TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EFECTO DEL DAÑO ACUMULADO EN EL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DEL ACERO SAE 4340 TEMPLADO Y REVENIDO

Tutor: Prof. Eli Saúl Puchi C.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar por él titulo de
Ingeniero Metalúrgico
por el Br. Antonio J. Ramos P.

Caracas, Noviembre de 2004

RESUMEN

Ramos Pereyra Antonio J.

EFECTO DEL DAÑO ACUMULADO EN EL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DEL ACERO SAE 4340 TEMPLADO Y REVENIDO

Tutor: Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas–Venezuela.

Palabras Claves: Acero 4340, Daño acumulado, Fatiga.

El presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar el efecto del daño acumulado sobre el comportamiento a la fatiga del acero SAE 4340 templado y revenido. Para tal fin se realizaron ensayos de fatiga al aire en condiciones de flexión rotativa sobre especimenes de fatiga sin entalla dimensionados según norma ASTM E606. Los ensayos de fatiga fueron efectuados a cinco niveles de esfuerzos distintos que representan diferentes fracciones del esfuerzo de fluencia del material, para así determinar el comportamiento a la fatiga del material bajo condiciones de alto ciclaje (Numero total de ciclos > 10^5); estos resultados permitieron la elaboración la curva de Wöhler característica del material, y en base a esta, fueron posteriormente realizados ensayos de daño acumulado en dos bloques de esfuerzos ascendentes y descendentes, involucrando diferentes fracciones de vida consumida en el material, los cuales establecieron el comportamiento del material al daño acumulado bajo condiciones de alto ciclaje. Los resultados revelaron que cuando el daño acumulado en el material se realiza de forma descendente, es decir primeramente a un esfuerzo mayor y luego a uno de menor magnitud, el comportamiento del material ante el daño se desvía fuertemente de forma negativa de la Teoría de Daño Acumulativo Lineal propuesta por Miner. Lo que radica en que la aplicación de esta teoría produzca una sobreestimación de la vida real del material bajo estas condiciones de aplicación de cargas. Por otra parte los resultados de los ensayos de daño acumulado en dos bloques con esfuerzos ascendentes

evidenciaron que el comportamiento del material ante el daño se desvía de forma positiva de lo descrito por Miner, lo que implica una subestimación de la vida real del material con la aplicación de esta teoría, hecho este que se evidencia mas claramente para fracciones de vida consumida superiores a 0,5.

Por otra parte el estudio Fractográfico de las superficies de fractura realizado posteriormente al los experimentos sugieren que la aplicación sobre el material de bloques de esfuerzo en forma ascendente, propician múltiples inicios de grietas en el material, mientras que la aplicación de bloques de esfuerzos descendente propician la formación de una única zona de inicio de grietas en el mismo. La observación sistemática de los cortes longitudinales cercanos a la zona de inicio de grieta, evidencio la no presencia en las probetas de grietas primarias paralelas a la grieta principal.

VEREDICTO

Los suscritos miembros del jurado examinador designado por el Consejo de 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 Bachiller **ANTONIO JOSE RAMOS PEREYRA CI: 14965384**, el cual lleva por titulo **"EFECTO DEL DAÑO ACUMULADO SOBRE EL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DEL ACERO SAE 4340 TEMPLADO Y REVENIDO"**, decidimos conferirle una **MENCION HONORIFICA** como premio al esfuerzo realizado y como estimulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración de esta Tesis de Grado.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta en Caracas a los 16 días del mes de Noviembre del 2004, dejándose constancia que, de acuerdo con la normativa vigente actuó como coordinador del Jurado examinador el Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera.

Prof. Eli Saúl Puchi

Tutor

Prof. Jose Balbino Leon

Jurado

Prof. Freddy Fraudita

Jurado

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado en su totalidad
a dos personas cuya sabiduría, cariño y compañía
han hecho de mi quien soy hoy en día ...
Mis abuelos “Nicolás Ramos” y “Jorge Pereyra”

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a mi madre por haberme brindado la oportunidad de ser quien soy y por brindarme todo el cariño, apoyo, orientación y compresión que una madre debe darle a su hijo, me has dado de más madre, no me debes nada soy yo quien te debe....

A mi Padre por hacer de mi una mejor persona y enseñarme desde muy pequeño que uno debe luchar sin descanso por alcanzar sus metas y que en esta vida solo hace falta querer para poder...

A mi Tonta por enseñarme que si existe el amor y por llenar mi vida de felicidad y de ganas de futuro, Te amo, gracias por estar siempre a mi lado ...

Agradezco a mi tutor el Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera por su enseñanza, compresión, paciencia y apoyo brindado a lo largo de todo el tiempo que compartí bajo su tutoría.

Agradezco a la Casa que Vence las Sombras la UCV por ser mi hogar durante todos estos años y haberme permitido crecer dentro de ella a nivel académico y humano...

Agradezco a toda la gente de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica que con su ayuda y orientación hicieron posible que este trabajo fuera una realidad: Engels Ochoa, Luis Miguel Fernández, Luis Perdomo, Víctor Torres, Crisanto Villalobos... si se me olvida alguien pido disculpas, pero saben muy bien que les estoy eternamente agradecido.

Agradezco muy especialmente a José Gregorio La Barbera por la paciencia y orientación brindada hacia mi persona en la realización de este trabajo. Gracias Flaco...

Finalmente Agradezco al FONACIT por brindar todo el soporte económico necesario para la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN 1

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.- ACERO SAE 4340 3

2.2.- FATIGA 5

2.2.1.- Introducción 5

2.2.2.- Ciclos de esfuerzo 6

2.2.3.- Fractura por Fatiga 7

2.2.4.- Fundamentos Estadísticos de los Ensayos de Fatiga y Las Curvas S-N 8

2.2.4.1.- Causas de la Dispersión 9

2.2.4.2 .- Análisis de los datos de Fatiga 10

2.2.4.3.- Curvas S-N 11

2.2.5.-Resistencia a la Fatiga de los Aceros 12

2.3.- DAÑO ACUMULADO 14

2.3.1.- Introducción 14

2.3.2.- Ensayos para la Evaluación del Daño Acumulado 16

2.3.3.- Teorías y Modelos de Daño Acumulado 17

2.3.3.1.- Teorías lineales de daño acumulado 18

2.3.3.1.1.- Ley de daño acumulado lineal 18

2.3.3.1.2.- Teoría lineal de daño en dos etapas 19

2.3.3.2.- Teorías de Daño No- Lineales 21

2.3.3.2.1.- Teoría de Marco-Starkey 21

2.3.3.2.2.- Modelo de la Curva de Daño (DCA) Simple y Modelo de la Doble Curva de Daño (DDCA) 22

2.3.3.2.3.- Teorías Basadas en la Modificación de Curvas de Vida a la Fatiga 26

2.3.3.2.4.- Teorías Basadas en el Crecimiento de Grieta 28

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1.- FLUJOGRAMA DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 32

3.2.- MATERIAL BASE 33

3.3.- CORTE Y MAQUINADO DE LAS PROBETAS 33

3.3.- PREPARACIÓNSUPERFICIAL 34

3.4.- ENSAYOS DE FATIGA 35

3.4.1.- Elaboración de la Curva Wöhler del Material 38

3.4.2.- Ensayos de Daño Acumulado en dos Bloques de Esfuerzo 39

3.5.- ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO 41

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 42

4.1.- CONDICIÓN SUPERFICIAL DE LAS PROBETAS 42

4.2.- ENSAYOS DE FATIGA 43

4.2.1.- Evaluación de la resistencia a la fatiga del material 43

4.2.2.- Comportamiento del Material ante el daño Acumulado 46

4.3.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO 50

4.3.1.- Estudio de las Superficies de Fractura 50
4.3.2.- Verificación de grietas Secundarias 56

CAPITULO V
CONCLUSIONES 59

CAPITULO VI
RECOMENDACIONES 61

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 62

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Tabla 2.1 Composición química del acero SAE 4340 3
Tabla 2.2 Condiciones y propiedades del acero SAE 4340 4
Figura 2.1 Esfuerzos Típicos de Fatiga 6
Figura 2.2 Fractura por fatiga del semieje trasero de un automóvil 7
Figura 2.3 Típicas curvas de resistencia a la fatiga S-N 11
Figura 2.4 Gráfico de DLDR aplicada a un ensayo de esfuerzos descendentes en dos Bloques 21
Figura 2. 5 Representación Grafica de la curva de Daño vs Relación de Ciclos para la Teoría de Marco-Starkey 22
Figura 2. 6 Gráfico Comparativo de la DDCA con la DLDR y la DCA 25
Figura 2.7 Resultados obtenidos por Manson – Halford en ensayos de dos bloques de esfuerzos Descendentes sobre un Acero inoxidable 316 25
Figura 2.8 Representación de la LDR de Miner y la teoría de Corten-Dolon 27
Figura 2.9 Representación esquemática de la curva S-N modificada de Leipholz 28
Figura 2.10 Curva D-r propuesta por Vasek y Polak 31
Figura 3. 1 Flujograma del Procedimiento Experimental 32
Tabla 3.1 Propiedades Mecánicas del material suministrado 33
Figura 3.2 Dimensiones de la Probetas Cilíndricas de Fatiga ASTM E- 606 33
Figura 3.3 Torno MYFORD modelo ML7-R 35
Figura 3.4 Equipo Fatigue Dynamics modelo RBF – 200 36
Tabla 3.2 Distribución de Probetas en Función de los Niveles de Esfuerzo de ensayo 39
Tabla 3.3 Distribución de probetas para los Ensayos con Esfuerzos Ascendentes 40
Tabla 3.4 Distribución de probetas para los Ensayos con Esfuerzos Descendentes 40
Tabla 4.1 Rugosidad Promedio de las Probetas de ensayo 42
Figura 4.1 Perfilometria 3D de las Superficie de las Probetas estudiadas 42

Tabla 4.2 Resultados de los ensayos de fatiga realizados para la construcción de la curva de Wöhler del material 44
Figura 4.3 Curvas de Wöhler características para probetas entalladas y no entalladas 45
Tabla 4.3 Resultados de los ensayos de dos bloques aplicados de forma descendente 47
Tabla 4.4 Resultados de los ensayos de dos bloques aplicados en forma Ascendente 48
Figura 4.4 Gráficos comparativo de las fracciones de vida consumida y remanente obtenidas experimentalmente 48
Figura 4.5 Fotomicrografías correspondientes a las probetas de los ensayos de dos bloques ascendentes 50
Figura 4.6 Fotomicrografías correspondientes a las probetas de los ensayos de dos bloques descendentes 53
Figura 4.7 Grietas segundarias encontradas en las superficies de fractura de las probetas correspondientes a los ensayos de dos bloques ascendentes 55
Figura 4.5 fotomicrografías correspondientes a los cortes longitudinales realizados 58

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de fatiga ha sido estudiado desde 1850 al observar que un metal sometido esfuerzos fluctuantes, podía fallar aun al ser sometido a un esfuerzo mucho menor al requerido para su fractura por una única aplicación estática de carga y que esta falla generalmente se produce luego de un período considerable de servicio del material. Fue entonces cuando las fallas bajo una condición dinámica de esfuerzos aplicados fueron llamadas fallas por fatiga. Este fenómeno se ha vuelto progresivamente más importante como un motivo de desarrollo tecnológico ya que gran cantidad de partes de equipos y maquinarias como: Automóviles, aviones, compresores, bombas, turbinas etc. se encuentran sometidas a cargas repetitivas o vibraciones, haciendo que esta sea responsable de aproximadamente el 90 % de las fallas en servicio por causas mecánicas, [1].

El estudio convencional de la fatiga se realiza asumiendo una amplitud constante de esfuerzos aplicados sobre el material. Sin embargo en gran variedad de condiciones de servicio, los componentes o piezas están sometidas a historiales de esfuerzo en donde las cargas no poseen una amplitud constante, es decir el daño progresivo del material se produce a diferentes niveles de esfuerzos cíclicos cada uno de los cuales produce un daño sobre el mismo. El deterioro de los materiales bajo estas condiciones es conocido como “Daño acumulado por fatiga”.

El Problema de la predicción de la vida de los componentes en servicio sometidos a condiciones de daño acumulado, motivó el estudio de este fenómeno y de los mecanismos que este mismo implica. Fue entonces cuando en 1945 Miner[2] basado en el concepto de daño acumulativo lineal de Palmgren postuló el primer modelo matemático al respecto “La ley de daño acumulado lineal” (LDR). Luego de Miner[2] se han formulado más de 50 modelos para abordar este problema. Algunos de ellos con una base netamente fenomenológica, otros desarrollados tanto analítica como semi-

analíticamente y varios de ellos con formulaciones matemáticas no-lineales. Lo cierto es que sin importar su
basamento los modelos formulados hasta ahora, presentan soluciones al problema de daño acumulado bajo condiciones sumamente específica, y ninguno de ellos ha podido mejorar la simplicidad y aplicabilidad del modelo propuesto por Miner[2] en 1945. Razón por la cual a pesar de la conocida inexactitud bajo gran variedad de condiciones de la LDR, la misma sigue siendo aun el modelo matemático mas utilizado a nivel industrial para la predicción de la vida de componentes sometidos a condiciones de daño acumulado por fatiga.

Bajo este contexto el presente trabajo plantea como objetivo principal el estudio y la evaluación del comportamiento al daño acumulado por fatiga del acero SAE 4340 Templado y Revenido en condición de flexión rotativa, sobre probetas de fatiga no entalladas, lo que permite el estudio de este fenómeno bajo condiciones específicas de alto ciclaje (N >100.000 ciclos) con la finalidad de proporcionar datos actualizados que permitan evaluar el verdadero comportamiento de este material frente a las predicciones que arroja la LDR.

CAPÍTULO II

2.- MARCO TEÓRICO

2.1.- ACERO SAE 4340

El acero 4340 pertenece al grupo de los aceros aleados, específicamente a la serie 43XX, también conocidos como los aceros Níquel – Cromo –Molibdeno su composición característica se muestra en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Composición química del acero SAE 4340 [3]:

% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	% Mo	% S	% P
0,38 – 0,43	0,60 – 0,80	0,15 – 0,35	1,65 – 2,00	0,70 – 0,90	0,20 – 0,30	0,040 máx.	0,035 máx.

Como puede apreciarse en la tabla 2.1 cantidades de ciertos elementos que no están específicados en su nomenclatura o que no son requeridos en la aleación pueden también ser hallados en los aceros aleados. Muchos de estos elementos son introducidos de forma indefectible en los diferentes procesos de refinación que sufre la aleación antes de llegar a su estado final (Desulfuración, Desfosforacion, Desgasficacion, etc.) y otros son introducidos para lograr alguna característica microestructural específica o para mejorar alguna propiedad en particular. Cada elemento posee su grado de aceptabilidad dentro de un acero aleado determinado, por ejemplo el Cu es aceptable en un acero SAE 4340 hasta 0,35 % luego de esta cantidad es considerado indeseable ya que su efecto es perjudicial para las propiedades y características de la aleación.

El acero 4340 se caracteriza por su gran templabilidad, tenacidad, resistencia a la fatiga e impacto y además por capacidad de dar buenas propiedades en piezas de gran sección. No presenta fragilidad de revenido y posee una buena máquinabilidad, además de una dureza elevada (400 Brinell). Generalmente el acero 4340 es utilizado en forma "bonificada" (Temple – Revenido), donde es utilizable hasta temperaturas de 500 °C.

El 4340 es utilizado generalmente en la industria automotriz para la fabricación de piezas alta solicitud de esfuerzo en servicio que requieren una dureza y tenacidad elevada. Tornillería de alta resistencia templada y revenida de gran sección, levas de mando, engranajes para ejes para carros y camiones, discos para frenos, cardanes, bielas para motores, árboles de leva para carros, ejes de transmisión de grandes dimensiones, trenes de aterrizaje de aeronaves, etc.

Sus principales propiedades mecánicas se encuentran reflejadas en la tabla 2.2:

Tabla 2.2 Condiciones y propiedades del acero SAE 4340:

Temperatura de temple en aceite [4]	800 – 830 ºC
Temperatura de revenido [4]	455 – 650 ºC
Resistencia a la tracción [4]	980 – 1373 MPa
Esfuerzo de fluencia [4]	930 – 1225 MPa
Dureza [5]	247 – 350 HB
Reducción de área [5]	56 %
Modulo de Young [5]	205 GPa

2.2.- FATIGA

2.2.1.- Introducción:

Un metal sujeto a repetitivos esfuerzos fluctuantes puede fallar a un esfuerzo más bajo que el requerido para causar su fractura con una única aplicación estática de carga. Las fallas que ocurren bajo estas condiciones dinámicas de aplicación de esfuerzo son llamadas fallas por fatiga. Las fallas por fatiga son producidas por la aparición de una pequeña grieta en la superficie del material, la cual se genera a partir de alguna discontinuidad que sirva como punto de e nucleación de las mismas; esta se propaga hacia interior del material en cada fluctuación o ciclo de aplicación de carga hasta que la sección remanente se hace muy pequeña para soportar la carga aplicada y ocurre la fractura por sobrecarga. Por consiguiente el daño por fatiga podría dividirse a grandes rasgos en tres etapas la cuales son:

1. Nucleación de la grieta.

2. Propagación de la grieta.

3. Fractura por sobre carga.

Todo lo antes expuesto nos hace pensar en la importancia del fenómeno de fatiga en el deterioro progresivo de sistemas mecánicos de todo tipo, en los cuales solo tres condiciones son necesarias para que exista una falla por fatiga:

- Un esfuerzo máximo de tensión con una magnitud lo suficientemente elevada.
- Una variación o fluctuación en dicho esfuerzo.
- Un número suficiente de fluctuaciones o ciclos carga aplicados sobre el material.

2.2.2.- Ciclos de esfuerzo:

Como podemos apreciar en lo anteriormente expuesto para que se produzca una falla por fatiga es imprescindible la presencia de una condición dinámica de aplicación de esfuerzo. Existen tres condiciones fundamentales de aplicación de esfuerzo fluctuantes que producen fallas por fatiga que pueden apreciarse en la Figura 2.1 y son a saber: (a) Ciclos de esfuerzos totalmente reversos, (b) ciclos de esfuerzos en tensión pulsantes o repetitivos y (c) Ciclos de esfuerzos irregulares o al azar.

