

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE FATIGA Y CORROSION-FATIGA DE UN ACERO SAE 4140 RECUBIERTO CON UNA ALEACIÓN DE Ni-Co-B.

Presentado Ante la Ilustre
Universidad central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero Metalúrgico
Por el Br. Pimentel A. Pablo J.

Caracas, junio de 2005.

INTRODUCCIÓN

Es una constante encontrar en la literatura especializada, la aseveración de que la mayor parte de las fallas de componentes de máquina son fallas por fatiga, ocasionando elevadas pérdidas económicas sobre todo en el sector industrial. De allí que desde que apareció el problema aproximadamente por allá por los años 1800 hasta nuestros días se han hecho y siguen haciendo grandes esfuerzos de investigación con el fin de darle respuesta que eviten o minimicen este tipo de fallas, las cuales tienen como una de sus características más importante que suelen ocurrir a niveles de esfuerzos por debajo del esfuerzo de fluencia del material.

Por otra parte la corrosión es otro de los daños que también causa grandes pérdidas económicas en la industria. Factores ambientales como la humedad, gases, temperatura, promueven el ataque de la superficie de los metales, produciendo micro grietas que combinadas estas con tensiones bien sean estáticas o dinámicas terminan por producir la falla del material, lo cual ha conducido a la búsqueda constante del mejoramiento de la superficie de los materiales.

En cuanto al recubrimiento, tanto en la fatiga como en la corrosión, la superficie del material juega un papel importante. La corrosión es el resultado de una acción provocada en la superficie de un metal por un líquido o un gas, por lo que es evidente que la naturaleza de esta superficie ha de tener una influencia clave frente a la corrosión.

Así mismo el fenómeno de fatiga casi siempre comienza en la superficie del material. Una microgrieta, un poro, una raya, actúan como concentradores de esfuerzos que combinados con esfuerzos dinámicos desencadenan el proceso que termina con la falla del material.

Conocido todo lo anterior, se han desarrollado entonces diversas técnicas de recubrimientos de metales, buscando básicamente un mejor comportamiento frente a la corrosión. Pero al mismo tiempo, si bien es cierto que se logran mejoras en un medio agresivo, no siempre ocurre así, cuando el material recubierto es sometido a la acción combinada de fatiga con corrosión, resultando que las propiedades de fatiga unas veces disminuyen y otras veces son mejoradas, de tal manera que el tipo de recubrimiento y la técnica de deposición sobre el metal entran a jugar un papel importante a ser tomado en cuenta a la hora de estudiar la fatiga y la corrosión-fatiga de un metal recubierto.

En este contexto se realiza el presente trabajo, cuyo objetivo es determinar el comportamiento a la fatiga al aire y en una solución de cloruro de sodio, del acero SAE 4140 tanto sin recubrimiento como con recubrimiento, siendo este último una aleación de Ni-Co-B.

Para alcanzar el objetivo propuesto, se plantea evaluar las propiedades estáticas del material base y del material recubierto. Se realizarán ensayos de fatiga, en condiciones de flexión rotativa al acero con recubrimiento y sin recubrimiento, tanto al aire como en medio corrosivo y así obtener las curvas de vida y límite de fatiga.

Se estudiarán las superficies de fractura por fatiga y por fatiga-corrosión del metal base y del metal recubierto, utilizando la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido, para determinar que tipo de grietas se producen durante la fractura de las muestras y de que forma se propagan las mismas, así como también de que manera se ve afectado el recubrimiento en el proceso.

CAPITULO I

1.- MARCO TEORICO.

1.1.- Generalidades sobre el acero SAE 4140.

1.1.1-Acero SAE 4140 : Este acero es ampliamente usado en la industria automotriz para la fabricación de bielas, barras de conexión, cigüeñales, ejes de manivelas, juntas , articulaciones, ejes traseros, ejes de remolques.

En la industria petrolera se utiliza para brocas, mechas, collares de perforación, barrenas o taladros, barras de pistón y partes de bombas. También en la industria aeronáutica se utiliza en perfiles y tuberías.

El acero SAE 4140 es un acero aleado. Su composición química se muestra en la tabla N° 1-1.

Tabla 1-1. Composición química industrial.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Cu
% Peso	0,42	0,26	0,82	0,016	0,026	1	0,17	0,014	0,2

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción: 1.118 MPa.

Limite de fluencia: 818 MPa.

Reducción de área; 50 %

Dureza: 325 HB.

Estos datos fueron obtenidos del certificado de calidad suministrados por el fabricante.

1.2.- FATIGA.

1.2.1.- Generalidades.

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.

Un hecho resaltante es que, la falla por fatiga se puede producir sin presentar ningún indicativo previo que permita evitarla o detenerla antes de que se produzca.

La falla por fatiga es un fenómeno complejo en el cual están involucrado muchos factores, tales como:

- el tipo de esfuerzos, los cuales son cíclicos o alternantes y que pueden ocurrir como resultado de rotación, flexión o vibraciones.
- Concentraciones de esfuerzos.
- Tensiones residuales.
- Estados de la superficie (lisa o rugosa).
- Cambios bruscos de temperatura.
- Microestructura.
- Historia térmica y mecánica del material.
- Presencia de grietas, poros, inclusiones internas o en la superficie del material.
- Condiciones ambientales (agentes agresivos o no).

Cualquiera de los factores anteriores, puede activar el proceso que culmina en una falla súbita del material. Por ello como parte del fundamento teórico de este trabajo de tesis de grado, estudiaremos con algo más de detalles los factores antes mencionados.

Comencemos por definir lo que se entiende por fatiga: “Es el cambio estructural permanente, localizado y progresivo que ocurre en materiales sometidos a esfuerzos y deformaciones fluctuantes, que pueden resultar en grietas o fracturas después de un determinado número de fluctuaciones”^[1].

Además de los factores antes mencionados, se deben dar simultáneamente tres condiciones básicas, para que se produzca la falla por fatiga:

- 1) La acción de esfuerzos cíclicos que originen la grieta.
- 2) La acción de esfuerzos de tracción que generen el crecimiento y la propagación de la grieta y.
- 3) La existencia de deformación plástica.^[2]

1.2.2.- Mecanismo de las fallas por fatiga.

El mecanismo de fatiga se compone de tres etapas:

1. Nucleación e iniciación de la grieta.
2. Crecimiento progresivo de la grieta (etapa de propagación).
3. Fractura final y repentina de la sección remanente por sobrecarga. (La sección disminuye a medida que avanza la grieta)^[3].

En la Fig.1-1 se puede ver un esquema de las tres etapas.

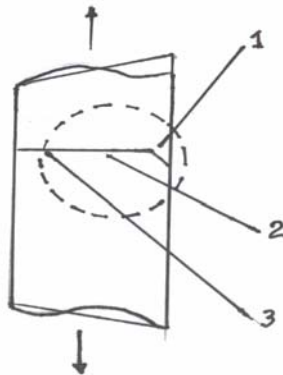


Fig. 1-1. Las tres etapas de la falla por fatiga.

1.2.2.1.- Etapa de iniciación de las grietas.

Esta etapa suele ser de corta duración. Una vez que el material comienza a ser sometido a esfuerzos fluctuantes, estos comienzan a actuar en aquellas zonas del material donde hay concentradores de esfuerzos (una inclusión, una cavidad, muesca, esfuerzos residuales, etc.) produciéndose allí **deformación plástica local**, esto ocurre aún cuando el esfuerzo nominal en la sección esté muy por debajo del límite elástico de material. La fluencia plástica local causa distorsión, creando bandas de deslizamiento (regiones de deformaciones intensas producidas esfuerzos cortantes) a los lados de los bordes cristalizados del material.

Conforme los esfuerzos se alternan aparecen más bandas de deslizamiento, formándose grietas microscópicas. Los huecos o inclusiones preexistentes servirán como elevadores de esfuerzo para la iniciación de la grieta.

Es importante resaltar que: se han observado bandas de deslizamiento a tensiones inferiores al límite elástico, en materiales férreos, por lo que la aparición de deslizamiento durante la fatiga no puede considerarse por si misma como indicio de que se formará una grieta^[4].

Un aspecto estructural importante, que parece ser único de la deformación en fatiga, es la formación en la superficie del material de entrantes y salientes que se llaman **extrusiones** e **intrusiones** de bandas de deslizamiento. Cuidadosos estudios metalográficos muestran que las grietas de fatiga se inician en las extrusiones y en las intrusiones. No se conocen todos los factores que producen la formación de las extrusiones y las intrusiones, sin embargo parece que se producen en huellas blandas del cristal, y esto sugiere que para su formación sea necesario el deslizamiento cruzado. Esta hipótesis está sostenida por el hecho de que es difícil que se produzcan fallas por fatiga en cristales iónicos, que no sufren fácilmente deslizamiento cruzado

y también porque no es posible rotura por fatiga en cristales de zinc orientados de manera que se deformen solamente por deslizamiento fácil.^[4]

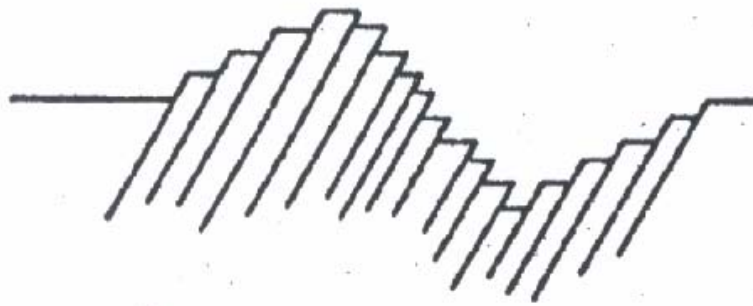


Fig. 1-2. Vista esquemática de la formación de una Intrusión y una Extrusión en una banda de deslizamiento. ^[5]

1.2.2.2.- Etapa de propagación de las grietas.

Bajo la acción de cargas cíclicas, una grieta puede nuclearse como consecuencia de una deformación plástica localizada, por ejemplo un concentrador de esfuerzos. Esto puede ocurrir aún cuando los esfuerzos nominales se encuentren muy por debajo del esfuerzo de fluencia. La propagación se divide en dos etapas:

Etapa I. Se puede considerar que la propagación se inicia, cuando ocurre el cambio de orientación del plano principal de fractura (de 45^0 a 90^0 en relación al eje de esfuerzos aplicados al material), ver Fig.1-3. Esta etapa es considerada la más importante en este proceso, por dos razones:

1.- La mayor parte de los materiales tecnológicos y estructurales contienen defectos inherentes, lo que ocasiona que la etapa de inicio de grieta se presente relativamente temprano en la vida de servicio del material.

2.-La velocidad de crecimiento de las grietas de fatiga es una función de ciertas propiedades del material, de la longitud de las grietas y del nivel de esfuerzos aplicados. En esta etapa de la fatiga, la grieta se propaga una cierta distancia con cada ciclo de esfuerzo.

Etapa II. Ocurre por el proceso de despunte plástico^[3] el cual se ilustra en la figura 1.3. Al comienzo del ciclo de carga la punta de la grieta es aguda (Fig.1.3.a), a medida que la carga de tensión es aplicada, la pequeña entalla doble en la punta de la grieta concentra el deslizamiento sobre planos a 45° del plano de la grieta (Fig.1.4.b), a medida que la grieta alcanza su máxima separación (Fig. 1. 4. c), esta crece por cizallamiento plástico y al mismo tiempo la grieta despunta o pierde su borde.

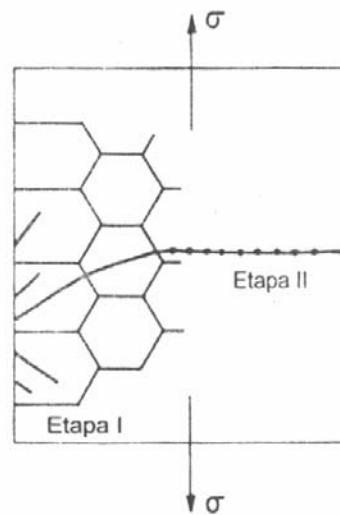


Fig. 1-3. Representación esquemática de las etapas I y II de la propagación de grietas^[4]

Cuando la carga cambia a compresión, la dirección de deslizamiento en la zona final se revierte (Fig. 1. 4. d). Las caras de las grietas son presionadas una contra otra y la nueva superficie creada en tensión es forzada a dirigirse sobre el plano de la grieta (Fig. 1. 4. e) donde es parcialmente doblada para formar una grieta reafilada la cual está lista para avanzar y despuntar en el siguiente ciclo de carga. Una característica de la propagación de grieta por fatiga, es que, una vez que ha sido

nucleada, su velocidad de crecimiento y su dirección están totalmente controladas por los esfuerzos localizados en el extremo o punta de la grieta.

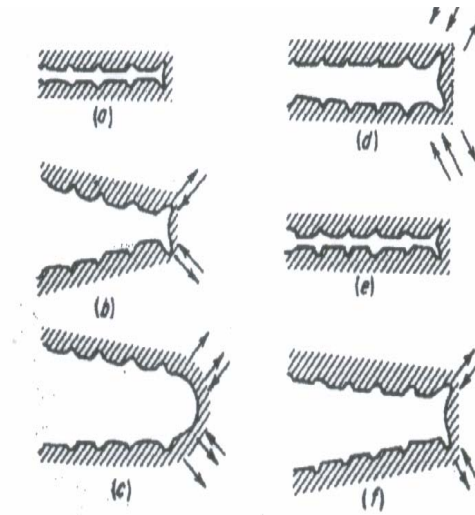


Fig. 1-4. Etapa II del crecimiento de grieta mediante el proceso de despunte plástico. [4]

1.2.2.3.- Etapa de fractura.

La grieta continuara creciendo en tanto estén presentes esfuerzos cíclicos a tensión y/o factores de corrosión de suficiente severidad. Llegado algún momento, el tamaño de la grieta se hace 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} , y en el siguiente ciclo de esfuerzo a tensión ocurre al instante la falla súbita. Esta fractura final puede ser frágil o dúctil o una combinación de las dos.

1. 2. 3.- Característica macroscópica de la falla por fatiga.

El examen a simple vista de las piezas falladas por fatiga muestra un patrón característico, como se puede apreciar en la Fig. 1-5. Una zona presenta una superficie mate y aterciopelada, de aspecto relativamente liso, producto del

frotamiento continuo y prolongado entre los bordes de la fisura .Esta zona es la denominada de crecimiento de la grieta y presenta las llamadas “marcas de playa”.

La otra zona corresponde al área donde se produjo la fractura final, cuando se redujo la sección y el material falla por sobre carga. Esta zona puede tener un aspecto cristalino, indicando que la fractura final fue frágil, o un aspecto fibroso, indicando una fractura final dúctil.

A la primera zona se le llama, zona de fatiga, y a la segunda, zona de ruptura. El tamaño relativo entre ambas zonas nos informa acerca del grado de sobre esfuerzo aplicado a la pieza. Si la zona de fatiga es mayor que la zona de ruptura, hubo poco sobre esfuerzo, lo contrario indica que el sobre esfuerzo fue mayor. Las marcas de playa, se forman cuando se originan fractura en dos o más lugares y se interceptan en forma generalmente cóncava respecto al inicio de la falla

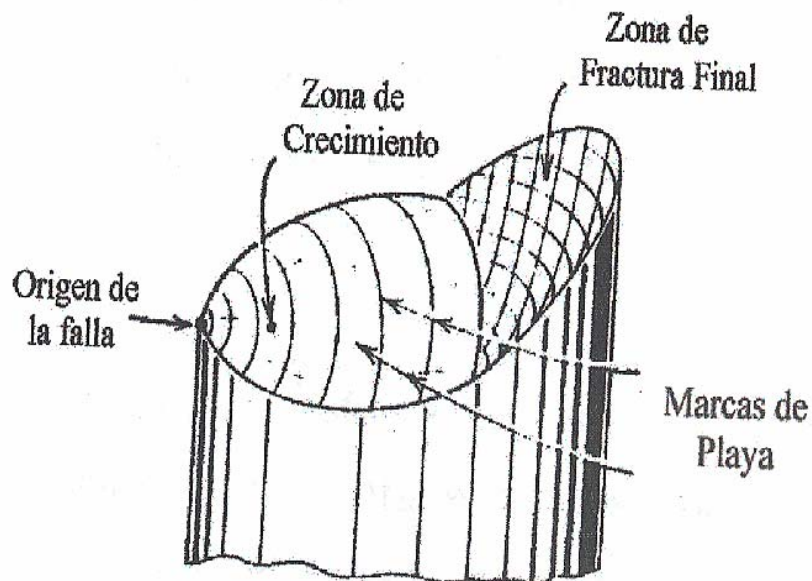


Fig. 1. 5. Diferentes zonas generadas en la superficie de fractura por el avance de la grieta^[6].

1.2.4.- Ciclos de tensión o distribución de cargas.

Dentro del estudio del fenómeno de fatiga se encuentran una gran variedad de esfuerzos fluctuantes que la producen, los cuales pueden ser tipo caótico, regular o irregular.

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 maquinarias rotativas tienden a ser de amplitud a lo largo del tiempo y repetirse con alguna frecuencia. En esta área se utilizan los siguientes términos:

$\sigma_{\text{máx.}}$ = máximo esfuerzo en el ciclo.

σ_m = esfuerzo medio = $(\sigma_{\text{máx.}} + \sigma_{\text{min.}}) / 2$

$\sigma_{\text{min.}}$ = mínimo esfuerzo en el ciclo.

Intervalo de tensiones = $\Delta\sigma_r = \sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{min.}}$

La amplitud del esfuerzo o tensión alterna es igual a la mitad del intervalo: σ_a
 $= \Delta\sigma_r / 2$

La relación de tensiones R se define como: $R = \sigma_{\text{min.}} / \sigma_{\text{máx.}}$

A continuación se presentan tres casos típicos de ciclos de fatiga, Fig. 1.- 6.:

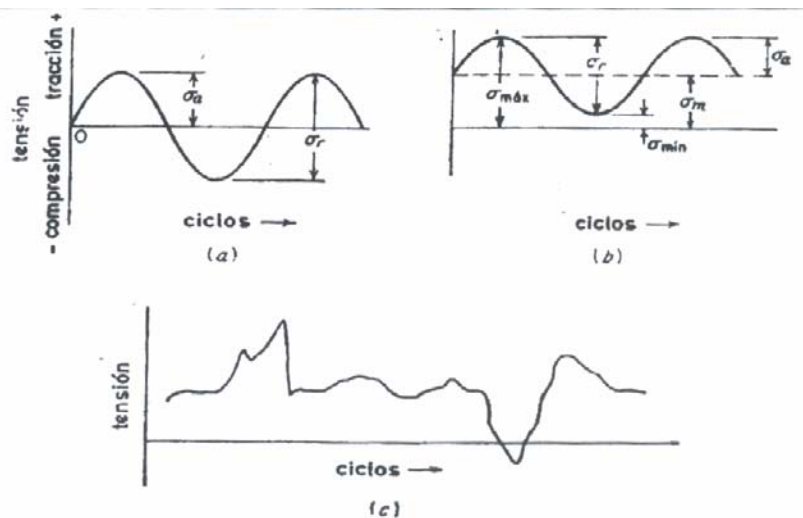


Fig. 1-6. Ciclos típicos de fatiga. [4]

Caso(a): Se trata de un ciclo de inversión completa o alterna del esfuerzo. Aquí el esfuerzo de tracción se considera positivo y el de compresión negativo. El esfuerzo máximo se considera igual al esfuerzo mínimo pero de magnitud contraria resultando medio igual a cero.

Caso (b): Ciclos de tensión repetidos o fluctuantes, en este caso el esfuerzo máximo ($\sigma_{\text{máx.}}$) y el esfuerzo mínimo ($\sigma_{\text{min.}}$) no son iguales. Ambos pueden estar en la región de tracción como se muestra en la Fig. 1-6. b, pero también pueden estar ambas en compresión o pueden tener signos opuestos.

Caso (c): Ciclo complejo de esfuerzos aleatorios o irregulares. En este caso los esfuerzos no siguen ningún patrón de aplicación.

1.2. 5.- La curva de Wöhler o S-N.

Una vez que se han realizado los ensayos de fatiga se suelen graficar los datos obtenidos en un diagrama en el cual se colocan los esfuerzos (S) en las ordenadas y el número de ciclos (N) al cual falló el material en las abscisas, de esta manera se obtiene una curva a la cual se le da el nombre de WÖHLER, ingeniero alemán y uno de los iniciadores del estudio del fenómeno de la fatiga. Por razones de sencillez se le llama también más comúnmente curva S-N. La curva obtenida divide el plano del diagrama en dos áreas, la que está por encima de la curva que representa el campo donde el material fallará y la zona por debajo de la curva que corresponde a las condiciones donde el material no fallará.

Se suelen encontrar dos tipos de curvas S-N que difieren en forma dependiendo del material, como se puede apreciar en la Fig.1- 6. Allí vemos que la curva superior presenta un punto de inflexión a partir del cual se hace horizontal, este valor de esfuerzo (S) por debajo del cual no ocurre falla para cualquier N se conoce como límite de fatiga.

La curva inferior es representativa de materiales que no presentan límite de fatiga (caso del Aluminio).

Las dos curvas ilustran la cantidad de ciclos que un material puede resistir sin que se produzca falla catastrófica, este número de ciclos representa la vida o resistencia a la fatiga del material sometido a ese nivel de esfuerzo.

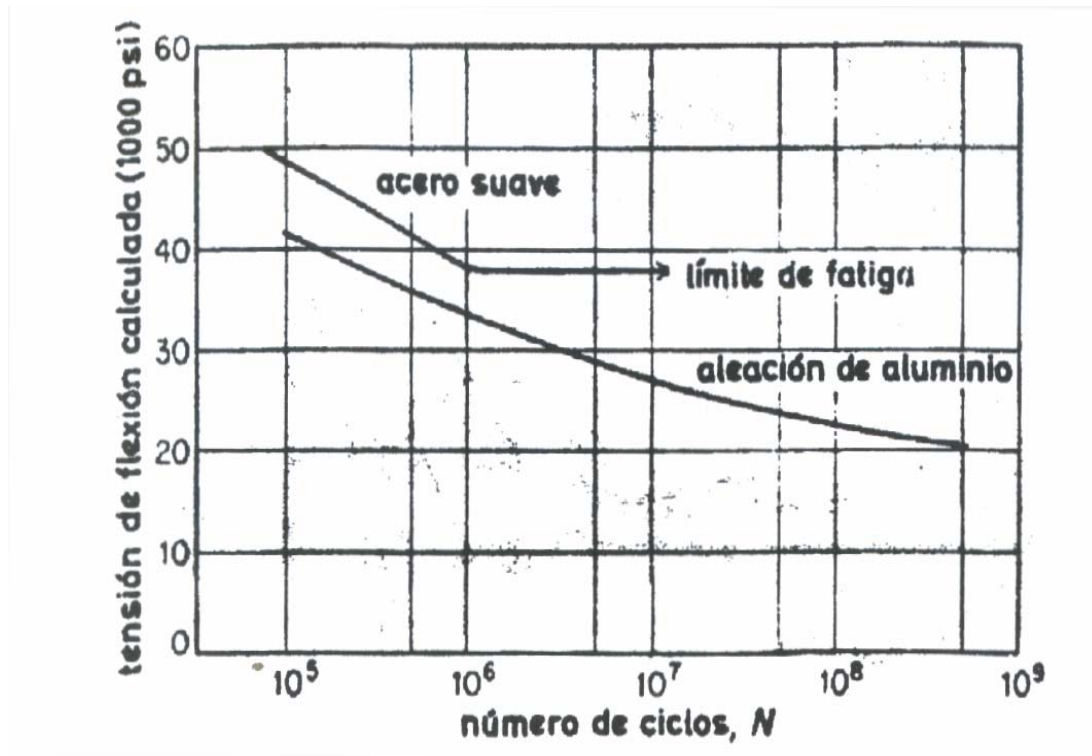


Fig. 1-7. Curvas Wöhler o curvas S-N. ^[4]

En el caso de ensayar un material y encontrarse un valor de límite de fatiga, la curva debe construirse en dos partes: la primera parte referente a la resistencia a la fatiga, que se realiza aplicando el modelo de Basquin y la segunda parte para determinar el límite de fatiga por cualquiera de los métodos existentes, como por ejemplo el método de la escalera, el cual es un método estadístico basado en el suceso menos frecuente, para obtener una aproximación del valor por debajo del cual no se presentará falla.

