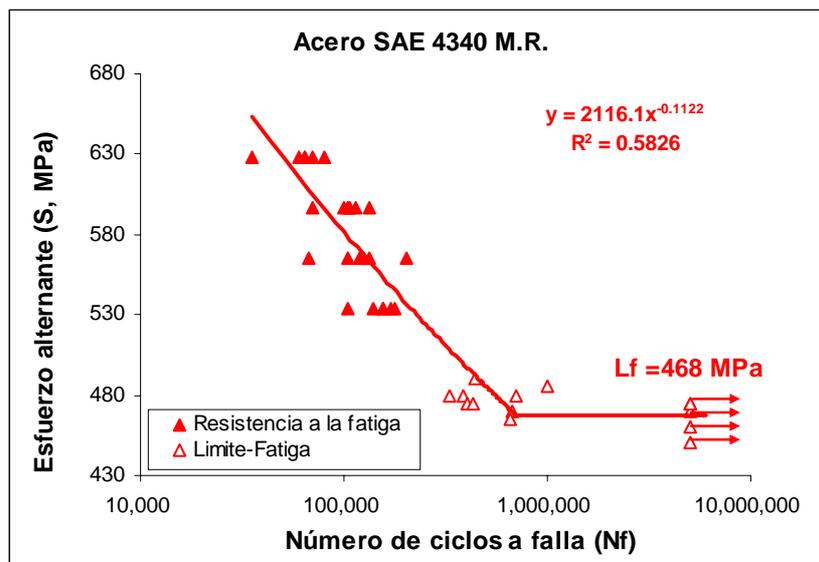


Fig. 3.4.- Curva de resistencia y límite de fatiga del acero SAE 4340 con recubrimiento de Cromo Duro.

Tabla 3.10.- Obtención de la ecuación de Basquin para el acero SAE 4340 con recubrimiento

Pendiente =	-0,112190038	b =	-0,112190038
Intersección (eje Y)	3,325535646	Sf =	2116,097365
		Ecuación de Basquin	
R2 =	0,582579531	S =	$2,116*(N_f)^{-0,1122}$

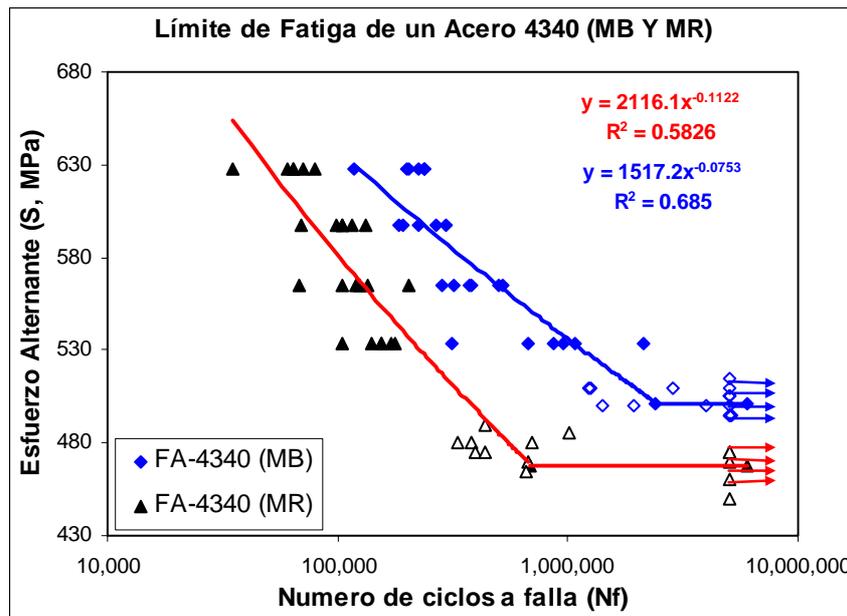


Fig 3.5.- Comparación entre el acero SAE 4340 recubierto (MR) y no recubierto (MB), ensayado en fatiga al aire.

En la Fig.3.5 se presenta la comparación del comportamiento a la fatiga del material recubierto con un depósito de cromo duro de un $23\mu\text{m}$ de espesor, con respecto al material base; en la misma se aprecia una disminución del límite de fatiga del primero con respecto al segundo, que está en el orden de un 7%.

Tabla 3.11.-Resultados de los ensayos de corrosión-fatiga del acero SAE 4340 Material Base.

Esfuerzo (MPa)	534	565	597	628
Ciclos a falla (N _f)	118.000	129.700	71.200	69.600
	111.000	121.900	76.600	71.900
	140.400	121.100	74.500	64.000
	146.500	127.200	84.000	71.800
		122.400	79.500	52.600
		137.400	81.900	76.300
Promedio	128.975	126.617	77.950	67.700
Desv. Est.	17.138	6.270	4.773	8.411

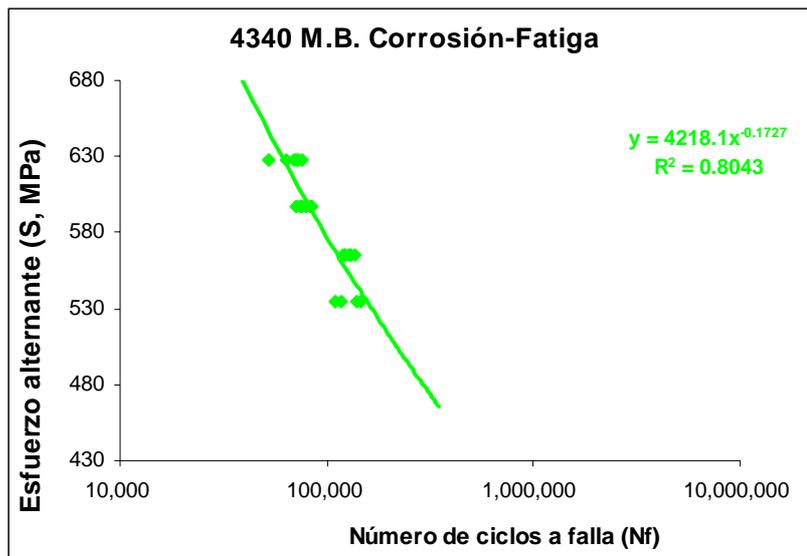


Fig. 3.6.- Curva fatiga-corrosión del acero SAE 4340 sin recubrimiento

Tabla 3.12.- Obtención de la ecuación de Basquin de corrosión-fatiga del acero SAE 4340 sin recubrimiento.

<i>Obtención de la ecuación de Basquin. M.B.</i>			
Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,1409	b =	-0,1409
Intersección (eje Y)	3,4715	Sf =	2.961,58
		Ecuación de Basquin	
R2 =	0,8485	S = 2,961*(N _f) ^{-0,1409}	

Tabla 3.13.- Resultados de los ensayos de corrosión-fatiga del acero SAE 4340 con recubrimiento.

Esfuerzo (MPa)	534	565	597	628
Ciclos a falla (N_f)	151.900	112.300	72.200	53.700
	144.800	108.300	81.000	64.500
	143.100	136.700	88.600	64.100
	112.300	111.300	92.000	56.600
	167.400	120.700	107.700	60.200
	144.400	206.200	82.800	62.400
Promedio	143.983	132.583	87.383	60.250
Desv. Est.	17.980	37.501	12.065	4.330

Tabla 3.14.- Obtención de la ecuación de Basquin de corrosión-fatiga del acero SAE 4340 con recubrimiento.