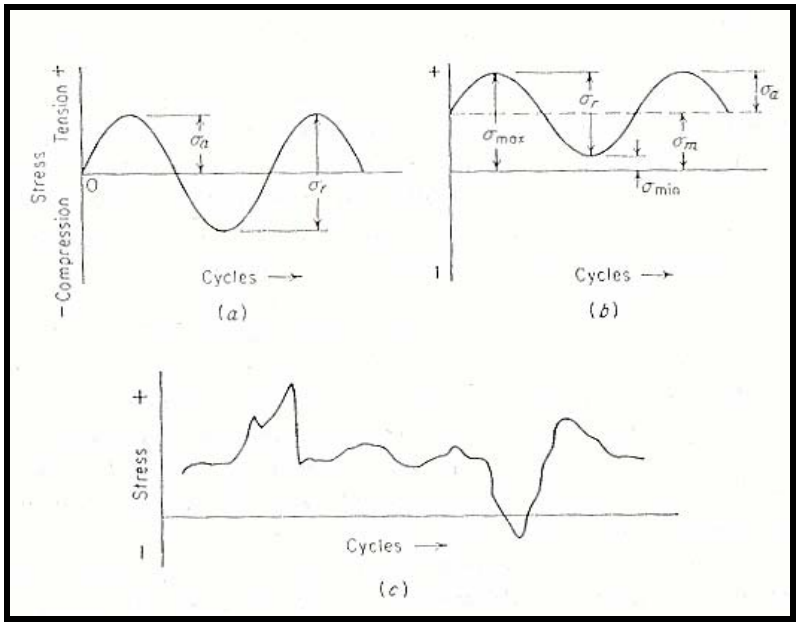


Figura 2.1 Esfuerzos Típicos de Fatiga [1].

La mayoría de las investigaciones de fatiga se realizan en máquinas de flexión rotatoria como es el caso del presente trabajo experimental, debido a que estas máquinas son seguras, de fácil manejo y permiten la evolución del comportamiento de gran cantidad de componentes en condiciones de servicio.

Sin embargo existen dos limitaciones de este tipo de máquinas para la evaluación de fatiga. Primero, están virtualmente limitadas al ensayo de probetas cilíndricas y segundo, la probeta está sometida únicamente a ciclos de esfuerzos reversos.

2.2.3.- Fractura por Fatiga:

Las Fallas por fatiga son particularmente indeseables pues estas se producen sin que sea apreciable una evidencia previa del peligro de falla en el componente. La fatiga resulta en la mayoría de los casos en fracturas de apariencia frágil, con muy poca deformación implicada, [1].

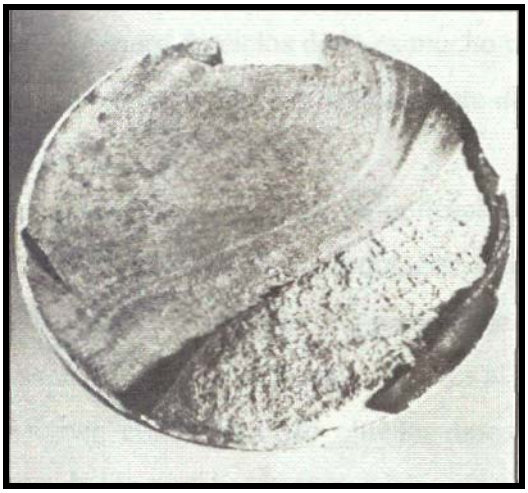


Figura 2.2 Fractura por fatiga del semieje trasero de un automóvil [6].

En líneas generales las superficies de fractura producidas por fatiga se reconocen por su apariencia, donde se pueden apreciar dos o tres zonas claramente identificables: En la primera zona, cercana a la nucleación de la grieta, la superficie de fractura presenta un aspecto liso donde se aprecian marcas conchoidales, también conocidas como marcas de playa, que evidencian el avance de la misma. En esta zona la grieta de fatiga se propaga con relativa lentitud. En algunas superficies de fractura es posible apreciar también una segunda zona que sigue a la antes mencionada en donde la grieta se propaga más rápidamente, en algunas ocasiones en varias direcciones a la vez, lo cual brinda una apariencia menos lisa que la zona inicial. Por último se aprecia una tercera zona correspondiente al área donde se produjo la fractura definitiva, cuando la sección restante del material no pudo soportar la carga aplicada; esta zona puede presentar un aspecto cristalino indicando que la fractura final a sido de tipo frágil o un aspecto fibroso indicando una fractura final de tipo dúctil (Figura 2.2).

2.2.4.- Fundamentos Estadísticos de los Ensayos de Fatiga y Las Curvas S-N:

Al ensayar un determinado número de probetas de fatiga similares al mismo nivel de esfuerzo se encuentra una considerable variación o dispersión en el número de ciclos a falla. La extensión de la dispersión depende de muchos factores; es mayor generalmente en probetas pulidas que en probetas entalladas, es mayor también en materiales de alta resistencia como es el caso del acero SAE 4340 que en materiales blandos y usualmente aumenta cuando el esfuerzo disminuye, [6].

El problema de la dispersión en los datos debe ser tomado en cuenta cuando se ensaya en condiciones de esfuerzos que sobre pasan el límite de fatiga y es aquí cuando son útiles las técnicas estadísticas. Ya que el principal propósito de los ensayos de fatiga es obtener datos que permitan predecir el comportamiento en servicio de determinado componente, el problema radica en estimar el comportamiento de un gran número de componentes en servicio a partir de un pequeño número de ensayos.

La adopción de métodos estadísticos de ensayo y análisis procuran un medio de hacer las estimaciones de laboratorio cuantitativas y/ o fijar su precisión.

Parte de la dispersión observada en los resultados de los ensayos de fatiga se debe a la variación en las condiciones y procedimientos de ensayo, los cuales deben ser cuidadosamente controlados cuando se hacen investigaciones estadísticas, pues esto es particularmente importante ya que no se puede distinguir con certeza entre la dispersión debida a las variaciones de ensayo y la dispersión producida por variación en el material, [6].

2.2.4.1.- Causas de la Dispersión:

Es posible obtener condiciones reproducibles fácilmente en ensayos de fatiga en flexión rotatoria, por lo que se adopta este método de ensayo cuando se requieren resultados con una verdadera representatividad estadística. Se han realizado gran cantidad de intentos por determinar la causa de la dispersión en este tipo de ensayos de fatiga. Ransom y Mehl [7] calcularon la dispersión introducida por errores experimentales en la colocación del momento de flexión y en la medida del diámetro de la probeta, y observaron que era pequeña comparada con la dispersión que observaron por las características metalúrgicas propias del acero aleado SAE 4340 utilizado; además no encontraron ninguna relación entre el número de ciclos a falla y la excentricidad en el montaje de la probeta. Por su parte Clayton-Cave y colaboradores [8] encontraron que la dispersión en ensayos con un acero 0,24% de C, estaba influenciada por el método de preparación de la probeta, y que cuando esta era realizada de forma cuidadosa, los resultados fueron significativamente distintos cuando se utilizaron un conjunto de máquinas de flexión rotativa, en lugar de una sola.

A partir de estos y otros experimentos, puede deducirse que los materiales presentan una disposición a la dispersión en cuanto a la resistencia a la fatiga se refiere y que la variación no es debida en su totalidad a cambios en el procedimiento de ensayo. Esto podría esperarse por la falta de homogeneidad de los metales, aún y cuando no haya sido posible establecer claramente todavía la contribución de los diversos factores metalúrgicos a la dispersión.

2.2.4.2 .- Análisis de los datos de Fatiga:

Los datos que se analizan usualmente cuando se aplica la estadística es el número de ciclos a falla de una muestra de probetas ensayadas a un valor de esfuerzo constante. Se ha encontrado que la distribución de frecuencia del número de ciclos a falla (Nf) no se ajusta a la distribución normal o de Gauss, pero que se puede obtener una aproximación bastante rigurosa, si se transforma los datos a escala logarítmica, lo cual se conoce como distribución logarítmica normal. La mayoría de los análisis estadísticos de fatiga son representados de esta forma, utilizando la Media Aritmética y la Desviación Estándar como las herramientas estadísticas más importantes para el monitoreo estadístico de los resultados.

2.2.4.3.- Curvas S-N:

La Resistencia a la fatiga se define como el valor máximo de esfuerzo alternante o fluctuante que resistirá sin fallo un material para un número dado de ciclos. El procedimiento para determinar la resistencia a la fatiga es ensayar un número de probetas similares, sometiéndolas a diferentes valores particulares de esfuerzo fluctuante hasta su rotura, así se obtiene la relación existente entre la carga o esfuerzo fluctuante (S) y el número de ciclos para la fractura o ciclos a falla (N), esta representación se denomina comúnmente curva S-N, [6].

La figura 2.3 muestra la típica curva S-N, donde el número de ciclos a falla es usualmente representado en escala logarítmica dado que su valor puede variar desde unos millares hasta muchos millones. El esfuerzo también suele representarse en escala logarítmica y utilizando esta representación doble logarítmica los resultados pueden ser representados como una línea recta. Cuando la curva es determinada en condiciones de flexión rotativa es llamada también curva de Wöhler en honor al investigador que entre 1858 y 1870 realizó investigaciones de la fatiga de los metales y que entre otras cosas diseño la máquina de fatiga de flexión rotatoria, que ha permitido la mayor parte de los ensayos e investigaciones estadísticas de la fatiga de los materiales que se han realizado hasta nuestros días.

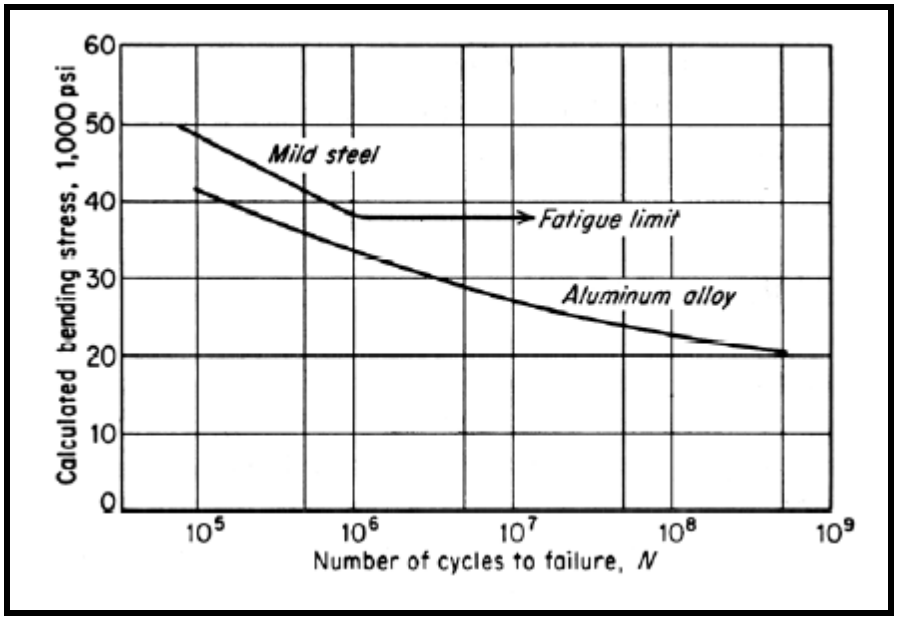


Figura 2.3 Típicas curvas de resistencia a la fatiga S-N [1].

Como se puede apreciar también en la Figura 2.3 a medida que el esfuerzo fluctuante decrece el número de ciclos a falla aumenta. Para gran parte de los metales a excepción de algunos materiales no ferrosos como aleaciones de aluminio y cobre, esta condición llega a un punto en el cual el número de ciclos a falla para un esfuerzo fluctuante bajo tiende a infinito y la línea de la curva S-N puede representarse de forma horizontal. Este punto es llamado límite de fatiga y por debajo de este valor nominal de esfuerzo se asume que el material no presentará falla por fatiga. (Figura 2.3).

2.2.5.-Resistencia a la Fatiga de los Aceros:

Como ya ha sido antes expuesto las características del comportamiento a la fatiga de los aceros muestra una curva S-N que usualmente muestra un límite de fatiga preciso, esto es más acusado para aceros al carbono, ya que para aceros aleados el límite de fatiga no es tan preciso y puede ser necesario continuar los ensayos de fatiga por más ciclos para determinarlo de forma correcta. Por otra parte la resistencia a la fatiga de los aceros se encuentra íntimamente relacionada con la resistencia a la tracción de los mismos, por lo tanto se asume que cualquier factor que incremente la resistencia a la tracción aumentará también la resistencia a la fatiga de los mismos.(Tratamientos térmicos , elementos aleantes, etc.).

Consideremos primeramente la influencia de los elementos aleantes en la resistencia a la fatiga de los aceros. En general las adiciones de: Carbono, Manganeso, Níquel, Cromo, Molibdeno, Vanadio, Cobre y Boro aumentará la resistencia a la fatiga de los aceros en aproximadamente la misma proporción que benefician la resistencia a la tracción y la dureza de los mismos, aunque esta última (Dureza) está más íntimamente relacionada con el límite de fatiga de los aceros.

La resistencia a la fatiga máxima que puede lograrse en los aceros aleados se incrementa al aumentar su contenido de carbono, esto es posible gracias a que al aumentar el carbono, es posible emplear una más alta temperatura de revenido, que permite una mayor relajación de las tensiones residuales internas introducidas por el temple.

El contenido de fósforo en los aceros se mantiene usualmente al mínimo para evitar la fragilización, el azufre es también considerado como perjudicial a la resistencia a la fatiga, porque produce inclusiones no metálicas, pero su influencia parece solamente seria en los aceros de alta resistencia. La adición de plomo a los aceros aleados para mejorar su máquinabilidad puede reducir levemente la resistencia a la fatiga. Dicha reducción puede ser mayor cuando se incrementa la resistencia la tracción de los mismos [9].

En general, el efecto de la composición en la resistencia a la fatiga es menos importante que el tratamiento térmico y la microestructura, [6]. La resistencia a la fatiga se incrementa usualmente con la aplicación de cualquier tratamiento térmico que aumente la resistencia a la tracción, pero es bien sabido que una determinada resistencia a la tracción depende hasta cierto punto de la microestructura.

Para aceros de alta resistencia, las mejores propiedades a la fatiga se han obtenido con una microestructura de martensita revenida. Dolan y Yen [10] compararon las resistencias a la fatiga de una estructura tipo martensítico, producida por un temple rápido, con otra mayormente ferrítica perlítica, obtenida por un enfriamiento lento. Los ensayos fueron realizados con un acero al carbono y dos aceros aleados, todos revenidos para conseguir resistencias a la tracción similares, y obtuvieron que las relaciones de fatiga (relación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga) para la martensita revenida fueron bastante superiores que para la estructura mixta.

Se ha supuesto que la más baja resistencia a la fatiga de las estructuras mixtas puede atribuirse, generalmente, a "entallas metalúrgicas" que podrían ser: Perlita gruesa, ferrita libre, segregaciones de elementos aleantes o austenita retenida durante el temple. En virtud de esto se han realizado diversas investigaciones para determinar cuantitativamente el efecto de estos factores. Borik, Chapman y Jominy [11] determinaron la resistencia a la fatiga de aceros aleados templados con diferentes cantidades de martensita retenida en la microestructura y determinaron que la resistencia a la fatiga se redujo aproximadamente en un 10 % por la presencia de un 20 % de estructura no martensítica, pero la reducción fue poca luego de disminuir aun más la estructura martensítica.

La influencia del tamaño de grano en la resistencia a la fatiga de los aceros tiene poca importancia. Los materiales de grano fino muestran una resistencia a la fatiga mayor que los de grano grueso, pero esto se compensa hasta cierto punto por su mayor susceptibilidad a "entallas metalúrgicas". En líneas generales las mejores propiedades de fatiga de un acero pueden lograrse con un temple seguido de un revenido a una temperatura adecuada que permita el aumento de la resistencia a la fatiga sin disminuir la resistencia a la tracción.

2.3.- DAÑO ACUMULADO

2.3.1.- Introducción:

El estudio convencional de la fatiga se realiza sometiendo a especímenes a ensayos a una amplitud de esfuerzo constante. Sin embargo, en una gran variedad de condiciones de servicio los componentes o piezas están sometidos a historiales de esfuerzo en donde las cargas no poseen una amplitud constante, es decir el daño progresivo del material se produce a diferentes niveles de esfuerzos cíclicos cada uno de los cuales produce un daño sobre el material. El deterioro de los materiales bajo estas condiciones de aplicación de cargas es conocido como "Daño acumulado por fatiga" o simplemente "Daño acumulado".

El problema que representa el estudio del comportamiento de los materiales bajo condiciones de daño acumulado es un problema viejo, pero no resuelto aun. Hace 80 años Palmgren [12] sugirió el concepto del daño acumulativo lineal, que posteriormente fue desarrollado por Miner [2] en 1945 de forma matemática como :

$$D = \sum (n_i / N_i) \qquad \text{(Ec. 2.1)}$$

Donde de "D" es la fracción de daño, "n_i" y "N_i" son el número de ciclos aplicados y el número de ciclos a falla para una amplitud de esfuerzo constante respectivamente. Además Miner [2] postuló que el fallo se produce cuando D alcanza la unidad, [13].

Luego de esto, el tratamiento del daño acumulado ha recibido cada vez más atención y númerosas teorías y modelos han sido presentadas luego de la de Miner [2], en la búsqueda de predecir el comportamiento de los materiales al daño acumulado.

A pesar de la gran cantidad de teorías y modelos desarrollados en los últimos años para tratar el problema del daño acumulado, ningún modelo ha logrado dar una respuesta de mayor simplicidad y aplicabilidad en condiciones de servicio que el modelo de Miner [2], razón por la cual a pesar de su conocida falta de exactitud bajo diversas condiciones de servicio, sigue siendo aun el más utilizado a nivel industrial para el tratamiento del problema de componentes cuya solicitud de esfuerzos en servicio implique daño acumulado por fatiga.

2.3.2.- Ensayos para la Evaluación del Daño Acumulado:

Existen varios métodos de ensayo que permiten la evaluación del comportamiento de los materiales bajo condiciones de daño acumulado por fatiga. Algunos de ellos son bastante complejos tal como los ensayos de bloques de esfuerzo programados en los cuales se somete a la probeta o componente a evaluar a ensayos continuos o discontinuos a varias amplitudes de esfuerzo diferentes, aplicando un número de ciclos determinado a cada una, para de esta forma lograr una aproximación más cercana a la condiciones reales de servicio del componente. Otro método de ensayo son los así denominados ensayos de bloques de esfuerzo repetidos, los cuales consisten en seleccionar dos o tres amplitudes de esfuerzo determinadas y aplicarlas sobre la probeta o componente de forma repetida variando la secuencia de aplicación.

Sin embargo, quizás los más simples de estos ensayos, son los de dos bloques, que se realizan empleando solamente dos niveles de esfuerzo. En estos se aplica primeramente sobre la probeta o componente a evaluar un número de ciclos determinado a un valor de esfuerzo, y luego otro segundo valor de esfuerzo hasta la fractura. Cuando los esfuerzos son aplicados de un esfuerzo mayor a otro menor, se dice que el ensayo fue realizado de forma descendente , mientras que cuando los bloques son aplicados de manera inversa se dice que el ensayo fue realizado de forma ascendente. Si bien estos ensayos no representan condiciones reales de servicio, lo mismos son sumamente útiles para evaluar la ley de daño acumulado lineal y sus limitaciones.