1.2.5.1.- Resistencia a la fatiga a través del modelo de Basquin.

Los datos de fatiga presentados por Wöhler se hicieron en una curva S-Log N; donde S representa la amplitud del esfuerzo y N el número de ciclos a falla. En forma resumida se puede expresar que el aporte de Basquin consistió en graficar los puntos con los que se obtuvo la curva de Wöhler en un papel Log-Log, allí se dio cuenta que el resultado se ajustaba bastante bien a una recta para la región de bajo clivaje. De este modo se establece la ley exponencial de la fatiga^[1].

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

$$S = S_s (2Nf)^b$$

$\Delta S/2 = S$ (amplitud de esfuerzo totalmente invertido).

S = Amplitud real de esfuerzo o resistencia a la fatiga del material.

$2Nf$ = Reversos a falla (1 ciclo = 2 reversos).

S_s = coeficiente de resistencia a la fatiga.

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

Tanto S_f como b son propiedades del material.

La ecuación de Basquin también puede ser representada por una ecuación potencial simple como:

$$S = S_F (Nf)^b.$$

1.2.5.2.- Limite de fatiga-metodo de la escalera.

Para estimar el límite de fatiga del material del presente trabajo se usará el método estadístico llamado de la escalera o método ascendente y descendente y cuya expresión matemática es la siguiente:

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

Donde

S = Límite de fatiga estimado.

X_0 = Primer nivel de esfuerzo o nivel más bajo de esfuerzo para el cual ocurre el suceso menos frecuente.

d = Incremento de tensión. (Escalón).

$A = \sum i \cdot f_i$ = Sumatoria de los sucesos menos frecuentes multiplicados por el nivel de tensiones al cual ocurre este suceso.

i = Nivel de tensiones.

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

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

El método se aplica de la siguiente manera:

Se ensaya una primera probeta al valor del límite de fatiga estimado, si esta probeta falla, el esfuerzo aplicado a la siguiente probeta se disminuye en una cantidad determinada (escalón), repitiendo este proceso hasta obtener una probeta que no falla a un número de ciclo determinado, al obtener esta probeta, se aumenta un escalón de esfuerzo para ensayar la siguiente. Este procedimiento continúa aumentando el escalón cuando la probeta no falle y disminuyendo cuando falle, en el proceso se utilizan entre 10 y 15 probetas.

La desviación estándar para el límite obtenido se calcula mediante la formula:

$$D_s = 1.620 d (N \cdot B - A^2 / N^2 + 0,029).$$

Aquí $B = \sum i^2 \cdot f_i$ = Sumatoria de los sucesos menos frecuentes multiplicados por el nivel de tensiones al cuadrado.

A pesar de utilizar un número pequeño de probetas el método de la escalera proporciona una buena estimación del límite de fatiga, siendo probado en numerosas investigaciones.

1.2.6.- Factores que afectan la vida a la fatiga.

El comportamiento a fatiga de los materiales es afectado por numerosos factores entre los que podemos citar, las condiciones superficiales de las piezas, concentración de esfuerzos, temperatura, condiciones corrosivas, micro estructura, historia termo-mecánica del material, etc. Estos factores inciden en los valores reportados por los ensayos de fatiga presentando gran dispersión aún si el material es de la misma colada. A continuación veremos la forma en que estos factores afectan el comportamiento a fatiga de los materiales.

1.2.6.1.- Condiciones superficiales.

Por lo general la mayoría de las fallas por fatiga se inician en la superficie. En estados de carga tales como flexión y torsión, el esfuerzo máximo se produce en la superficie, desencadenado por tanto el proceso de formación de grietas. Las condiciones superficiales afectan significativamente las propiedades de fatiga.

Los factores que afectan la superficie de una probeta de fatiga pueden ser divididos en tres categorías^[7]:

1) Rugosidad superficial: La resistencia a la fatiga aumenta a medida que disminuye la rugosidad, mientras menor sea esta última se minimizan los esfuerzos locales. Los diferentes acabados superficiales obtenidos por los distintos procedimientos de mecanizado afectan apreciablemente el comportamiento a la fatiga.

Las rayas que quedan sobre la superficie actúan como concentradores de esfuerzos y por consiguiente como sitios preferenciales para la nucleación de grietas. Se observa que las probetas menos pulidas presentan menor resistencia a la fatiga.

2) Cambios en las propiedades superficiales: Debido a la influencia que tiene la condición superficial sobre la resistencia a la fatiga, cualquier fenómeno que cambie la resistencia a la fatiga de la superficie del material, alterará significativamente las propiedades de fatiga. Tratamientos superficiales tales como la cementación y la nitruración en los aceros suelen mejorar las propiedades de fatiga. En cambio el electroplaqueado de la superficie suele acarrear la disminución del límite de fatiga del acero. Los recubrimientos anódicos son usualmente beneficiosos, mientras los recubrimientos catódicos producen disminución de las propiedades. Los recubrimientos de zinc y de cadmio son anódicos respecto al acero y producen mejoras en las propiedades sobre todo en condiciones de corrosión-fatiga. El cromo y el níquel son catódicos respecto al acero y el electroplateado con estos metales produce indeseables tensiones residuales y posible agrietamiento por hidrogeno.

Las condiciones particulares empleadas en la obtención del recubrimiento pueden tener un efecto apreciable en las propiedades de fatiga, puesto que producen a veces grandes variaciones en las tensiones residuales, adherencia, porosidad y dureza del plateado^[3]. El cromado y el niquelado no son recomendables para piezas sometidas a fatiga, a menos que se sometan a un proceso de granallado.

3) Esfuerzos residuales superficiales. Los esfuerzos residuales en las capas superficiales de las probetas o piezas de máquinas, bien que sean inducidos intencionalmente o accidentalmente juegan un papel importante en las propiedades de fatiga. Si los esfuerzos inducidos son de tracción la resistencia a la fatiga disminuye, por el contrario si son de compresión entonces la resistencia a la fatiga mejora.

La mayor parte de las piezas contendrán algunos esfuerzos residuales, provenientes de sus procesos de conformación o manufactura. Cualquier procedimiento como el conformado o el tratamiento térmico, que crean deformaciones locales por encima del punto de fluencia dejará tras de si esfuerzos cuando desaparezca la deformación, tomando en cuenta que el fenómeno de fatiga es

básicamente de esfuerzo a tensión, entonces se requiere prestar mucha atención para evitarlos en piezas sometidas a esfuerzos alternantes^[8].

Como ya hemos visto los esfuerzos a compresión mejoran la vida a la fatiga. Esto se explica por que a la grieta se le hace más difícil avanzar dentro de un campo de esfuerzos a compresión. Existen varios medios comunes de producir esfuerzos superficiales de compresión veamos dos de ellos:

1) Granallado: Consiste en disparar a la superficie de la pieza con un chorro de granallas (como perdigones) de acero, de hierro fundido, de cáscara de nuez o de cualquier otro material. La granalla más dura se aplica a piezas de acero y la más blanda en metales blandos no ferrosos.

2) Preesforzado: consiste en sobrecargar deliberadamente la pieza en la misma dirección que la pieza va a estar en servicio. Se aplica a piezas que durante su servicio están cargadas dinámicamente solo en una dirección.

1.2.6.2.- Tamaño de grano y dirección.

Para materiales de la misma composición se encuentra que aquellos de grano fino exhiben propiedades de fatiga superiores a los de grano grueso aunque en aceros ferríticos el tamaño de grano parece tener un efecto menor. Para aceros austeníticos y muchas aleaciones no férricas la disminución a la resistencia a la fatiga con el tamaño de grano más grande llega a ser significativa^[9].

En cuanto a la dirección de los granos se ha encontrado, que con la aplicación de la carga cíclica en dirección transversal a la dirección preferencial de los granos se obtienen propiedades de resistencia a la fatiga inferiores que a lo largo de los granos, es decir longitudinalmente.

1.2.6.3.- Composición del material.

Con respecto a la curva S-N, los materiales se dividen en dos grupos: los aceros y el titanio cuyas curvas presentan un tramo horizontal a una tensión límite determinada, que es el denominado límite de fatiga. Por otra parte la mayoría de los metales no féreos como las aleaciones de aluminio, las de magnesio y las de cobre tienen una curva de Wöhler cuya pendiente disminuye progresivamente al aumentar el número de ciclos aproximándose a una horizontal pero sin llegar serlo nunca. No tienen por tanto un verdadero límite de fatiga. En estos casos es práctica común caracterizar las propiedades de fatiga expresando la resistencia a la fatiga para un número de ciclos convenidos arbitrariamente.

1.2.6.4.- Tratamientos térmicos.

Dependiendo del tratamiento aplicado las propiedades de resistencia a la fatiga pueden ser significativamente afectadas por los tratamientos térmicos. Se puede decir que, generalmente las propiedades de fatiga aumentan con cualquier tratamiento que mejore las propiedades de tracción.

1.2.6.5.- Soldadura.

No importa que técnica de soldadura se use. Los materiales soldados deben ser considerados como metalúrgicamente no homogéneos. La zona de unión constituye una región problemática, no solo por el gradiente de homogeneidad sino también por que existe la posibilidad de agrietamiento en el cordón de soldadura o en el metal base adyacente debido al post tratamiento, también esfuerzos residuales, penetración incompleta del metal, poros, inclusiones, micro grietas, cavidades internas, etc. Por todo esto siempre tendremos en los metales soldados una resistencia a la fatiga inferior a la del metal base.

1.2.6.6.- Inclusiones.

El término inclusiones, abarca una gran cantidad de componentes metálicos, no metálicos e ínter metálicos, cada uno con una cantidad igual de propiedades mecánicas y químicas. La forma, tamaño, propiedades y coherencia con la matriz de dichas inclusiones afectará el comportamiento como generador y acumulador de esfuerzos en el material. De esta manera partículas que no tengan una buena cohesión con la matriz presentarán las mismas características que produciría la presencia de poros. Por otra parte, partículas coherentes con la matriz pueden afectar la distribución de esfuerzos locales y producir un aumento en el grado de deformación localizada si estas tienen módulos elásticos diferentes al de la matriz.

Por lo general cualquiera de estas partículas tienden a acelerar la propagación de grietas y disminuir el tamaño de grieta crítica, pero algunas pueden mantener el mismo comportamiento de la matriz frente al proceso de fatiga. La forma de las partículas también influye en el proceso. Las que tienen una forma esférica no son afectadas por la deformación de la matriz. En cambio las aciculares pueden fracturar por la deformación local no homogénea, siempre y cuando no sean paralelas al esfuerzo y pueden ser más dañinas si están ubicadas en una región de concentración de esfuerzos y sometidas a altos niveles de esfuerzo local en servicio.

1.2.6.7.- Temperatura.

Por lo general las pruebas de fatiga se realizan a temperatura ambiente. Sin embargo se pueden presentar dos casos a saber:

- 1) Fatiga a temperaturas bajas. Los ensayos de los metales a la fatiga, a temperaturas inferiores a la ambiente muestran que la resistencia a la fatiga aumenta con el descenso de la temperatura. Aunque los aceros se hacen más sensibles a la

entalla en fatiga a temperaturas bajas, no hay pruebas de cambios bruscos en las propiedades de fatiga por debajo de una temperatura de transición de dúctil a frágil.

2) Fatiga a temperatura elevada. En general, la resistencia a la fatiga de los metales, disminuye al aumentar la temperatura por encima de la ambiente. Es una excepción el acero suave, que muestra un máximo de resistencia a la fatiga a temperaturas de entre 200°C y 300°C . Cuando la temperatura se eleva, muy por encima de la ambiente, va adquiriendo más importancia la fluencia lenta (creep) y a las temperaturas altas (superiores a la mitad del punto de fusión) llega a ser la causa de las fallas. El tránsito del fallo por fatiga al fallo por fluencia lenta, acarrea una variación del tipo de fractura, que pasa a ser la intercrystalina usual de la fluencia lenta en lugar de la transcrystalina típica de la fatiga.

Los materiales férreos que suelen mostrar un límite de fatiga a temperatura ambiente ya no lo tienen cuando se ensayan a temperaturas superiores a 420°C aproximadamente. Desaparece el codo de límite de fatiga en las curvas S-N.

1.2.6.8.- Efecto del tamaño de las piezas.

No existe una buena correlación de los ensayos hechos en laboratorios con las probetas pequeñas, con piezas grandes de máquinas. Se ha concluido que existe un efecto tamaño. La resistencia a la fatiga de piezas grandes es más baja que la de probetas pequeñas. Los datos experimentales del efecto tamaño en fatiga son contradictorios y no muy completos. Los investigadores presentan dos posibles causas por las cuales se produce el efecto tamaño:

a) Se sostiene que se produce por la variación de la relación entre el área superficial y el diámetro de la probeta. La variación del área superficial, es de importancia, puesto que generalmente las grietas de fatiga se inician en la superficie. Por otra parte en las probetas lisas o entalladas cargadas a flexión o torsión decrece el

gradiente de tensiones a través del diámetro y aumenta el volumen del material sometido a tensiones altas a medida que crece el diámetro.

b) Un segundo enfoque dice que el efecto tamaño se produce más bien por un gradiente de tensión. Esta explicación se sostiene en el hecho que cuando se introduce una entalla en la probeta con la que se origina un gradiente de tensiones, se observa un efecto de tamaño definido^[3].

1.2.6.9.- Efecto de la concentración de tensiones en la fatiga.

Las irregularidades geométricas tales, como roscas, filetes, chaveteros, cambios de sección, rayas, rugosidad, inclusiones, poros, que suelen tener las piezas o elementos de máquinas actúan como concentradores de tensión.

Cuando se introduce un concentrador de tensiones tal como una entalla o agujero, la resistencia a la fatiga disminuye notablemente. Esto lleva a extremar los cuidados a la hora de diseñar y fabricar piezas, evitando al máximo la presencia de estos concentradores de tensión, que desencadenan el proceso de falla por fatiga.

El análisis de componentes que han fallado en servicio debido a la acción de cargas cíclicas revela que en muchos de estos casos el inicio de la (s) grieta (s) de fatiga se encuentran en algún punto de la periferia de la entalla. La grieta se forma aquí debido a que los esfuerzos cíclicos en la entalla y cercanos a su periferia son mayores que los esfuerzos cíclicos nominales alejados de la entalla.

El efecto de las concentraciones de tensiones en la fatiga se estudia generalmente ensayando probetas entalladas, casi siempre con entallas en ∇ o circulares. La presencia de una entalla en una probeta produce tres efectos:

- 1) Un incremento o concentración de tensiones en el fondo de la entalla.

- 2) Un gradiente de tensión desde el fondo de la entalla hasta el centro de la probeta.
- 3) Un estado triaxial de tensiones en la base de la entalla.

La vida de las probetas entalladas que fallan en fatiga es la suma del número de ciclos requeridos para iniciar una grieta en la superficie y desarrollarla en los alrededores de la entalla y de la raíz de la misma, y de los ciclos requeridos para propagar esta grieta a través del área remanente de la sección transversal, la cual es sometida únicamente a los esfuerzos cíclicos nominales aplicados. La relación del número de ciclos que tienen lugar en estas dos etapas dependerá del material, geometría de la entalla, tamaño de la probeta y niveles de esfuerzos. De esta manera, las grietas se pueden formar rápidamente en la raíz de la entalla, pero a niveles de esfuerzo bajos, la propagación a través de la probeta puede ocupar la mayor parte de la vida de servicio.

1.2.6.9.1.- Factor de concentración de esfuerzos (K_I).

Se ha definido un parámetro llamado factor de concentración de esfuerzos K_I , que no es más que la relación del esfuerzo local máximo en la región de la discontinuidad con el correspondiente esfuerzo nominal. El esfuerzo nominal puede basarse bien en la sección transversal neta a través de la discontinuidad o en la sección transversal bruta de la pieza ignorando la discontinuidad.

El K_I puede definirse como:

$$K_I = S_{ent.} / S_{nom.}$$

Donde $S_{ent.}$ Es el esfuerzo en la raíz de la entalla y $S_{nom.}$ Es el esfuerzo nominal.

El factor de concentración de esfuerzos provee una descripción sencilla y conveniente de las condiciones de esfuerzo en la raíz de la grieta, pero su utilidad es limitada debido a que no ofrece información sobre la distribución de esfuerzos

alrededor de la entalla. El K_t nos da una medida de la severidad de un concentrador de esfuerzo.

1.2.6.10.- Efecto de la tensión media en la fatiga.

La presencia de un componente de esfuerzo medio tiene un efecto significativo sobre las fallas. Cuando al componente alternante se le agrega un componente medio a tensión, el material falla a esfuerzos alternantes inferiores a los que causan la falla bajo cargas totalmente alternantes ($S_m = 0$)

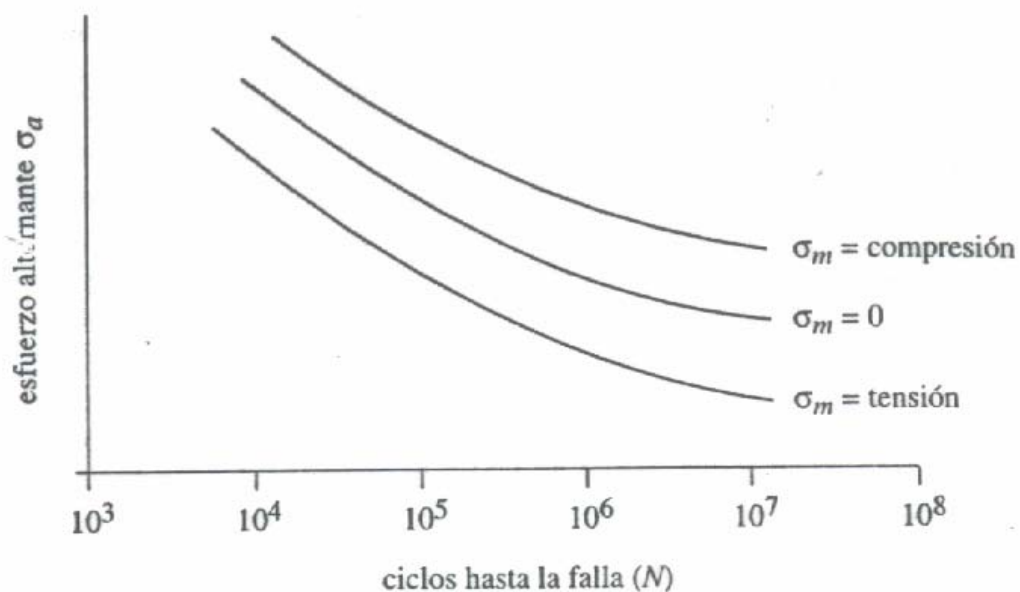


Fig. 1.- 9. Efecto del esfuerzo medio en la vida a la fatiga^[8]

En la Fig. 1-9, se muestra para un material hipotético la comparación del material cuando su esfuerzo medio es igual a cero con otros dos casos: un esfuerzo medio a compresión y un esfuerzo medio a tracción.

Se puede ver que, cuando el esfuerzo medio es a compresión la resistencia a la fatiga y vida a la fatiga aumentan, pero cuando es a tracción disminuye.

1.2.6.11.- Efecto de la corrosión.

Un ambiente corrosivo aumenta la rugosidad de la superficie de un material y por consiguiente aumenta la cantidad de lugares de posible nucleación de grietas.

1.2.6.12.- Fatiga térmica.

Es el resultado de las variaciones cíclicas de temperatura. Las expansiones y contracciones térmicas causan esfuerzos heterogéneos en el material, pudiendo ocasionar agrietamientos tanto en la superficie como en el interior del material.

1.2.7.- Fatiga-corrosión.

1.2.7.1.- Generalidades.

La corrosión es el fenómeno según el cual los metales tienen tendencia, bajo la acción de agentes atmosféricos o de reactivos químicos, a volver a su estado original de óxido, sulfuro, carbonato, más estable con relación al medio considerado, sufriendo así un deterioro de sus propiedades^[10].

La mayoría de los componentes de ingeniería y estructurales interactúan con el aire, agua y agua salada. La acción corrosiva de estos elementos sobre la superficie de un metal puede provocar la alteración de la superficie, formándose picaduras o grietas en ciertos puntos, dando lugar a una pérdida considerable en la resistencia a la fatiga si el material es sometido a esfuerzos fluctuantes.

El agrietamiento de un metal como resultado de la acción combinada del medio corrosivo y cargas repetidas o alternantes se llama fatiga-corrosión. El daño ocasionado es por lo general mayor que la suma de los daños que causa la corrosión o la fatiga si actúan por separado^[11].

Se presentan algunas diferencias entre las fallas debidas a fatiga-corrosión y las fallas por fatiga normal.

- La superficie de fractura, frecuentemente cambia de color por el proceso de corrosión.

- Normalmente se producen mucho más grietas en fatiga-corrosión que en una falla por fatiga normal .Esto se debe a que el ataque electroquímico se reduce a medida que la grieta crece; en consecuencia, la velocidad de propagación de la grieta disminuye, dando tiempo a que se formen más grietas.

- Las grietas de fatiga-corrosión son típicamente transgranulares y con frecuencia ramificadas. Las grietas de fatiga son de manera similar transgranulares (con excepción del Pb, el Sn y algunas aleaciones de aluminio), pero es raro encontrar más de una grieta principal y la grieta se inicia desde la superficie. En fatiga-corrosión, a menudo pero no necesariamente siempre se forman en principio picaduras por corrosión en la superficie del metal, iniciándose las grietas en las bases de estas picaduras.

1.2.7.2.- Mecanismo de la fatiga-corrosión.