<i>Obtención de la ecuación de Basquin.</i>			
Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,1090	b =	-0,1090
Intersección (eje Y)	3,3138	Sf =	2.059,79
		Ecuación de Basquin	
R2 =	0,8000	S = 2,060*(N _f) ^{-0,1090}	

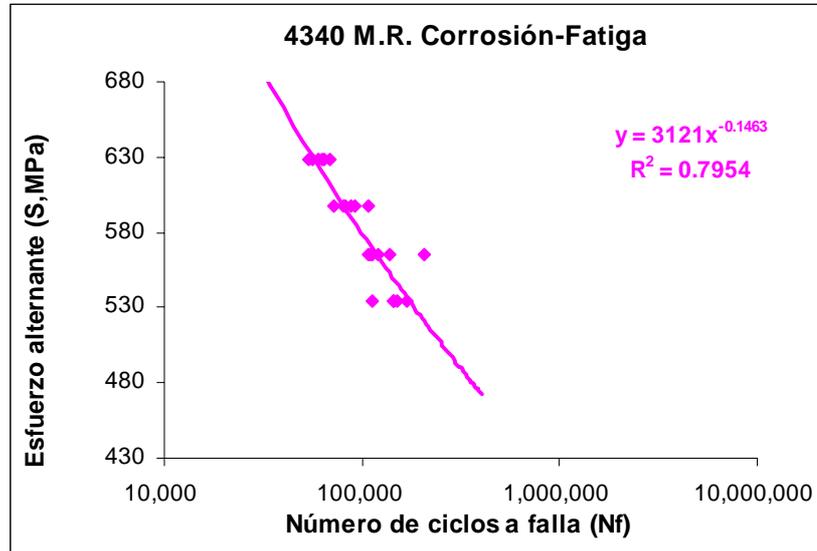


Fig. 3.7.- Curva fatiga-corrosión del acero SAE 4340 con recubrimiento.

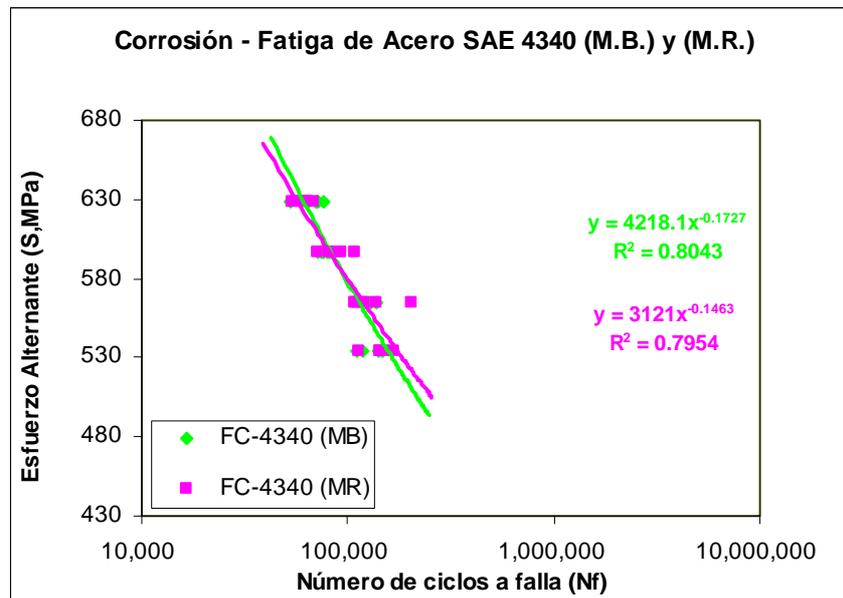


Fig. 3.8- Comparación entre el acero SAE 4340 recubierto (MR) y no recubierto (MB), ensayado a corrosión-fatiga.

En la grafica de la Fig. 3.8 podemos observar que el comportamiento del material recubierto con cromo duro es muy similar al del acero sin recubrir, lo que significa que, a diferencia de lo que ocurre en el caso del comportamiento a la fatiga al aire, la presencia del recubrimiento no empeora el comportamiento a la fatiga del metal base en condiciones corrosivas. Por lo tanto, para ambos materiales la falla por fatiga está determinada por la acción del fluido corrosivo.

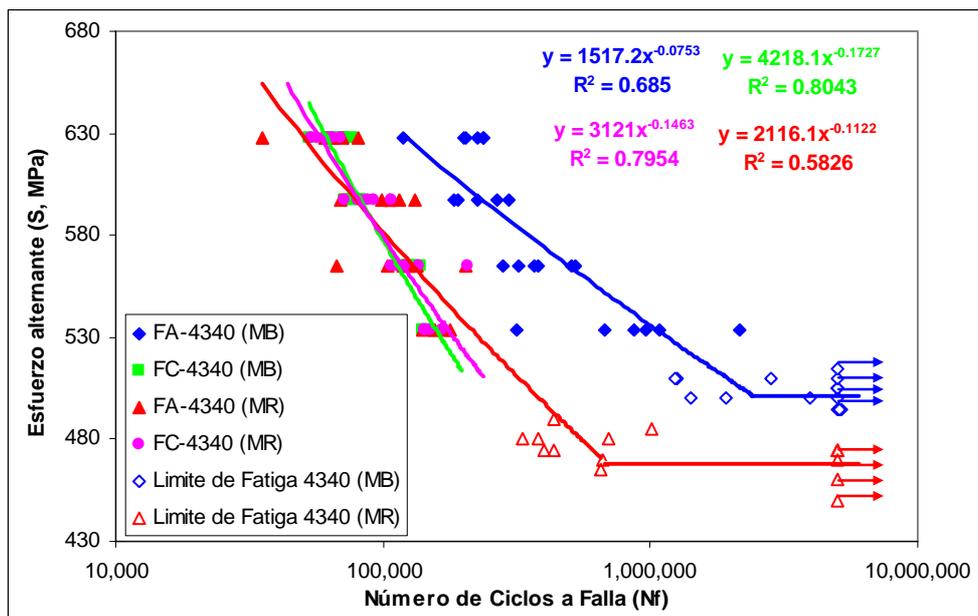


Fig. 3.9.- Curvas de resistencia a la fatiga, límite de fatiga y corrosión fatiga del acero SAE 4340, con y sin recubrimiento.

En resumen, los resultados indican que aunque las propiedades mecánicas estáticas del acero 4340 no son afectadas significativamente cuando el material es recubierto con un depósito de cromo duro, el comportamiento a la fatiga al aire si es modificado de manera significativa ya que el recubrimiento genera una disminución sustancial en la vida a fatiga, que pudiera variar desde 80% para el nivel de esfuerzo más bajo hasta 48% para el nivel de esfuerzo más elevado, tal como se ilustra en la Figura 3.10. Asimismo ocurre una disminución en el límite de fatiga del material recubierto, del orden del 6-7%, al ser comparado con las probetas sin recubrimiento.

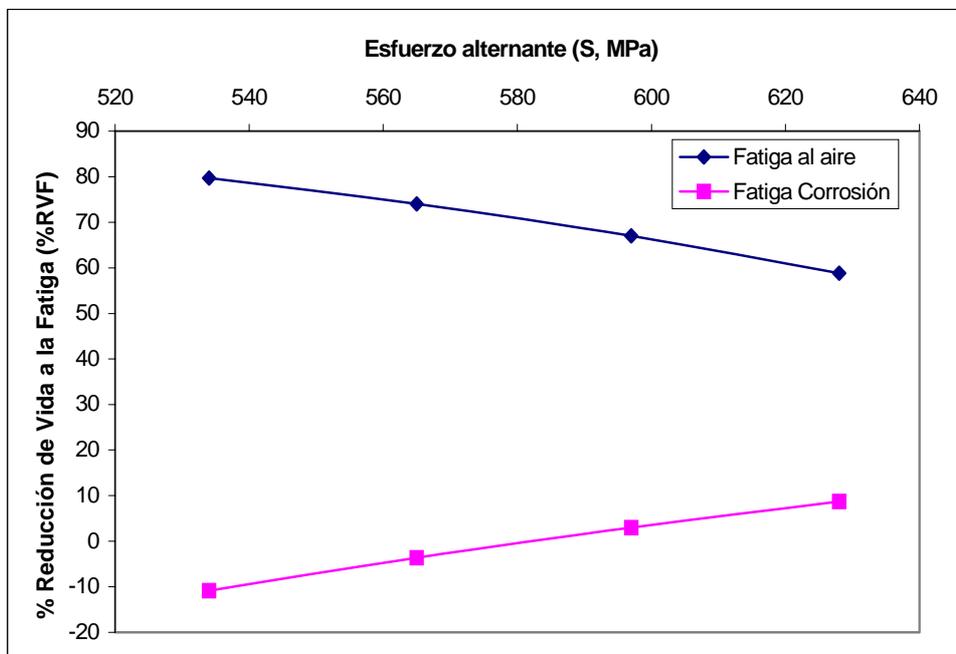


Fig. 3.10. Grafica de esfuerzo alternante vs reducción de vida a la fatiga de un acero SAE 4340 recubierto y no recubierto con un depósito de cromo duro, ensayado en fatiga al aire y corrosión-fatiga.