Basados en estos ensayos, numerosos investigadores realizaron trabajos experimentales con el fin de evaluar la influencia del sobreesfuerzo previo, sobre el comportamiento posterior del material encontrando, que un ligero sobreesfuerzo no produce una reducción significativa de las propiedades a fatiga del material, y que más bien en muchos casos este pequeño sobreesfuerzo puede incrementar las mismas.

Sin embargo, para sobreesfuerzos elevados se observó que los mismos producen una reducción significativa de las propiedades a fatiga en el material. Razón por lo cual la secuencia de aplicación de las cargas es un factor muy importante a tomar en cuenta en este tipo de ensayos, pues la misma es determinante en la vida a fatiga de los materiales bajo estas condiciones de aplicación de esfuerzo.

2.3.3.- Teorías y Modelos de Daño Acumulado:

La historia de los modelos para daño acumulado se inició entre 1920 y 1930 y como se dijo anteriormente númerosos modelos matemáticos han sido desarrollados en los últimos años para de alguna manera resolver el problema del daño acumulado. Algunos de ellos sobre todo las desarrollados antes de los 70 tienen una base netamente fenomenológica y otros más recientes han sido desarrollados sobres bases analíticas y semi-analíticas, pero ninguno de estos modelos ha logrado dar solución al problema en su totalidad.

Las teorías o modelos matemáticos sobre daño acumulado podrían clasificarse en 2 grandes grupos:

1. Teorías lineales .

2. Teorías no-lineales.

A continuación se presentan las teorías y modelos más importantes que han sido desarrollados para abordar el problema del daño acumulado por fatiga:

2.3.3.1.- Teorías lineales de daño acumulado:

2.3.3.1.1.- Ley de daño acumulado lineal:

Miner [2] en 1945 dió un tratamiento matemático al concepto anteriormente introducido por Palmgren [12] en 1924, y propuso entonces la ley de daño acumulado lineal (LDR), [13].

Representada por la ecuación:

$$D = \sum (n_i / N_i) = \sum r_i \qquad \text{(Ec. 2.2)}$$

En donde "D" representa la fracción de daño del material, "n_i" y "N_i" representan el número de ciclos aplicados y el número de ciclos a falla para una amplitud de esfuerzo constante respectivamente, cuya razón es denotada como "r_i" también llamada relación de ciclos que corresponde al daño producido a un nivel de esfuerzo específico. En esta teoría la cuantificación del daño es muy simple como se puede apreciar en la ecuación anterior. Esta se basa en asumir que el material acumula un trabajo constante por ciclo y que este trabajo a su vez produce una acumulación de energía en el material, razón por la cual asumiendo que esta absorción es de carácter lineal la falla o fractura se producirá cuando $D = \sum r_i = 1$.

La mayor deficiencia de la LDR es que evalúa cada nivel de esfuerzo de forma independiente , sin tomar en cuenta la secuencia de aplicación del mismo ni el efecto de la interacción entre los distintos niveles de esfuerzo a los que se somete al material.

En 1949 Maching [14] propuso una ley de daño lineal con base metalúrgica que es básicamente otra forma de expresión de la LDR. En 1950 Coffin [15, 16] y colaboradores expresaron la LDR en términos del intervalo de deformación plástica que fue posteriormente relacionado con la vida a fatiga mediante el coeficiente de Coffin-Manson. En posteriores estudios Topper y Biggs [17] usaron la LDR basada en la deformación para correlacionar sus resultados experimentales. Basado en la LDR con base en la deformación Miller [18] realizó también numerosos estudios experimentales. Sin embargo no importa cual versión de la LDR se utilizada, la misma resulta insatisfactoria, pues evidencias experimentales en ensayos de esfuerzos totalmente invertidos aplicados en dos bloques reportan que r_i es mayor a 1 cuando el mismo es ascendente, es decir de un esfuerzo menor a uno mayor y $r_i < 1$ para ensayos descendentes es decir de un esfuerzo mayor a uno menor, [13].

2.3.3.1.2.- Teoría lineal de daño en dos etapas:

La Teoría lineal de daño en dos etapas, mejora la Teoría lineal de daño, manteniendo su simplicidad. Siguiendo los conceptos establecidos anteriormente por Langer [19], Grover [20] consideró la relación de ciclos "r_i" de forma separada para dos etapas en el daño por fatiga:

1. El daño para la etapa de iniciación de grieta estaría definido como:

$$N_I = \alpha N_f \qquad \text{(Ec. 2.3)}$$

2. El daño para la etapa de propagación de grieta estaría definido como:

$$N_{II} = (1 - \alpha)\, N_f \qquad \text{(Ec. 2.4)}$$

Donde α es el factor de fracción de vida para la iniciación de la etapa y N_f el número de ciclos a falla para un esfuerzo constante.

Manson [21] en contraposición al trabajo realizado por Grover [20], planteo la Ley Doble de daño acumulado lineal (DLDR) en 1966, donde las dos etapas fueron representadas por las ecuaciones:

Etapa 1 (Iniciación de Grieta) : $N_I = N_f - P\, N_f^{\,0,6}$ (Ec. 2.5)

Etapa 2 (Propagación de Grieta): $N_{II} = P N_f^{\,0,6}$ (Ec. 2.6)

Donde P es el coeficiente de la vida a fatiga para la segunda etapa. La representación grafica de la DLDR aplicada a un ensayo de esfuerzos descendentes aplicados en dos bloques puede apreciarse en la figura 2.4. Recientemente Bilir [22] llevó a cabo trabajos experimentales ciclando probetas de Aluminio 1100 entalladas en ensayos de dos niveles de esfuerzo , encontrando una buena concordancia entre las predicciones realizadas mediante la DLDR y los resultados experimentales obtenidos, [13].

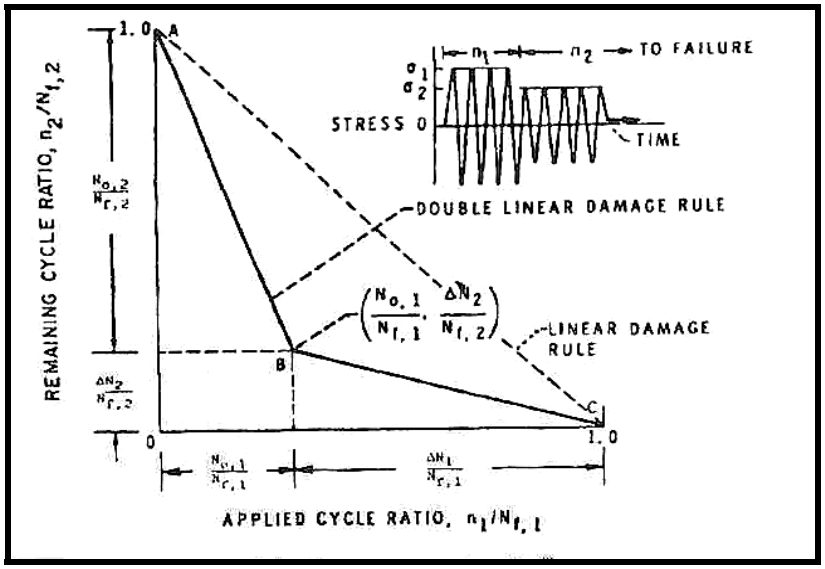


Figura 2.4 Gráfico de DLDR aplicada a un ensayo de esfuerzos descendentes en dos Bloques [13].

2.3.3.2.- Teorías de Daño No- Lineales:

2.3.3.2.1.- Teoría de Marco-Starkey:

Para remediar las deficiencias de la LDR, Richart y Newmark [23] introdujeron en 1948 el concepto de las curvas de daño o curvas D – r, especulando que estas curvas eran diferentes para cada nivel de esfuerzo aplicado. Basados en este concepto y en resultados experimentales Marco y Starkey [24] propusieron el primer modelo no lineal de daño acumulado que tomaba en cuenta la dependencia de los esfuerzos aplicados, representada por la siguiente ecuación potencial:

$$D = \sum ri^{xi} \qquad \text{(Ec. 2.7)}$$

Donde x_i es la variable de cantidad relacionada con el nivel de carga *i*. Las curvas de daño que representan esta relación se pueden apreciar en la figura 2.5, donde una línea diagonal X =Y representaría la LDR de Miner [2], la cual seriá un caso especial de la ecuación 2.7 con $x_i = 1$. Como se puede observar en la gráfica, la vida del material

calculada mediante esta teoría resulta en $r_i > 1$ para una secuencia de esfuerzos ascendente y en $r_i < 1$ para una secuencia de esfuerzos descenderte.

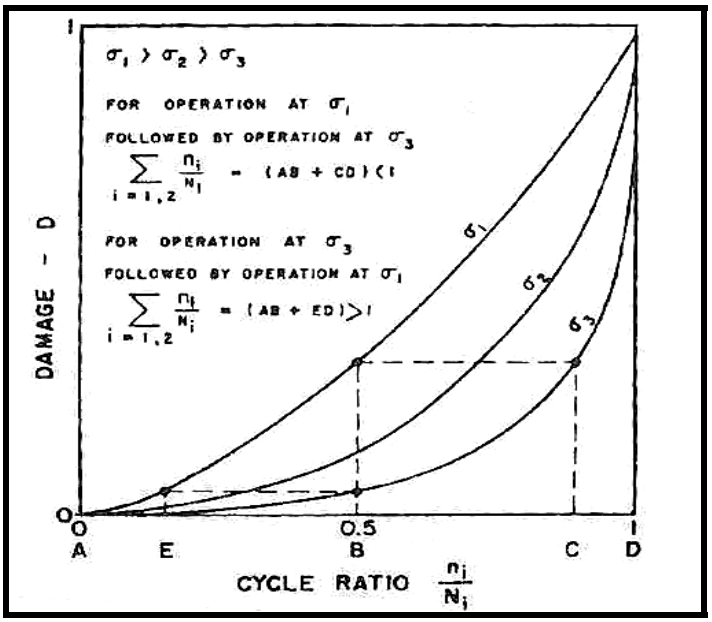


Figura 2. 5 Representación Grafica de la curva de Daño vs Relación de Ciclos para la Teoría de Marco-Starkey [13].

2.3.3.2.2.- Modelo de la Curva de Daño (DCA) Simple y Modelo de la Doble Curva de Daño (DDCA):

Para refinar la DLDR y basados en la realidad física en el sentido que la mayor manifestación de daño es debida al crecimiento de la grieta, lo que a su vez involucra muchos procesos complicados como apilamiento de dislocaciones, formación de múltiples micro-grietas con orientación independiente, etc. Manson y Halford [25, 26] tomaron el concepto de las curvas de daño y formularon un modelo empírico de estas curvas basados el crecimiento de la grieta. Proponiendo así dos nuevos modelos: El modelo de la curva de daño simple (DCA) y el modelo de la doble curva de daño (DDCA).

Modelo de la curva de daño simple (DCA): El modelo de la curva de daño simple está representado por la siguiente ecuación:

$$a = a_0 + \left(a_f - a_0\right) r^q \qquad \text{(Ec. 2.8)}$$

Donde a_0, a *y* a_f son la longitud inicial (r = 0), instantánea y final (r = 1) de la grieta, respectivamente, y q es una función de N de la forma:

$$q = BN^{\beta} \qquad \text{(Ec. 2.9)}$$

Donde B *y* β son dos constantes del material. El Daño es entonces definido como una relación entre la longitud instantánea y final de la grieta:

$$D = \frac{a}{a_f} \qquad \text{(Ec. 2.10)}$$

En muchos de los casos, $a_0 = 0$ y el daño simplemente se convierte en la forma:

$$D = r^q \qquad \text{(Ec. 2.11)}$$

La cual es bastante similar a la ecuación 2.7 presentada por Marco-Starkey [24] en su teoría no-Lineal de daño.

Modelo de la doble curva de daño (DDCA): Este modelo fue desarrollado tomando en cuenta la DLDR y sumándole un término de carácter lineal a la ecuación de la DCA. Luego de ciertas manipulaciones matemáticas el modelo puede presentarse de la siguiente manera:

$$D = \left[(pr)^k + \left(1 - p^k\right) r^{kq} \right]^{\frac{1}{k}} \qquad \text{(Ec. 2.12)}$$

Donde k es un exponente que da un buen ajuste a la línea de la teoría de daño lineal en dos etapas, y p es una constante medida a partir de la pendiente de la primera línea de acumulación de daño en DLDR:

$$p = \frac{D_{knee}}{r_{knee}} = \frac{A\left(\frac{N_r}{N}\right)^{\alpha}}{1 - (1 - A)\left(\frac{N_r}{N}\right)^{\alpha}} \qquad \text{(Ec. 2.13)}$$

En líneas generales la DDCA es una curva continua de daño conformada en su etapa inicial por una porción de la línea correspondiente a la DLDR, luego doblada con una curvatura basada en la DCA, para posteriormente en su etapa final volver a converger con la recta que representa la DLDR (Figura 2.6).

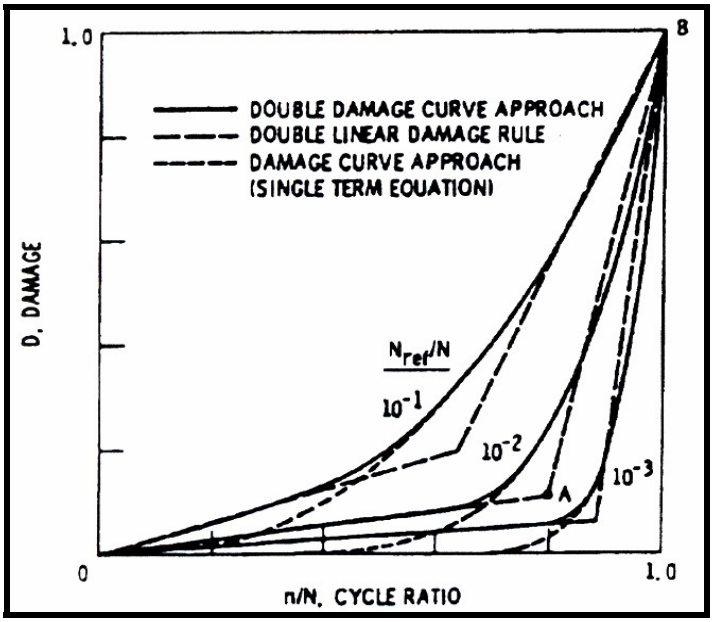


Figura 2. 6 Gráfico Comparativo de la DDCA con la DLDR y la DCA [13].

Para evaluar la efectividad de la DDCA Manson y Halford [27, 28] realizaron una serie de ensayos de daño acumulado sobre un acero inoxidable 316 y una aleación Haynes 118, encontrando una buena correlación entre los resultados experimentales y la DDCA. Los resultados de los ensayos de dos bloques de esfuerzos descendentes sobre el acero inoxidable 316 pueden apreciarse en la figura 2.7.

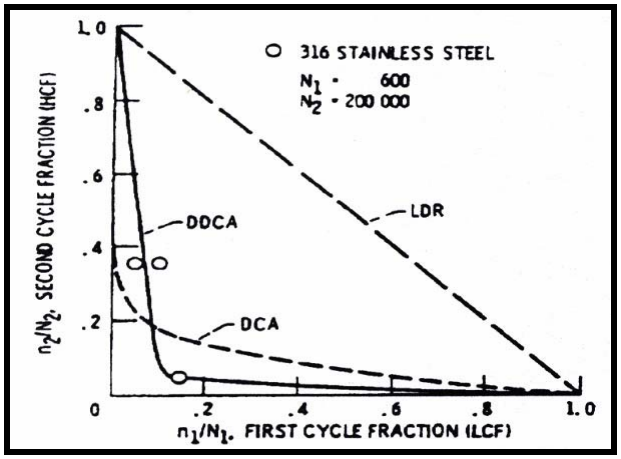


Figura 2.7 Resultados obtenidos por Manson – Halford en ensayos de dos bloques de esfuerzos Descendentes sobre un Acero inoxidable 316 [13].

2.3.3.2.3.- Teorías Basadas en la Modificación de Curvas de Vida a la Fatiga S-N:

La principal virtud de estas teorías es que las mismas toman en cuanta el efecto de la interacción de los esfuerzos aplicados. Entre estas teorías se incluyen los modelos de Corten-Dolon [29] y de Freudenthal-Heller [30, 31]. Ambas teorías se basan en una rotación en el sentido de las agujas del reloj de la curva de vida a la fatiga original (Curva S-N). En el modelo de Corten-Dolon [29] el punto de referencia para la rotación es el correspondiente al más alto nivel de esfuerzo aplicado sobre el material , mientras que en el modelo de Freudenthal-Heller [30, 31] se toma como punto de referencia para la rotación el nivel de esfuerzo correspondiente a una vida a la fatiga entre 10^3 y 10^4 ciclos. Posteriormente Spitzer y Corten [32] intentaron mejorar el modelo inicialmente planteado por Corten-Dolon [29] y sugirieron que la pendiente de la curva S-N modificada, es decir, rotada podía obtenerse a partir del promedio de las constantes obtenidas en base a resultados de unos pocos ensayos dos bloques de esfuerzo. Ensayos de flexión rotativa realizados por Manson y colaboradores sobre un acero SAE 4130 para examinar el concepto de las curvas S-N modificadas y el punto de convergencia de la rotación, sugirieron que el punto correspondiente a una vida a fatiga entre 10^2 y 10^3 ciclos podía ser seleccionado como punto de rotación para este material, además este modelo proporcionó un método para predecir la reducción de la resistencia límite producida por un daño por preciclaje.

En la figura 2.8 puede apreciase una representación para ensayos de dos bloques de esfuerzos tanto ascendentes como descendentes, donde la LDR de Miner [2] está representada por la línea sólida, mientras que la línea punteada corresponde a la rotación de la curva S-N sugerida por Corten-Dolon [29]. En esta representación se puede apreciar claramente que la LDR y la teoría de Corten-Dolon [29] difieren en la capacidad de tomar en cuanta el efecto de la interacción entre los esfuerzos aplicados.