La acción de las tensiones cíclicas rompe localmente la película superficial de óxido y facilita la formación de picaduras. Se producen muchas más picaduras en la fatiga con corrosión que en el ataque corrosivo en ausencia de tensiones alternas. Las tensiones cíclicas también remueven y desalojan a los productos de la corrosión que podrían proteger contra el ataque posterior. El fondo de las picaduras es más anódico que el resto del metal, por lo que la corrosión progresa en profundidad, ayudada por la destrucción de la película de óxido que producen las tensiones cíclicas. El agrietamiento ocurrirá cuando las picaduras lleguen a ser suficientemente agudas para producir una elevada concentración de tensiones.

En resumen se puede decir que la fatiga-corrosión es un proceso electroquímico ya que algunas regiones de la superficie del metal son anódicas respecto a otras como consecuencia de las irregularidades en la superficie o las diferencias locales de concentración de oxígeno. El proceso se puede evitar con protección catódica o con inhibidores.

1.2.8.- El recubrimiento Ni-Co-B.

1.2.8.1.- Introducción.

Las técnicas de modificación de superficie de los metales, con el propósito de mejorar sus propiedades frente a la corrosión, desgaste y abrasión se vienen haciendo desde hace décadas.

Desde los tradicionales tales como la electrodeposición, capas superpuestas por soldadura, termo rociado y tratamientos termoquímicos a nuevas tecnologías tales como deposición física en fase de vapor (PVD), deposición química en fase de vapor (CVD), implantación iónica y técnicas de modificación de superficie por láser.

Hoy en día la técnica de electro deposición en una proporción que supera el 95% es la más aplicada y el resto corresponde a nuevas tecnologías. Sin embargo esta proporción tiende a bajar, ya que muchos sectores declinan la aplicación de la electro deposición debido a la aprobación de nuevas leyes ambientales. Sin embargo el uso de nuevos procesos puede resultar costoso para muchas empresas que se dedican a la aplicación del electroplateado. Así que una buena alternativa para el sector es investigar, buscar nuevos procesos que concilien los aspectos económicos, técnicos y ambientales.

Todavía es de uso frecuente el níquel, el cromo y el cobre para el rescate de piezas con fallas de maquinado o componentes desgastados ^[12].

El plateado de níquel es aún usado ampliamente para la protección de partes de acero frente al desgaste y a la corrosión, mientras el cromo duro provee al acero de una gran resistencia al desgaste y a la abrasión. El electroless níquel no es un proceso nuevo y es frecuentemente usado en accesorios de máquinas para hacerle frente al desgaste y a la corrosión.

El potencial de esta clase de recubrimientos ha sido extendido recientemente con la incorporación del boro y el fósforo, para incrementar la resistencia al desgaste y a la corrosión. Otros recubrimientos electro depositados compuestos de Ni y Co conteniendo una fase dura no metálica han sido reportados, teniendo una mejor resistencia al desgaste.

La electro deposición es considerada como una alternativa viable para el gran desarrollo del área de los recubrimientos. Esta técnica ha sido usada exitosamente para el depósito de metales, semiconductores, recubrimientos duros, polímeros, etc.

1.2.8.2.- Características principales de la aleación Ni-Co-B ^[13].

- **Composición química:** La aleación tiene una composición (% en peso) de: 50-75% de Ni, 25-50% Co y 1-5% de B.

- **Propiedades mecánicas:**

 - Resistencia a la tracción: 771 MPa.

 - Límite de fluencia: 675 MPa.

 - Resistencia a la ruptura: 593 MPa.

 - Ductilidad: 15% (en dos pulgadas).

 - Dureza: 1.158 (HV 100 grs.)

- **Punto de fusión:** 1.291⁰C.

•**Otras características:**

- Apariencia lisa y brillante (blanco plateado).
- Resistencia al desgaste.
- Bajo coeficiente de fricción.
- Buena resistencia a la corrosión.
- Alta dureza
- Buenas propiedades magnéticas
- Estructura homogénea.
- Resiste altas temperaturas.
- Por sus propiedades químicas y físicas puede sustituir ventajosamente a recubrimientos como el cromo duro, níquel-cromo, níquel-paladium.
- Puede ser aplicado a sustratos de diferente configuración o formas.

1.2.8.3.- Método de deposición de la aleación Ni-Co-B.

La aleación de Ni-Co-B es depositada sobre el sustrato por el método electrolítico.

Un par de ánodos contruidos de níquel electrolítico y un cátodo que lo constituye el sustrato a ser recubierto, son conectados a una fuente de poder y luego sumergidos en el baño. La fuente de poder produce una corriente de onda cuadrada a una frecuencia de 1000 Herzt y tiene un rendimiento de 30%. La densidad de corriente es de 0,018 a 0,076 Amps/cm². Por electrolisis la corriente produce O₂ en los ánodos y H₂ en los cátodos. Cuando se quita o se desactiva la corriente la capa de difusión de gas se dispersa. La producción alterna de O₂ y H₂ y la desaparición de la capa de difusión previene la oxidación de los ánodos y la polarización en el sustrato (cátodo).

1.2.8.31.- Composición del baño.

El baño está compuesto de sales de níquel y cobalto, ácido bórico y amino boro.

Por litro de solución se tiene:

0,75-1.1 moles de sulfato de níquel.

0,250-0,3125 moles de cloruro de níquel.

0,0625-0,125 moles de sulfato de cobalto.

0,500 moles de ácido bórico y

0,0125 moles de dimethylamino boro.

El baño es calentado a una temperatura de 65⁰C. El pH es ajustado a un valor entre 3.8 y 4.0. El baño también incluye 2 ml de un agente humectante y 0,25 ml de un agente relajante por litro de solución. El agente humectante puede ser un sulfonato o un alcohol. Su efecto es bajar la tasa a la cual se depositan los iones de Ni, Co y B sobre el sustrato, lográndose así una deposición más uniforme.

El relajador de tensión previene que el hidrógeno quede atrapado en la aleación o entre la aleación y el sustrato. Si el hidrógeno queda atrapado producirá una aleación frágil. Así que el agente relajador de tensión hace que se produzca una aleación dúctil.

1.2.8.4.- Equipo utilizado para hacer el recubrimiento de Ni-Co-B.

El baño puede ser preparado en un tanque de 40 X 30 X 30 cms (Fig. 1-10). El cual es equipado con un agitador de aire, una bomba de filtración, un calentador de teflón, un controlador de pH y un monitor para el análisis químico de la solución.

El tanque se divide en tres secciones por medio de dos diafragmas acrílicos microscópicamente perforados.

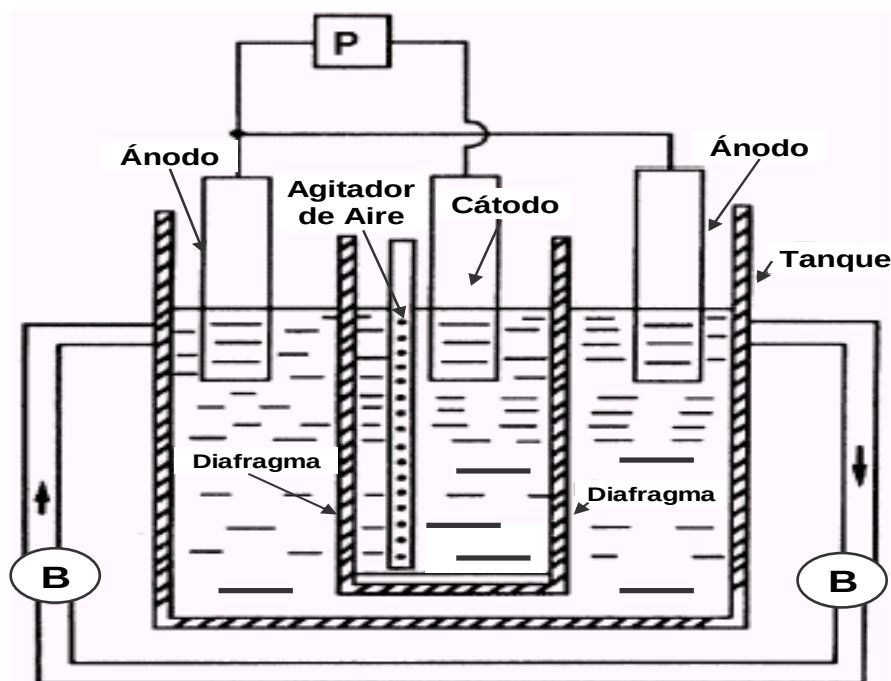


Fig.1-10. Equipo experimental para la electro deposición de la aleación de Ni-Co-B.^[13]

La sección del centro constituye una celda catódica y las otras dos secciones celdas anódicas. El sustrato a ser recubierto es sumergido en la celda catódica. Los ánodos están constituidos por dos barras de níquel electrolítico recubiertos con polipropileno y son colocados cada uno en las celdas anódicas. Los ánodos son conectados por el extremo superior a la fuente de poder (Fig. 1-10). La circulación del baño en el tanque se logra a través de un sistema de filtración y agitación de aire. La circulación y agitación ayuda a mantener limpios los ánodos, beneficiando la reacción de la aleación, manteniendo la concentración de iones igual en toda el área del tanque, además de dar una apariencia brillante a la aleación. Una bomba suministra continuamente el baño en las celdas anódicas a través de un filtro de carbón activado, logrando de esta forma la circulación y la remoción de

contaminantes, tales como boruros de níquel o de cobalto. El sistema de agitación de aire opera a una presión de 25 psi, para hacer circular la solución en la celda catódica.

1.2.8.5.- Activación de la superficie del sustrato.

Previo a colocar el sustrato en el baño, debe ser pretratado, lavado y activado. El pretratamiento consiste en limpiar el sustrato con alcohol, preferiblemente isopropanol y luego limpiar con una solución aniónica. Se prefiere alcohol Isopropílico para el lavado, por que tiene solamente tres carbonos y no deja un film de carbón sobre el sustrato. Seguidamente el sustrato es limpiado anódicamente, en una solución alcohólica por dos minutos en presencia de una corriente la cual tiene una densidad de $0,08 \text{ amps/cm}^2$, la solución contiene NaOH, Na_2CO_3 y $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$.

Luego es enjuagado con agua caliente destilada y agua destilada fría, con lo cual se remueven todos los álcalis excepto el silicato de sodio. El silicato da una capa protectora al sustrato. El siguiente paso es sumergir, el sustrato en un baño ácido por cinco minutos. El baño contiene 1% de ácido sulfúrico y 0,1% de ácido clorhídrico. El sustrato es entonces enjuagado en agua destilada.

Después de los baños alcalino y ácido, el sustrato es activado anódicamente y catódicamente, en una solución de HCl y NiCl_2 . La activación anódica se realiza pasando una corriente a través del baño activador, por dos minutos.

Con esto se logra remover los óxidos formados sobre la superficie del sustrato. En la misma solución se activa el sustrato catódicamente, haciendo pasar un corriente por seis minutos. La activación catódica forma una capa meta estable de Ni sobre el sustrato. A continuación el sustrato es lenta y suavemente sumergido en agua destilada, después de esto ya está listo para ser sumergido en el baño en el cual se realiza el proceso de electro deposición de la aleación Ni-Co-B.

1.3.- ANTECEDENTES DE ESTUDIOS REALIZADOS EN EL ÁREA.

CAMPILLO et al.^[14] (1996). Llevaron a cabo un estudio donde caracterizaron el comportamiento a la corrosión de la aleación electrolítica Ni-Co-B depositada sobre un acero de bajo carbono (AISI 1045). Las soluciones usadas fueron: HCl 0.1 M, H₂SO₄ 0.1 M y KOH al 28%. Todos los ensayos fueron realizados a temperatura ambiente. Los resultados obtenidos mostraron que la solución de ácido sulfúrico produce el daño más grande en el recubrimiento cuando se le compara con las otras dos soluciones. Por otra parte las tasas de corrosión registradas fueron muy bajas, mostrando que la aleación Ni-Co-B ofrece buena resistencia a la corrosión. Este comportamiento podría ser debido a la formación de una o varias capas de pasivación en el recubrimiento.

BERRIOS et al.^[16] (1998). Realizaron estudios sobre el efecto del espesor de un depósito de EN sobre las propiedades mecánicas de un acero AISI 1045. En esta investigación se encontró que en los depósitos de aproximadamente 7µm de espesor, después de un post tratamiento térmico a 200⁰C por 60 minutos, el material se comporta similarmente al substrato no recubierto, lo cual es atribuido a un alto contenido de fósforo (> 10%) a partir del cual se generan esfuerzos residuales de compresión mejorando con ello la resistencia a la fatiga del material recubierto. Por otra parte a medida que el contenido de fósforo en el depósito disminuye los esfuerzos residuales predominantes en el recubrimiento son los de tracción, produciendo entonces una disminución en la resistencia a la fatiga en el substrato.

ORTIZ Y MARIÑO^[16] (2000). Evaluaron el comportamiento a la fatiga y corrosión-fatiga de un acero SAE 4140 recubierto con cromo duro. Los ensayos se llevaron a cabo en condición de flexión rotativa. Se realizaron ensayos de fatiga al aire para el material base y para el material recubierto, así como ensayos de corrosión-fatiga para el material base y para el material recubierto utilizando una solución salina con 3% de NaCl. Los esfuerzos a los cuales se hicieron los ensayos

representaron una fracción del esfuerzo de fluencia tanto del material base como del material recubierto.

Los resultados de fatiga al aire del material recubierto revelaron 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. Para la condición de corrosión-fatiga del metal base, se produjo una disminución que varía entre 81 y 92% respecto al material base ensayado al aire. Para la condición de corrosión-fatiga del material recubierto se encontró una disminución de hasta 90% respecto al material recubierto ensayado al aire.

El estudio fractográfico realizado en este trabajo reveló una buena adherencia del recubrimiento y la formación de múltiples inicios de grietas de fatiga, lo cual indica que aparentemente el recubrimiento actuó como un concentrador de esfuerzos alrededor de toda la probeta, incidiendo muy probablemente en la disminución de la resistencia a la fatiga.

A. PERTUZ et al.^[17] (2000). Trabajando con un acero SAE 4140 templado y revenido mostraron que recubriendo el material con un depósito de electroless de Ni-P se produce una significativa reducción de la vida a la fatiga del material.

La reducción de la vida a la fatiga del material recubierto, para un esfuerzo alternante de 580 MPa alcanzó un 68%, mientras que para un esfuerzo de 478 MPa, la reducción estuvo alrededor de un 88%. Esta investigación fue hecha con probetas entalladas (0,5mm de longitud) y no entalladas, con y sin recubrimiento.

Los ensayos realizados con las 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.

Esta disminución en las propiedades de fatiga es comparable al reportado por las probetas recubiertas sin entalla, lo cual sugiere que el depósito de EN actúa como una superficie fuente de grietas, causando una significativa disminución en las propiedades de fatiga del sustrato.

Para el caso de las probetas entalladas y recubiertas, la reducción se incrementó por encima del 78% a altos esfuerzos, mientras que a bajos esfuerzos la pérdida es similar a la de las probetas entalladas y no recubiertas.

Una de las conclusiones de este trabajo es que, la disminución en la vida a la fatiga de las muestras recubiertas sin entalla ocurre como resultado del paso de las grietas desde el recubrimiento hacia el sustrato. Por otra parte los investigadores encontraron evidencias fractográficas de grietas secundarias a lo largo de la intercara, indicando una pobre adherencia del recubrimiento al sustrato, de lo que se desprende que la intercara no es capaz de soportar los esfuerzos aplicados.

CAMPILLO et al. ^[18] (2002). Realizaron estudios con el fin de caracterizar la aleación Ni-Co-B y su posible aplicación como un recubrimiento resistente a la corrosión en la electrólisis por agua. Usaron como material base acero inoxidable 304. Obtuvieron los siguientes resultados:

1.- Análisis químico de la aleación:

<i>Ni % en peso</i>	<i>Co %en peso</i>	<i>B %en peso</i>
71,28	26,26	1,96

2.-Microestructura: La interfase-depósito-matriz exhibe un recubrimiento uniforme y muestra aparentemente una buena adherencia.

3.-Dureza. La dureza promedio 750-950 HVN (10 gr.)

4.- Conductividad térmica: 0,7394 Cal/cmS°C.

5.- Conductividad eléctrica: $6,89 \cdot 10^{-7}$ Mohs/m.

6.- Resistencia eléctrica: $4,428 \cdot 10^3 \Omega$.

El estudio mostró que la aleación Ni-Co-B, tanto como por su resistencia a la corrosión como por su excelente actividad electro catalítica y bajo costo puede sustituir ventajosamente a electro catalizadores como la plata y el platino los cuales tienen elevados costos económicos.

2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1.- MATERIAL.

El metal base, un acero SAE 4140 fue adquirido en forma de barras de 6 metros de longitud y un diámetro de 13 mm. La empresa proveedora FERRUM, C. A posee la certificación ISO 9000. El certificado de calidad suministrado por la empresa especifica la composición química y las propiedades mecánicas del acero, las cuales se presentan en las tablas 2-1y 2-2 respectivamente.

Tabla 2-1. Composición química del acero SAE 4140.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Cu
0,42	0,26	0,82	0,016	0,026	1.00	0,17	0,014	0,20

Tabla 2-2. Propiedades mecánicas del acero SAE 4140.

Resistencia a la tracción (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Elongación (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)
1.118	818	15	50	325

2.2.- ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS.

Tomando en cuenta los objetivos del trabajo y adoptando las normas ASTM E739 y ASTM A370 se elaboraron 140 probetas de fatiga y 8 de tracción. En las Fig. 2-1 y 2-2 se muestran las probetas con sus dimensiones ajustadas a las normas antes mencionadas.

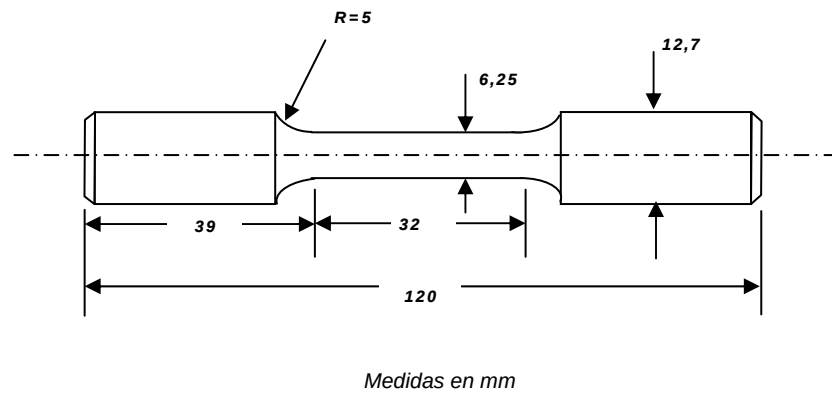


Fig. 2-1. Probeta de tracción.

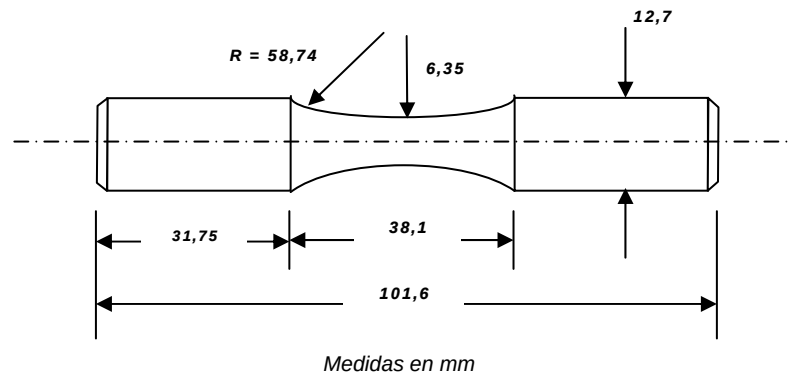


Fig. 2-2. Probeta de fatiga.

2.2.1.- Pulido de las probetas.

Una vez dimensionadas las probetas de fatiga y tracción se procedió a lijar cada una de ellas hasta llevarlas a una forma especular. El lijado se hizo con papel abrasivo de SiC en series de números 400-500-600-y 1200, en seco y en dirección axial al eje de la probeta. El proceso se realizó en un torno tipo MD 65, ubicado en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de los materiales de la UCV. Con el lijado realizado se eliminaron las entallas circunferenciales generadas durante el maquinado, que pudieran ser fuentes de inicio de grietas durante los ensayos de fatiga.

2.3.- DEPOSICION DEL RECUBRIMIENTO.

A una cantidad de 70 Probetas de fatiga, 3 de tracción y 3 probetas rectangulares (de acero de herramientas para medir la dureza del recubrimiento), fueron cuidadosamente embaladas y enviadas a Ciudad México donde se les hizo el recubrimiento de Ni-Co-B. El método de deposición utilizado fue el electrolítico.

2.4.- ENSAYOS DE TRACCION.

Se ensayaron en total seis probetas de tracción, tres de metal base y tres con el recubrimiento Ni-Co-B, cantidad pautada por las normas ASTM370^[18] para reportar confiablemente las propiedades estáticas del material. Los ensayos se realizaron en una máquina marca INSTRON modelo 8052, la cual tiene una fuerza máxima de 25 toneladas y un desplazamiento máximo de 10 cm.



Fig. 2-3. Máquina INSTRON para ensayos de tracción.

El sistema aplica cargas a las probetas mediante un actuador hidráulico en el transcurso del ensayo, el cual es controlado por un programa de computación para ensayos mecánicos. Previo al montaje en la máquina de ensayo, a las probetas se les midió el diámetro con un vernier digital. Los ensayos se realizaron a una velocidad de 3 mm/min. 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). Se hicieron las mediciones del diámetro final de las probetas para calcular entonces el área final e inicial de la sección transversal.

2.4.1.-Corrección por deformación elástica.

Como ya vimos anteriormente, el programa de computación que controla el ensayo permite obtener un registro de la carga aplicada (F_i) y el alargamiento de la probeta (Δl_i), pero sin la corrección por deformación elástica de los componentes de la máquina involucrados en el sistema de carga, por tanto se requiere hacer una corrección del alargamiento de la probeta.

La corrección se hace mediante la siguiente fórmula:

$$(\Delta l_i)_{\text{corr.}} = \Delta l_i - F_i * (K_{\text{teo}} - K_{\text{exp}}) / (K_{\text{teo}} * K_{\text{exp}})$$

Donde:

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

Δl_i = Elongación sin corregir de la probeta.

F_i = Fuerza con la que se carga la máquina.

$K_{\text{teo.}}$ = Rigidez teórica de la probeta.

$K_{\text{exp.}}$ = Rigidez experimental del conjunto.

Por otra parte: $K_{\text{teo}} = A_0 * E / l_0$ y $K_{\text{exp.}} = \Sigma F_i / \Sigma \Delta l_i$ (solamente con los puntos de la zona recta de la curva Fuerza-elongación)

A_0 = área inicial de la sección transversal de la zona de ensayo.

$$A_0 = \pi * (D_0)^2 / 4$$

E = Modulo de elasticidad del acero.

L_0 = longitud inicial de la sección de ensayo.

2.4.2- Obtención de la curva Esfuerzo-Deformación Real.