3.3.- ENSAYOS DE DUREZA.

Resultado de dureza de acero AISI D2 sin recubrimiento

Continuando con el análisis de los valores de dureza, se pudo observar que para la probeta de acero que no fue recubierta los valores de dicha propiedad mostraron la existencia de un leve efecto de tamaño de huella, particularmente a valores de carga del orden de 1000 g. Para cargas inferiores a dicho valor la dureza se mantuvo alrededor 543 ± 54 VHN.

Tabla 3.6 Resultado del barrido de dureza de acero AISI D2 sin recubrimiento.

Carga (Substrato)	Dureza Vickers (HV)	Desv. est (Dureza)	d (µm)
25	533,2	28,1	10,1
50	603,2	40,9	12,9
100	562,5	9,8	17,6
200	545,3	11,8	24,9
300	551,1	9,5	30,6
500	571,4	2,9	39,6
1000	431,1	1,7	56,5
Promedio	542,5		
Desvest	54,0		

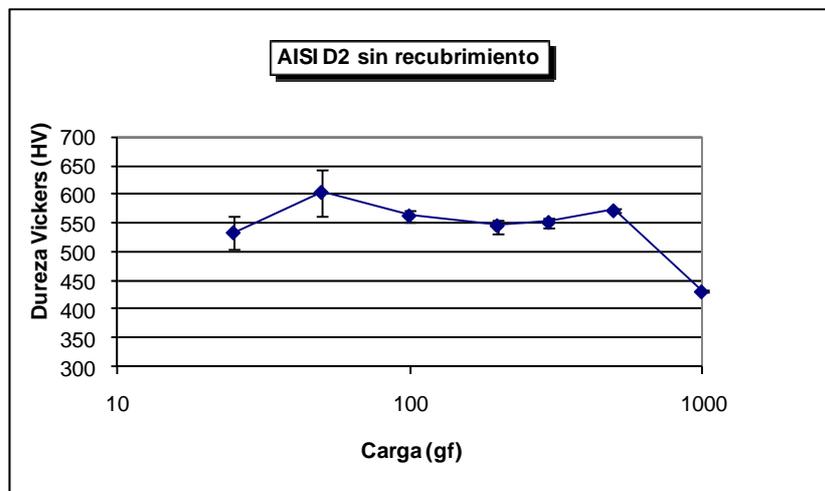


Figura 3.11.- Curva de Dureza Vickers (HV) vs. Carga (gf) de acero AISI D2 sin recubrimiento.

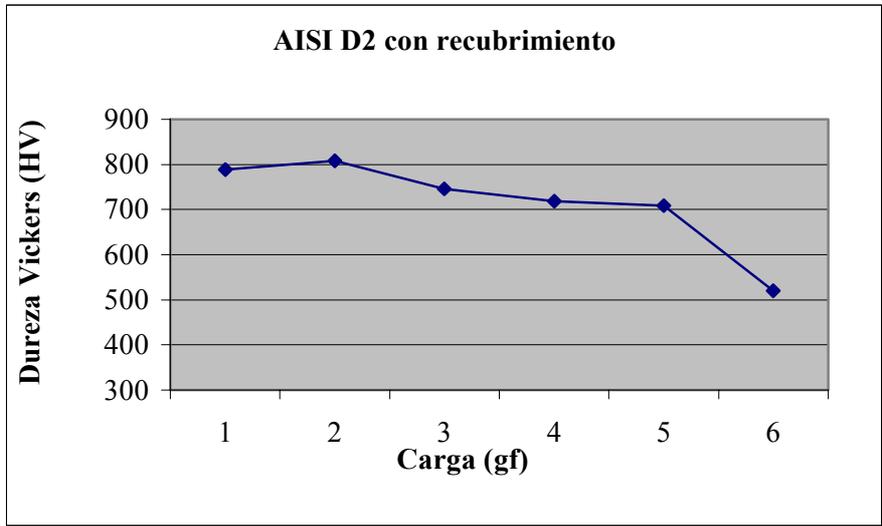


Fig. 3.12.- Curva de Dureza Vickers (HV) vs. Carga (gf) de hacer AISI D2 recubrimiento.

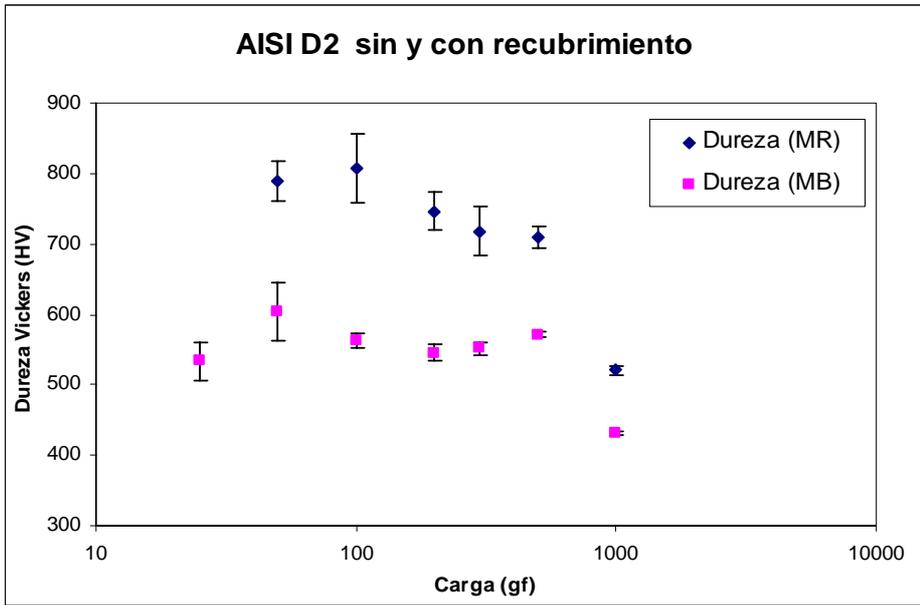


Fig. 3.13.- Comparación del ensayo de dureza del acero SAE 4340 recubierto (MR) y no recubierto (MB).

En la Figura 3.13 se aprecian las gráficas de dureza en función de la carga aplicada. Podemos observar que la dureza del material recubierto es superior al material base. Otro detalle que podemos ver en dicha gráfica, es que a medida que aumentamos la carga de penetración del indentador se van acercando los valores, hasta llegar a uno en el cual coinciden tanto el material recubierto como el substrato, lográndose medir así tanto la dureza del substrato como del material recubierto.