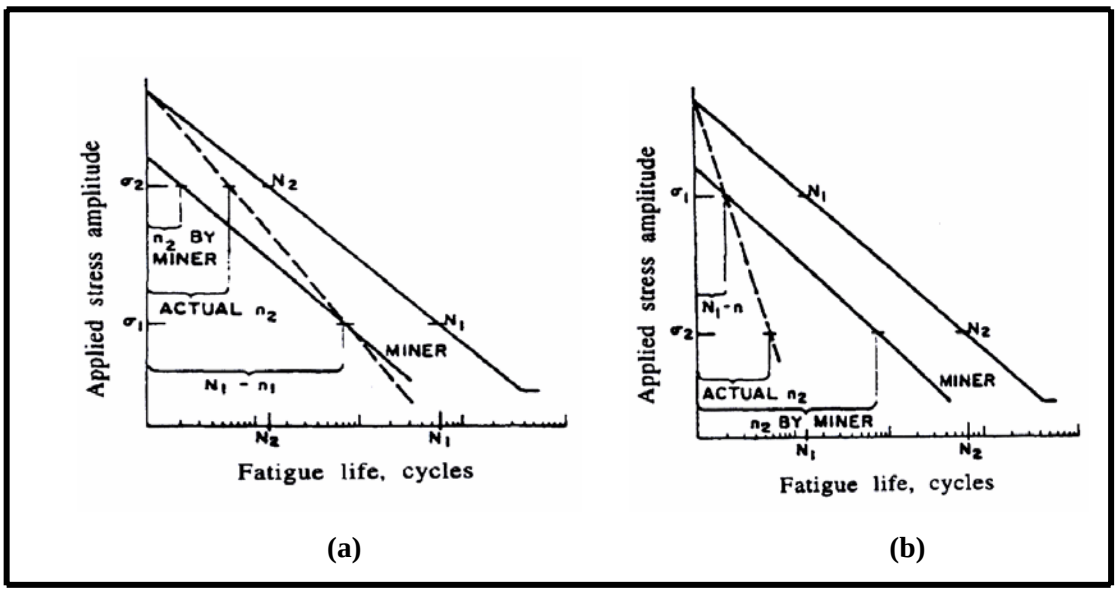


Figura 2.8 Representación de la LDR de Miner (___) y la teoría de Corten-Dolon (-----) para ensayos de dos bloques de esfuerzo. (a)Esfuerzos ascendentes y (b)Esfuerzos descendentes [13].

Más recientemente entre 1985 y 1986 Leipholz [33, 34] en acuerdo con la opinión de Freudenthal-Heller [30, 31] de que los errores en la predicción de la vida del material mediante la LDR, no eran producto de asumir una forma lineal, sino de asumir que la velocidad de daño era independiente del nivel de esfuerzos, propuso el concepto que propone de remplazar la curva original de vida a la fatiga, por una curva S-N modificada tomando en cuenta la interacción entre los esfuerzos aplicados que estaría representada de la siguiente forma:

$$N_{\sum} = 1 / \sum (B_i / N_i') \qquad \text{(Ec. 2.14)}$$

Donde $N_{\sum}$ es la vida acumulada total, B_i y N_i' son la relación de ciclos ($n_i / N_{\sum}$) y la vida a la fatiga modificada tomando en cuenta el nivel de esfuerzo S_i, respectivamente. En la figura 2.9 se describe la típica forma en la cual la curva S-N modificada converge con la curva S-N original para niveles de esfuerzo elevados y diverge para niveles de esfuerzo bajos.

Las curvas modificadas de Leipholz fueron obtenidas aplicando la ecuación 2.14 en ensayos de bloques de esfuerzo repetitivos, y posteriores verificaciones experimentales muestran que este modelo provee de una buena predicción de vida bajo estas condiciones de ensayo (Bloques de esfuerzo repetitivos).

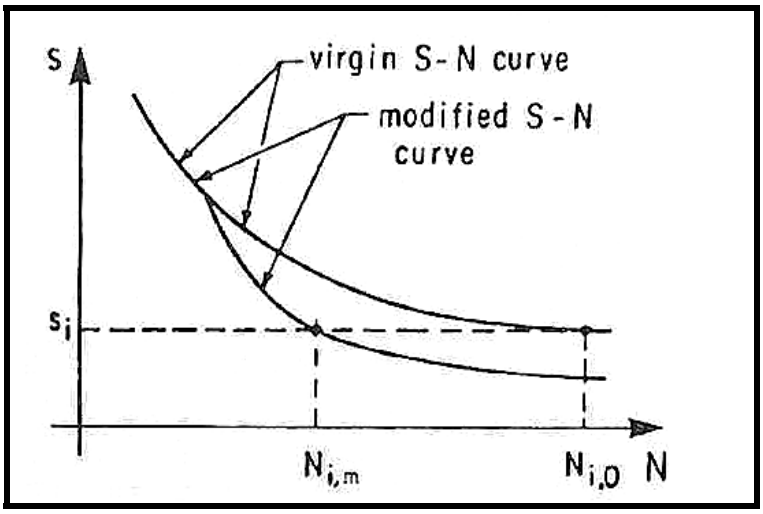


Figura 2.9 Representación esquemática de la curva S-N modificada de Leipholz [13].

2.3.3.2.4.- Teorías Basadas en el Crecimiento de Grieta:

Otros modelos para el análisis del daño acumulado por fatiga son los fundamentados en el concepto de crecimiento de grieta. En 1952 Shanley [35] introdujo su teoría de daño acumulado, que utiliza la longitud de la grieta como medida del daño sobre el material y sugirió que la velocidad de crecimiento de la grieta variaba con el nivel de esfuerzo aplicado sobre el material de forma lineal o exponencial.

Valluri [36, 37] en 1961 introdujo un modelo de daño por crecimiento de grieta de forma diferencial. El desarrollo cuantitativo de la teoría fue basado en conceptos derivados de las teorías de dislocación y en la síntesis de la teoría de fractura macroscópica elasto-plástica.

La ecuación de esta teoría es expresada de forma similar a la Mecánica de fractura lineal elástica (LEFM) de la siguiente forma:

$$\frac{da}{dN} = Cf(\sigma)a \qquad \text{(Ec. 2.15)}$$

Donde a es la longitud de grieta, C es una constante y $f(\sigma)$ es una función que depende del material y de la configuración de carga. Otra teoría que usa el concepto de crecimiento de grieta es la formulada por Scharton y Crandall [38] en 1966 y su expresión matemática es la siguiente:

$$\frac{da}{dN} = a^m f(\sigma_{ii}) \qquad \text{(Ec. 2.16)}$$

Donde m es una constante del material.

Más recientemente luego de 1970 númerosas teorías basadas en el crecimiento de grieta han sido formuladas, las cuales dan una mejor explicación a los fenómenos físicos de daño asociados al crecimiento de la grieta. Un modelo bastante popular es el de Wheeler [39], el cual modelo asume que la velocidad de crecimiento de grieta está relacionada con la zona plástica generada en la punta de la misma, que se encuentra bajo esfuerzos residuales compresivos creados por la sobrecarga del material. Este modelo modifica la ecuación de crecimiento de grieta bajo esfuerzo constante ($\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n$), mediante la adición de un factor empírico de retardo del crecimiento C_i.

Quedando expresada como sigue:

$$\frac{da}{dN} = C_i[A(\Delta K)^n] \qquad \text{(Ec. 2.17)}$$

Donde:

$$C_i = (r_p / r_{max})^{p} \qquad \text{(Ec. 2.18)}$$

Siendo r_p y r_{max} la zona plástica asociada con el nivel de esfuerzo del ciclo y la distancia desde la punta de la grieta hasta el punto más lejano de la zona elástico - plástica creada por la sobrecarga, respectivamente y p es un exponente empírico que depende de las propiedades del material y de la configuración de esfuerzos aplicada.

Otro modelo basado en la interpretación de observaciones experimentales fue el propuesto por Vasek-Polak [40] , quienes identificaron dos regímenes de daño diferentes, el régimen de iniciación de grieta y el de crecimiento de grieta a velocidad constante, planteando:

Régimen I (Iniciación de Grieta) : $\frac{da}{dN} = V_i$ para $a_0 \leq a \geq a_c$ (Ec. 2.19)

Régimen II (Propagación de Grieta): $\frac{da}{dN} = V_i + K(a - a_c)$ para $a_c \leq a \geq a_f$ (Ec. 2.20)

Donde V_i es la velocidad de crecimiento de la grieta, K es un coeficiente y a_0, a, a_c, a_f son la longitud inicial, instantánea, crítica y final de la grieta, respectivamente. La longitud crítica de la grieta define la transición del comportamiento inicial al de propagación y fue definida por Vasek-Polak [40] como la longitud aproximada de la grieta a la mitad de la vida del material, es decir la longitud de la grieta en $N_f / 2$. Por otra parte Vasek-Polak [40] también encontraron que las magnitudes de V_i, K y a_c eran

dependientes del nivel de esfuerzos aplicado y que las mismas incrementaban conforme incrementaba el nivel de esfuerzo.

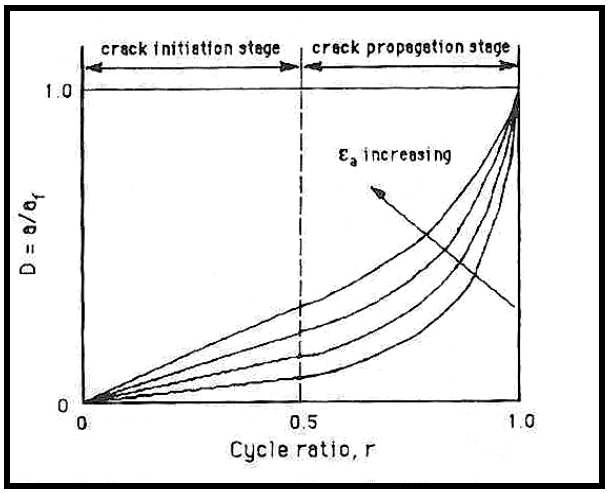


Figura 2.10 Curva D-r propuesta por Vasek y Polak [13].

La representación de la curva de daño (D - r) basada en lo propuesto por Vasek-Polak [40] donde el daño se encuentra cuantificado por la relación $D = a / a_f$ puede apreciarse en la figura 2.10.

CAPÍTULO III

3.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1.- FLUJOGRAMA DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

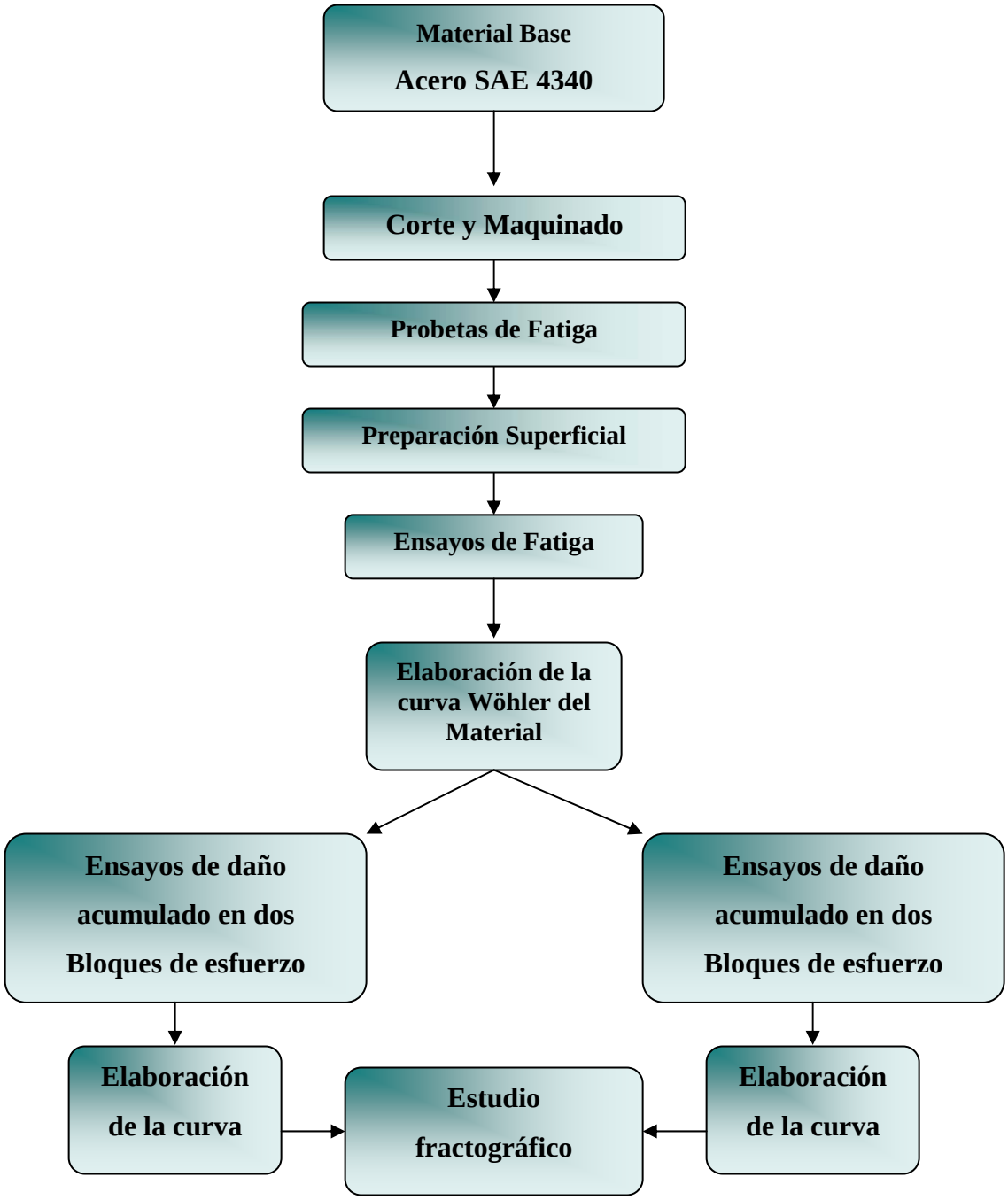


Figura 3. 1 Flujograma del Procedimiento Experimental

3.2.- MATERIAL BASE

El material para ensayo fue suministrado en forma de barras de 15,88 mm de diámetro y 6 m de longitud. Las mismas estaban constituidas de Acero SAE 4340 templado y revenido, cuyas propiedades mecánicas fueron determinadas previamente por Ochoa [41] en su trabajo especial de grado (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Propiedades Mecánicas del material suministrado [41]:

Resistencia a la Tracción	Esfuerzo de Fluencia	% Reducción de Area
1198 MPa	1023 MPa	56

3.3.- CORTE Y MAQUINADO DE LAS PROBETAS

Para la realización de los ensayos fue necesario el corte y maquinado de las pobretas según la norma ASTM E606 [42] (figura 3.2). Para tal fin el material base fue enviado a el Taller Precisión J.V.C.A ubicado en la zona industrial de Turumo, Estado Miranda, donde se realizó el corte y maquinado de las 60 Probetas de fatiga sin entalla necesarias para los ensayos estipulados.

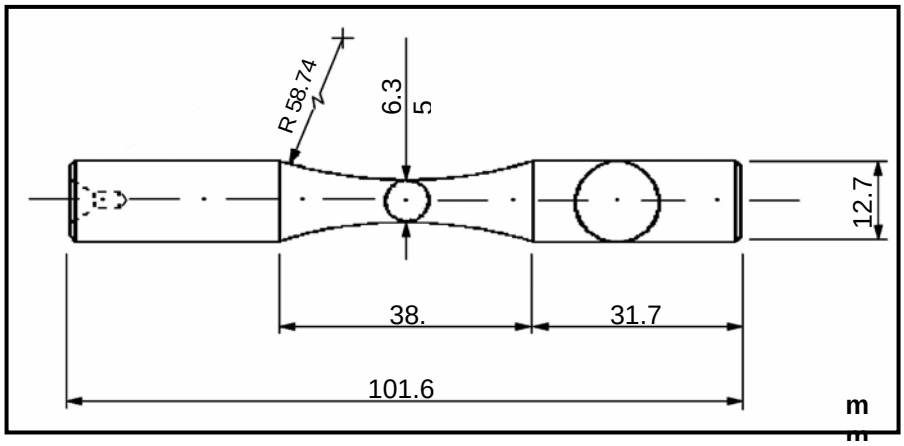


Figura 3.2 Dimensiones de la Probetas Cilíndricas de Fatiga ASTM E- 606 [42].

3.3.- PREPARACIÓN SUPERFICIAL

Como consecuencia de las operaciones de maquinado, las Probetas de ensayo poseen gran cantidad de marcas circunferenciales que pueden traducirse en concentradores de esfuerzos, actuar como una entalla y precipitar la fractura de la probeta. Sí el objetivo de la investigación no es el estudio de especímenes bajo estas condiciones superficiales, es recomendable la preparación superficial de los mismos como una manera de minimizar la influencia de la condición superficial sobre la vida a fatiga de la probeta [42].

Debido a esto todas las probetas fueron preparadas superficialmente en la zona calibrada antes de ser ensayadas, usando para tal fin un torno MYFORD modelo ML7-R perteneciente al Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales de la UCV (Figura 3.3) y papeles abrasivos de SiC de granulometrías: 400, 500, 600, 800, 1000 y 1200 con los cuales se realizó el desbaste de las probetas en forma paralela al eje longitudinal de las mismas, que simultáneamente giraban en el torno, para lograr un acabado uniforme en toda la superficie.

La Norma ASTM E606 [42] sugiere que la rugosidad promedio de la superficie de las probetas para ser ensayadas no debe ser mayor a 0,2 μm, razón por la cual la condición superficial de las probetas fue verificada mediante la utilización de un interferómetro de luz ZYGO modelo New View 200 perteneciente al laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales de la UCV. Mediante el cual se realizaron tres medidas de rugosidad promedio sobre tres probetas preparadas distintas con el fin de lograr la verificación de la condición superficial de las mismas.

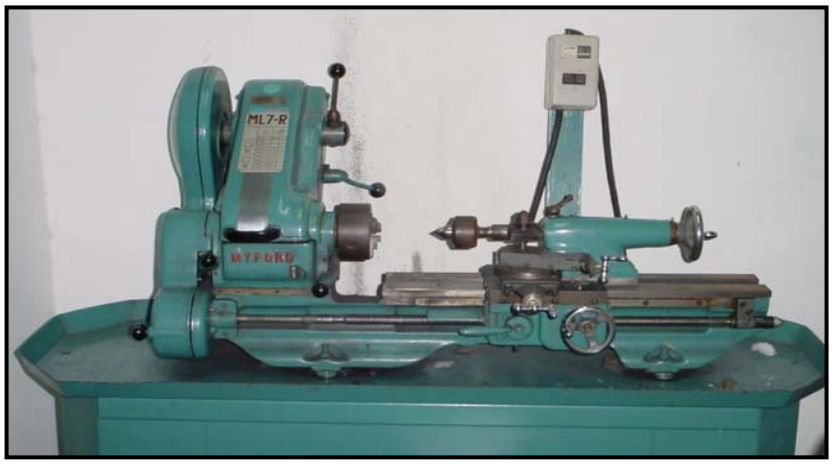


Figura 3.3 Torno MYFORD modelo ML7-R

3.4.- ENSAYOS DE FATIGA

Los ensayos de fatiga fueron realizados en su totalidad en un equipo de flexión rotativa Fatigue Dynamics modelo RBF – 200 (figura 3.4) perteneciente al Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales U.C.V. Este equipo induce sobre la probeta una condición de flexión rotativa, al aplicar cargas invertidas sobre la misma a medida que esta se mantiene en rotación sobre su eje horizontal. Para lograr tal condición la probeta es sujetada por uno de sus extremos al eje de rotación fijo del equipo, mientras el otro extremo de la probeta es fijado a un brazo de carga cónico, por medio del cual se aplica la carga con la ayuda de una regleta metálica directamente conectada al brazo de carga, sobre la cual se desplaza una pesa calibrada para generar diferentes magnitudes de momento flector sobre la probeta de acuerdo con la carga que se desee aplicar a la misma.