Con los valores obtenidos de $(\Delta l_i)_{corr.}$ Para cada estado de carga correspondiente (F_i), se generó la curva esfuerzo-deformación real (σ vs. ϵ) a partir de la curva esfuerzo-deformación ingenieril (S vs e).

Donde:

$$S_i = F_i / A_0 \quad \text{Esfuerzo ingenieril}$$

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

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

$$\epsilon_i = \ln(1 + e_i) \quad \text{Deformación real.}$$

Para cada probeta se obtuvo entonces los valores de:

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

Con los valores obtenidos se calculó un promedio con su desviación estándar, tanto para el material base como para el material recubierto.

Los valores de reducción de área en % para lo cual se midieron los diámetros finales (en la zona de fractura) de cada probeta también se promediaron para las dos condiciones del material: sin recubrir y recubierto.

2. 5.-ENSAYOS DE FATIGA.

Los ensayos de fatiga se realizaron en una máquina de flexión rotativa (Fig. 2-5) marca Fatigue Dynamics inc., modelo RBF-200, con una potencia de $\frac{1}{2}$ HP, diseñada para aplicar cargas reversibles de flexión en voladizo, sobre probetas cilíndricas con una longitud entre 80 y 90 mm. Esta máquina consta de las siguientes partes:

- Un contador de ciclos, que puede registrar desde 100 hasta 9.999.9900 ciclos.
- Un regulador de velocidad, que puede variar de 500 a 10.000 r.p.m.
- Una barra calibrada, con un contra peso que permite aplicar el momento flector desde 0 hasta 200 lbf*pulg (14 Kg-cm).
- Mordazas con diámetro de $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ pulg.
- Un interruptor de apagado automático.

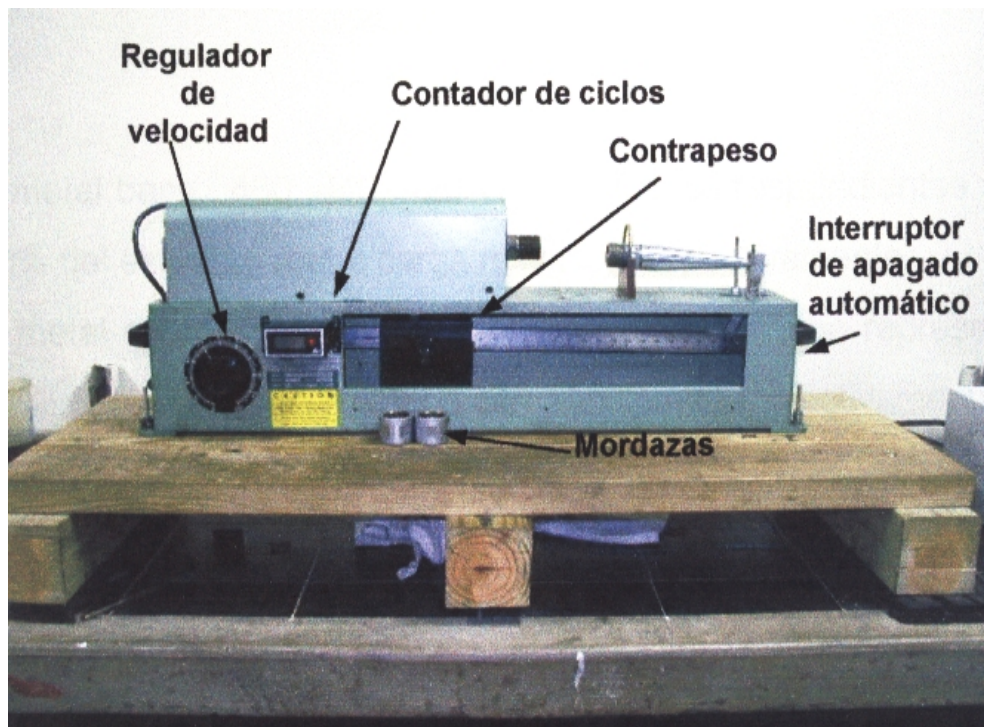


Fig.2-4. Máquina para ensayos de fatiga en flexión rotativa.

Para obtener las ecuaciones de Basquin se ensayaron seis probetas para cada nivel de esfuerzo, un total de 24 para cada condición del material. El nivel de esfuerzo necesario en cada ensayo se aplica a través de la barra calibrada en función del momento flector. Esta barra calibrada va unida a un eje cónico que a su vez sostiene a la probeta en sus extremos.

2.5.1.-Cálculo del momento flector.

Para calcular el momento flector aplicado a las probetas en cada nivel de esfuerzo se utiliza la ecuación que relaciona el momento flector con el esfuerzo aplicado:

$$S = M \cdot C / I \quad \text{de donde } M = S \cdot I / C$$

M = Momento flector.

S = Esfuerzo aplicado.

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

C = D/2, D = diámetro de la probeta.

Para el caso de una barra de sección circular, se tiene que:

$$I = \pi \cdot (D_0)^4 / 64$$

Sustituyendo se tiene que:

$$M = S \cdot [\pi \cdot (D_0)^4 / 64] / D / 2 = S \cdot \pi \cdot D^3 / 32$$

$$M = 0,0982 \cdot S \cdot D^3 [\text{Lbf} \cdot \text{pulg.}] \text{ Ec. del momento de la máquina.}$$

La barra que aplica el momento está calibrada en libras y pulgadas, por tanto es necesario expresar el esfuerzo que está en MPa llevarlo a Lbf/pulg² y el diámetro en mm a pulgadas de tal manera que se obtenga el momento flector en las mismas unidades en que está calibrada la barra de momento de la máquina de fatiga.

$$\text{Se tiene que: } 1 \text{ Pascal} = 1 \text{ N / m}^2 = 0,000145 \text{ Lbf / pulg}^2$$

$$1 \text{ MPa} = 145 \text{ Lbf / pulg}^2 \text{ y } 1 \text{ mm} = 0,0394 \text{ pulg.}$$

Haciendo las operaciones correspondiente se obtiene:

$$M = 0.00087 \cdot S \cdot D^3 [\text{Lbf} \cdot \text{pulg}]$$

Donde S[MPa] y D[mm].

Introduciendo los valores de esfuerzo [MPa] correspondiente en cada nivel y el diámetro [mm] en la ecuación anterior obtenemos el valor de M, para luego proceder a montar la probeta en la máquina y realizar el ensayo de fatiga, cuidando todos los detalles, sobre todo la vibración durante el ensayo, para evitar que se alteren los resultados.

2.5.2.- Ensayos de fatiga-corrosión.

El procedimiento operativo para los ensayos de fatiga-corrosión es básicamente igual al ya expuesto, solo que en este caso se le adapta a la probeta una cámara de corrosión conectada con una bomba de circulación que posee la máquina de fatiga. La bomba mantiene un suministro continuo de la solución corrosiva (NaCl al 3%) la cual es conducida por medio de mangueras a la cámara de corrosión, las mismas poseen una válvula que permite controlar el flujo de la solución.

Para obtener la gráfica de fatiga-corrosión, solo se ensayaron 24 probetas para cada condición del material, ya que en esta solo se representa la zona de resistencia a la fatiga.

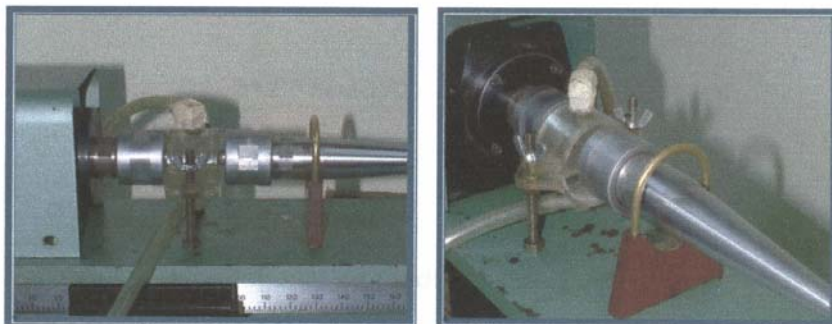


Fig. 2-5. Cámara de corrosión

2.5.3.- Obtención de la curva de Wöhler y parámetros de la Ec. De Basquin.

Mediante el modelo de Basquin, se obtuvieron cuatro ecuaciones de vida a fatiga para cada una de las condiciones de trabajo realizadas:

1.-Fatiga al aire del material base.

2.-Fatiga al aire del material recubierto (Ni-Co-B).

3.-Fatiga-corrosión del material base

4.-Fatiga-corrosión del material recubierto (Ni-Co-B).

Para cada condición del material se ensayaron 24 probetas, distribuidas en cuatro niveles de esfuerzos, 6 probetas por cada nivel.

Para los ensayos del material base, tanto al aire como en corrosión los niveles de esfuerzos aplicados fueron de: 68, 72, 76, y 80% del esfuerzo de fluencia del material base ($\sigma_y = 955$ MPa). En tanto que, para el material recubierto para los ensayos al aire y en corrosión los niveles de esfuerzos aplicados representaron el 69, 73, 77, y 81% del esfuerzo de fluencia del material recubierto ($\sigma_y = 941$ MPa).

Los parámetros de la ecuación de Basquin para cada curva S_f y b se encontraron a partir de la ecuación: $S = S_f (N_f)^b$ Ec. de Basquin. Donde:

S = Esfuerzo de resistencia a fatiga.

S_f = Coeficiente de resistencia a la fatiga.

N_f = N° de ciclos a falla.

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

La ecuación anterior 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 para 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. Graficando $\text{Log}(S)$ vs. $\text{Log}(2N_f)$ se obtienen 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 , por otra parte se obtiene también el coeficiente de correlación lineal para esta recta.

2. 5. 4.- Determinación del límite de fatiga por el método de la escalera.

Se realizaron ensayos tanto al material base como al material recubierto con el fin de determinar el límite de fatiga en ambas condiciones, el método aplicado para estimar el límite de fatiga en este trabajo es el método de la escalera. En cada caso se utilizaron 15 probetas. El proceso se comienza ensayando una primera probeta a un nivel de esfuerzo igual a un valor del límite estimado, si la probeta falla, la siguiente probeta se ensaya a un nivel de esfuerzo un escalón menor (5MPa en este caso) que la anterior. Este procedimiento se repite hasta que la probeta no falle, hasta alcanzar un valor de $5 \cdot 10^6$ ciclos. Cuando la probeta alcance este N° de ciclos sin fallar, entonces se aumenta el nivel de esfuerzo un escalón la próxima probeta a ensayar, esto se sigue aplicando, aumentando el esfuerzo cuando la probeta no falle y disminuyendo cuando fallen, hasta ensayar las 15 probetas.

El límite de fatiga se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$S = X_0 + d(A/N+1/2)$$

Donde:

S = Límite de fatiga.

X_0 = Primer escalón.

d = Escalón de esfuerzo.

$A = \sum (i \cdot n)$ ($i = N^\circ$ de nivel de esfuerzo; $i = 0$ donde haya falla y $n = N^\circ$ de probetas en la que ocurre el suceso menos frecuente)

$N = \sum n$

La desviación estándar se calculó utilizando la ecuación:

$$Ds = 1,620 \cdot d(N \cdot B - A^2 / N^2 + 0,029)$$

Donde:

Ds = Desviación estándar y $B = \Sigma (i^2 n)$.

Tomando en cuenta que se hizo un análisis estadístico, se calculó la re producibilidad de las ecuaciones de Basquin a partir de la ecuación:

% Re producibilidad = $(1 - N^{\circ} \text{ de niveles de } S / N^{\circ} \text{ de probetas ensayadas}) \cdot 100$

Las cuatro condiciones se ensayaron con el mismo número de esfuerzos (4) y el mismo número de probetas (24), esto produce un resultado de un 83% de re producibilidad para cada una de las ecuaciones de Basquin.

2. 6.- ESTUDIO FRACTOGRAFICO (Microscopía Electrónica de Barrido).

El estudio fractográfico se hizo a través de la técnica de microscopía electrónica de barrido. Se seleccionaron un total de ocho probetas de las que fallaron al más bajo esfuerzo (650 MPa) y al más alto esfuerzo (764 MPa):

Fatiga al aire material base: 2 probetas.

Fatiga al aire material recubierto: 2 probetas.

Fatiga-corrosión material base: 2 probetas.

Fatiga corrosión del material recubierto: 2 probetas.

Este estudio se hizo con el propósito de analizar y caracterizar los mecanismos de fatiga y corrosión involucrados en la falla, así como también analizar la Nucleación y crecimiento de grieta (s). El estudio se realizó tanto en la superficie de fractura de las probetas escogidas, como en la sección longitudinal de las mismas. En esta sección longitudinal se buscaron posibles grietas paralelas a la grieta principal. En estos cortes también se midió el espesor del recubrimiento.

Otro aspecto importante en este estudio, es ver si el recubrimiento actuó como un concentrador de esfuerzos alrededor de todo el sustrato, lo que generalmente se manifiesta con múltiples inicios de grietas en la periferia de la cara de fractura.

2.6.1.- Preparación de las muestras.

Se prepararon dos tipos de muestras:

- 1) Muestras que comprendían la superficie de fractura.
- 2) Muestras cortadas longitudinalmente.

Las primeras se cortaron a unos 5 mm desde la superficie de fractura y a las segundas se les hizo primero dos cortes longitudinales a una profundidad de 8 mm desde la superficie de fractura y luego se hizo un corte transversal para obtener la muestra de 3 mm de espesor. El paso siguiente fue embutir estas muestras y pulirlas sobre la cara longitudinal.

Para realizar los cortes se utilizó una cortadora de precisión marca Buehler, modelo Isomet 2000. Fig. 2-6. Esta cortadora está provista de un disco con filo de diamante.

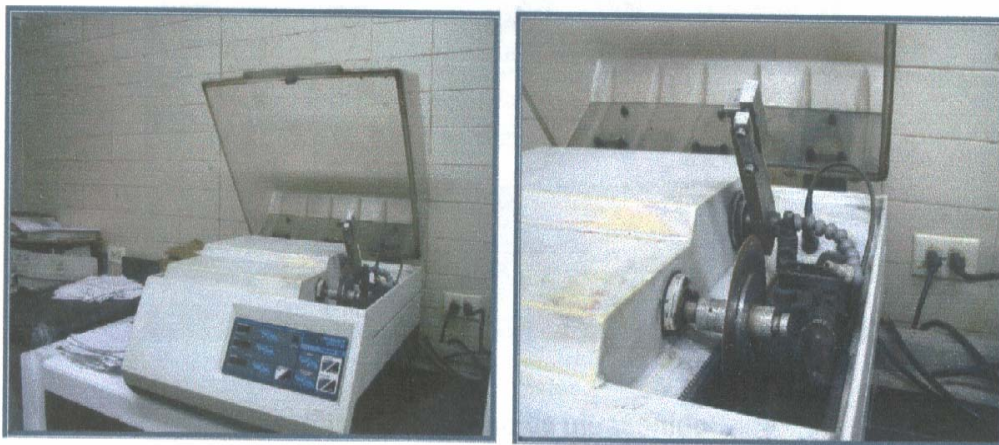


Fig. 2-6 Cortadora.

2.6.1.2.- Limpieza de las muestras.

La técnica de microscopía electrónica de barrido exige que las muestras a ser observadas estén lo más limpias posible, para evitar distorsión en las imágenes y complicación en su interpretación. Para cumplir con esta exigencia todas las muestras se limpiaron con acetona, por 15 minutos en un equipo de limpieza ultrasónica marca Buehler, modelo Ultramet II, Fig.2-6.Finalmente se limpiaron con alcohol y se secaron.



Fig. 2-7. Equipo de ultra sonido.

2. 6. 2.- Microscopia electrónica de barrido - observación de las muestras.

La sesión de microscopía se realizó en el Instituto Universitario de tecnología (I.U.T) ubicado en la carretera panamericana Km. 8. Se utilizó un microscopio marca PHILLIPS, modelo XL30, el cual tiene acoplado un equipo de EDS. Se observaron las superficies de fractura, localizando zonas de inicio de grieta (s) y tomaron fotomicrografías en las cuales se pueden visualizar los detalles de dichas zonas. El mismo procedimiento se siguió para las muestras de corte longitudinal.

2.7.- ENSAYO DE DUREZA.

Se midió la dureza del recubrimiento (aleación de NI-Co-B) utilizando un penetrador Vickers, el cual es un penetrador de diamante en forma de pirámide, de base cuadrada, con 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.

La medición del recubrimiento se realizó usando como substrato, acero de herramientas. A este acero también se le hizo un barrido de dureza.

2.8.- ENSAYO DE RUGOSIDAD.

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

3.- RESULTADOS Y ANALISIS.

3.1.- ESAYOS DE TRACCION.

A continuación se presentarán los resultados de los ensayos de tracción tanto del material base como del material con recubrimiento.

En la tabla 3-1 y 3-2 se muestran los valores de esfuerzo real a carga máxima (σ_u), esfuerzo de fluencia (σ_y) y % de reducción de área del metal base. Estos valores se obtuvieron de las curvas de tracción mostradas en la Fig. 3-1.

Tabla 3-1. Resultados de los ensayos de tracción del material base.

Resultados de los Ensayos de Tracción M.B			
Nº de probeta	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	Reducción de Área (%)
1	927	1112	58
2	976	1132	58
3	962	1153	56
Promedio	955	1132	57
Des. Est.	25	21	1

Tabla 3-2. Resultados de ensayos de tracción del material recubierto con Ni-Co-B.

Resultados de Ensayo de Tracción M.R			
Nº Probeta	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	Reducción de Área (%)
1	921	1052	58.65
2	956	1038	59.33
3	945	1094	58.97
Promedio	941	1061	58.98
Desv. Est.	17.9	29.1	0.34

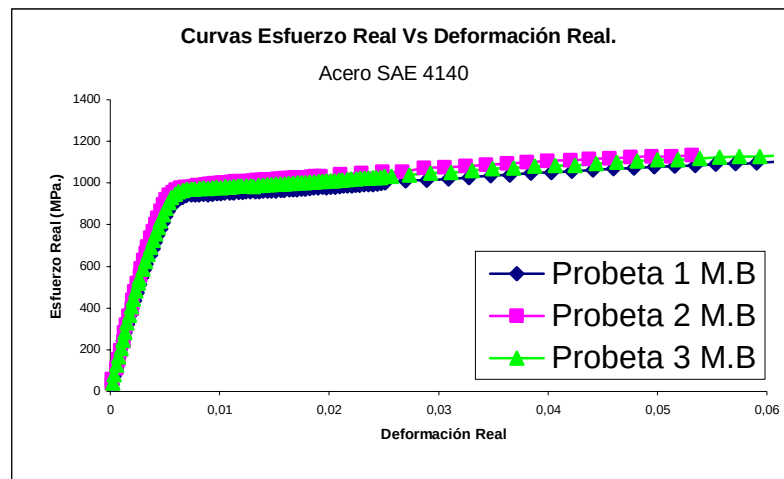


Fig.3-1. Curvas de tracción del material base.

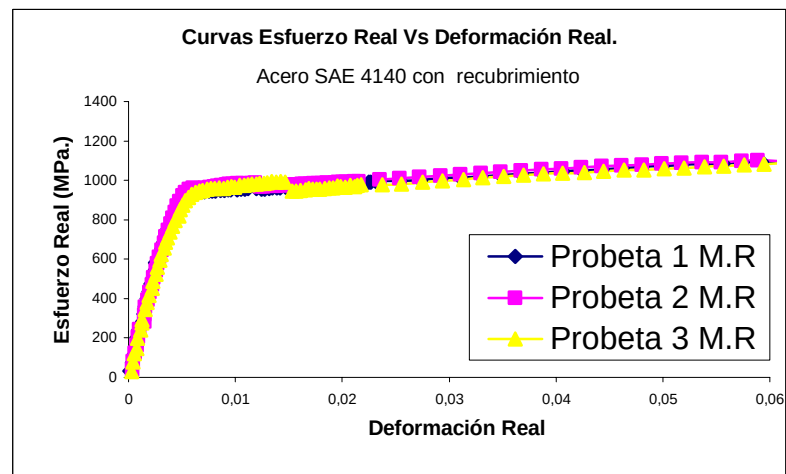


Fig. 3-2. Curvas de tracción del material recubierto.

Observando las curvas de tracción, Fig. 3-1 y 3-2 se puede ver que tanto el material base como el material recubierto tienen un comportamiento similar. Esto se puede corroborar cuando comparamos los valores presentados en las tablas 3-1 y 3-2. La disminución de las propiedades estáticas del material recubierto no es muy significativa (del orden del 1%) comparado con el material base. En cuanto a la reducción de área es prácticamente la misma en ambos casos. De esta manera se puede afirmar que la aplicación de este recubrimiento sobre el acero 4140 no genera importantes cambios en las propiedades mecánicas del conjunto.

3.2.- ENSAYOS DE FATIGA.

Los resultados de los ensayos de fatiga realizados sobre las muestras con y sin recubrimiento se muestran en las siguientes tablas y figuras.

Tabla 3-3. Resultados de los Ensayos de fatiga al aire del material base.

Esfuerzo (MPa)	650	688	726	764
Ciclos a falla (N _f)	157.400	46.400	37.600	34.400
	194.200	79.000	107.600	44.800
	96.200	103.900	75.500	19.000
	164.000	63.700	63.500	43.800
	78.200	47.100	75.800	33.500
	221.000	115.000	54.000	44.700
Promedio	151.800	75.850	69.000	36.867
Desv. Est.	55.245	28.882	23.747	10.051

Tabla 3-4. Resultados de los ensayos de fatiga al aire para la determinación del límite de fatiga del acero SAE 4140 sin recubrimiento.

Probeta	Esfuerzo(S en MPa)	N _f
1	570	5000000
2	575	5000000
3	580	5000000
4	585	1637700
5	580	499700
6	575	5000000
7	580	711300
8	575	299400
9	570	5000000
10	575	231100
11	570	213800
12	565	984000
13	560	398100
14	555	5000000
15	560	155700

Tabla 3-5. Aplicación del método de la escalera para la determinación del límite de fatiga del acero SAE 4140 sin recubrimiento.