3.4.- MEDICIÓN DE RUGOSIDAD APARENTE.-

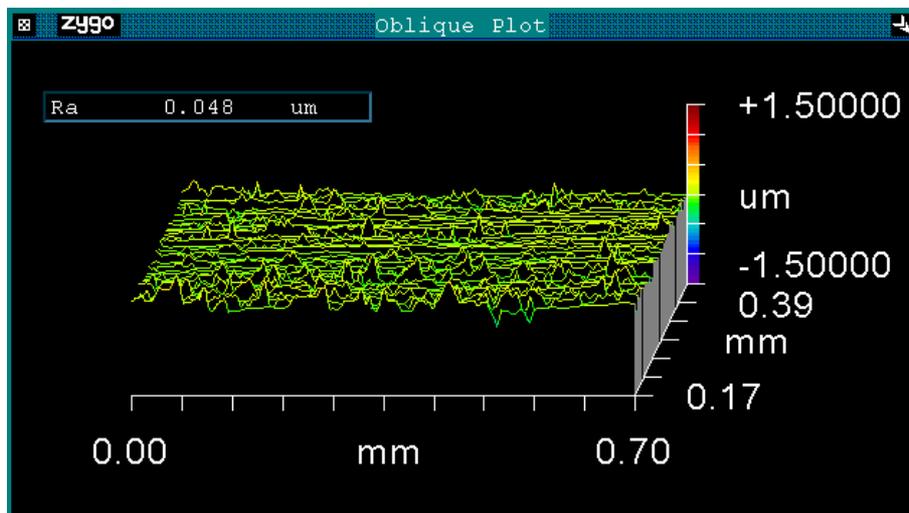


Fig. 3.14.- Perfilometría Óptica. Medición de Rugosidad Aparente del acero SAE 4340 sin recubrimiento.

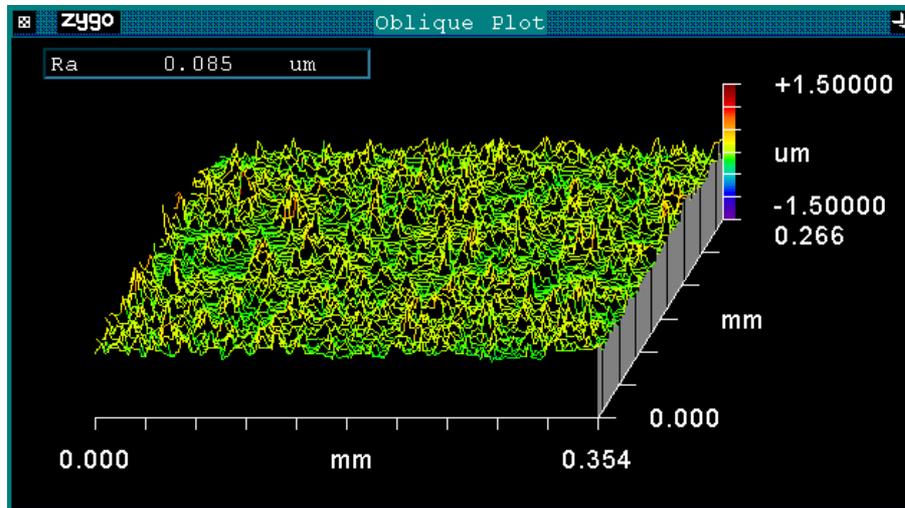


Fig. 3.15.- Perfilometría Óptica. Medición de rugosidad Aparente del acero SAE 4340 con recubrimiento de cromo duro.

3.5.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

En esta sección se presentan las fotomicrografías obtenidas a través de MEB de las muestras que fueron ensayadas en fatiga al aire como en corrosión-fatiga tanto en el material base como en el material recubierto. La selección de las muestras a estudiar se llevó a cabo tomando aquellas muestras cuyo número de ciclos a falla estuviese más cercano al promedio correspondiente en los niveles de esfuerzo alternante menor y mayor.

Las fotomicrografías de las superficies de fractura del material base del acero SAE 4340 ensayados en fatiga al aire y corrosión-fatiga se pueden observar en el Trabajo Especial de Grado realizado por los Brs. Mariana M. y Luis C ^[20], debido a que la aleación utilizada en el presente trabajo corresponde al mismo material proveniente del mismo lote, por lo que no se incluyen en el presente

trabajo. Además, aunque los esfuerzos empleados en el citado trabajo no fueron exactamente los mismos, los esfuerzos aquí empleados en el presente estudio difieren en menos de 1% por lo tanto se espera que las características fractográficas sean muy similares. Por lo antes expuesto, en esta sección sólo se presentan los resultados correspondientes al material recubierto con cromo duro.

3.5.1.- Fatiga al aire del acero SAE 4340 recubierto con cromo duro.

En la figura 3.20 (a) se muestra una vista general de la superficie de fractura de una probeta del material recubierto ensayada en condición de fatiga al aire a 534 MPa en la cual se pueden apreciar al menos tres posibles inicios de grieta. La parte superior de la fotomicrografía presenta uno de estos posibles inicios de grieta (O_1), así como la dirección de propagación de la misma (ZPG) y la parte inferior de la fotomicrografía indica la zona de falla por sobrecarga (ZFPS). La figura 3.20. (b) es una vista magnificada de la zona (O_1). La figura 3.20. (c) es un acercamiento aún mayor a la zona de inicio de grieta donde se puede observar tanto el recubrimiento como las marcas radiales que sugieren la dirección de propagación de la grieta.

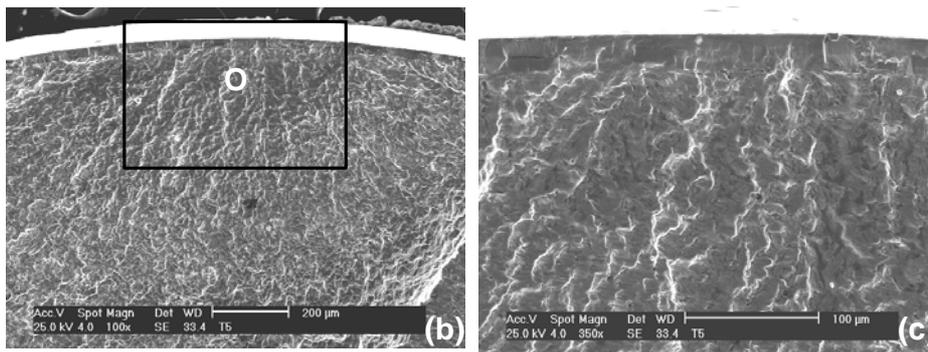
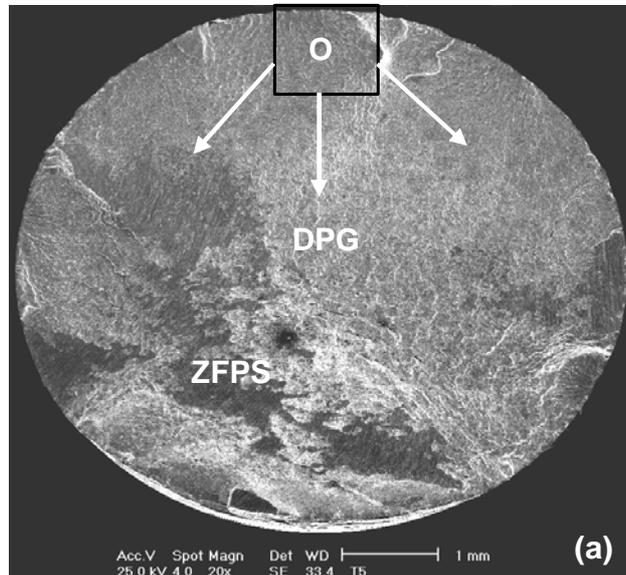


Fig. 3.20.- Superficie de fractura del material recubierto ensayado a fatiga al aire a 534 MPa y $N_f = 177300$ ciclos.

En la figura 3.21 (a) se presenta una vista general de la superficie de fractura del material recubierto, ensayado en condiciones de fatiga al aire a un esfuerzo de 628 MPa. En este caso, también se pueden observar múltiples inicios de grieta (O_1 - O_4). Las grietas avanzan desde sus diferentes orígenes hacia el centro de la probeta generando la falla por sobrecarga en esta zona. En la figura (b) se presenta un acercamiento de la zona de inicio O_1 , mostrando la dirección de

propagación de la grieta y la figura (c) es una vista magnificada de (b) mostrando mayor detalle de la zona de inicio O_1 .