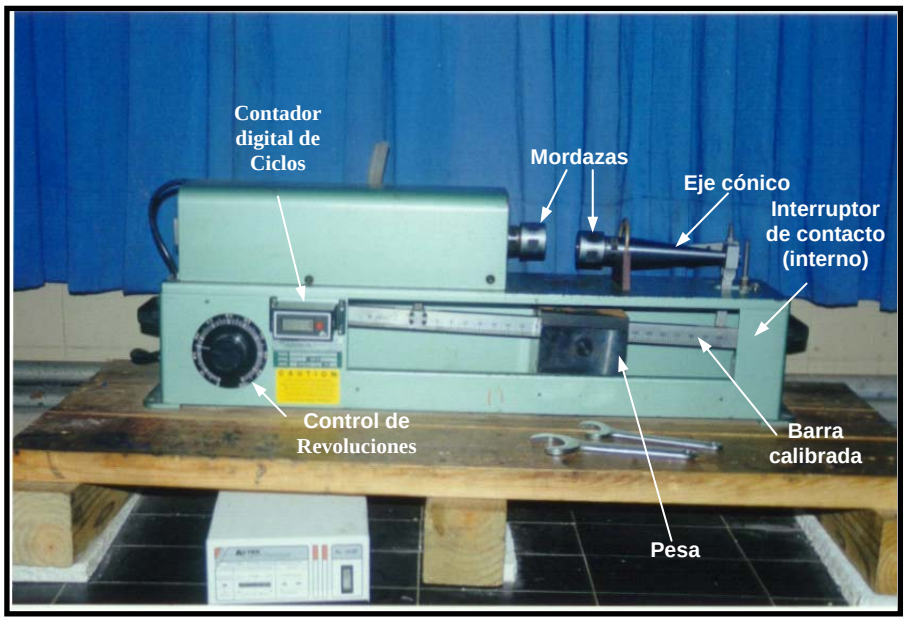


Figura 3.4 Equipo Fatigue Dynamics modelo RBF – 200

El nivel de esfuerzo aplicado sobre la probeta es por consiguiente una función del momento flector que se genere en la regleta metálica del equipo y podría expresarse de la siguiente manera:

$$S = \frac{M * C}{I} \quad \rightarrow \quad M = \frac{S * I}{C} \qquad \text{(Ec. 3.1)}$$

Donde :

M = Momento flector.

S = Esfuerzo aplicado.

I = Momento Rectangular de inercia.

C = Distancia desde el eje neutro de carga hasta la superficie de la probeta (C = D/2).

D = Diámetro de la probeta.

Sabiendo que para una barra cilíndrica se tiene que:

$$I = \frac{\pi * D^4}{64} \qquad \text{(Ec.3.2)}$$

Sustituyendo en le ecuación 3.1 tenemos que:

$$M = \frac{S * \pi * D^3}{32} \qquad \text{(Ec. 3.3)}$$

Al simplificar el momento flector de la maquina queda expresado como:

$$M = 0.0982 * S * D^3 \text{ (Lbf * Pulg)} \qquad \text{(Ec. 3.4)}$$

Al realizar el cambio de unidades de :

Lbf → MPa y Pulg → mm

Tenemos que la ecuación utilizada para calcular el momento flector del equipo en función del esfuerzo a aplicar en los ensayos es :

$$M = 0.00087 * S * D^3 \qquad \text{(Ec. 3.5)}$$

Donde:

M = Momento flector (Lbf* pulg)

S = Esfuerzo a aplicar (MPa)

D = Diámetro de la probeta. (mm)

De esta manera luego de colocar el momento flector en el equipo correspondiente al esfuerzo a aplicar sobre la probeta, se da inicio al ensayo en el cual se le induce como se dijo anteriormente una condición de flexión rotativa a la probeta hasta producirse la falla de la misma, momento en el cual el equipo se detiene automáticamente y con ayuda de un dispositivo contador adaptado al equipo (figura 3.4), se conoce el número de ciclos de carga aplicados por el mismo hasta la fractura de la probeta (Nf). Es importante destacar que el equipo Fatigue Dynamics modelo RBF – 200 controla también la frecuencia de aplicación de la carga sobre la probeta, mediante un mando que nos permite variar las revoluciones de la probeta en el equipo (Ver figura 3.4) desde 500 hasta 10.000 r.p.m según la frecuencia en que se desee trabajar. En nuestro caso la totalidad de los ensayos fueron realizados a 3600 r.p.m.

3.4.1.- Elaboración de la Curva Wöhler del Material:

Como primer paso para la evaluación del daño acumulado en el comportamiento a la fatiga de alto ciclaje del material, se determinó la resistencia a la fatiga al aire del material, mediante la elaboración de la curva de Wöhler del mismo. Para tal fin se seccionaron 5 niveles de esfuerzo diferentes, correspondientes al: 68 %, 64 %, 60 %, 56 % y 54 % del esfuerzo de fluencia del material respectivamente (Tabla 3.2), que nos permitieron obtener información sobre la resistencia del material. Para cada una de estos niveles de esfuerzos fueron ensayadas hasta fallar 6 probetas, para un total de 30 probetas ensayadas lo cual nos permitió obtener datos confiables y reproducibles, tomando en cuenta que la cantidad de probetas especificada por la norma ASTM E739 [43] para la evolución de propiedades a fatiga se encuentra entre 12 y 24 probetas.

Tabla 3.2 Distribución de Probetas en Función de los Niveles de Esfuerzo de ensayo

Niveles de Esfuerzo	Probetas Ensayadas
694 MPa	**6**
654 MPa	**6**
614 MPa	**6**
574 MPa	**6**
550 MPa	**6**

3.4.2.- Ensayos de Daño Acumulado en dos Bloques de Esfuerzo:

Luego de evaluadas la Resistencia a la fatiga del material, fueron diseñados los ensayos de daño acumulado en dos bloques de esfuerzos, a saber, el esfuerzo máximo (694 MPa) y mínimo (550 MPa) de trabajo para la elaboración de la curva de Wöhler.

Se realizaron dos ensayos de daño acumulado en dos bloques: Primeramente uno con esfuerzos ascendentes, es decir, se consumió primeramente cierta fracción de vida del material al esfuerzo menor (550 MPa) y luego se llevó la probeta a falla al esfuerzo mayor (694 MPa); Posteriormente se realizó el ensayo de forma inversa es decir, de forma descendente con un primer bloque de esfuerzo a 694 MPa y luego un segundo bloque a 550 MPa.

Para ambos ensayos a partir del promedio número de ciclos a falla (Nf) correspondiente ambos niveles de esfuerzo máximo y mínimo derivados de la curva de Wöhler realizada previamente, se establecieron condiciones de ensayo en las cuales se lograran fracciones de vida consumida del material (Xc) de: 0,15, 0,30, 0,50, 0,70 y 0,85. Luego fueron ensayadas las probetas necesarias en cada caso (Tablas 3.3 y 3.4) que nos permitieran graficar de forma inequívoca el comportamiento de la fracción de vida remanente (Xr) del material en función de las diferentes fracciones de vida consumida antes establecidas.

Tabla 3.3 Distribución de probetas para los Ensayos con Esfuerzos Ascendentes:

Fracción de Vida consumida (Xc)	Probetas Ensayadas
0,15	**3**
0,30	**3**
0,50	**3**
0,70	**3**
0,85	**3**

Tabla 3.4 Distribución de probetas para los Ensayos con Esfuerzos Descendentes:

Fracción de Vida consumida (Xc)	Probetas Ensayadas
0,15	**3**
0,30	**3**
0,50	**4**
0,70	**4**
0,85	**5**

3.5.- ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO

Con el fin de realizar un estudio fractorgráfico, fueron seleccionadas las probetas más representativas de cada condición de vida consumida, establecida para los ensayos de daño acumulado en dos bloques, para un total de 10 probetas, 5 pertenecientes a los ensayos de esfuerzos ascendentes y 5 pertenecientes a los ensayos con esfuerzos descendentes, a las cuales se le realizaron dos cortes diferentes para su análisis. Primeramente se les realizó un corte transversal al eje longitudinal de la probeta en la zona cercana a la superficie de fractura, con el fin de estudiar fractograficamente dicha superficie mediante técnicas de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB). Luego también se le realizo a las probetas un corte paralelo al eje longitudinal de las mismas, en la cercanía de la zona de nucleación de grietas, los cuales fueron preparados

metalograficamente hasta condición de pulido para verificar mediante Microscopia óptica la presencia de grietas paralelas a la grieta principal, que podrían presentarse en otro plano diferente al plano de fractura.

Todas las sesiones de MEB fueron realizadas con un equipo Marca PHILLIPS, acoplado a un analizador de imágenes ubicado en el Instituto Universitario de Tecnología de la Región Capital (I.U.T), donde se realizó sobre los cortes transversales de las probetas la observación detallada de la zonas de nucleación y propagación de grieta, así como también de la zona final de fractura. Para la observación sistemática de los cortes longitudinales para verificar la presencia de grietas primarias paralelas a la grieta principal fue utilizado un microscopio óptico Olympus PMG3 acoplado a un analizador de imágenes perteneciente al Laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales de la UCV.

CAPITULO IV

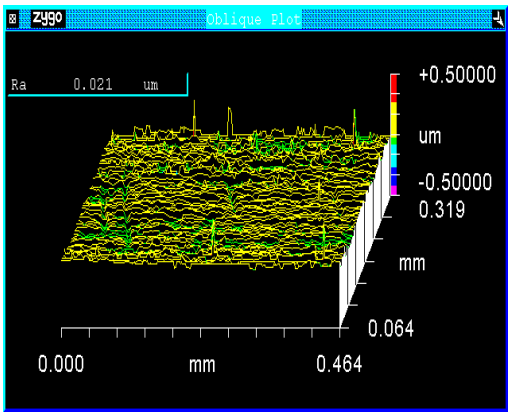
4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

4.1.- CONDICIÓN SUPERFICIAL DE LAS PROBETAS:

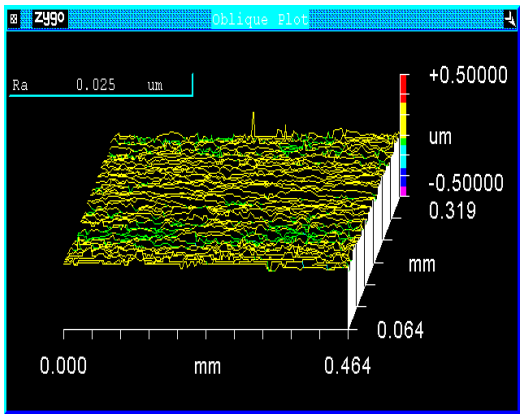
Como fue mencionado en la sección 3.3, luego de la preparación superficial de las probetas de ensayo se realizó una verificación de la condición superficial de las mismas cuyos resultados se encuentran resumidos en la tabla 4.1 y en la figura 4.1.

Tabla 4.1 Rugosidad Promedio de las Probetas de ensayo

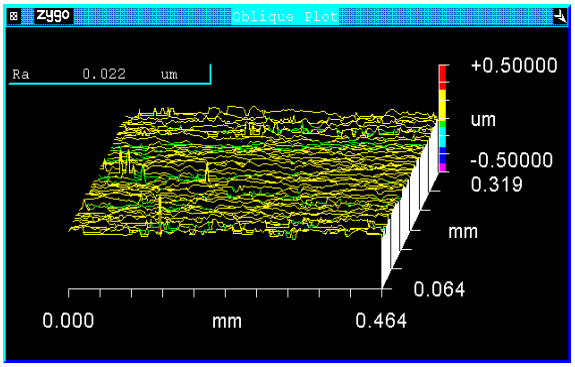
Probetas	Rugosidad Promedio (Ra)
1	0, 021 µm
2	0, 025 µm
3	0, 022 µm
Promedio:	**0, 022 µm**



Probeta 1



Probeta 2



Probeta 3

Figura 4.1 Perfilometria 3D de las Superficie de las Probetas estudiadas.

Dado que el objetivo de la presente investigación es estudiar el comportamiento de especímenes sin entalla, debe reducirse al mínimo la influencia del factor condición superficial sobre la vida a la fatiga del material. Por lo cual es de vital importancia la preparación superficial adecuada de los especimenes de ensayo con el fin de eliminar de la superficie cualquier tipo de discontinuidades que puedan condicionar posteriormente la vida a fatiga del material.

Como puede apreciarse en la tabla 4.1 las condiciones superficiales logradas luego de la preparación de los especímenes es la adecuada, pues la rugosidad promedio de las probetas de ensayo es de 0, 022 μm, valor que se encuentra muy por debajo del valor máximo sugerido por la norma ASTM E606 de 0,2 μm; además de esto, en la figura 4.1 podemos apreciar que la superficie de las mismas posee un acabado uniforme libre de discontinuidades que pudieran convertirse en concentradores de esfuerzo y actuar como entallas que promuevan la nucleación de grietas, que posteriormente darían lugar a la fractura prematura de las probetas.

4.2.- ENSAYOS DE FATIGA

4.2.1.- Evaluación de la resistencia a la fatiga del material:

Con la finalidad de evaluar la resistencia a la fatiga del material se construyó la curva de Wöhler característica del mismo, para lo cual se ensayaron hasta fractura un total de 30 probetas. Sin embargo 5 de estas produjeron resultados no representativos, puesto que se alejaban notablemente del comportamiento observado, por lo cual se decidió su eliminación con la finalidad de evitar distorsión en los resultados reportados. Los resultados de los ensayos realizados para la construcción de la curva se encuentran resumidos en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Resultados de los ensayos de fatiga realizados para la construcción de la curva de Wöhler del material.

#	Diámetro (mm)	Esfuerzo (MPa)	Momento (Lbf* Pulg)	Nf
1	6,52	694	167,3	84.800
2	6,47		163,5	78.100
3	6,5		165,8	58.500
4	6,46		162,8	56.800
5	6,41		159,0	73.900
6	6,35		154,6	91.600
			Promedio:	**73.950**
			Desviación Estándar:	**13.995**
#	Diámetro (mm)	Esfuerzo (MPa)	Momento (Lbf* Pulg)	Nf
7	6,51	654	157,0	98.100
8	6,52		157,7	92.000
9	6,48		154,8	111.800
10	6,44		152,0	76.900
11	6,46		153,4	124.500
			Promedio:	**100.660**
			Desviación Estándar:	**18.293**
#	Diámetro (mm)	Esfuerzo (MPa)	Momento (Lbf* Pulg)	Nf
12	6,57	614	151,5	294.100
13	6,43		142,0	157.200
14	6,34		136,1	216.500
15	6,47		144,7	140.800
16	6,47		144,7	229.800
			Promedio:	**207.680**
			Desviación Estándar:	**61.353**
#	Diámetro (mm)	Esfuerzo (MPa)	Momento (Lbf* Pulg)	Nf
17	6,37	574	129,1	297.600
18	6,47		135,3	568.700
19	6,58		142,3	421.900
20	6,47		135,3	319.600
21	6,41		131,5	623.000
			Promedio:	**446.160**
			Desviación Estándar:	**145.743**
#	Diámetro (mm)	Esfuerzo (MPa)	Momento (Lbf* Pulg)	Nf
22	6,47	550	129,6	1.868.100
23	6,45		128,4	599.200
24	6,30		119,6	1.164.300
25	6,36		123,1	1.707.300
26	6,45		128,4	1.493.800
			Promedio:	**1.366.540**
			Desviación Estándar:	**503.385**

En la figura 4.2 podemos apreciar la curva de Wöhler obtenida para probetas sin entalla de acero SAE 4340 templado y revenido. Si comparamos esta curva con la curva obtenida por Gomes [46] en su trabajo especial de grado, donde evalúo la resistencia a la fatiga de probetas de este mismo material, con entallas semiesféricas de 0,5 mm de diámetro (Figura 4.2), podemos apreciar que el comportamiento de las probetas no entalladas es cónsono con lo registrado en la bibliografía [6] en el sentido que debido a la ausencia de un concentrador de esfuerzo a nivel superficial (Entalla) el proceso de nucleación de grietas no se encuentra condicionado a los altos esfuerzos generados en la raíz de la entalla lo cual permite que el material consuma un mayor número de ciclos en esta etapa, provocando que la curva característica de las probetas no entalladas se encuentra desplazada hacia la derecha registrando números de ciclos a falla mayores que las entalladas para un mismo nivel de esfuerzo aplicado.

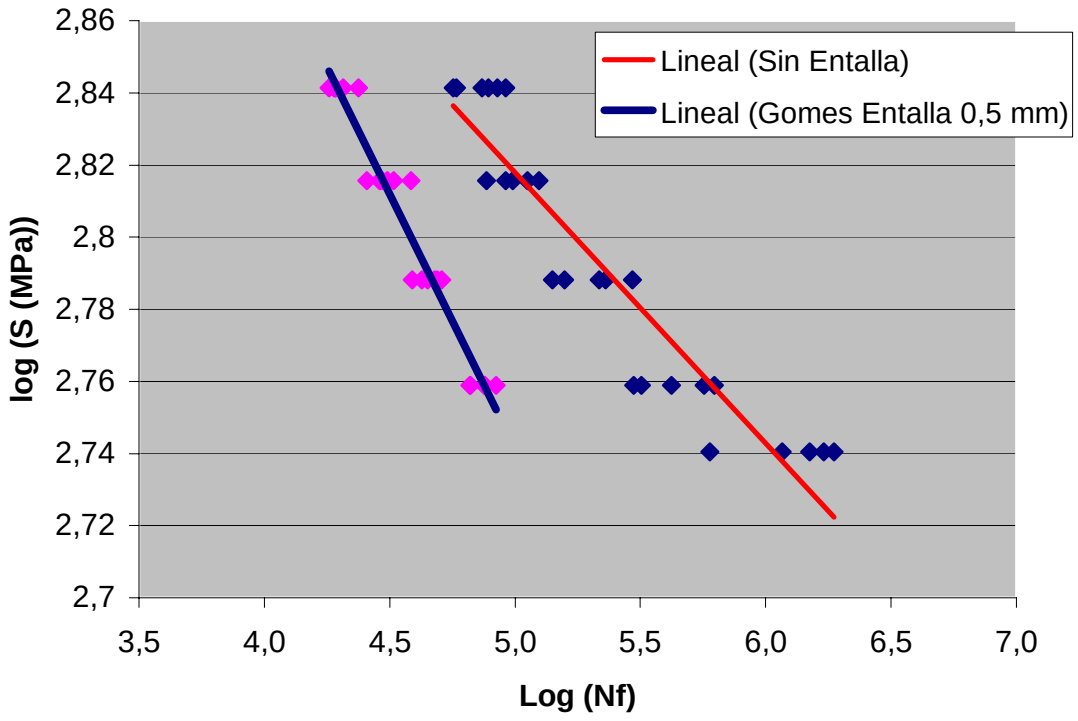


Figura 4.3 Curvas de Wöhler características para probetas entalladas y no entalladas.