Esfuerzo MPa.	Nivel De Esfuerzo i	Nº de Probetas no Rotas n_i	$i \times n_i$	$i^2 \times n_i$
585	6	0	0	0
580	5	1	5	25
575	4	2	8	32
570	3	2	6	18
565	2	0	0	0
560	1	0	0	0
555	0	1	0	0
		N = 6	A = 19	B = 75

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

$$S = 573 \text{ MPa} \quad D_s = 20$$

$$S = 573 \pm 20 \text{ MPa.}$$

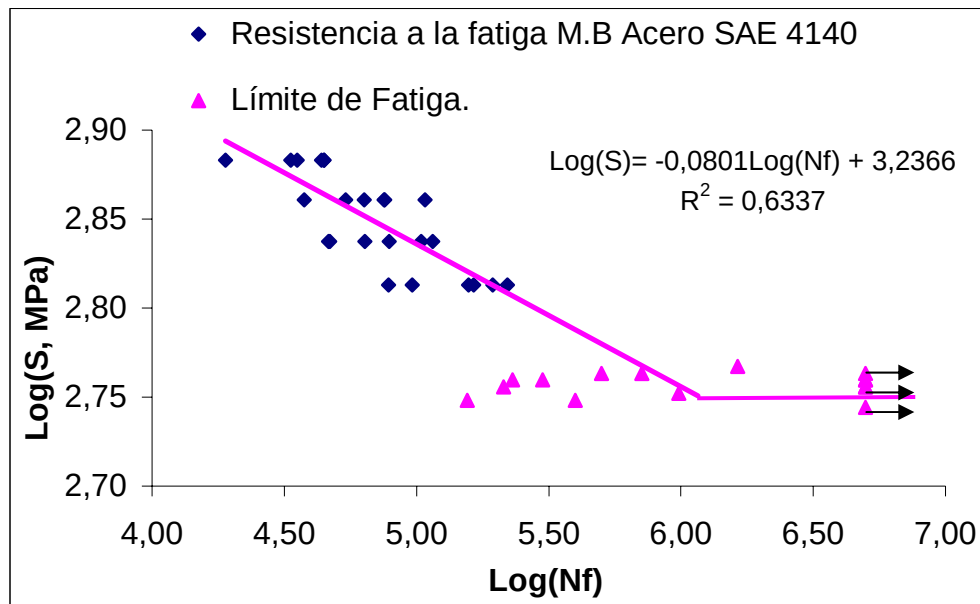


Fig. 3-3. Curva de resistencia y límite de fatiga del acero SAE 4140.

Tabla 3-6. Obtención de la ecuación de Basquin.

Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,0801	b =	-0,0801
Intersección (eje Y)	3,2366	Sf =	1.724,25
		Ecuación de Basquin	
R2 =	0,6337	S = 1.724,25*(Nf)^{-0,0801}	

Tabla 3-7. Resultados de los ensayos de fatiga al aire del acero SAE 4140 con recubrimiento.

Esfuerzo (MPa)	650	688	726	764
Ciclos a falla (N _f)	166.500	95.800	29.300	24.000
	52.000	90.000	30.000	27.000
	71.900	45.500	28.600	40.800
	132.600	39.300	41.800	55.600
	133.000	57.500	44.800	33.200
	98.300	34.900	32.800	18.600
Promedio	109.083	60.500	34.550	33.200
Desv. Est.	42.869	26.287	6.991	13.385

Tabla 3-8. Obtención de la ecuación de Basquin.

Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,1421	b =	-0,1421
Intersección (eje Y)	3,5061	Sf =	3.207
		Ecuación de Basquin	
R2 =	0,6053	S = 3.207 *(Nf)^{-0,1421}	

Tabla 3-9. Resultados de los ensayos de fatiga al aire para la determinación de límite de fatiga del acero SAE 4140 con recubrimiento.

Probeta	Esfuerzo (MPa)	Nf
1	495	496.600
2	490	217.600
3	485	737.400
4	480	650.000
5	475	2.280.000
6	470	590.000
7	455	299.000
8	440	3.276.900
9	435	876.300
10	430	1.925.900
11	410	1.176.000
12	380	5.000.000
13	390	1.230.900
14	380	5.000.000
15	390	1.289.000

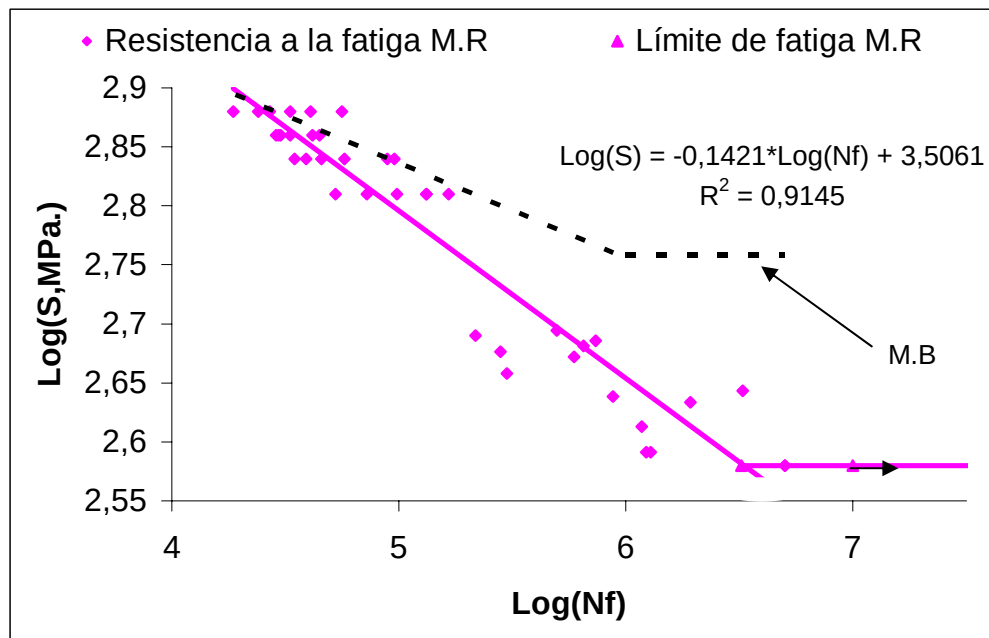


Fig. 3-4. Resistencia y límite de fatiga del acero SAE 4140 recubierto con Ni-Co-B.

Observación: El método empleado para estimar el límite de fatiga del material recubierto en principio era el método de la escalera, sin embargo durante la ejecución de los 15 ensayos para tal fin, solo 2 probetas del total alcanzaron los cinco millones de ciclos, por lo que este método no se hace aplicable y es por ello que solo se plantea como un valor estimado el límite de fatiga del material recubierto, el cual asociamos a un valor cercano a 380 MPa. Esfuerzo para el cual las dos probetas alcanzaron los cinco millones de ciclos.

Tabla 3-10. Resultados de los ensayos de corrosión-fatiga del acero SAE 4140.

Esfuerzo (MPa)	650	688	726	764
Ciclos a falla (N _f)	166.500	95.800	29.300	24.000
	52.000	90.000	30.000	27.000
	71.900	45.500	28.600	40.800
	132.800	39.300	41.800	55.600
	133.000	57.500	44.800	33.200
	98.300	34.900	32.800	18.600
Promedio	40.483	33.950	27.383	25.383
Desv. Est.	6.385	5.962	3.062	3.193

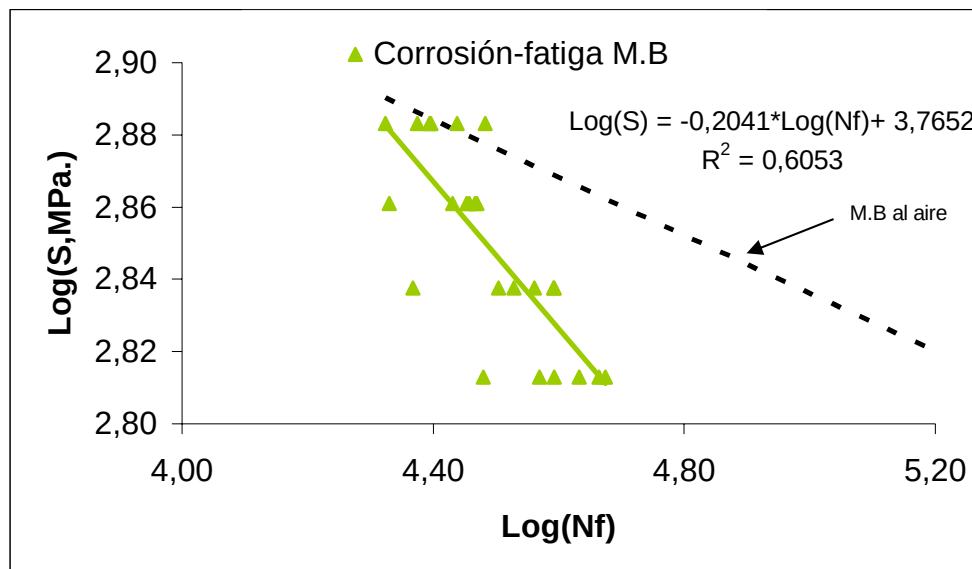


Fig. 3-5. Curva de resistencia a la corrosión-fatiga del acero SAE 4140.

Tabla 3-11. Obtención de la ecuación de Basquin.

Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,2041	b =	-0,2041
Intersección (eje Y)	3,7652	Sf =	5.823,46
		Ecuación de Basquin	
R2 =	0,6053	S =5.823,46*(Nf)^-0,2041	

Tabla 3-12. Resultados de los ensayos de corrosión-fatiga del acero SAE 4140 con recubrimiento

Esfuerzo (MPa)	650	688	726	764
Ciclos a falla (Nf)	30.000	45.100	33.200	22.000
	47.300	31.000	32.100	18,300
	76.600	48.800	32.600	16.200
	52.200	33.500	24.400	36.700
	44.400	31.500	31.500	16.300
	52.500	26.800	31.300	22.000
Promedio	50.500	36.100	30.850	21.917
Desv. Est.	15.204	8.759	3.237	7.692

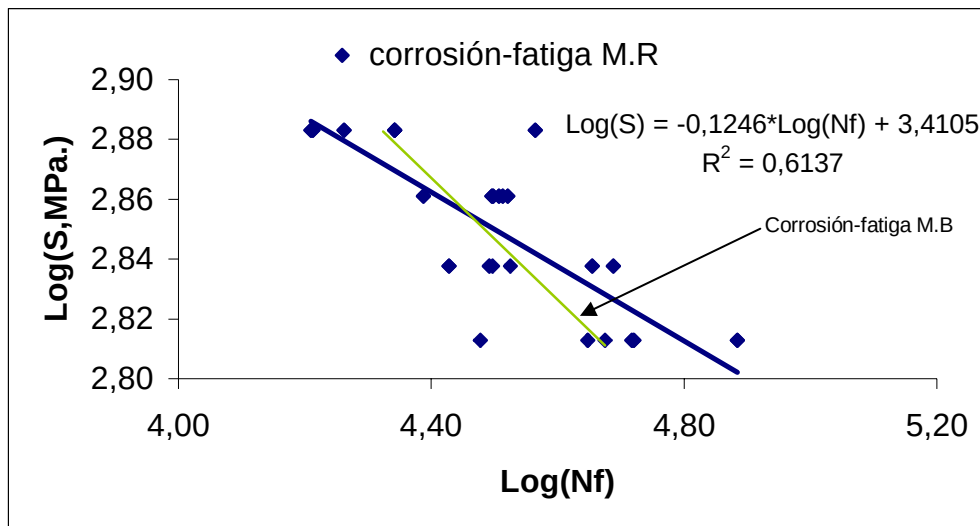


Fig. 3-6. Curva fatiga-corrosión del acero SAE 4140 con recubrimiento.

Tabla 3-13. Obtención de la ecuación de Basquin.

Datos de la curva		Parámetros ec. Basquin	
Pendiente =	-0,1246	b =	-0,1246
Intersección (eje Y)	3,4105	Sf =	2.573,47
		Ecuación de Basquin	
R2 =	0,6137	S =2.573,47*(Nf)^-0,1246	

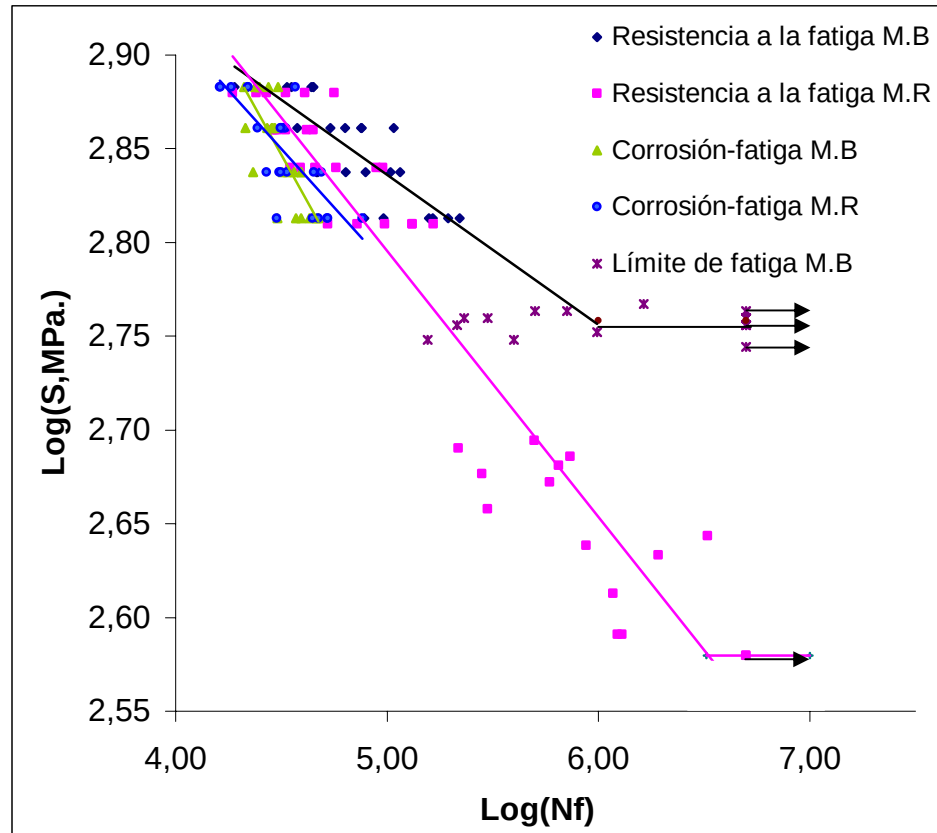


Fig. 3-7 Curvas de resistencia y límite de fatiga del acero SAE 4140, con y sin recubrimiento y ensayos de corrosión- fatiga para ambos casos.

De los datos obtenidos en los ensayos de fatiga para el **material base** ensayado al aire (tablas 3-3 y 3-6) comparado con el material base en corrosión (tablas 3-10 y 3-11) se puede observar que el uso de la solución corrosiva genera una importante disminución en la vida a la fatiga, que varía entre 19 y 76% cuando se trabaja con esfuerzos de 764 y 650 MPa, respectivamente (Figura 3-5). Lo cual es de

esperarse debido al mayor tiempo de exposición del material a la solución salina a bajos esfuerzos. Para el caso de los ensayos de fatiga al aire del material base (tablas 3-3 y 3-6) y el material recubierto (tablas 3-8 y 3-9) se observa (figura 3-4) que la aplicación del recubrimiento produce una disminución de la vida a la fatiga de 7% para altos esfuerzos (764 MPa.) mientras que para bajos esfuerzos (650 MPa.) se produce una caída de un 61% en la vida a la fatiga del material recubierto. Esto puede estar asociado al estado superficial de recubrimiento, ya que mostró una mayor rugosidad que el sustrato.

En los ensayos de corrosión-fatiga se encuentra que el comportamiento a la fatiga del material recubierto (tablas 3-12 y 3-13) es inferior al material base en un 18% cuando se emplean altos esfuerzos (764 MPa.). Sin embargo para bajos esfuerzos (650 MPa.) la vida a la fatiga el material recubierto respecto al material base se incrementa en un 26%.(figura 3-6). Así mismo, cuando comparamos los resultados de los ensayos de fatiga al aire y de corrosión-fatiga del material recubierto (tablas 3-8, 3-9,3-12 y 3-13) se observa que para altos esfuerzos (764MPa.) el material recubierto ensayado en corrosión-fatiga disminuye su vida a la fatiga en un 29%, en comparación con el material base ensayado en el mismo medio, mientras que para bajos esfuerzos (650 MPa) aparentemente aumenta. Sin embargo, esta afirmación no es concluyente ya que ambas curvas se encuentran dentro de la desviación estándar del promedio de vida a cada nivel de esfuerzo, en el orden del 17%. En todo caso, esto pareciera indicar que el recubrimiento actúa de manera positiva, como una barrera protectora contra la solución corrosiva a bajos esfuerzos (650 MPa.), mientras que a altos esfuerzos (764 MPa.) pareciera producirse el agrietamiento temprano del recubrimiento que permite a la solución corrosiva entrar en contacto con el sustrato y producir una falla más temprana.

Finalmente, el límite de fatiga para el material recubierto es de 380 MPa, mientras que para el material base (acero SAE 4140) es de 573 MPa, lo cual se traduce en una disminución del 34%.

3.3.- ENSAYOS DE DUREZA.

Tabla 3-14. Resultados de Microdureza Vickers.

Carga (gr)	50	100	200	300	500	1000
Probeta N°	Dureza promedio					
1	628	643	629	637	655	379
2	686	725	691	698	745	565
3(Substrato)	494	538	561	551	598	485

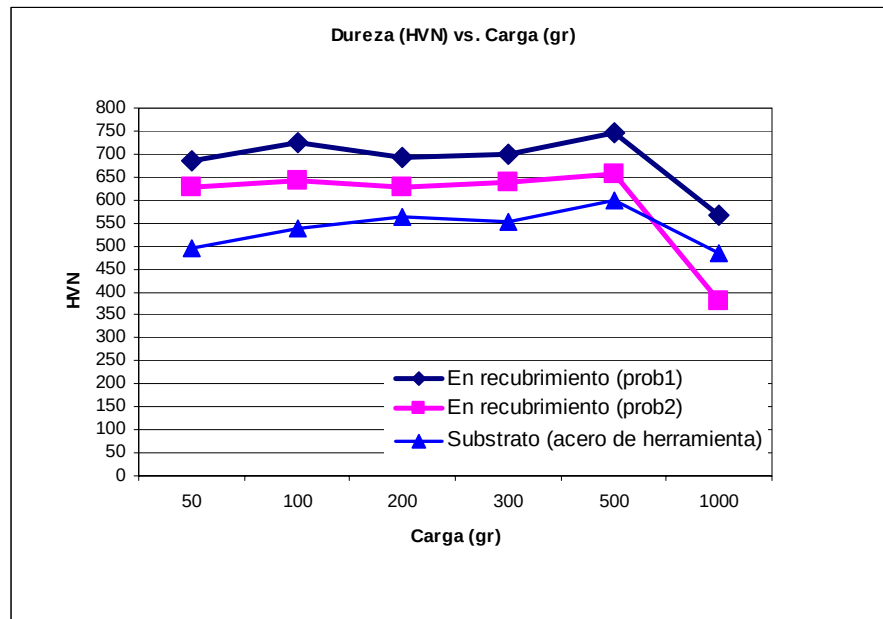


Fig. 3-8 Curvas de dureza para el recubrimiento Ni-Co-B.

En la Figura 3-11 se presenta las gráficas de dureza en función de la carga aplicada. Se observa que para cargas entre 50 y 300 gr. la dureza del recubrimiento se mantiene dentro de unos valores parecidos. Para cargas mayores que 300 gr. se tiene una dureza compuesta, a medida que aumenta la carga la penetración del indentador es mayor y alcanza al sustrato, midiéndose de esta manera la dureza tanto del recubrimiento como del sustrato.

3.4.-ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X POR DISPERSIÓN DE ENERGÍA (EDS).

Con el fin de determinar la composición química del recubrimiento se hizo un análisis por EDS a una muestra seleccionada cuyo resultado se muestra en la Fig. 3-12. Se obtiene un 74% de Ni y un 24,45 % de Co (% en peso) .No se registró la presencia de Boro por las condiciones del equipo en el momento del ensayo.

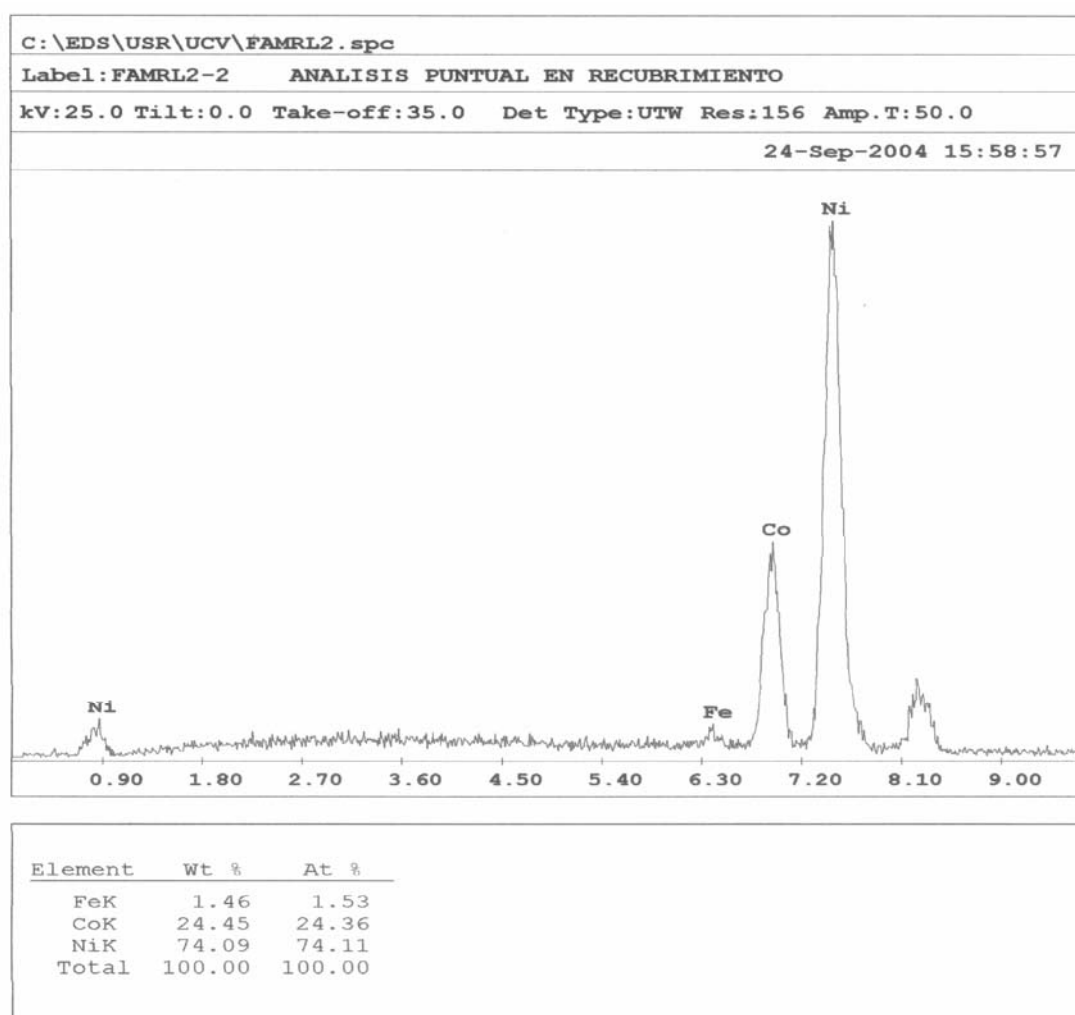


Fig. 3-9. Análisis puntual en recubrimiento Ni-Co-B.

3.5.- MEDIDA DE RUGOSIDAD.