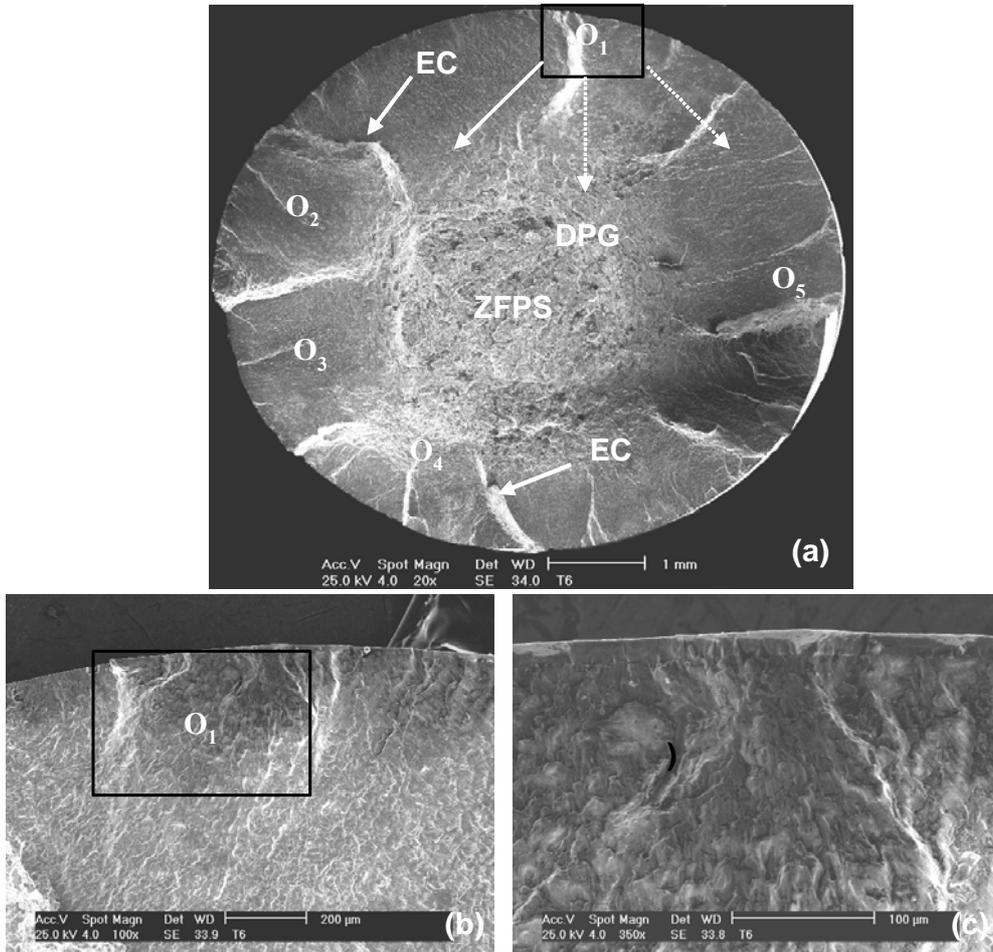


Fig. 3.21.- Superficie de fractura del material recubierto ensayado a fatiga al aire a 628 MPa y $N_f = 60500$ ciclos

3.5.2.- Fatiga-corrosión del acero SAE 4340 recubierto con cromo duro.

En la figura 3.22 (a) se presenta una vista general de la superficie de fractura de una probeta del material recubierto ensayada en condición de corrosión- fatiga a 534 MPa. En este caso se observan múltiples inicios de grieta (O_1 - O_5). En la parte superior observamos el inicio de grieta O_1 así como la dirección de propagación de la misma (DPG), la zona de falla por sobrecarga (ZFPS) se observa en el centro de la probeta. También se observan escalones de clivaje entre los diferentes frentes de avance de las grietas. La figura 3.22 (b) es una vista magnificada de la zona de inicio de grieta O_1 , mostrando con mayor detalle la zona de propagación de la misma. La figura 3.22 (c) es un acercamiento aun mayor de la zona O_1 ; se puede observar en la parte superior el recubrimiento (R) de cromo duro.

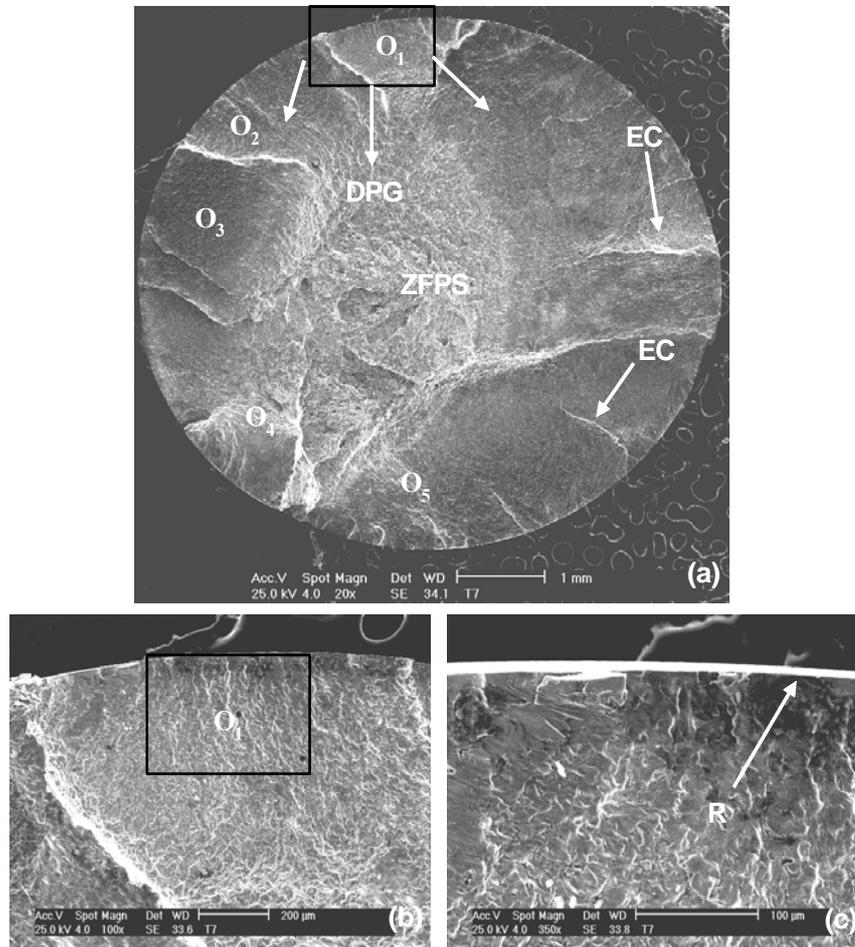


Fig. 3.22.- Superficie de fractura del material recubierto ensayado a corrosión-fatiga a 534 MPa y $N_f = 167400$ ciclos.

En la figura 3.23 (a) se muestra la vista general de la superficie de fractura de una probeta del material recubierto ensayada a 628 MPa en condiciones de corrosión-fatiga. Igual que en el caso anterior se observan múltiples inicios de grieta (O_1 - O_4) en la periferia de la superficie. La zona de falla por sobrecarga (ZFPS) se encuentra en el centro de la probeta, ligeramente desplazada hacia la parte inferior. Se pueden observar escalones de clivaje. La figura 3.23. (b) es una vista magnificada de la zona O_1 , ilustrando el inicio de

grieta de fatiga así como la dirección de propagación (DPG). La figura 3.23 (c) es un acercamiento mayor a la zona O₁, en el cual se puede observar el recubrimiento (R).