Por otra parte puede apreciarse también en la figura 4.2 que los resultados de los ensayos sobre las probetas no entalladas realizados en la presente investigación poseen una mayor dispersión que los resultados encontrados previamente por Gomes [46] en probetas entalladas; esto responde también al hecho señalado anteriormente con relación al proceso de nucleación de grietas. Es bien conocido que un factor determinante de la dispersión en los resultados de fatiga es el que tiene que ver con la condición superficial de los especímenes.

4.2.2.- Comportamiento del Material ante el daño Acumulado:

Tal como fue descrito en la sección 3.4.2 del procedimiento experimental, con la finalidad de estudiar el comportamiento real del material ante el daño acumulado se realizaron ensayos ascendentes y descendentes de dos bloques de esfuerzo; los resultados de estos ensayos pueden apreciarse en las tablas 4.3 y 4.4 donde se especifican las fracciones de vida consumida (Xc) y vida remanente (Xr) obtenidas, ciclos a falla luego del esfuerzo inicial (Nf) y el total de ciclos aplicados sobre la probeta.

Tabla 4.3 Resultados de los ensayos de dos bloques aplicados de forma descendente.

#	Xc	Ciclos (Xc)	Nf	Xr	Ciclos totales
27	0,15	11000	1.107.000	0,81	1.118.000
28			519.100	0,38	530.100
29			406.700	0,30	417.700
30	0,30	22100	102.100	0,07	124.200
31			127.900	0,09	150.000
32			303.500	0,22	325.600
33	0,50	36900	161.500	0,12	198.400
34			57.100	0,04	94.000
35			135.500	0,10	172.400
36	0,70	51700	69.800	0,05	121.500
37			79.300	0,06	131.000
38			54.900	0,04	106.600
39	0,85	62800	38.200	0,03	101.000
40			29.800	0,02	92.600
41			37.300	0,03	100.100

Tabla 4.4 Resultados de los ensayos de dos bloques aplicados en forma Ascendente.

#	Xc	Ciclos (Xc)	Nf	Xr	Ciclos totales
42	0,15	204900	66.000	0,89	270.900
43			64.300	0,87	269.200
44			74.700	1,01	279.600
45	0,30	409900	54.100	0,73	464.000
46			61.700	0,83	471.600
47			57.000	0,77	466.900
48	0,50	683200	45.700	0,62	728.900
49			48.600	0,66	731.800
50			49.500	0,67	49.500
51			75.800	1,03	759.000
52	0,70	956500	62.900	0,85	1.019.400
53			63.200	0,85	1.019.700
54			79.700	1,08	1.036.200
55			63.600	0,86	1.020.100
56	0,85	1161500	72.800	0,98	1.234.300
57			37.400	0,51	1.198.900
58			65.500	0,89	1.227.000
59			16.500	0,22	1.178.000
60			66.100	0,89	1.227.600

Una vez culminados los ensayos de dos bloques se procedió a determinar el comportamiento del material ante el daño acumulado; para tal fin se realizó un gráfico comparativo (Figura 4.4) de las fracciones de vida consumida y remanente derivadas de los ensayos antes mencionados con respecto al comportamiento de estas fracciones según la LDR de Miner [2], que se encuentra representada por la línea diagonal continua de color negro.

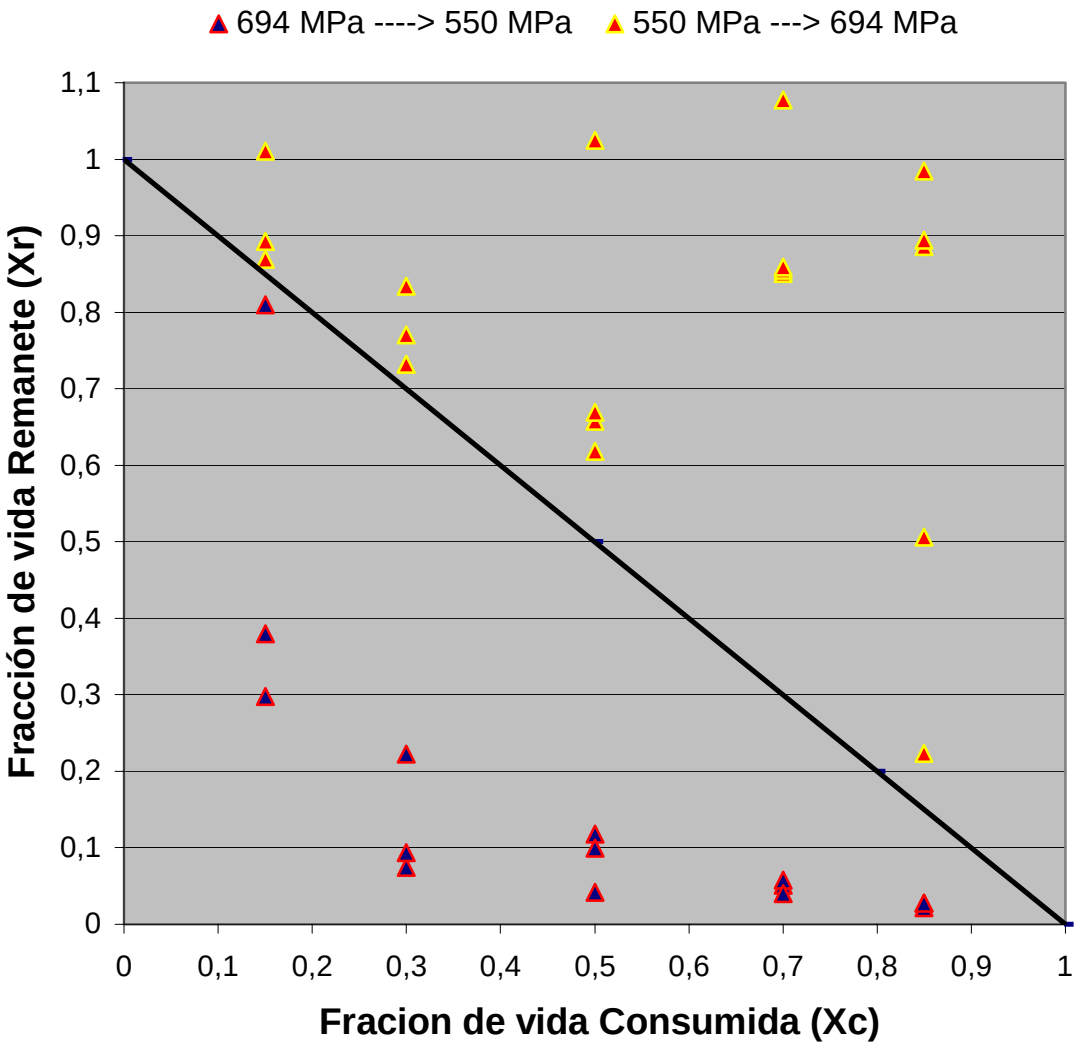


Figura 4.4 Gráficos comparativo de las fracciones de vida consumida y remanente obtenidas experimentalmente y el comportamiento sugerido por la LDR de Miner.

En la figura 4.4 podemos apreciar que el comportamiento del material es congruente con lo expresado por Fatemi y Yang [13], quienes señalan que para la aplicación de esfuerzos ascendentes el daño real sobre el material difiere positivamente de lo señalado por Miner consiguiéndose así ri >1, mientras que cuando los esfuerzos son aplicados de forma descendente, el daño real se desvía de forma negativa obteniéndose ri < 1. Este hecho evidencia que el daño acumulado por el material es dependiente del nivel de esfuerzo al cual se produce el mismo, así como también a la secuencia de aplicación de esfuerzos sobre el material.

Si observamos con detenimiento los resultados derivados de los ensayos de dos bloques donde los esfuerzos fueron aplicados de forma descendente, podemos apreciar que la aplicación de un esfuerzo inicial de 694 MPa correspondiente al 68 % del esfuerzo de fluencia produce un daño severo en el material, que genera una disminución significativa de la resistencia a la propagación de grietas, por lo cual a pesar de que el esfuerzo aplicado posteriormente es menor 550 MPa (54 % del Esfuerzo de Fluencia) la falla material se produce en un número muy reducido de ciclos. Esto implica que el daño real producido es mayor de lo cuantificado por Miner, hecho este que se puede apreciar claramente en la figura 4.4 donde las fracciones de vida remanente (Puntos azules) se encuentran muy por debajo de lo señalado por la LDR.

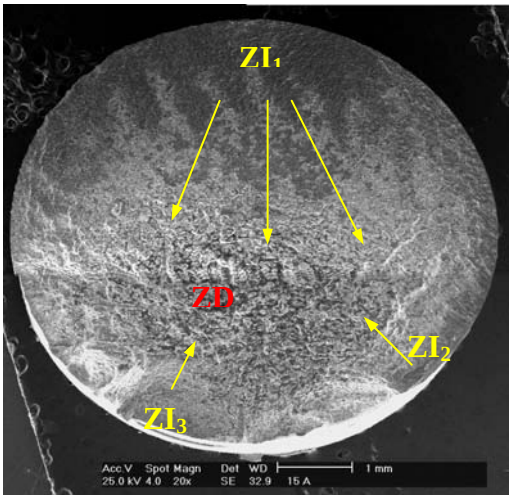
Por otra parte los resultados de los ensayos de dos bloques de esfuerzo aplicados de forma ascendentes sobre el material sugieren, que a medida que aumentan la fracciones de vida consumida al esfuerzo inicial de 550 MPa, se genera una mayor resistencia a la propagación de las grietas, lo cual se traduce en un mejor comportamiento ante el daño producido por la aplicación posterior del esfuerzo superior de 694 MPa (Ver figura 4.4). Esto podría deberse al hecho sugerido por MacDougall y Topper [45] en el sentido que la aplicación repetitiva de un esfuerzo de poca magnitud sobre el material genera esfuerzos residuales compresivos en la punta de la grieta que mejoran el comportamiento del mismo ante el daño. Todo esto implica que el daño real producido sobre el material es menor de lo cuantificado por la LDR, lo que es apreciable en la figura 4.4 donde las fracciones de vida remanente obtenidas experimentalmente para esta condición de aplicación de esfuerzos se encuentran por encima de la línea que representa la ley de daño lineal, siendo aún más evidente este comportamiento para las fracciones de vida consumida de 0,70 y 0,85 donde la fracción de vida remanente del material alcanza valores de 0,85 y 0,98 respectivamente, que son bastante superiores a lo cuantificado mediante la LDR que corresponderían a fracciones de vida remanente de 0,15 y 0,30 .

Finalmente, observando detenidamente la figura 4.4 podemos darnos cuenta que a excepción de los resultados de los ensayos de dos bloques ascendentes de fracciones de vida consumida correspondientes 0,15 y 0,30, los resultados obtenidos difieren significativamente de lo cuantificado por la ley de daño lineal de Miner, bien sea por que la LDR sobreestima el daño real sobre el material como es el caso de la aplicación de esfuerzos en forma ascendente o por que la LDR subestima dicho daño como es el caso de la aplicación de esfuerzos de forma descendente.

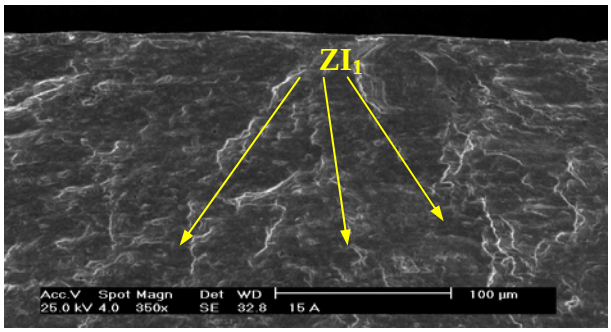
4.3.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO:

4.3.1.- Estudio de las Superficies de Fractura:

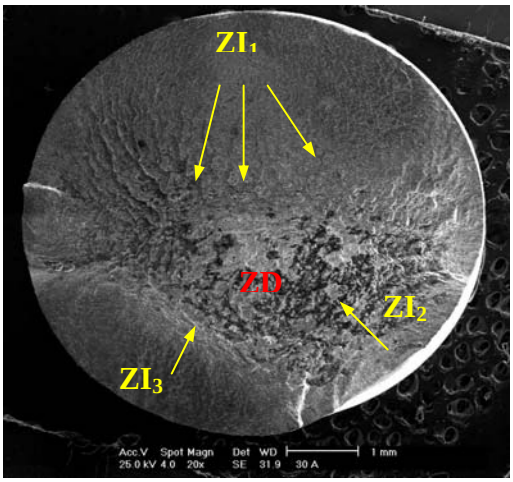
Con el fin de estudiar las superficies de fractura de las probetas mas representativas de cada condición de ensayos de dos bloques, se realizó un estudio fractográfico mediante MEB, cuyos resultados pueden apreciarse a continuación en las figuras 4.5 - 4.7, donde se presenta la totalidad de las fotomicrografías obtenidas, señalándose en ellas la zonas de inicio de grietas (ZI), la dirección de propagación de las mismas (Flechas) y la zona de despegue o fractura final (ZD) .



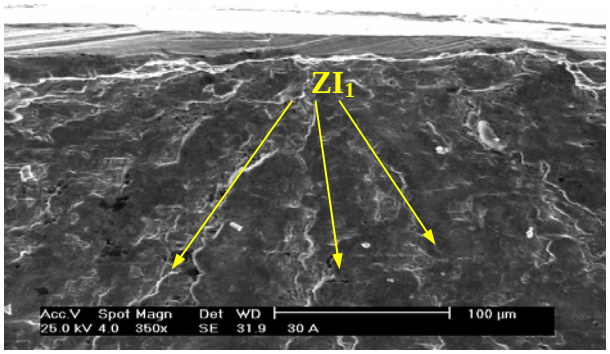
(a)



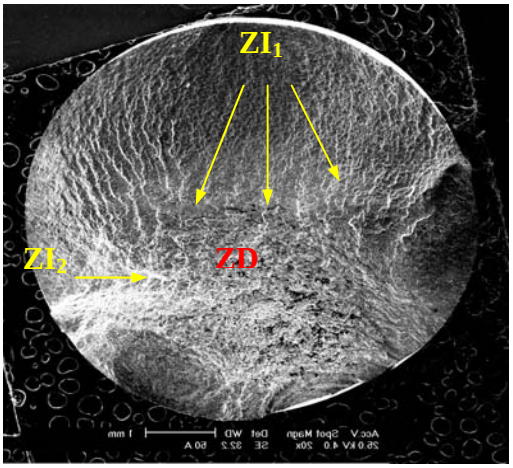
(a.1)


ZI1
ZD
ZI2
ZI3
Acc.V Spot Magn Det WD 1 mm
25.0 kV 4.0 20x SE 31.9 30 A

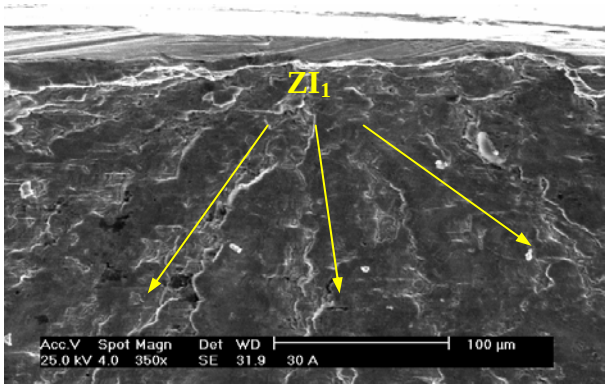
(b)


ZI1
Acc.V Spot Magn Det WD 100 µm
25.0 kV 4.0 350x SE 31.9 30 A

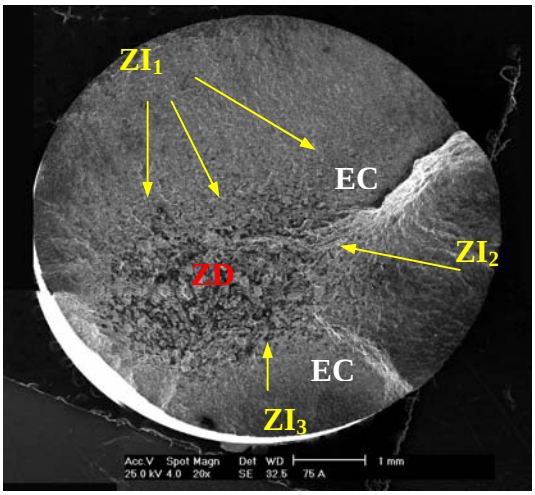
(b.1)


ZI1
ZI2
ZD

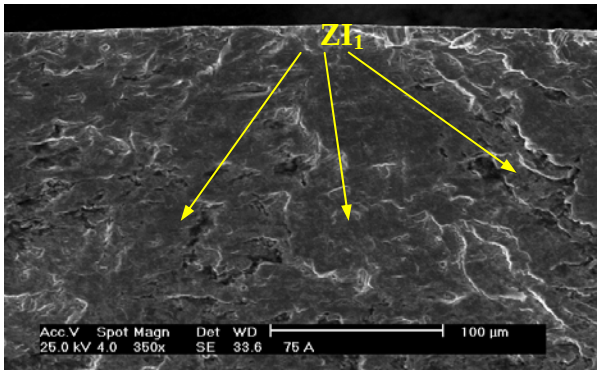
(c)