Previo a la realización de los ensayos de fatiga se determinó la rugosidad del material base cuyo valor promedio resultó ser de $0,05\text{ }\mu\text{m}$.

Así mismo se determinó para el material recubierto resultando ser de $0,07\text{ }\mu\text{m}$, resultando por tanto la rugosidad del material recubierto ligeramente mayor que la del material base.

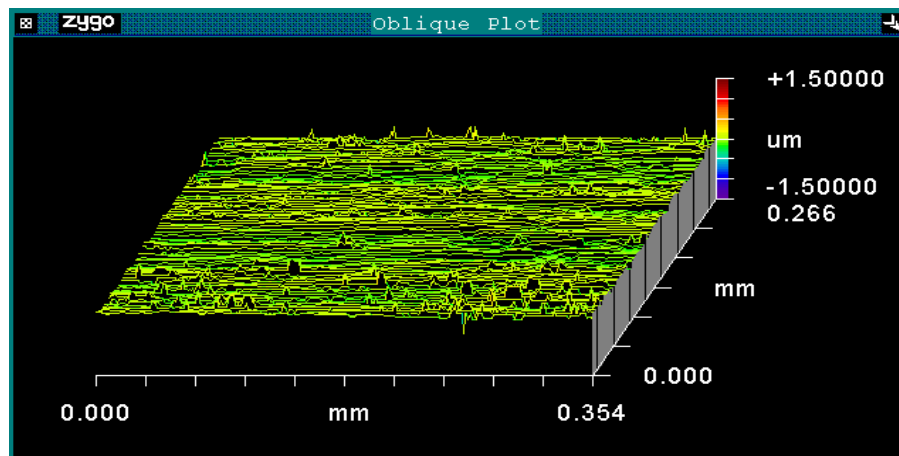


Fig. 3-10. Perfilometría óptica 3D del material base.

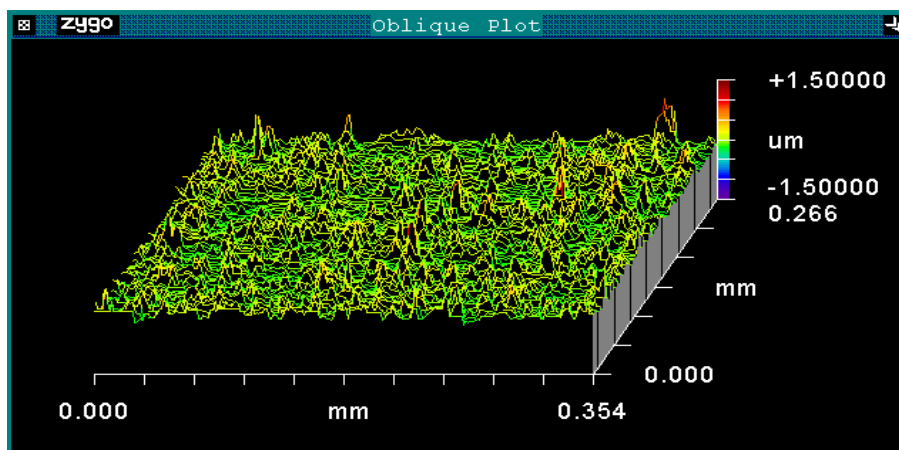


Fig. 3-11. Perfilometría óptica 3D del material recubierto.

3.6.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO (Microscopía Electrónica de Barrido).

A continuación se presentan las fotomicrografías obtenidas por MEB tomadas a las muestras seleccionadas de las probetas ensayadas tanto al material base como al recubierto.

3.6.1. Fatiga al aire material base.

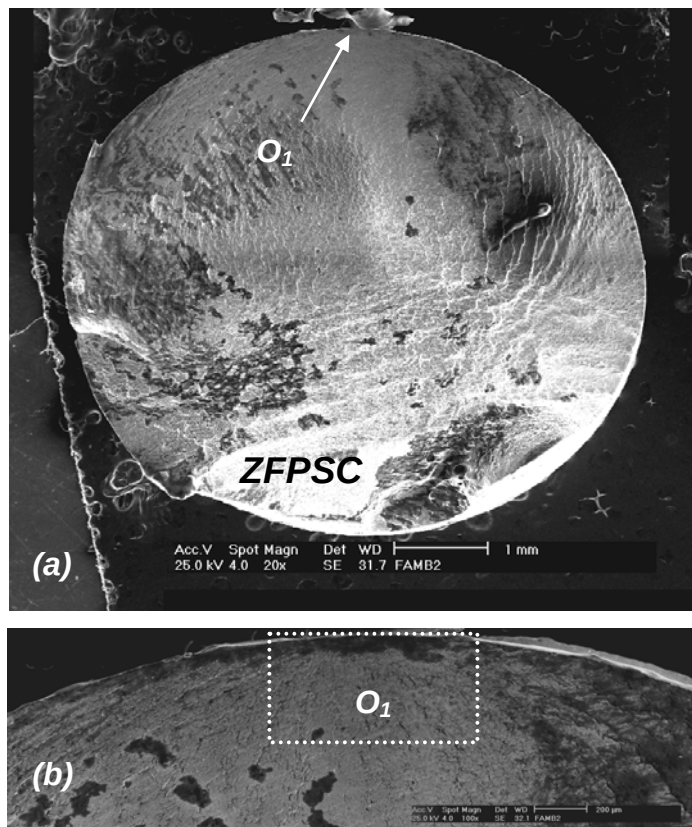


Fig. 3-12. Superficie de fractura del material base a 650 MPa.

En la figura 3-12 (a) se muestra una vista general de la superficie de fractura de una probeta del material base ensayada a 650 MPa en condición de fatiga al aire. Se observa un solo inicio de grieta, el cual se encuentra en la parte superior de la fotomicrografía. La zona de falla por sobrecarga se encuentra en la parte inferior.

La figura 3-12 (b) es una vista magnificada de la zona de inicio de grieta O_1 en la figura 3-12 (a).

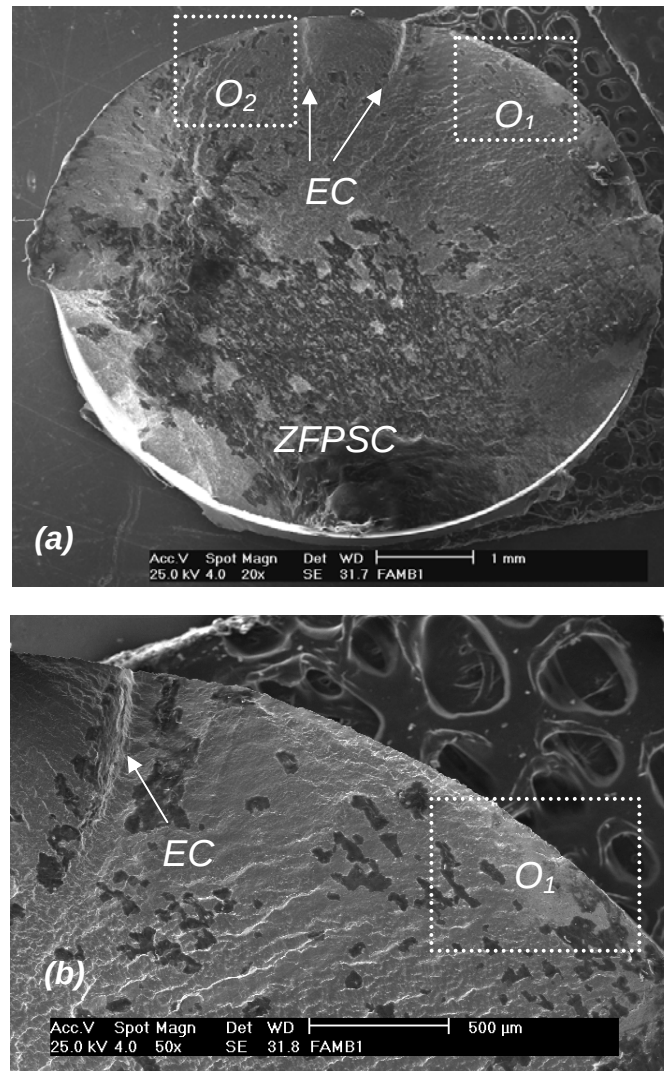


Fig. 3-13. Superficie de fractura del material base a 754 MPa.

Fig. 3-13 (a) vista general de la superficie de fractura de una probeta del material base ensayada a 764 MPa en condición de fatiga al aire. Se puede observar en la parte superior dos inicios de grieta así como dos escalones de clivaje. En la parte inferior y opuesta a la zona de inicio de grieta observamos la zona de falla por sobre carga y el labio de corte.

La figura 3-13 (b) es una vista magnificada de la zona O_1 de (a) donde se puede ver claramente un escalón de clivaje, zona de inicio y propagación de la grieta.

3.6.2. Fatiga-corrosión material base.

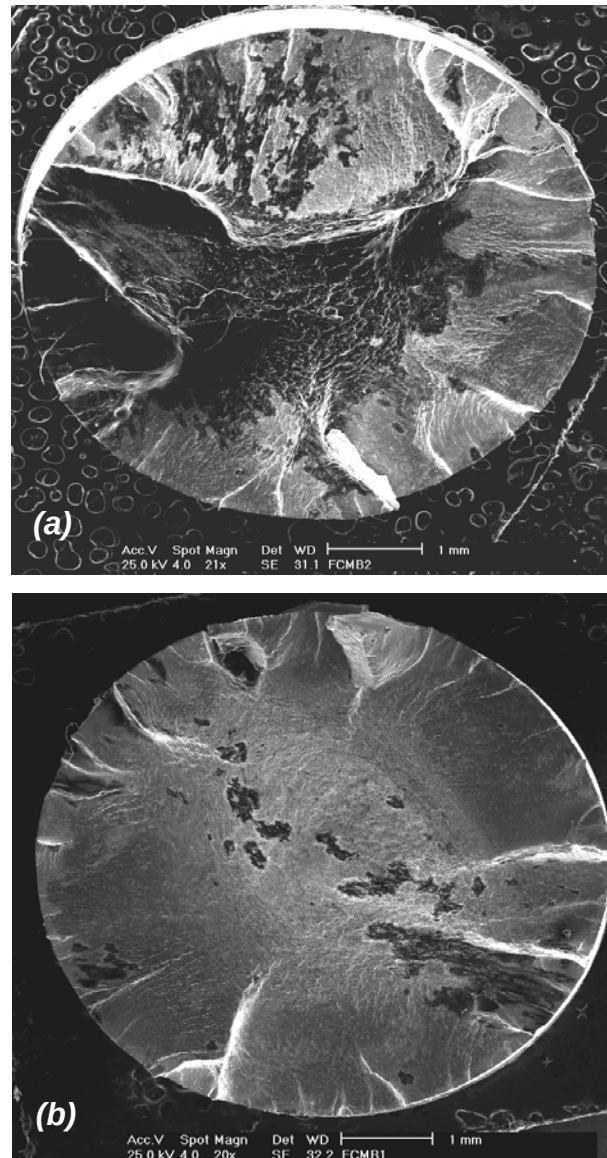
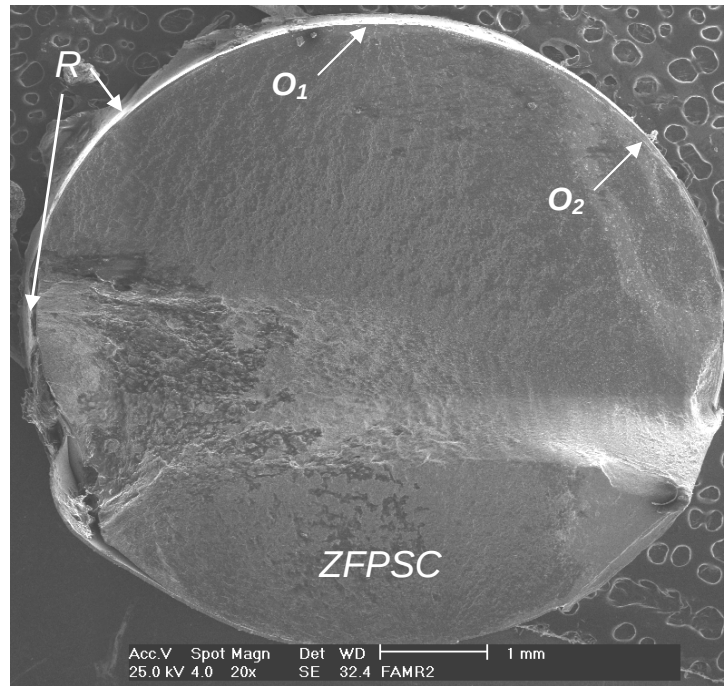


Fig.3-14. Superficie de fractura del material base en corrosión a 650 (a) y 754 (b) MPa respectivamente

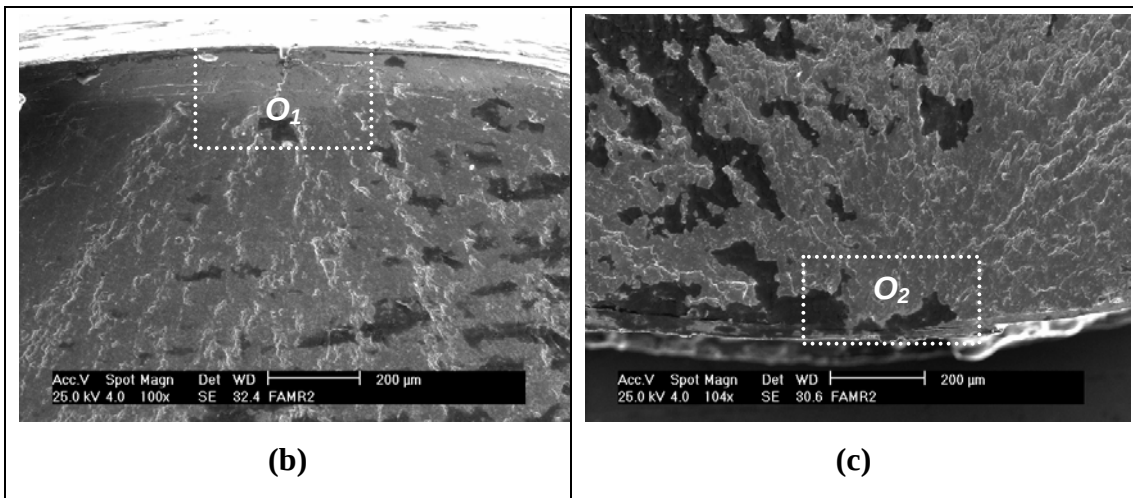
En la figura 3-14 (a) se muestra una vista general de la superficie de fractura de una probeta ensayada a bajo esfuerzo (650 MPa.).Es una superficie típica del fenómeno corrosión-fatiga, la cual se caracteriza por los múltiples inicios de grietas y escalones de clivaje en toda la periferia de la superficie. La zona de falla por sobre carga se halla en el centro de la probeta.

En la figura 3-14 (b) se muestra la superficie de fractura de otra probeta del material base, ensayada en la misma condición de corrosión-fatiga, pero en este caso a un alto esfuerzo (764 MPa.). Se puede observar un mayor número de inicios de grietas así como de escalones de clivaje, lo cual sugiere que a altos esfuerzos se produce un daño mayor para la condición de corrosión-fatiga del material base.

3.6.3. Fatiga al aire material recubierto.



(a)



(b)

(c)

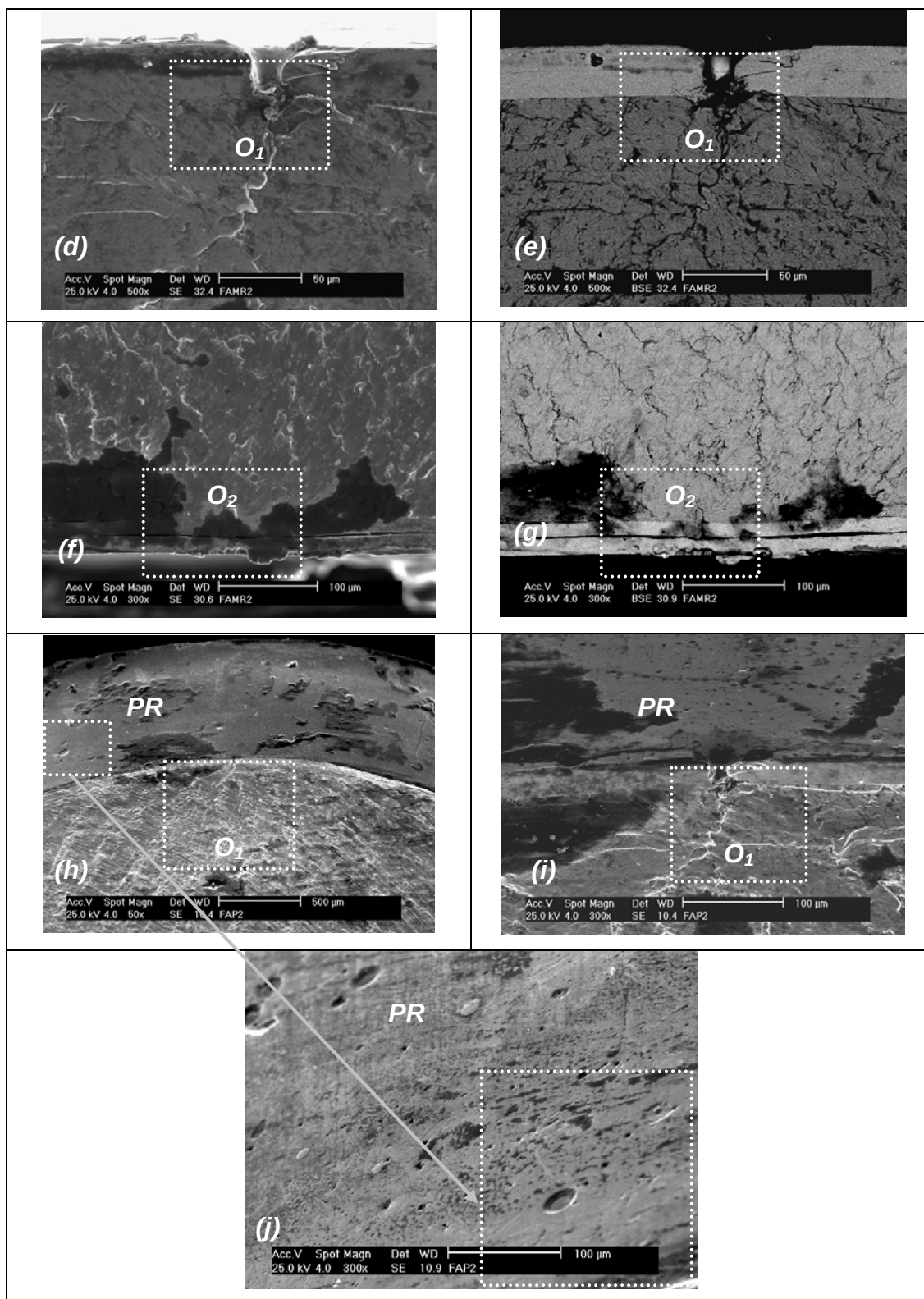


Fig. 3-15. Superficie de fractura del material recubierto a 650 MPa.

La figura 3-15 (a) es una vista general de la superficie de fractura de una probeta del material recubierto ensayada a bajo esfuerzo (650 MPa) en condición de fatiga al aire. Se aprecia en este caso en la parte superior dos zonas de inicio (O_1 y O_2) de propagación de la grieta, la cual avanza hacia el centro hasta que se produce la falla por sobrecarga.

La figura (b) es una vista magnificada de la zona de inicio O_1 de la grieta. Se puede apreciar las marcas radiales dejadas por el avance de grieta.

La figura (c) es una vista magnificada de la zona de inicio O_2 de la grieta. La figura (d) es un acercamiento mayor a la zona observada en la figura (b). Se aprecia con mayor detalle el daño en el recubrimiento. La figura (e) corresponde a la imagen (d) en el modo de electrones (Backscattering), lo que permite ver claramente definidos tanto el recubrimiento como el sustrato.

Las figuras (f) y (g) representan una vista magnificada de O_2 en el modo de imagen de electrones secundarios y electrodispersados, respectivamente. Donde se aprecia la delaminación recubrimiento.

La figura (h) es otra vista de la zona de inicio de grieta O_1 , donde además se puede apreciar la pared del recubrimiento (PR) el cual presenta ciertas irregularidades de forma redonda. La figura (i) es un acercamiento a la zona de inicio O_1 , tomada con la misma inclinación de la figura (h) e incluyendo la pared del recubrimiento. Finalmente la figura (j) es una vista de la superficie del recubrimiento señalada por el recuadro de la figura (h), donde se pueden observar con mayores irregularidades del recubrimiento.