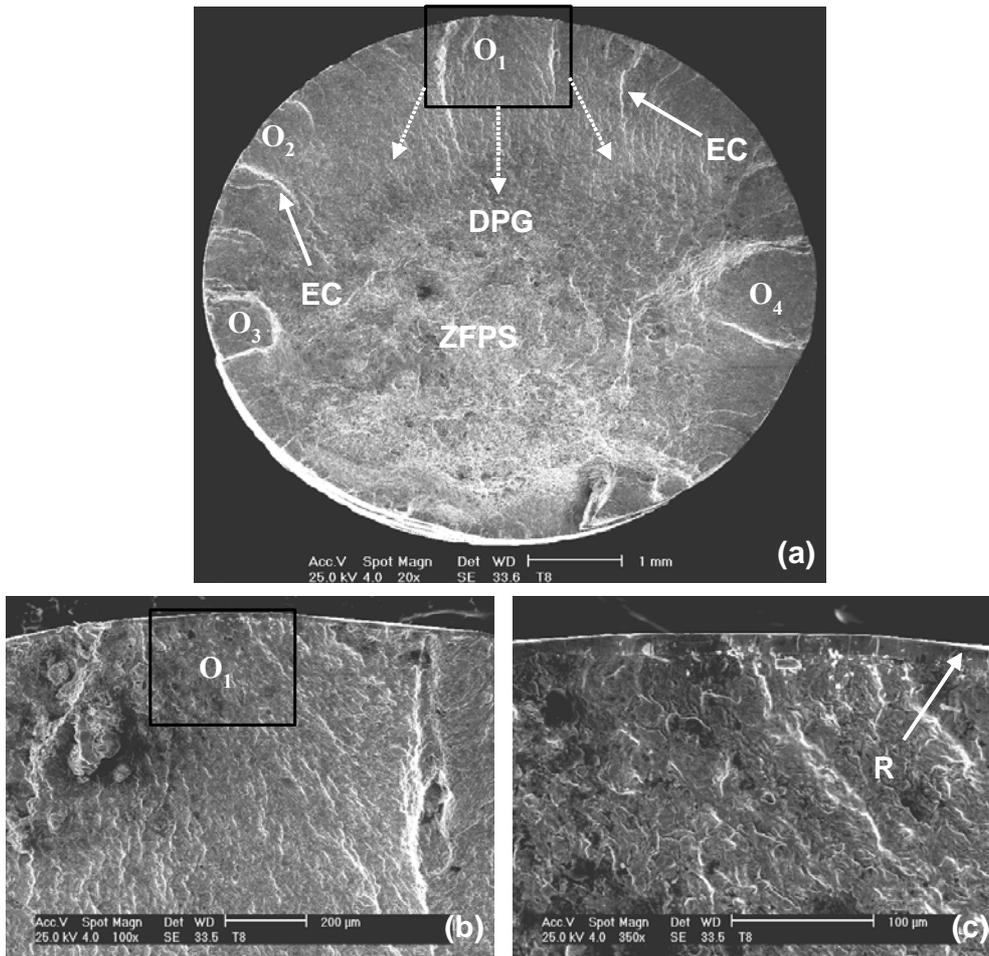


Fig. 3.23.- Superficie de fractura del material recubierto ensayado a corrosión-fatiga a 628 MPa $N_f = 56600$ ciclos.

Finalmente, a manera de resumen se pudiera afirmar que el material base sin recubrimiento, ensayado en fatiga al aire presenta tanto a bajos como a altos esfuerzos un mecanismo de avance de grieta producto de la nucleación de una o varias grietas, dependiendo del esfuerzo alternante, mientras que las probetas recubiertas muestran bajo las mismas condiciones de ensayo, múltiples puntos en los que se nuclean las grietas, generando que la zona de falla por sobrecarga se ubique hacia el centro de la superficie fractográfica. Estas características sugieren que el recubrimiento de cromo duro se comporta como un concentrador de esfuerzo que facilita la nucleación múltiple de grietas por fatiga. Por otro lado, en el caso de las fractografías correspondientes a los ensayos de fatiga-corrosión, tanto en las muestras del material base sin recubrimiento y con recubrimiento se observa también el inicio de múltiples grietas por fatiga en ambos casos.

3.5.3.- Análisis de los cortes longitudinales.

A continuación se presentan las fotomicrografías correspondientes al análisis realizado sobre los cortes longitudinales (cortes normales a la superficie de fractura) de las probetas recubiertas con cromo duro ensayadas en las dos condiciones de trabajo: fatiga al aire y corrosión-fatiga a bajos y altos esfuerzos.

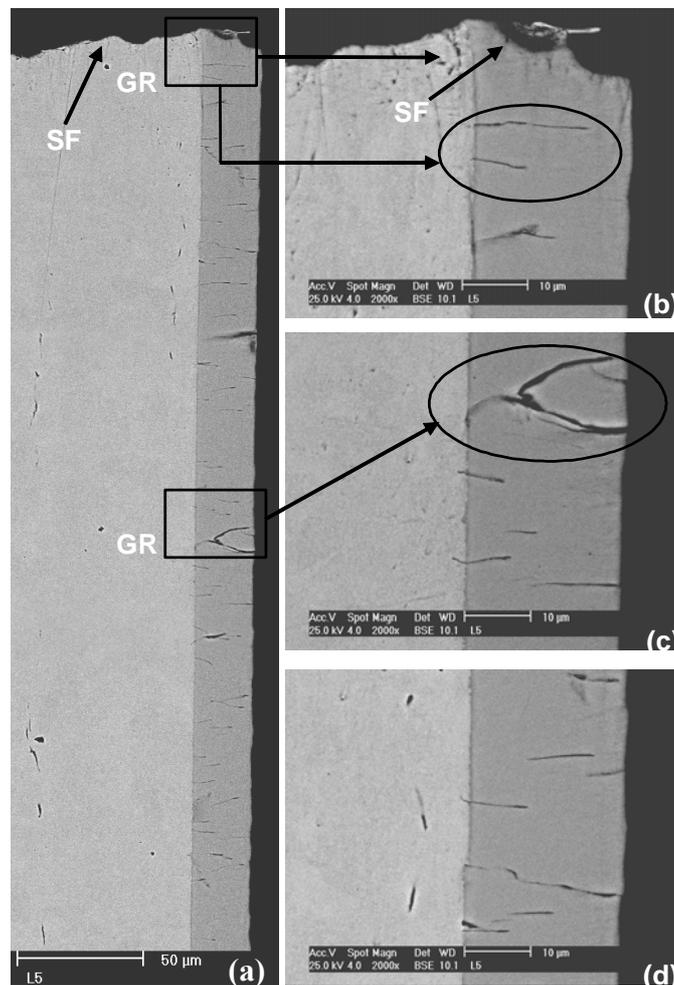


Fig. 3.24. Vista de cortes longitudinales del material recubierto ensayado a fatiga al aire a 534 MPa y $N_f = 177300$ ciclos.

En las figuras 3.24. (a), (b), (c) y (d), se presentan las micrografías de cortes longitudinales del material recubierto, ensayado en condiciones de fatiga al aire a un esfuerzo de 534 MPa. En primer lugar, se evidencia la gran cantidad de microgrietas distribuidas a lo largo de la pared del recubrimiento de cromo duro, algunas de las cuales son originadas durante el proceso mismo de deposición y otras son producto del agrietamiento ocasionado sobre el recubrimiento a causa de las cargas cíclicas. La figura 3.24 (a) indica la ubicación de la superficie de fractura (SF) y la presencia de grietas (GR) de fatiga y se observan detalladamente en las figuras 3.24 (b), (c) y (d). Estas figuras indican claramente que el inicio de la grieta puede darse tanto en la superficie externa del recubrimiento como en la intercara substrato-depósito.