ZI1
Acc.V Spot Magn Det WD 100 µm
25.0 kV 4.0 350x SE 31.9 30 A

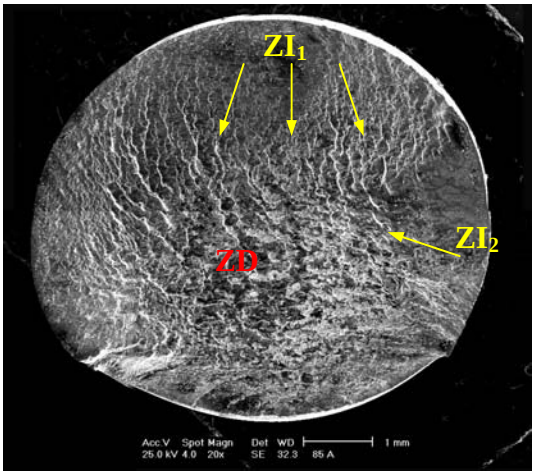
(c.1)


ZI1
EC
ZI2
ZD
EC
ZI3
Acc.V Spot Magn Det WD 1 mm
25.0 kV 4.0 20x SE 32.5 75 A

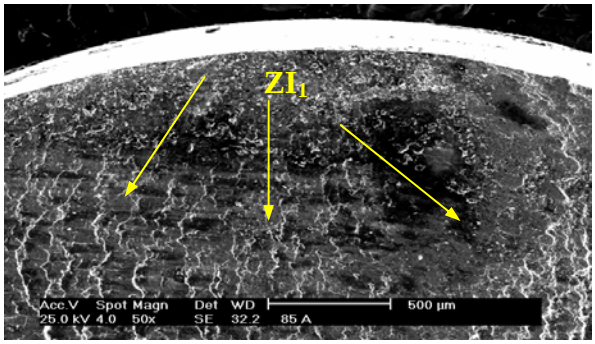
(d)


ZI1
Acc.V Spot Magn Det WD 100 µm
25.0 kV 4.0 350x SE 33.6 75 A

(d.1)



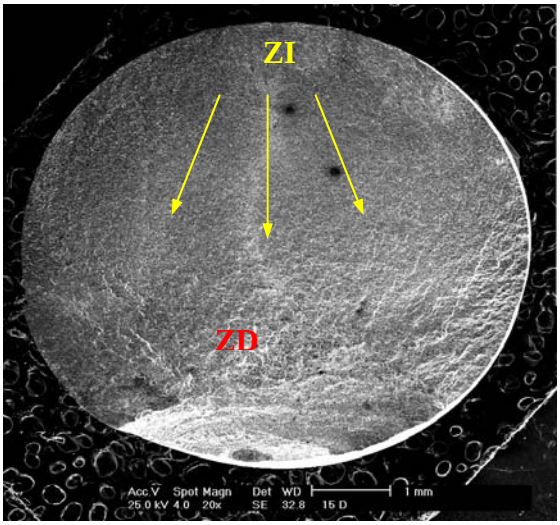
(e)



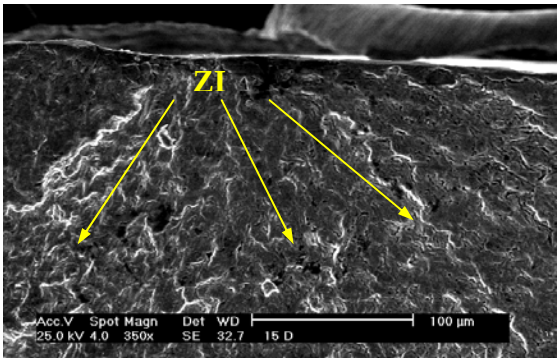
(e.1)

Figura 4.5 Fotomicrografías correspondientes a las probetas de los ensayos de dos bloques ascendentes , (a) 0,15 Xc [20X] – (a.1) Detalle Zona de Inicio de Grietas en (a) [350 X], (b) 0,30 Xc [20X] – (b.1) Detalle Zona de Inicio de Grietas en (b) [350X], (c) 0,50 Xc [20X] – (c.1) Detalle Zona de Inicio de Grietas en (c) [350 X], (d) 0,70 Xc [20X] – (d.1) Detalle Zona de Inicio de Grietas en (d) [350 X], (e) 0,85 Xc [20X] – (e.1) Detalle Zona de Inicio de Grietas en (e) [50 X].

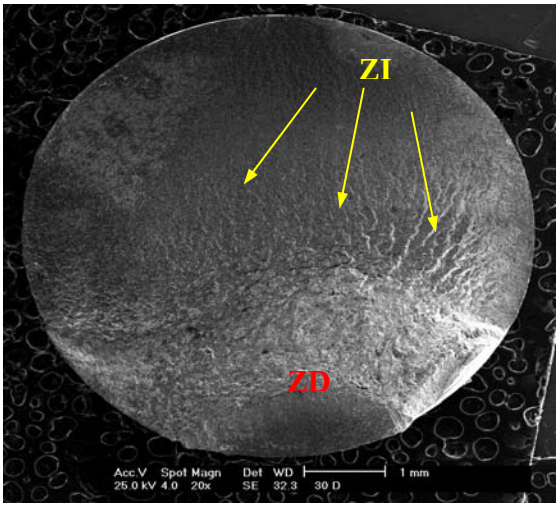
En la figura 4.5 puede apreciarse que las probetas correspondientes a los ensayos de dos bloques de esfuerzo en condición ascendente, presentan la zona de despegue o fractura final (ZD) ubicadas en el centro de las superficies de fractura, aunque un tanto desplazadas del mismo debido al avance predominante de uno de los múltiples inicios de grietas (ZI) que en ellas se presentan. Estos múltiples inicios se pueden identificar por la presencia de marcas radiales que convergen hacia el sitio considerado como el origen; además estas marcas radiales denotan la dirección de propagación de las grietas. En algunos casos pueden observarse también claramente escalones de clivaje (EC) como los señalados en la figura 4.5 (d), producto del la confluencia de dos frentes de crecimiento de grietas distintos.


ZI
ZD
Acc.V Spot Magn Det WD 1 mm
25.0 kV 4.0 20x SE 32.8 15 D

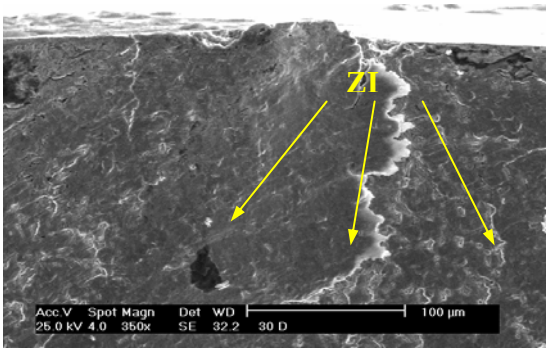
(a)


ZI
Acc.V Spot Magn Det WD 100 µm
25.0 kV 4.0 350x SE 32.7 15 D

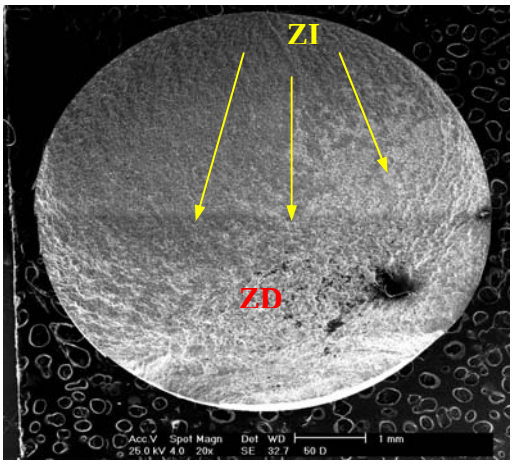
(a.1)


ZI
ZD
Acc.V Spot Magn Det WD 1 mm
25.0 kV 4.0 20x SE 32.3 30 D

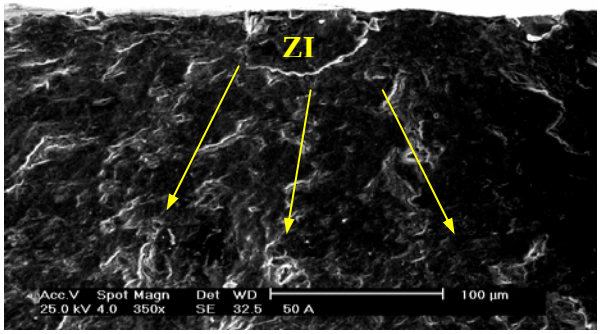
(b)


ZI
Acc.V Spot Magn Det WD 100 µm
25.0 kV 4.0 350x SE 32.2 30 D

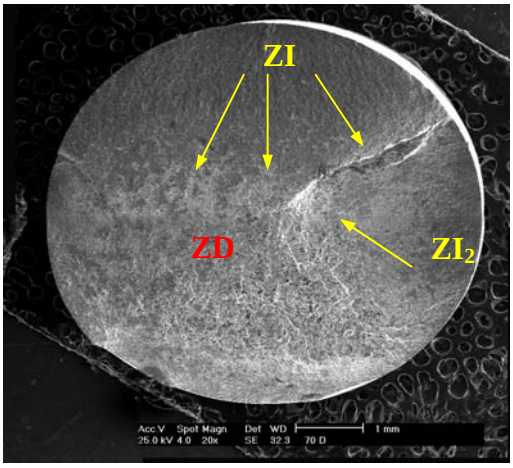
(b.1)


ZI
ZD
Acc.V Spot Magn Det WD 1 mm
25.0 kV 4.0 20x SE 32.7 50 D

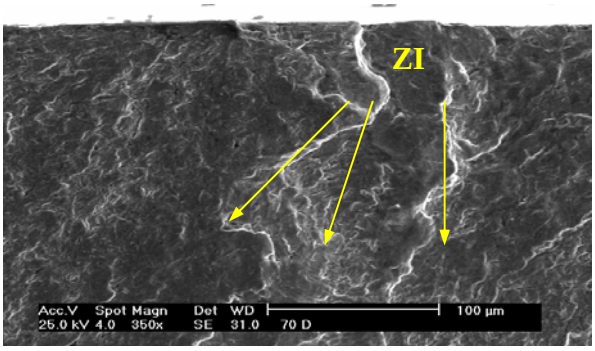
(c)


ZI
Acc.V Spot Magn Det WD 100 µm
25.0 kV 4.0 350x SE 32.5 50 A

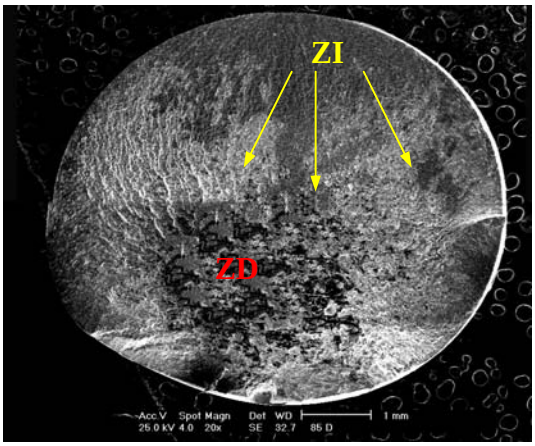
(c.1)



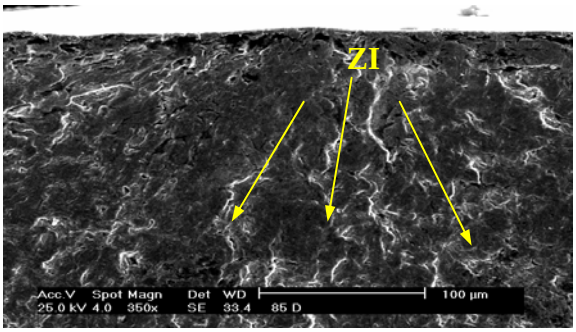
(d)



(d.1)



(e)



(e.1)

Figura 4.6 Fotomicrografías correspondientes a las probetas de los ensayos de dos bloques descendentes , (a) 0,15 Xc [20X] – (a.1) Detalle Zona de Inicio de Grietas en (a) [350 X], (b) 0,30 Xc [20X] – (b.1) Detalle Zona de Inicio de Grietas en (b) [350X], (c) 0,50 Xc [20X] – (c.1) Detalle Zona de Inicio de Grietas en (c) [350 X], (d) 0,70 Xc [20X] – (d.1) Detalle Zona de Inicio de Grietas en (d) [350 X], (e) 0,85 Xc [20X] – (e.1) Detalle Zona de Inicio de Grietas en (e) [350 X].

En la figura 4.6 podemos apreciar que a diferencia de las probetas correspondientes a los ensayos realizados de forma ascendente, todas las probetas examinadas para esta condición de ensayo, a excepción de la correspondiente a 0,70 Xc (Figura4.6 (d)), presentan una única zona de inicio de grietas, esto podría explicarse por el hecho que la aplicación de un nivel de esfuerzo superior en el primer bloque de ensayo, promueve el avance de un único frente de grieta, por lo que observamos la zona de fractura por sobre carga a un extremo de la probeta.

Por otra parte si comparamos la amplitud de las zonas de propagación de grietas para ambas condiciones de manera cualitativa (Figura 4.5 y 4.6), esto pareciera sugerir que las probetas correspondientes a la condición de esfuerzos descendentes presentan una mayor zona de propagación, debido a que la aplicación de un esfuerzo inferior en el segundo bloque de ensayo permite un avance más prolongado de la grietas antes de producirse la fractura por sobrecarga. Además podemos observar en la figura 4.6 que a medida que aumenta fracción de vida consumida en el primer bloque de esfuerzo, disminuye la zona de propagación de grietas.

Finalmente es importante señalar que las probetas correspondientes a los ensayos de dos bloques ascendentes presentaron grietas secundarias en la zona de despegue (Figura 4.7), que por su ubicación parecen ser generadas por el desgarramiento producto de la aplicación del esfuerzo superior (694 MPa) al final de la vida a fatiga del material.

Sin embargo la no realización del estudio fractográfico de probetas correspondientes a los ensayos de fatiga realizados a amplitud constante de 694 MPa, no hacen posible corroborar si estas son producto de lo expuesto anteriormente, o si por lo contrario, las mismas son una consecuencia de la condición de daño acumulado.

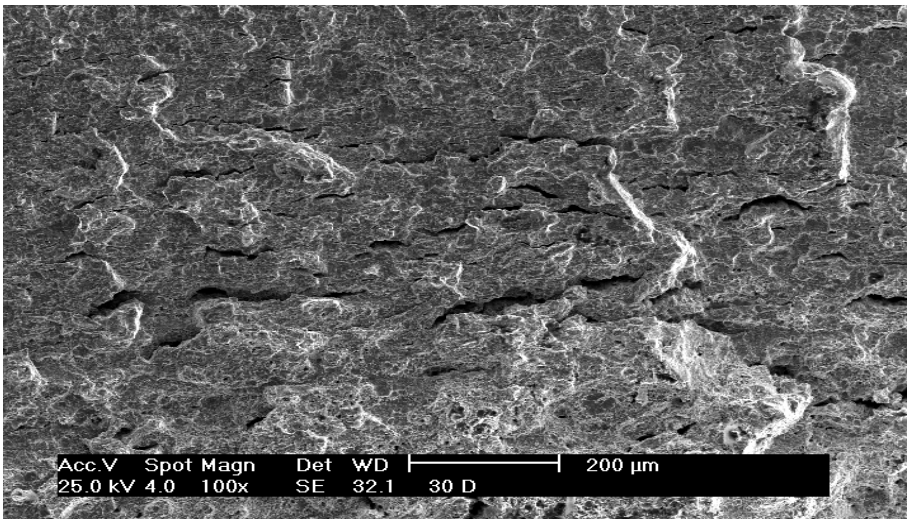
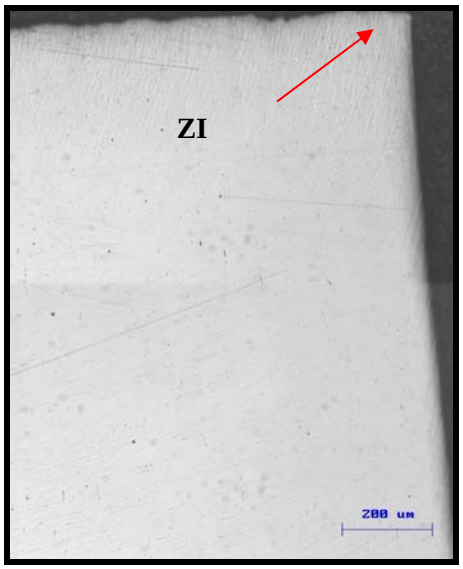


Figura 4.7 Grietas segundarias encontradas en las superficies de fractura de las probetas correspondientes a los ensayos de dos bloques ascendentes.

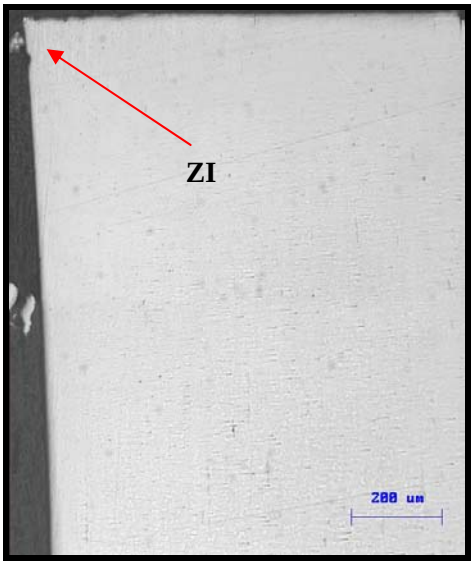
4.3.2.- Verificación de grietas primarias:

Con el fin de verificar la presencia de grietas primarias paralelas a la grieta principal que hallan contribuido de alguna u otra manera al daño sobre el material, se realizó una observación sistemática de los cortes longitudinales efectuados en las cercanías de la zona de nucleación de grieta de las probetas seleccionadas, evidenciándose la ausencia de grietas primarias en todas las probetas evaluadas. Basándonos en este hecho, podríamos decir que en el caso de los ensayos de esfuerzos descendentes la totalidad del daño sobre el material es atribuible únicamente a la propagación sobre el plano de fractura de la grieta principal.