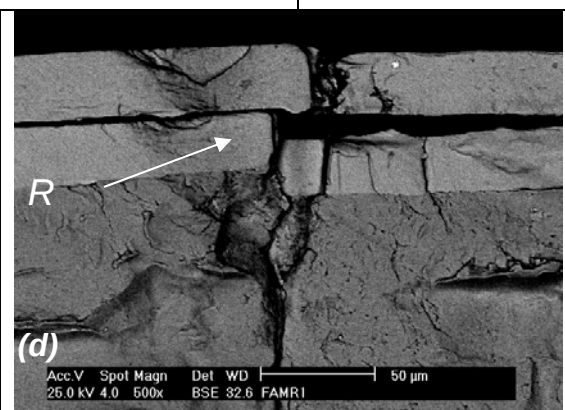
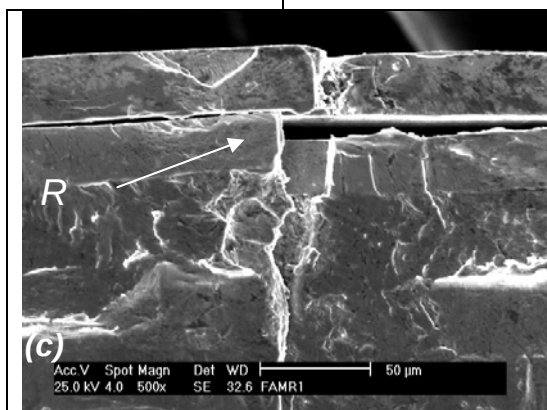
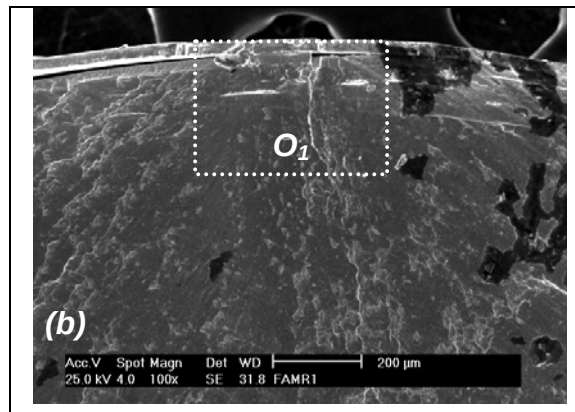
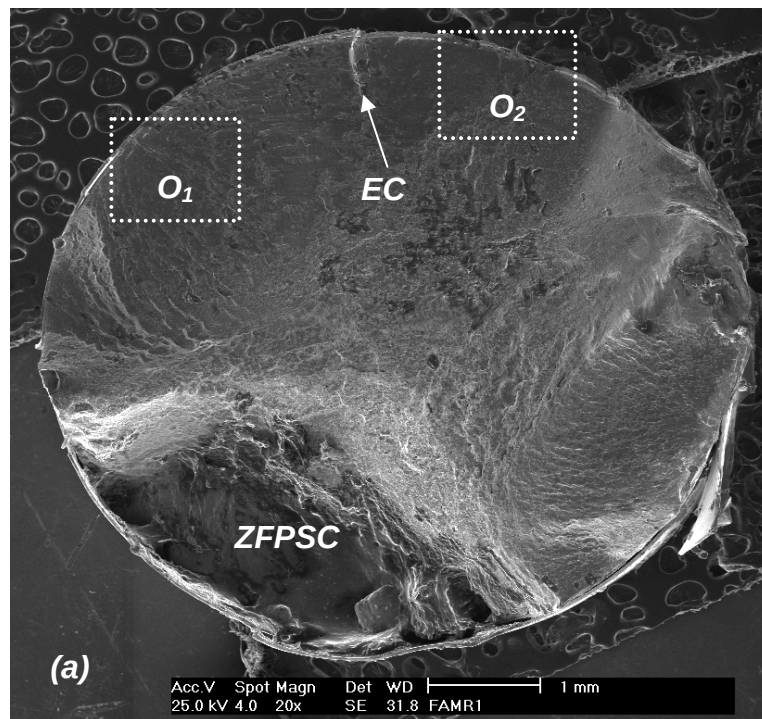
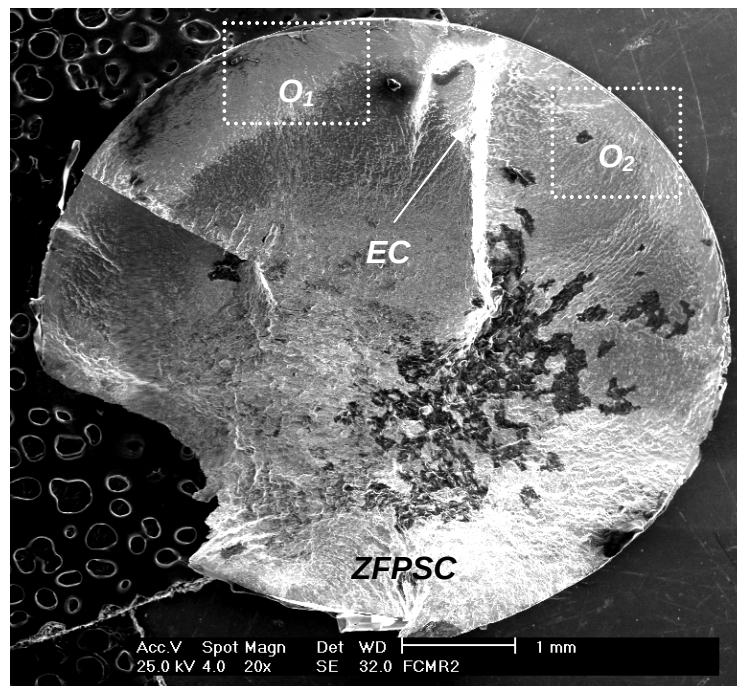


Fig. 3-16. Superficie de fractura del material recubierto a 764 MPa.

En la figura 3-16 (a) se muestra la superficie de fractura de una probeta del material recubierto ensayada a 764 MPa en condición de fatiga al aire. Se observan dos inicio de grieta (O_1 y O_2), a la derecha de O_1 se puede observar un escalón de clivaje, en la parte inferior observamos una zona irregular y fibrosa que constituye la zona de despegue o zona de falla por sobrecarga. En la figura 3-16 (b) se presenta un acercamiento a la zona O_1 donde se origina la grieta. La figura 3-16 (c) es una vista magnificada de (b) mostrando con mayor detalle el daño ocurrido tanto al recubrimiento como al material base. La figura (d) es la misma fotomicrografía anterior pero utilizando el modo de imagen de electrones electrodispersados, lo cual permite diferenciar más claramente al recubrimiento del sustrato. Nótese la separación en dos capas del recubrimiento.

3.6.4. Fatiga-corrosión del material recubierto.

A continuación se presentan las fotomicrografías de las probetas ensayadas en la condición de corrosión-fatiga a bajo esfuerzo (650 MPa).



(a)

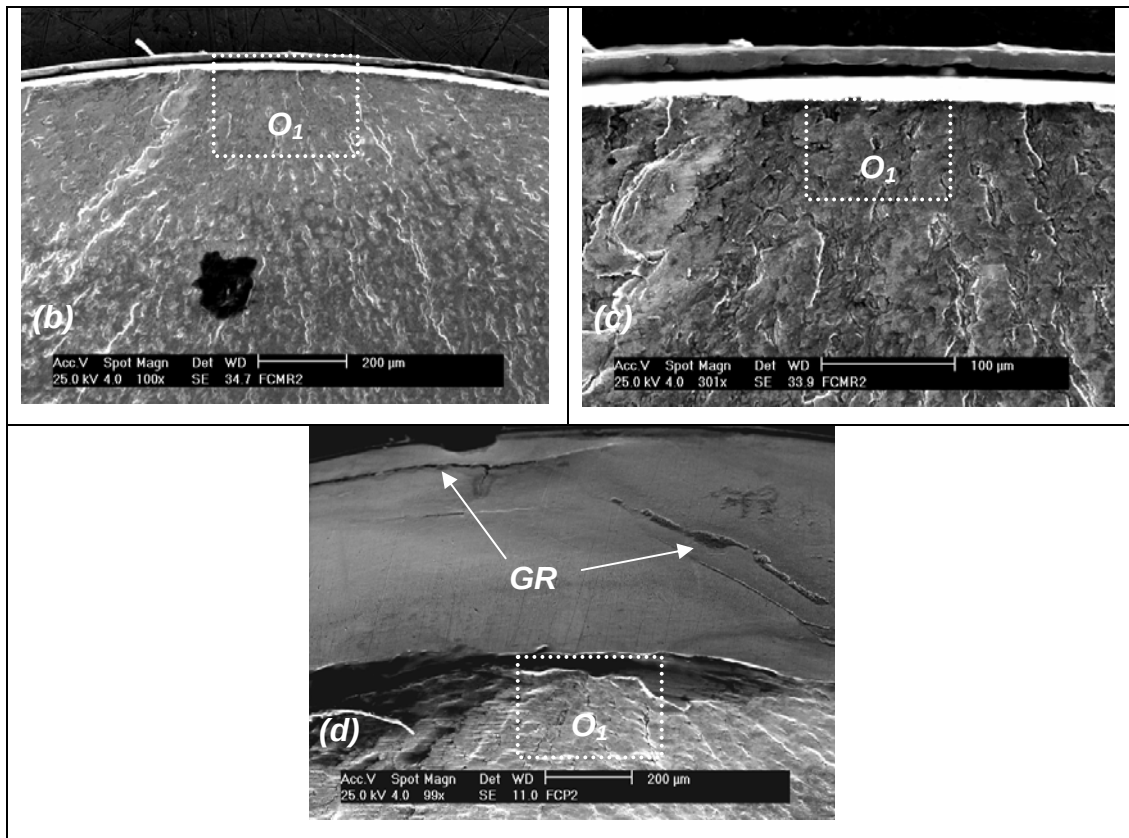


Fig. 3-17. Superficie de fractura del material recubierto a 650 MPa.

En la figura 3-17 (a) se presenta una vista general de la superficie de fractura de una probeta del material recubierto ensayada a un esfuerzo de 650 MPa en condición de corrosión-fatiga. En este caso se pueden observar dos inicios (O_1 y O_2) de grieta y entre ellas un escalón de clivaje. La zona de despegue se observa en la parte inferior.

En la figura 3-17 (b) se presenta un acercamiento a la zona de inicio O_1 donde se puede apreciar las marcas radiales características del avance de grieta. La figura (c) es una vista magnificada de la zona O_1 . La figura (d) es una vista magnificada de la zona O_1 tomada muy cerca del borde de la muestra y donde se pueden observar dos grietas (GR) en el recubrimiento.

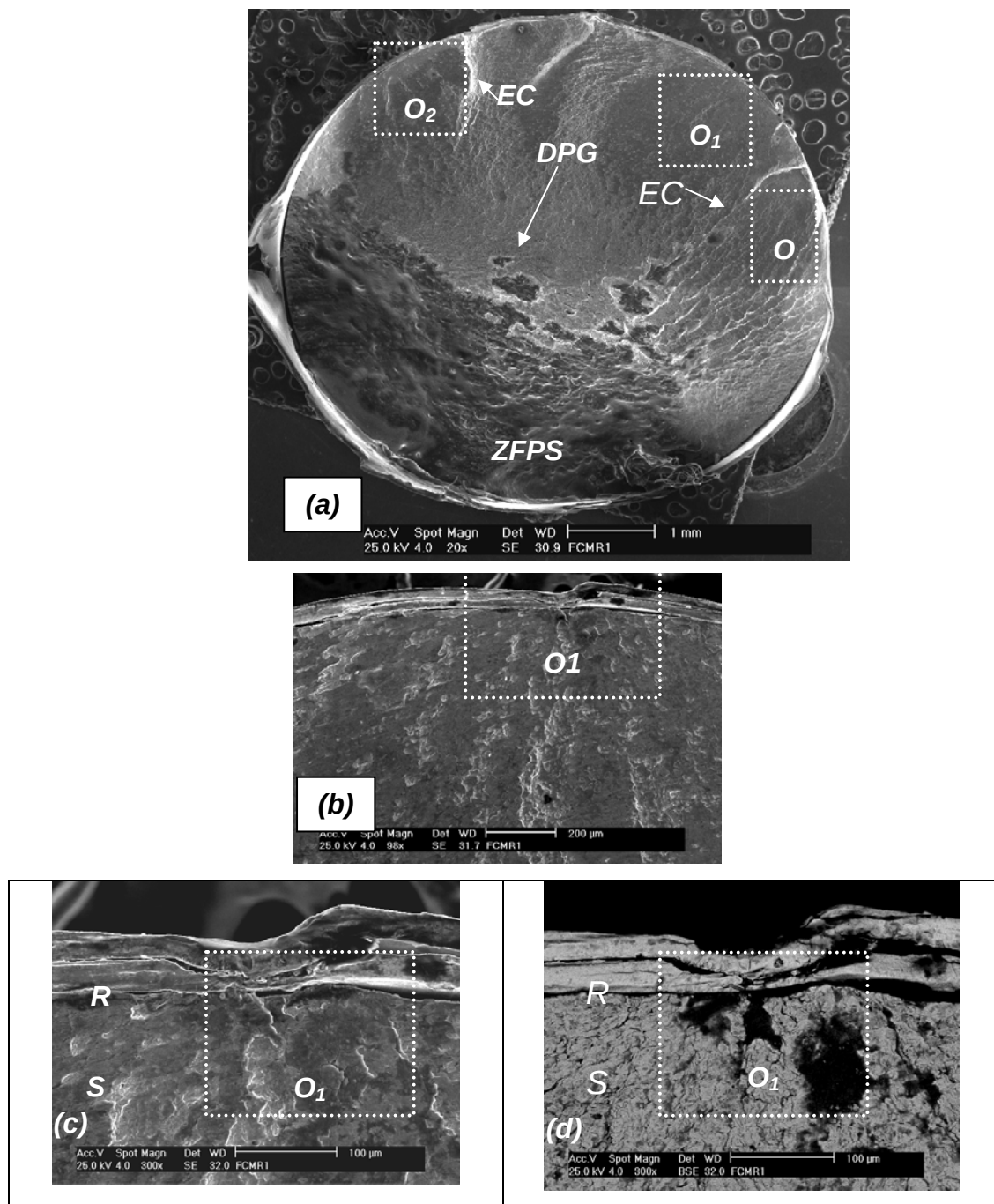


Fig. 3-18. Superficie de fractura del material recubierto a 764 MPa.

En la figura 3-18 (a) se muestra una vista general de la superficie de fractura de una probeta del material recubierto ensayada a 764 MPa en condiciones de corrosión-fatiga. Se puede observar tres inicios de grieta (O_1 , O_2 , O_3), así como dos escalones de clivaje. La zona de despegue se encuentra en la parte inferior y la flecha

señala la dirección de propagación de la grieta. Fig. 3-18 (b) esta fotomicrografía es una magnificación de la zona O₁ de la figura anterior, en ella se pueden apreciar las marcas radiales dejadas por el avance de grieta. En las figuras (c) y (d) se muestra un acercamiento mayor a la zona de inicio. Aquí se puede observar claramente el daño en el recubrimiento en el sitio de inicio de la grieta. Se aprecia también dos capas de recubrimiento.

3.6.5. Análisis de los cortes longitudinales.

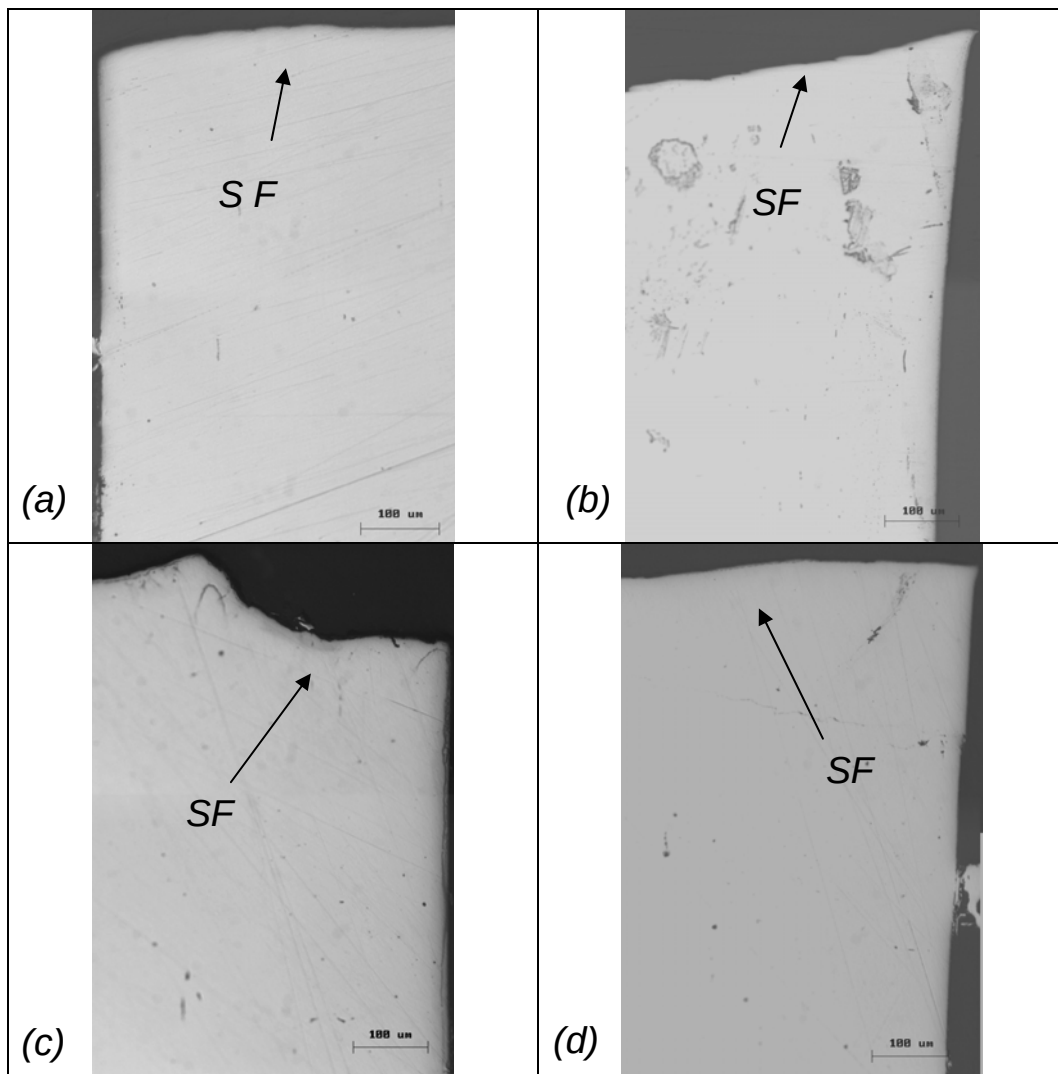


Fig. 3-19. Vista de cortes longitudinales del material base.

Anteriormente se presento la serie de fotomicrografías correspondientes al análisis realizado a los cortes longitudinales de las probetas ensayadas en las dos condiciones de trabajo: fatiga al aire y corrosión-fatiga, a altos y bajo esfuerzos.

En la Fig.3-19 (a y b), (c y d) se muestran las fotomicrografías hechas a cuatro secciones longitudinales de probetas del material base, ensayadas a 650 y 764 MPa, respectivamente.

En condiciones de fatiga al aire y corrosión-fatiga. Como se puede observar no se encontraron grietas paralelas al plano de la grieta principal de fractura.

En la Fig. 3-20 (a), (b), (c) y (d) se presentan las fotomicrografías de cortes longitudinales de probetas del material recubierto, ensayadas a esfuerzos de 650 MPa en condiciones de fatiga al aire (a y b) y de corrosión-fatiga (c y d). En este caso como en el anterior tampoco se encontraron grietas en el sustrato, sin embargo en la probeta ensayada en la condición de corrosión-fatiga Fig. 3-20 (d) se puede apreciar una grieta en el recubrimiento en la capa más externa. Esta grieta se sitúa cercana a la superficie de fractura y paralela a ella.

En la Fig. 3-20 (e) se presenta un acercamiento a la grieta mostrada en la Fig. 3-20 (d). En las fotomicrografías también se puede apreciar el recubrimiento separado del sustrato lo cual indica una mala adherencia del mismo.

En la Fig. 3-20 (f) se presenta una vista del corte longitudinal de una probeta del material recubierto ensayada a un esfuerzo de 764 MPa en condición de corrosión-fatiga no se observan grietas paralelas al plano de la superficie de fractura.

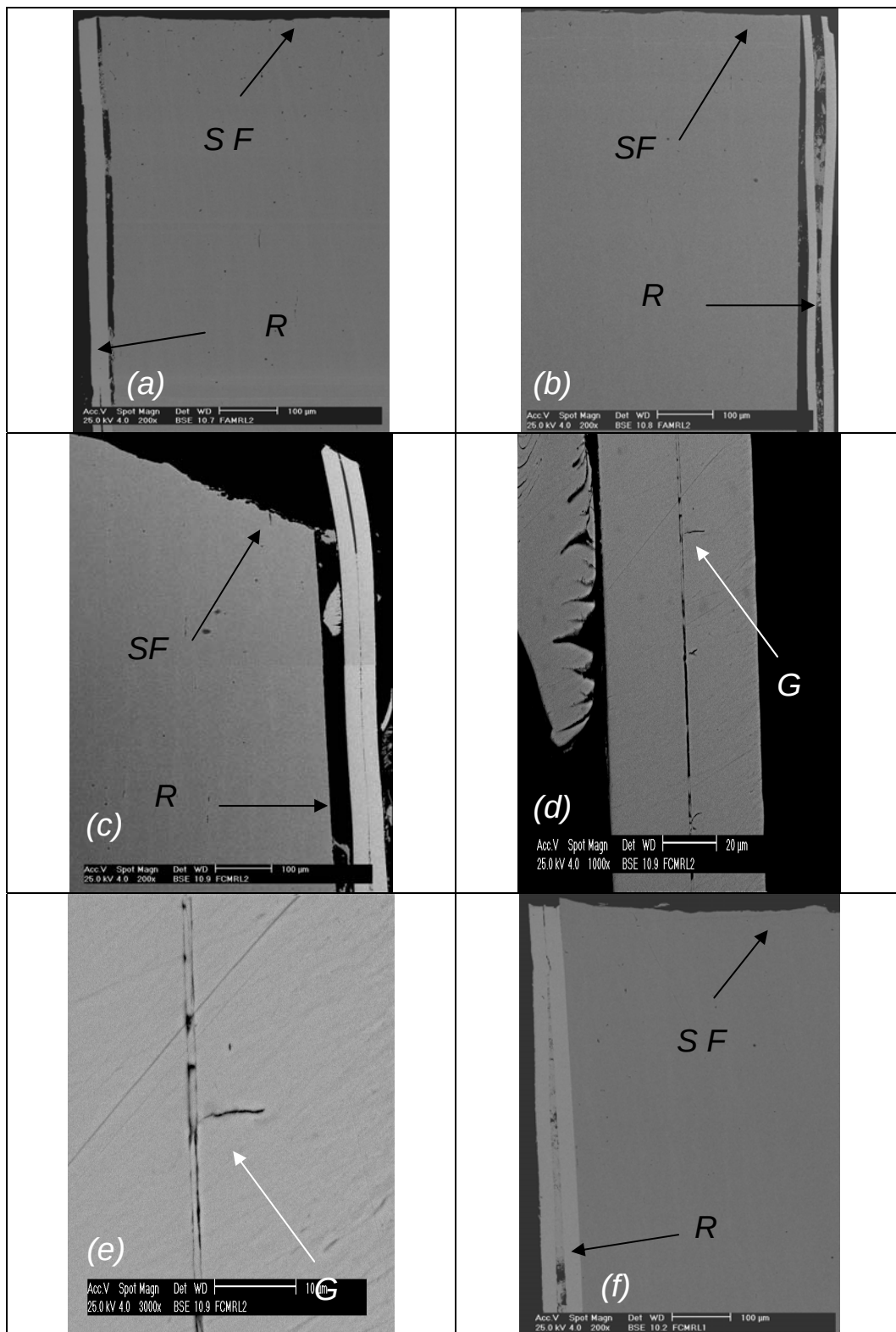


Fig. 3-20. Vista de cortes longitudinales del material recubierto.

Resumen del análisis fractográfico.

De las observaciones realizadas en el estudio fractográfico realizado a las probetas del material base y material recubierto con la aleación Ni-Co-B se tienen las siguientes observaciones:

- Solo en el caso de los ensayos del material base ensayado en condiciones de corrosión-fatiga se encontraron múltiples inicios de grieta, presentándose el mayor número de estos en las probetas ensayadas a mayor esfuerzo 764 MPa, Fig. 3-14 (b). En el material recubierto ensayado a bajo esfuerzo (650 MPa) en condiciones de corrosión- fatiga se encontraron dos inicios de grieta, Fig. 3-17 (a), lo que sugiere que el recubrimiento a bajos esfuerzos alternantes provee una mayor protección contra el ataque corrosivo. Por otra parte, en el material recubierto ensayado en corrosión-fatiga a alto esfuerzo (764 MPa) Fig., 3-18 (a), se observaron tres inicios de grieta. En los acercamientos realizados a estos inicios encontramos nuevamente que de las dos capas que regularmente presenta el recubrimiento las más cercana al substrato luce mas deteriorada que la externa.