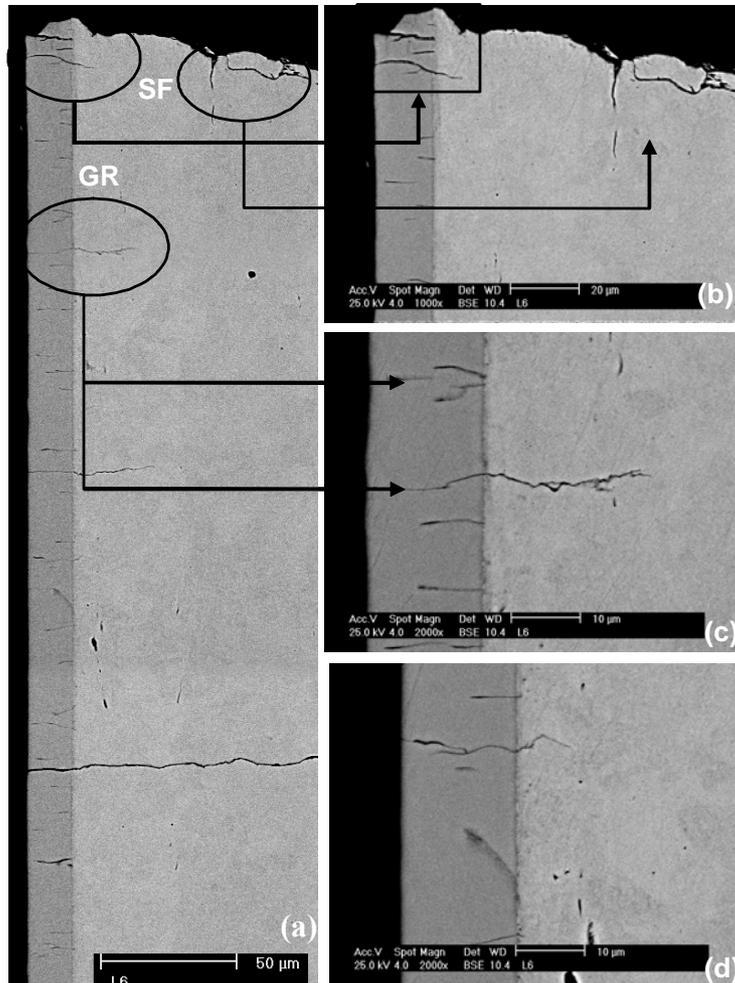


Fig. 3.25.- Vista de cortes longitudinales del material recubierto ensayado a fatiga al aire a 628 MPa y $N_f = 60500$ ciclos.

Otras grietas, pueden observarse en el seno mismo del depósito, es decir no se encuentran cerca del sustrato ni hacia la superficie externa del recubrimiento, indicando probablemente que éstas son microgrietas causadas por el proceso de deposición.

En las figuras 3.25 (a), (b), (c) y (d), se observan las micrografías de cortes longitudinales, correspondientes al material recubierto ensayado en condiciones de fatiga al aire a un esfuerzo de 628 MPa. De manera similar, a lo encontrado a bajos esfuerzos se observa una gran cantidad de grietas a lo largo de la pared del recubrimiento. Para este nivel de esfuerzo se observan también grietas que tienen su inicio tanto en la superficie del recubrimiento como en la intercara (Figuras 3.25 (b), (c) y (d)).

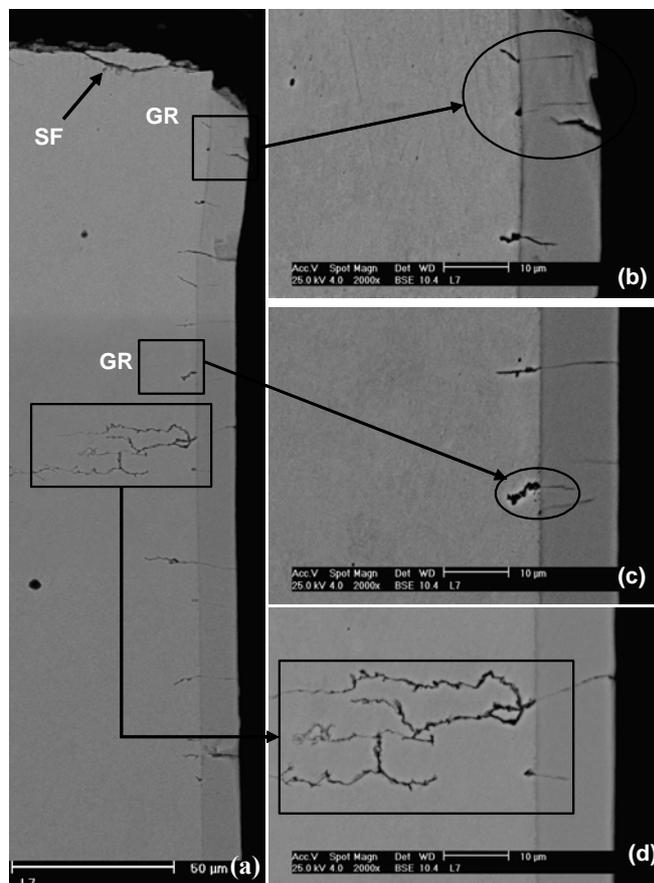


Fig. 3.26.- Vista de cortes longitudinales del material recubierto ensayado a corrosión-fatiga a 534 MPa y $N_f = 167400$ ciclos.

La gran densidad de microfisuras presentes en el recubrimiento, así como los múltiples inicios de grietas encontrados en el estudio fractográfico indican claramente porque la vida a la fatiga de las muestras recubiertas es considerablemente menor que la encontrada para el material base cuando son ensayados en fatiga al aire.

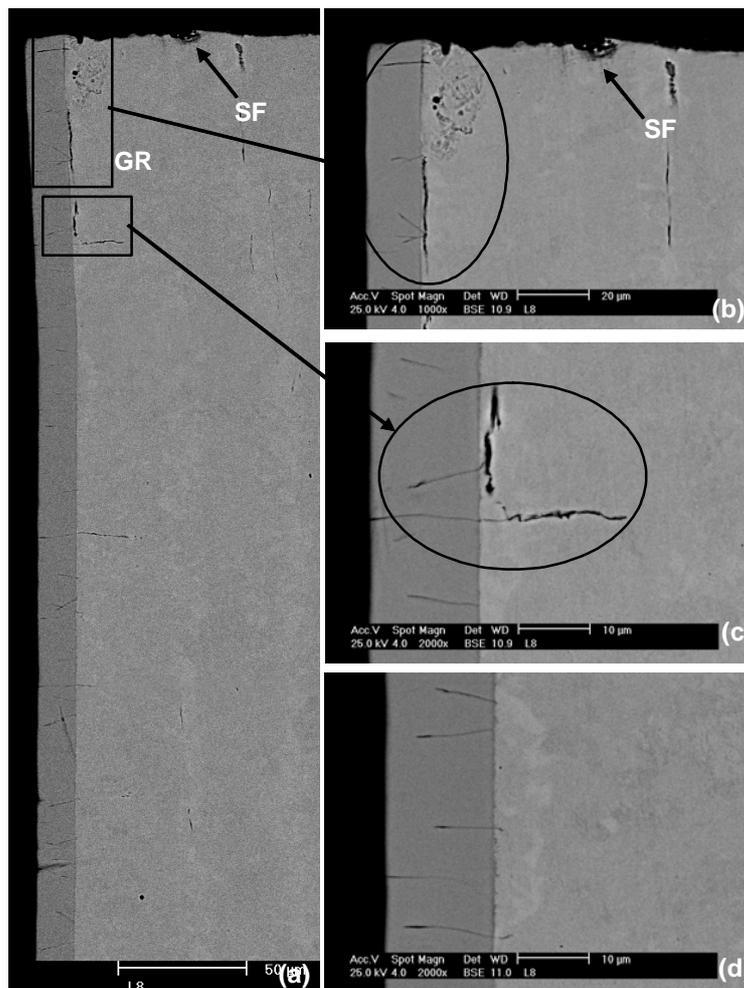


Fig. 3.27.- Vista de cortes longitudinales del material recubierto ensayado a corrosión-fatiga a 628 MPa y $N_f = 56600$ ciclos.