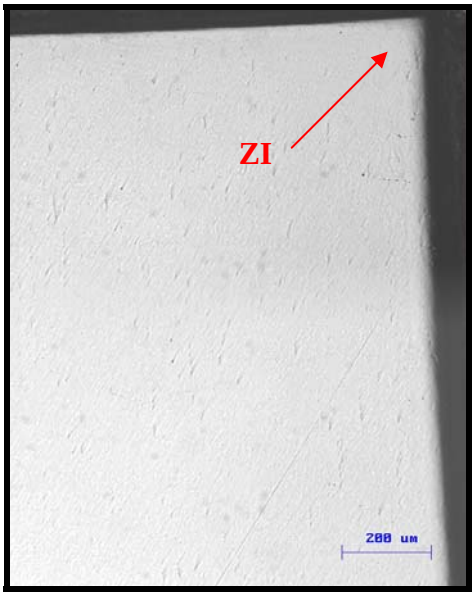
A continuación se presentan las fotomicrográficas correspondientes de los cortes longitudinales realizados a las probetas seleccionadas**:**



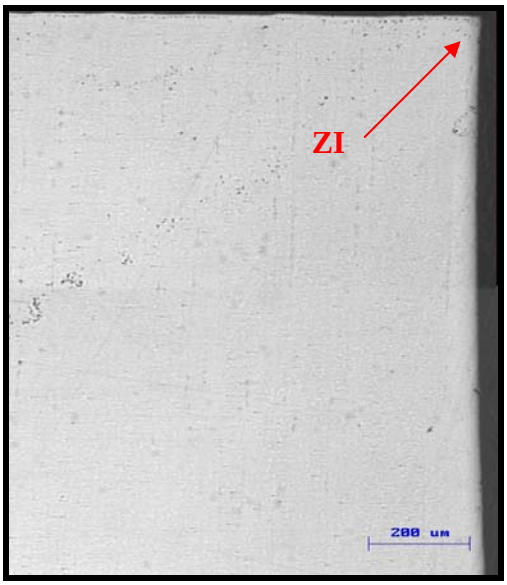
Xc = 0,15 Ascendente



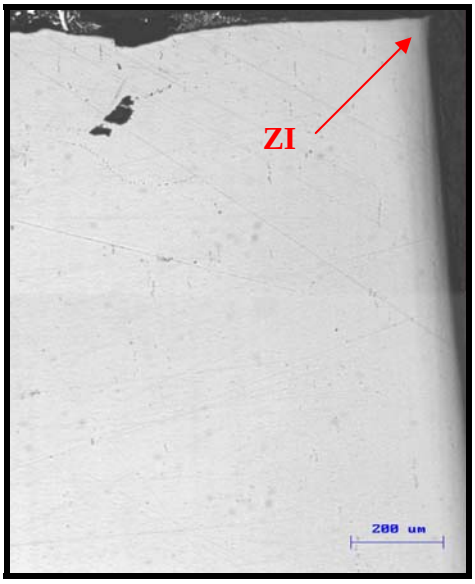
Xc = 0,15 Descendente



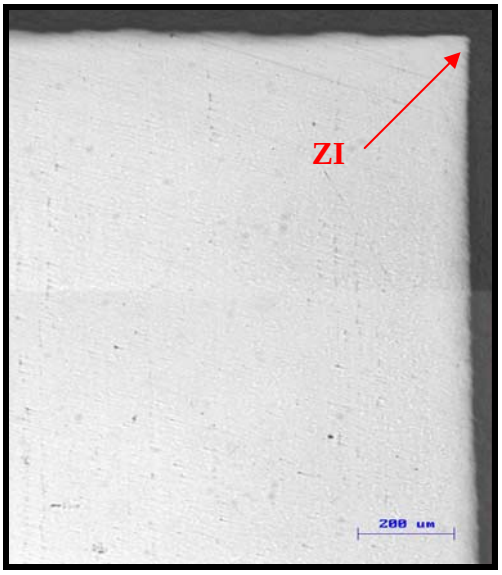
Xc = 0,30 Ascendente



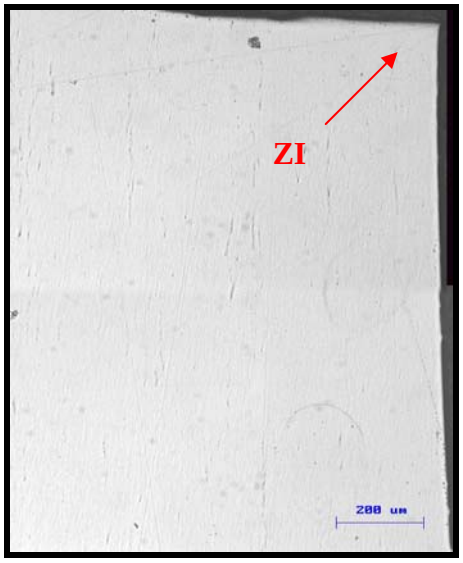
Xc = 0,30 Descendente



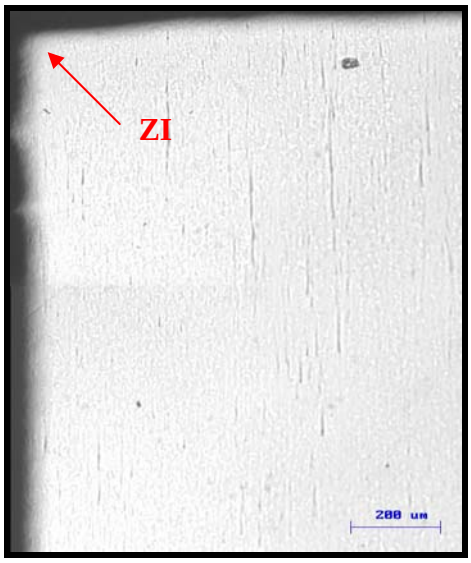
Xc = 0,50 Ascendente



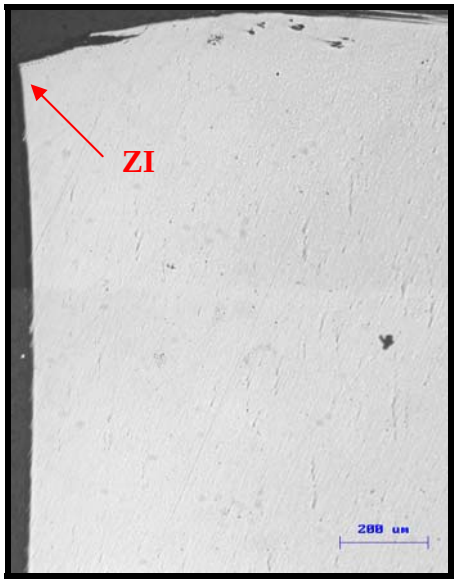
Xc = 0,50 Descendente



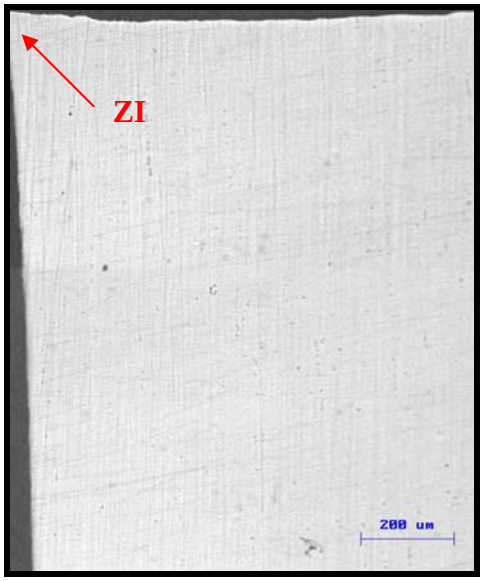
Xc = 0,70 Ascendente



Xc = 0,70 Descendente



Xc = 0,85 Ascendente



Xc = 0,85 Descendente

Figura 4.5 fotomicrografías (100X) correspondientes a los cortes longitudinales realizados a las probetas seleccionadas donde se señala la zona de inicio de grieta (ZI).

CAPITULO V

CONCLUSIONES

Basados en los resultados obtenidos en el presente estudio podemos concluir lo siguiente:

- La magnitud del daño acumulado sobre el acero SAE 4340 templado y revenido en condiciones de alto ciclaje no es predecible satisfactoriamente mediante la Ley de Daño Acumulado Lineal de Miner [2].

- La ausencia de una entalla que sirva como agente de nucleación de grietas de fatiga, genera una mayor dispersión en los resultados obtenidos así como también un aumento apreciable en el número de ciclos a falla del material. Sin embargo, esto permite el estudio del daño acumulado en un espectro más amplió de ciclos, tomando en cuenta el daño producido en el material en la etapa de iniciación de grietas.

- La aplicación sobre el material de un esfuerzo inicial de 694 MPa produce un daño severo que genera una disminución significativa de la resistencia a la propagación de grietas independientemente de la fracción de vida consumida en el primer bloque, mientras que la aplicación repetitiva sobre el material de un esfuerzo inicial de 550 MPa genera un aumento en la resistencia a la propagación de las grietas.

- La aplicación de la Ley de Daño Lineal de Miner [2] en la cuantificación del daño sobre el material en ensayos de dos bloques en un ámbito de 100.000 a 1.000.000 de ciclos produce una sobre estimación del daño en condiciones de esfuerzos ascendentes y una subestimación del mismo en condiciones de esfuerzos descendentes.

- La totalidad del daño producido sobre el material en los ensayos de dos bloques de esfuerzo aplicados de forma descendente es atribuible únicamente a la propagación de la grieta principal sobre el plano de fractura.

- La aplicación sobre el material de bloques de esfuerzos ascendentes, propician múltiples inicios de grietas en el material. Mientras que la aplicación de bloques de esfuerzos descendentes propician la formación de una única zona de inicio de grietas en el mismo.

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES

Con el objetivo de orientar futuros trabajos que puedan complementar este estudio se realizan las siguientes recomendaciones:

- Realizar estudios similares sobre otros materiales y aleaciones que permitan obtener resultados comparables con los presentes, con el objetivo de apreciar de forma más amplia el comportamiento de los materiales ante el daño acumulado por fatiga.

- Realizar estudios en condiciones de magnitud y orden de aplicación de esfuerzos diferentes al presente, tales como ensayos de tres bloques de esfuerzo, ensayos de amplitud programada de esfuerzos y ensayos de bloques de esfuerzos repetitivos, que permitan observar el daño en el material bajo diversos espectros de aplicación de carga.

- Realizar ensayos de daño acumulado en condiciones de aplicación de carga de tensión – tensión, con la finalidad de preservar la características morfológicas de la superficies de fractura.

- Realizar el estudio fractográfico mediante Microscopia Electrónica de Barrido de las superficies de fractura correspondientes a las probetas ensayadas a una amplitud constante de 694 MPa, con el fin de establecer el origen y el papel de las grietas secundarias observadas en la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.- DIETER, GEORGE (1976). **"Mechanical Metallurgy"**. McGraw-Hill Second Edition, Japan.

2.- MINER, M. A. (1945). **"Cumulative damage in fatigue"**, Journal of Applied Mechanics, 67, pp A159 – A164.

3.- ASM International (1990). **"ASM Handbook, Materials Handbook, Properties and Selection Irons, Steels and High Performance Alloys"**, Vol. 1, Materials Park, USA.

4.- ASM International (1991). **"ASM Handbook, Heat Treating"**, Vol. 4, Materials Information Society, USA.

5.- ASM International (1996). **"ASM Handbook, Fatigue and Fracture"**, Vol. 19, Materials Information Society, USA.

6.- FORREST, P. G. (1972). **"Fatiga de los Metales"**. Ediciones Urmo, España.

7.- J. T. RANSON y R. F. MEHL (1952) **"The Statistical Nature of the Fatigue Properties of SAE 4340 Steel Forgings",** American Society for Testing and Materials, 137, p 3 .

8.- J. CALYTON, CAVE ; J. TAYLOR y E. IVENSON (1955). **" Reproducibility of Wöhler Fatigue Test"**, Journal of Iron and Steel Institute. 180, p 161.

9.- J. WOOLMAN y A. JACQUES (1950). **"Influence of Lead Additions on the Mechanical Properties and Machinability of some Alloy Steels",** Journal of Iron and Steel Institute, 165, p 257.

10.- T. J. DOLAN y G. S. YEN (1948). **“Effect of Metallurgical Structure on Fatigue Strength and Notch Sensitivily of Steel”,** American Society for Testing and Materials, 48, p 664.

11.- F. BORIK; R. D. CHAPMAN y W. E. JOMINY (1958). “**The Effect of Percent Tempered Martensite on the Endurance Limit”,** American Society of Metals, 48, p 664.

12.- PALMGREN A. (1924). **“Die Lebensdauer von Kugellagern “**, Verfahrenstechinik, 68, pp 339 – 341.

13.- A. FATEMI y L. YANG (1998). **“Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: A Survey of the State of the Art for Homogeneous Materials”**, International Journal of Fatigue, 20, pp 9 – 34.

14.- LIM, L. C. ; TAY, Y. K. y FONG, H. S. (1990) **“Fatigue Damage and Crack Nucleation Mechanisms at Intermediate Strain Amplitude”,** Acta Metallugica et Materialia, 38 (4), pp 595-601.

15.- COFFIN L. F.(1956). **“ Design Aspects of high – Temperature Fatigue with Particular Reference to Thermal Stresses”**, ASME, 78, pp 527 – 532.

16.- BALDWIN E. ; SOKOL G. y COFFIN L. (1957). **“ Cyclic Strain Fatigue Studies on AISI 347 Stainless Steel”**, American Society for Testing and Materials, 57, pp 567 – 586.

17.- TOPPER T. H. y BIGGS W. D (1966). **“ The Cyclic Straining of Mild Steel “**, Applied Materials Research, pp 202 – 209.

18.- MILLER K. J (1970). **“An Experimental linear Cumulative – Damage law”**, Journal of Strain Analysis, 5(3), pp 177 – 184.

19.- LANGER B. F (1937). **“ Fatigue Failure from Stress cycles of varying Amplitude”,** ASME Journal of Applied Mechanics, 59,pp A160 – A162.

20.- GROVER H. (1960). **“ An Observation Concerning the cycle ratio in Cumulative Damage, In Symposium on Fatigue of Aircraft Structure”**, American Society for Testing an Materials, pp 120 – 124.

21.- MANSON S. (1966). **“ Interfaces between Fatigue, Creep, and Fracture”**, International Journal of Fracture Mechanics, 2,pp 328 – 363.

22.- BILIR, O. G. (1991) **“Experimental Investigation of Fatigue Damage Accumulation in 1100 Al Alloy**” , International Journal of Fatigue, 13 (1), pp 3 – 6.

23.- RICHART, F. E y NEWMARK, N. M. (1948) **“A Hypothesis for the Determination of Cumulative Damage in Fatigue”,** American Society for Testing and Materials, 48, pp 767-800.

24.- MARCO S. y STARKEY W. (1954). **“ A concept of Fatigue Damage”**, ASME, 76, pp 627 – 632.

25.- MANSON S. y HALFORD G. (1986), **“ Reexamination of cumulative fatigue damage analysis an engineering perspective”**, Engineering Fracture Mechanics, 25(5/6),pp 539 – 571.

26.- MANSON S. y HALFORD G. (1981), **“ Practical implementation of the Double Linear Damage Rule and Damage curve approach for treating cumulative fatigue Damage”**, International Journal of Fracture, 17(2), pp 169 - 192.

27.- MANSON S. y HALFORD G. (1983). **“ Complexities of high – temperature metal fatigue: some steps toward understanding”,** Israel Journal of Technology, 21, pp 29 – 53.

28.- HALFORD G. y MANSON S. (1985). **“ Reexamination of cumulative fatigue damage laws , In Structure Integrity and Durability of Reusable Space Propulsion Systems”**, NASA CP – 2381, NASA, pp. 139 – 145.

29.- CORTEN H. AND DOLON T. (1956)**. “ Cumulative fatigue damage , In Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals, Institution of Mechanical”** Engineering and American Society of Mechanical Engineers, pp. 235 – 246.

30.- FREUDENTHAL A. y HELLER R. (1959). **“ On stress interaction in Fatigue and a Cumulative Damage rule”**, Journal of the Aerospace Sciences, 26(7),pp 431 – 442.

31.- FREUDENTHAL A. (1956). **“ Physical and Statistical aspects of Cumulative Damage”**, In Colloquium on Fatigue, Stockholm, pp. 53 – 62.

32.- SPITZER R. y CORTEN H**., “ Effect of Loading sequence on Cumulative Fatigue Damage of 7071 – T6 aluminium alloy”**, American Society for Testing and Materials, 61,pp 719 – 731.

33.- LEIPHOLZ H. (1985). **“ Lifetime Prediction for metallic specimens subjected to Loading with varying intensity”**, Computer & Structures, 20(1 – 3), pp 239 – 246.

34.- LEIPHOLZ H. ; TOPPER T. y EL MENOUFY M. (1983). **“ Lifetime Prediction for metallic Components subjected to Stochastic Loading”**, Computer and Structures, 16(1 – 4),pp 499 – 507.

35.- SHANLEY F. (1952). **“A theory of Fatigue based on unbonding during reversed Slip”**, Report P – 350, The Rand Corporation, Santa Monica.

36.- VALLURI S. (1961). **“ A unified Engineering Theory of high stress level Fatigue”**, Aerospace Engineering, 20,pp 18 – 19.

37.- VALLURI S. (1961). **“ A Theory of Cumulative Damage in Fatigue”**, Report No. ARL 182, Aeronautical Research Laboratory, Office of Aerospace Research, United States Air Force.

38.- SCHARTON T. y CRANDALL S. (1966**).“ Fatigue Failure under Complex stress histories”**, ASME Journal of Basic Emgineering, 88(1),pp 247 – 251.

39.- WHEELER, O. E. (1972) **“Spectrum Loading and Crack growth”** , ASME Journal of basic Engineering, D94 (1), pp 181-186.

40.- VASEK A. y POLAK J. (1991). **“ Low cycle Fatigue Damage Accumulation in Armei – iron”,** Fatigue of Engineering Materials and Structures,14(2 – 3), pp 193 – 204.

41.- OCHOA E.(2002). **“ Estudio de la Fatiga en un Acero SAE 4340 Templado y Revenido, Entallado”** Escuela de Metalúrgia y Ciencia de los Materiales U.C.V., Tesis de grado..

42.- ASTM Designation E606-92 **“ Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing”**

43.- ASTM Designation E739-91 **“ Standard Practice for Statistical Analysis of linear or linearzed Stress-Life (S-N) and Strain-Life (E-N) Fatigue Data”**

44.- A. K. VASUDEVAN ; K. SADANANDA Y G. GLINKA (2001). **“Critical Parameters for Fatigue Damage”,** International Journal of Fatigue, 23 , pp 39 – 53.

45.- COLIN MACDOUGALL AND T.H. TOPPER (1997). **“The influence of variable amplitude loading on crack closure and notch fatigue behaviour”,** International Journal of Fatigue, 19 , pp 389 – 400 .

46.- GOMES, C (2004) **“Análisis del Daño Acumulado por Fatiga en un acero SAE 4340 Templado y Revenido”**, Escuela de Metalúrgia y Ciencia de los Materiales U.C.V., Tesis de grado.

47.- GARY R. HALFORD (1997) **“Cumulative fatigue damage modeling—crack nucleation and early growth” ,** International Journal of Fatigue, 19 , pp 253 – 260.

48.- Y. C. XIAO; S. LI y Z. GAO (1998) **“A continuum damage mechanics model forhigh cycle fatigue”,** International Journal of Fatigue, 20 , pp 503 – 508.