- En el caso del material recubierto ensayado a bajo esfuerzo (650 MPa) en condición de fatiga al aire se encontró un solo inicio de grieta el cual se produjo aparentemente en la intercara del conjunto, Fig. 3-15 (a) y (e). El material recubierto ensayado a alto esfuerzo (764MPa) en condición de fatiga al aire mostró dos inicios de grieta. Se puede notar la capa interna del recubrimiento más deteriorada que la externa lo cual sugiere que el inicio se produce en la intercara Fig. 3-16 (c) y (d).

De este análisis se concluye que las observaciones realizadas mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) en la superficie de las muestras fracturadas es totalmente consistente con las curvas S – N que se presentan en la Fig. 3-7.

En cuanto a los cortes longitudinales se observó lo siguiente:

- Solo en el caso del material recubierto ensayado en condición de corrosión-fatiga a un esfuerzo de 650MPa, se pudo observar una grieta paralela al plano de la superficie de fractura, dicha grieta se encuentra situada en la capa exterior del recubrimiento Fig.3-20(b)

- No se encontró agrietamiento del recubrimiento salvo en las zonas de inicio de grieta.

- El recubrimiento no mostró buena adherencia al sustrato, ver Fig. 3-20 (a), (c) y (d).

- El recubrimiento tiende a separarse en capas como consecuencia de los ensayos realizados.

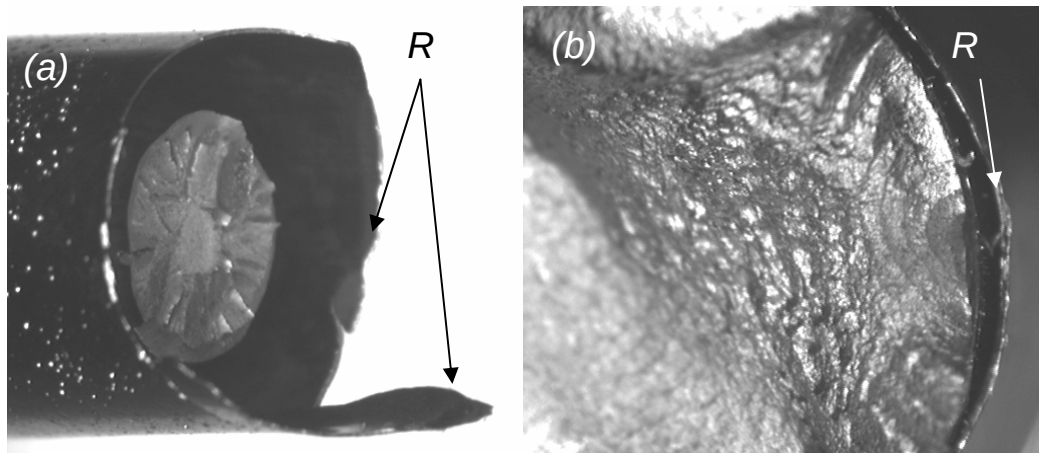


Fig. 3-22. Probetas con recubrimiento Ni-Co-B ensayada en tracción y fatiga, respectivamente.

En la Fig.3-22(a) se muestra la parte de una probeta del material recubierto ensayado en tracción y en la cual se puede apreciar como el recubrimiento se desprendió del material base, y en la figura 3-22(b) se hace la misma observación de la separación del recubrimiento pero en este caso la probeta es de fatiga.

CAPITULO II

4. CONCLUSIONES.

* El uso de la solución corrosiva (NaCl al 3%) genera en el acero SAE 4140 una importante disminución de la resistencia a la fatiga que varía entre 19% y 76% cuando se trabaja con esfuerzos de 764 y 650 MPa. respectivamente.

* La aplicación el recubrimiento Ni-Co-B al acero SAE 4140 produce una disminución de la resistencia a la fatiga entre un 7% y un 61%. Así mismo el límite de fatiga del material recubierto sufrió una disminución del 33%, pasando de 573 MPa a 380 MPa. Esto podría ser explicado por la presencia de esfuerzos de tracción en el recubrimiento, los cuales favorecen la nucleación de grietas de fatiga en la intercara recubrimiento-substrato.

* Para la condición de corrosión-fatiga, el acero SAE 4140 recubierto disminuye la resistencia a la fatiga un 19% cuando se aplican altos esfuerzos (764 MPa.). Por otra parte cuando se trabaja con bajos esfuerzos (650 MPa.) el material recubierto incrementa su resistencia a la fatiga en un 26%. En ambos casos la comparación se ha establecido con el material base en la misma condición de corrosión-fatiga. El incremento que se produce en la resistencia a la fatiga indica que en este caso (bajos esfuerzos) el recubrimiento actúa como una barrera protectora contra la solución corrosiva evitando el ataque temprano del substrato y retardando por tanto la falla del conjunto.

* Comparando los resultados de fatiga al aire y corrosión-fatiga para la condición del material recubierto, se observó una disminución de 29% de resistencia a la fatiga cuando se aplican altos esfuerzos (764 MPa). En tanto que, para el caso de bajos esfuerzos (650 MPa) la disminución es de un 17%, acercándose al

comportamiento del material recubierto ensayado al aire, esto es coherente con el punto anterior, donde se observó que el recubrimiento ofrece un mejor comportamiento a bajos esfuerzos.

* Tanto en los ensayos de tracción como en los de fatiga se observó desprendimiento del recubrimiento Ni-Co-B del material base, evidenciando con ello una mala adherencia. (Fig. 3-22 y 3-23).

RECOMENDACIONES.

- * Un aspecto positivo de este trabajo es que se determinó que a bajos esfuerzos y en condiciones de corrosión-fatiga el recubrimiento Ni-Co-B ofrece cierta protección al acero SAE 4140. Sin embargo debido al desprendimiento que se observa en los ensayos tanto de tracción como de fatiga es conveniente evaluar la adherencia entre el recubrimiento y el sustrato.
- * Hacer un mejor control del proceso de deposición del recubrimiento.
- * Realizar estudios con diferentes espesores de recubrimiento y determinar como varían las propiedades de fatiga en función de estos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] ASM Handbook. Vol. 19. Fatigue and Fracture 1997.
- [2] Dieter, G. E “Mechanical metallurgy”. Edit. McGraw-Hill Co. New York. (1986).
- [3] Forrest, P. G. “Fatiga de los metales”. Edit. URMO España. (1972).
- [4] Dieter, G. E. “Metalurgia Mecánica”. Edit. McGraw-hill. España. (1967).
- [5] Naukowo, W. and Warsaw, W. “Fatigue and Fracture”. Edit. Sijhoff & Noordhoff International Publishers. The Netherlands. 1978.
- [6] Forsyth, P. J. E. “The physical Basis of Metal Fatigue”. Edit. American Elsevier Scientific Publishing Company. New York, (1969).
- [7] Metals Handbook. “Fatigue Testing” Vol. 8.
- [8] Norton, Robert L. “Diseño de Máquinas”. Edit. Prince Hall . N.Y (2001).
- [9] Collins, J. A. “Failure of Materials in Mechanical Design” Edit. John Wiley. (1981).
- [10] Bernard-Michel-Philibert-Talbot. “Metalurgia General”. Edit Hispano Europea. España. (1973).
- [11] Herbert, Uhlig, “Corrosión y control de corrosion”. Edit. URMO. (1963)
- [12] Leyensetter, A. “Tecnología de los oficios Metalúrgicos”. Edit. Reverté, S.A. (1974).
- [13] Caballero; Luis X. “Nickel-Cobalto-Boron alloy deposited on a Substrate” Diamond Technologies Company. (1994).
- [14] 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.
- [15] Berrios J. A.; “Effect of thickness of an Electroless Ni-P deposit on the mechanicals properties of an AISI 1045 plain carbon Steel”. Surface and coating Technology. Volúmenes 108-109, issues 1-3, 10 de Octubre de 1998, pág. 466-472.

- [16] Ortiz y Mariño; “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. (2000).
- [17]] Pertúz. A. “Influence of a commercial Electroless Ni-P deposit on the fatigue properties of a notched and unnotched SAE 4140 steel”. Surface and Coatings Technology. Volumen 133-134, Noviembre de 2000, pág. 572-582.
- [18] Campillo, B. et al. “Electrodeposited Ni-Co-B alloy: Application as corrosion resistant coating and in water electrolysis”. Materials science and Engineering C- Elsevier. Volumen 19, sigues 1-2, 02 de Enero de 2002, pág. 115-118.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE FATIGA Y CORROSION-FATIGA DE UN ACERO SAE 4140 RECUBIERTO CON UNA ALEACIÓN DE Ni-Co-B.

Presentado Ante la Ilustre
Universidad central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero Metalúrgico
Por el Br. Pimentel A. Pablo J.

Caracas, junio de 2005.

ACTA

Quienes suscriben, miembros del jurado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, para examinar el Trabajo Especial de Grado intitulado:

ESTUDIO DE FATIGA Y CORROSION-FATIGA DE UN ACERO SAE 4140 RECUBIERTO CON UNA ALEACIÓN DE Ni-Co-B.

Presentado ante la ilustre **Universidad Central de Venezuela** por el Br. Pimentel A. Pablo J., dejan constancia de lo siguiente:

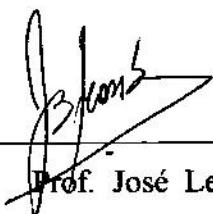
Hemos leído este trabajo y participado en su discusión, encontrando que el mismo es suficiente en contenido, calidad y extensión para cumplir con todos los requerimientos establecidos para optar al título de Ingeniero Metalúrgico.

En fe de lo cual se levanta la presente acta en Caracas a los 14 días del mes de Junio de 2005.



Prof. Eli Saúl Puchi

Tutor



Prof. José Leon

Jurado



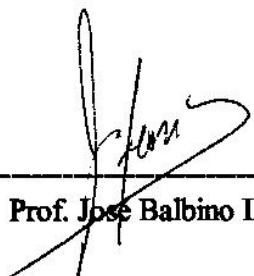
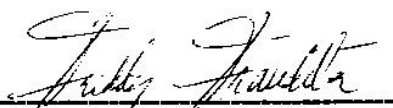
Prof. Fraudita Freddy

Jurado

VEREDICTO

Los suscritos, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Br. **Pablo Pimentel**, C. I. 2992794, el cual lleva por título "**Comportamiento a la Fatiga y Corrosión-Fatiga de un Acero SAE 4140 Recubierto con una Aleación de Ni-Co-B**", hemos acordado otorgarle una **Mención Honorífica** por la extraordinaria calidad de la investigación realizada la cual, en opinión de este Jurado, sobrepasa ampliamente el nivel normalmente exigido en este tipo de Trabajo.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta, en Caracas a los catorce días del mes de Junio del 2005, dejándose constancia que, de acuerdo a la Normativa vigente, actuó como Coordinador del Jurado Examinador el Profesor Eli Saúl Puchi Cabrera.


Prof. José Balbino León
Prof. Freddy Fraudita.
Prof. Eli Saúl Puchi C.

DEDICATORIA

**A la memoria de mi Madre,
A la UCV, fuente de Luz.
A Gabriele y Alicia Visconti,
A MariCarmen Visconti.**

AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Eli Saúl Puchi Cabrera** por haber dirigido mi trabajo de grado.

A la **Prof. Anna Di Prinzio** y **Engels Ochoa**, por su importante
apoyo prestado para la realización de este trabajo.

A mis amigas **Dilsie Díaz** y **Caridad Cumache**.

A mi amigo Freddy Virgos.

Pablo J. Pimentel A.

**ESTUDIO DE FATIGA Y CORROSION-FATIGA DE UN ACERO SAE 4140
RECUBIERTO CON UNA ALEACIÓN DE Ni-Co-B.**

**Tutor: Prof. Eli Saúl Puchi C. Tesis.
Ciudad, U.C.V. Facultad de Ingeniería.**

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Año 2005.

Palabras Claves: Recubrimiento Ni-Co-B, Fatiga, Corrosión-fatiga, Fractografía.

Resumen. Se realizó un trabajo de investigación con el fin de estudiar el comportamiento a fatiga y corrosión - fatiga de un acero SAE 4140 recubierto con una aleación de Ni-Co-B. Los ensayos se llevaron a cabo en condición de flexión rotativa. Se realizaron ensayos de fatiga al aire tanto para el material base como para el material recubierto, así como ensayos de corrosión - fatiga para el material base y el material recubierto utilizando para ello una solución de NaCl al 3%. Los ensayos se realizaron aplicando esfuerzos que representaron una fracción del esfuerzo de fluencia tanto del material base como del material recubierto, los cuales se obtuvieron a partir de los ensayos de tracción realizados para cada condición. Un primer punto a observar es que el esfuerzo de fluencia y la resistencia máxima a la tracción del material recubierto disminuyen pero no de una manera significativa con respecto al material base sin recubrimiento.

Los resultados de resistencia a la fatiga fueron obtenidos aplicando la ecuación de Basquin y el límite de fatiga para ambas condiciones del material se obtuvo mediante el método de la escalera. 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. De igual forma, 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, se observó que para altos esfuerzos este disminuye la resistencia a la fatiga en un orden de 19% con respecto al material base en la misma condición de corrosión-fatiga.

Para el caso de bajo de bajo esfuerzo el material recubierto eleva la resistencia a la fatiga en un 26% con respecto al material base en la misma condición de corrosión-fatiga.

Comparando los resultados de corrosión-fatiga del material recubierto con respecto al material recubierto ensayado al aire se observó que:

- a) Para altos esfuerzos (764 MPa.) el material recubierto disminuye su resistencia a la fatiga en el orden del 29 %.
- b) Para bajos esfuerzos (650 MPa.) la disminución en cambio es de 17%.

El estudio fractográfico reveló que el recubrimiento inhibe la formación de múltiples inicios de crecimiento de grietas de fatiga, protegiendo al material substrato de la solución salina.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	3
1.- MARCO TEORICO.....	3
1.1.- GENERALIDADES SOBRE EL ACERO SAE 4140.....	3
1.2.- FATIGA.....	4
1.2.1.- Generalidades.....	4
1.2.2.- Mecanismo de las fallas por fatiga.....	5
1.2.2.1.- Etapa de iniciación de las grietas.....	6
1.2.2.2.- Etapa de propagación de las grietas.....	7
1.2.2.3.- Etapa de fractura.....	9
1.2.3.- Característica macroscópica de la falla por fatiga.....	9
1.2.4.- Ciclos de tensión o distribución de cargas.....	11
1.2.5.- La curva de Wöhler o S-N.....	12
1.2.5.1.- Resistencia a la fatiga a través del modelo de Basquin.....	14
1.2.5.2.- Limite de fatiga-metodo de la escalera.....	14
1.2.6.- Factores que afectan la vida a la fatiga.....	16
1.2.6.1.- Condiciones superficiales.....	16
1.2.6.2.- Tamaño de grano y dirección.....	18
1.2.6.3.- Composición del material.....	19
1.2.6.4.- Tratamientos térmicos.....	19
1.2.6.5.- Soldadura.....	19
1.2.6.6.- Inclusiones.....	20
1.2.6.7.- Temperatura.....	20
1.2.6.8.- Efecto del tamaño de las piezas.....	21
1.2.6.9.- Efecto de la concentración de tensiones en la fatiga.....	22
1.2.6.10.- Efecto de la tensión media en la fatiga.....	24
1.2.6.11.- Efecto de la corrosión.....	25
1.2.6.12.- Fatiga térmica.....	25
1.2.7.- Fatiga-corrosión.....	25
1.2.7.1.- Generalidades.....	25
1.2.7.2.- Mecanismo de la fatiga-corrosión.....	26
1.2.8.- El recubrimiento Ni-Co-B.....	27
1.2.8.1.- Introducción.....	27
1.2.8.2.- Características principales de la aleación Ni-Co-B ^{Al}	28
1.2.8.3.- Método de deposición de la aleación Ni-Co-B.....	29
1.2.8.4.- Equipo utilizado para hacer el recubrimiento de Ni-Co-B.....	30
1.2.8.5.- Activación de la superficie del sustrato.....	32
1.3.- ANTECEDENTES DE ESTUDIOS REALIZADOS EN EL ÁREA.....	33
2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	37
2.1.- MATERIAL.....	37
2.2.- ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS.....	37
2.2.1.- Pulido de las probetas.....	38
2.3.- DEPOSICION DEL RECUBRIMIENTO.....	39
2.4.- ENSAYOS DE TRACCION.....	39
2.4.1.- Corrección por deformación elástica.....	40
2.4.2.- Obtención de la curva Esfuerzo-Deformación Real.....	41
2.5.- ENSAYOS DE FATIGA.....	42

2.5.1.-Cálculo del momento flector.....	43
2.5.2.- Ensayos de fatiga-corrosión.	44
2.5.3.- Obtención de la curva de Wöhler y parámetros de la Ec. De Basquin.....	45
2. 5. 4.- Determinación del límite de fatiga por el método de la escalera.....	46
2. 6.- ESTUDIO FRACTOGRAFICO (MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO).	47
2.6.1.- Preparación de las muestras.....	48
2.6.1.2.- Limpieza de las muestras.....	49
2. 6. 2.- Microscopia electrónica de barrido - observación de las muestras.....	49
2.7.- ENSAYO DE DUREZA.....	50
2.8.- ENSAYO DE RUGOSIDAD.....	50
3.- RESULTADOS Y ANALISIS.....	51
3.1.- ESAYOS DE TRACCION.....	51
3.2.- ENSAYOS DE FATIGA.....	53
3.3.- ENSAYOS DE DUREZA.....	61
3.4.-ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X POR DISPERSIÓN DE ENERGÍA (EDS).....	62
3.5.- MEDIDA DE RUGOSIDAD.....	63
3.6.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO (MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO).	64
3.6.1. Fatiga al aire material base.....	64
3.6.2. Fatiga-corrosión material base.....	66
3.6.3. Fatiga al aire material recubierto.....	67
3.6.4. Fatiga-corrosión del material recubierto.....	71
3.6.5. Análisis de los cortes longitudinales.....	74
CAPITULO II.....	79
4. CONCLUSIONES.	79
RECOMENDACIONES.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	82

INDICE DE TABLAS

CAPITULO I	3
1.- MARCO TEORICO	3
<i>Tabla 1-1. Composición química industrial.</i>	<i>3</i>
2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	37
<i>Tabla 2-1. Composición química del acero SAE 4140.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2-2. Propiedades mecánicas del acero SAE 4140.....</i>	<i>37</i>
3.- RESULTADOS Y ANALISIS.....	51
<i>Tabla 3-1. Resultados de los ensayos de tracción del material base.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 3-2. Resultados de ensayos de tracción del material recubierto con Ni-Co-B.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 3-3. Resultados de los Ensayos de fatiga al aire del material base.</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 3-4. Resultados de los ensayos de fatiga al aire para la determinación del límite de fatiga del acero SAE 4140 sin recubrimiento.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 3-5. Aplicación del método de la escalera para la determinación del límite de fatiga del acero SAE 4140 sin recubrimiento.</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 3-6. Obtención de la ecuación de Basquin.</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 3-7. Resultados de los ensayos de fatiga al aire del acero SAE 4140 con recubrimiento.</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 3-8. Obtención de la ecuación de Basquin.</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 3-9. Resultados de los ensayos de fatiga al aire para la determinación de límite de fatiga del acero SAE 4140 con recubrimiento.</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 3-10. Resultados de los ensayos de corrosión-fatiga del acero SAE 4140.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 3-11. Obtención de la ecuación de Basquin.</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 3-12. Resultados de los ensayos de corrosión-fatiga del acero SAE 4140 con recubrimiento</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 3-13. Obtención de la ecuación de Basquin.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 3-14. Resultados de Microdureza Vickers.</i>	<i>61</i>

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I	3
1.- MARCO TEORICO	3
Fig. 1-1. Las tres etapas de la falla por fatiga	5
Fig. 1-2. Vista esquemática de la formación de una Intrusión y una 7 Extrusión en una banda de deslizamiento	7
Fig. 1-3. Representación esquemática de las etapas I y II de 8 propagación de grietas	8
Fig. 1-4. Etapa II del crecimiento de grieta mediante el proceso 9 de despunte plástico	9
Fig. 1. 5. Diferentes zonas generadas en la superficie de fractura 10 por el avance de la grieta	10
Fig. 1-6. Ciclos típicos de fatiga	11
Fig. 1-7. Curvas Wöhler o curvas S-N	13
Fig. 1-9. Efecto del esfuerzo medio en la vida a la fatiga	24
Fig.1-10. Equipo experimental para la electro deposición de la 31 aleación de Ni-Co-B	31
2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	37
Fig. 2-1. Probeta de tracción	38
Fig. 2-2. Probeta de fatiga	38
Fig. 2-3. Máquina INSTRON para ensayos de tracción	39
Fig.2-4. Máquina para ensayos de fatiga en flexión rotativa	42
Fig. 2-5. Cámara de corrosión	44
Fig. 2-6 Cortadora	48
Fig. 2-7. Equipo de ultra sonido	49
3.- RESULTADOS Y ANALISIS	51
Fig.3-1. Curvas de tracción del material base	52
Fig. 3-2. Curvas de tracción del material recubierto	52
Fig. 3-3. Curva de resistencia y limite de fatiga del acero SAE 4140	54
Fig. 3-4. Resistencia y limite de fatiga del acero SAE 4140 recubierto con Ni-Co-B	56
Fig. 3-5. Curva de resistencia a la corrosión-fatiga del acero SAE 4140	57
Fig. 3-6. Curva fatiga-corrosión del acero SAE 4140 con recubrimiento	58
Fig. 3-7 Curvas de resistencia y limite de fatiga del acero SAE 4140, con y sin recubrimiento y ensayos de corrosión- fatiga para ambos casos	59
Fig. 3-8 Curvas de dureza para el recubrimiento Ni-Co-B	61
Fig. 3-9. Análisis puntual en recubrimiento Ni-Co-B	62
Fig. 3-10. Perfilometría óptica 3D del material base	63
Fig. 3-11. Perfilometría óptica 3D del material recubierto	63
Fig. 3-12. Superficie de fractura del material base a 650 MPa	64
Fig. 3-13. Superficie de fractura del material base a 754 MPa	65
Fig.3-14. Superficie de fractura del material base en corrosión a 6650 (a) y 754 (b) MPa respectivamente	66
Fig. 3-15. Superficie de fractura del material recubierto a 650 MPa	68
Fig. 3-16. Superficie de fractura del material recubierto a 764 MPa	70
Fig. 3-17. Superficie de fractura del material recubierto a 650 MPa	72
Fig. 3-18. Superficie de fractura del material recubierto a 764 MPa	73
Fig. 3-19. Vista de cortes longitudinales del material base	74
Fig. 3-20. Vista de cortes longitudinales del material recubierto	76
Fig. 3-22. Probetas con recubrimiento Ni-Co-B ensayada en tracción y fatiga, respectivamente	78