En las Figuras 3.26 y 3.27 se observan las fotomicrografías de los cortes longitudinales, correspondientes al material recubierto ensayado en condiciones de corrosión-fatiga a 534 MPa y 628 MPa, respectivamente. En ambas condiciones se puede observar la extensa cantidad de grietas existentes en el recubrimiento. Asimismo, al igual que en el caso de fatiga al aire se muestran inicios de grieta tanto en la intercara substrato-recubrimiento como en la superficie del depósito. Por otro lado, puede apreciarse claramente el efecto perjudicial de la solución salina sobre el substrato el cual se manifiesta en el fuerte ataque ocasionado sobre el metal base, encontrándose en muchos casos grietas que avanzan paralelas a la intercara. Todo lo anterior sugiere que la red de microgrietas presente en el recubrimiento no impide la entrada del líquido corrosivo hacia el substrato sino que más bien lo facilita. Luego, el depósito no cumple con el rol de funcionar como una barrera protectora y por lo tanto esta observación permite explicar porque la vida a la fatiga de las muestras con y sin recubrimiento ensayadas a fatiga-corrosión son prácticamente las mismas.

4.- CONCLUSIONES

1.-) Las probetas de acero SAE 4340 recubiertas con un depósito de cromo duro de aproximadamente 23 μm de espesor, ensayadas en condiciones de fatiga al aire, cuando se comparan con el material base, presentan una disminución de la resistencia a la fatiga de un 80% para el esfuerzo más bajo y un 48% para el nivel de esfuerzo más alto. Asimismo, ocurre una disminución en el límite de fatiga del material recubierto del orden del 6-7%, al ser comparado con las probetas sin recubrimiento. Esto podría ser explicado por la posible presencia de esfuerzos residuales de tracción en el recubrimiento, los cuales dan origen a la nucleación de grietas de fatiga en aquellas áreas del material que presentan defectos en las zonas cercanas de la intercara recubrimiento sustrato.

2.-) Para la condición de corrosión-fatiga, el acero SAE 4340 recubierto se comporta de manera similar al acero sin recubrir, por lo cual se concluye que el recubrimiento no ofrece protección efectiva al material en condiciones de corrosión-fatiga.

3.-) Se puede concluir que el recubrimiento actúo como un concentrador de esfuerzos en la superficie de la probeta ensayada a fatiga, en ambas condiciones (fatiga al aire y corrosión-fatiga), ya que se observaron múltiples inicios de grieta en la periferia de superficie de fractura de las probetas ensayadas.

4.-) Las propiedades mecánicas estáticas del acero SAE 4340 recubiertas con un depósito de cromo duro no presentaron variación significativa respecto al material sin recubrir. Esto es debido probablemente a las propiedades mecánicas similares y espesor pequeño del recubrimiento.

5.- RECOMENDACIONES

- 1.-) Hacer la prueba con mayores espesores de recubrimiento, para determinar en qué medida éste influye sobre la resistencia a la fatiga de dicho acero.

- 2.-) Aplicar diferentes tratamientos térmicos variando la temperatura, para determinar cómo afecta la resistencia a la fatiga y el cambio de esfuerzos residuales de tracción a compresión.

- 3.-) Optimizar el proceso de mecanizado, pulido y deposición del recubrimiento.

- 4.-) Aplicar el granallado previo a la deposición del cromo duro ya que es un método que da lugar a un aumento de los esfuerzos residuales de compresión dentro de una capa delgada superficial del substrato. De esta manera, cualquier tensión superficial externa de tracción sería parcialmente contrarrestada y reducida en magnitud por el esfuerzo residual de compresión. El efecto neto sería que la probabilidad de nucleación de la grieta y por tanto de rotura por fatiga se reduciría.

6.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] **Hammond. R.F. and C. Williams. “The Efect of Electroplating on Fatigue Strength”. Metallurgical Reviews. 1960. Vol. 5. N° 18.**
- [2] **Dieter. G. Metalurgia mecánica. McCraw. Hill España 1967.**
- [3] **Forrest. P.G. Fatiga de los metales. Edic. Urmo. Bilbao 1972.**
- [4] **Dowling. N.E. Mechanical Behaviour of Material. Prentice Hall Englewood Clifs. N.T. Pag. 335. 1993.**
- [5] **Wu. Y et al. “Effect of Electroless Nickel Plating on Fatigue Strength of 30CrMoA Steel”. Plating and Surface Finishing (1995).**
- [6] **Campillo B. et al. “Evaluation of an electrolytic alloy of Ni-Co-B as a high resistance coating”. The Nace International Conference And Exposition. Corrosion (1996), paper N° 57.**
- [7] **Puchi. E.S. et al. “ Influence of Ni-P Electroless Coating on the Fatigue Behaviour of Plain Carbon Steel”. Thin Solid Films 290-291 (1996). 370-373.**
- [8] **Yang. Y.Z. et al. “ Fatigue Properties of Electroless deposited Steel”. Journal of Material Science Letters 15 (1996). 1364-1366.**
- [9] **ASTM Designation A370-90, V1(2) (1997). 175-226. [part. 10]. “Mechanical Testing of Steel Product. Method and def. for”.**
- [10] **ASTM Designation E739-91, V3(1) (1997). 594-600 [part.10]. “Statistical Analysis of linear or linear or Linearized Stress Life (S-N) and Stress Life (ϵ -N). Fatigue Data practice for”.**

- [11] Jones. A.R. "Corrosion of Electroplated Hard Chromium". ASM Handbook. 1997. Vol. 9 Surface Engineering.
- [12] Meyers. B and S. Lynn. "Chromium Elimination". ASM Handbook 1997. Vol. 9. Surface Engineering.
- [13] Chitty. J. et al. "Influence of Electroless Ni-P deposits on the corrosion-fatigue properties of an AISI 1045 steel". Thin Solid Films 308-309 (1997). 430-435.
- [14] Kenneth R. Newby. "Industrial (Hard) chromium plating". ASM Handbook.1997. Vol. 9. Surface Engineering.
- [15] Jones. A.R. "Microcracks in Hard Chromium Electrodeposited". Plating and Surface Finishing. April 1998.
- [16] Berrios. J.A. et al. "Effect of thickness of an Electroless Ni-P deposited on the mechanical properties of an AISI 1045 plain carbon steel". Surface and coatings Technology 108-109 (1998). 466-472.
- [17] Pertuz. A. et al. "Influence of an Comercial Electroless Ni-P deposited on the fatigue properties of a notched an unnotched SAE 4140 Steel". Surface and coating technology 133-134 (2000). 572-582.

- [18] **Mariño y Ortiz. (2001). Estudio de fatiga y corrosión-fatiga de un acero SAE 4140 recubierto con un depósito de cromo duro. Tesis UCV facultad de ingeniería. Escuela de metalurgia y ciencia de los materiales.**
- [19] **Campillo B. et al. (2002). “Electrodeposited Ni-Co-B alloy. Application as corrosion resistant coating and water electrolysis”. Material science and Engineering C-Elsevier. Vol. 19, segues 1-2, 02 de Enero de 2002, pag. 115-118.**
- [20] **M. Mariana y C. Luis (2004). “Estudio a la fatiga y fatiga-corrosión De Acero AISI 4340 Con Recubrimiento De TiCN Empleando La Técnica De PVD”. Tesis UCV Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.**
- [21] **Pimentel. P. (2005). “Estudio de fatiga y corrosión-fatiga de un acero SAE 4140 recubierto con una aleación de Ni-Co-B. Tesis UCV Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.**