

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**“COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE ALTO CICLAJE DEL ACERO
SAE 4340”**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Bachiller
Ángel J. Rodríguez M
Para optar al Título:
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**“COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE ALTO CICLAJE DEL ACERO
SAE 4340”**

Tutor Académica: Prof. Elí Saúl Puchi.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Bachiller
Ángel J. Rodríguez M.
Para optar al Título:
Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2013



ACTA

Los Abajo Firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller:

Ángel José Rodríguez Martínez

Titulado:

**“Comportamiento a la Fatiga de Alto Ciclaje del Acero SAE
4340”**

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

Acta se levanta en la ciudad de Caracas, al octavo día del mes de agosto del año dos mil trece.


Prof. Crisanto Villalobos

Jurado


Prof. Fausto Carpentiero

Jurado


Prof. Eli Saúl Puchi.

Tutor

DEDICATORIA

.Te dedico este trabajo ti madre, y a ti papa, y aun siento que esto se queda aún muy corto, pensándolo hasta cierto punto. Decir que escribir esto es una de las cosas más difíciles de escribir en este trabajo no es mentira. Las palabras siempre se quedaran cortas, esas cosas que las palabras no podrán describir nunca, y solo se siente que como el corazón se pone como pequeño. Dios sabe los sentimientos que se sienten. Encima parece mentira como cambio todo; como las cosas fáciles se volvieron difíciles, lo pequeño se volvió grande, lo difícil más difícil y duro se volvió.

Imagino que así se sentiría Odiseo (ó Ulises) cuando llego a Ithaca, y en esta travesía igual que él se aprendieron muchas cosas nuevas y también hubo la dicha de conocer tantos grandes nuevos amigos. Es verdad que los amigos son la familia que se escoge, y tuve la gran suerte y dicha que, ellos más bien me hayan hasta escogido para ser parte de su familia. Ojala los hubieras conocido mama. Si llegara a pasar que Dios quisiera que volviera a nacer, y me pone a escoger una madre la pediría a Ud. Una y otra vez, y no me importaría donde ni como, ni cuando, ni en qué condiciones ni como se viviría. Dedico este trabajo a ti. Mama, y a ti papa, y a todos esos padres que luchan y trabajan tanto por el bienestar de sus hijos, con tanto desinterés y esfuerzo, tanto sacrificio, cariño y amor. Esos padres que solo cuando uno crece, y ve como es la realidad de la vida adulta, uno se da de cuenta y ve todo ese esfuerzo que hicieron, lo que pasaron, y todo lo que trabajaron duramente y llegaron a dar por sus hijos.

Solo Dios sabe por qué la vida quiso que pasara de esta forma, pero no es un adiós madre mía, es solo un pequeño y simple hasta luego. Te quiero.

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento al profesor Elí Saúl Puchi, por guiarme durante el desarrollo de la tesis, y su apoyo y comprensión durante las difíciles pruebas, tanto de la tesis como las tan dolorosas familiares que ocurrieron, las cuales transcurrieron durante el transcurso y desarrollo de la misma.

A mis padres, que tanto apoyo dieron, sus palabras de fuerza a pesar de que vivíamos momentos tan duros y difíciles, para que continuara pasara lo que pasara, siguiera y finalizara y no me rindiera.

A los Prof. Engels Ochoa y Prof. José Gregorio La Barbera por su valiosa y abnegada colaboración durante todas las etapas de la tesis. Sin ellos no habría sido posible alcanzar la meta.

A Elio Castro y su familia por su colaboración en tantas fases del desarrollo de este trabajo, y su gran amistad, Dios los colme de bendiciones.

A Luis Naspe y José Sánchez, José Gregorio Vera, Juan y Humberto De Caires por su amistad, y apoyo. Por su gran colaboración durante la realización de muchos de los ensayos.

A Profa. Maribel Suarez, Profa. Ruth Bisbal, Profa. Sonia Camero, Prof. Wilfrido González, Prof. Freddy Malpica, Prof. Marcial Pérez, Prof. Jorge Barillas, Prof. Franklin Baduy, Prof. Alberto Pertuz, Ángela Castro, Elías Milano por su colaboración y ayuda.

A Oneida Gutiérrez y Hamyit Blanco, por su gran apoyo en los muchos momentos difíciles, pues muchas veces, las cosas dolorosamente vividas durante el

desarrollo de este trabajo, en el ámbito familiar y personal, hicieron que una muy simple tarea, se volviera tan difícil, compleja y extenuante.

A Lic. María Antonieta Padrón, Luis Márquez, Fabio Reyes, Cesar Martínez, Félix Arraiz, Romualdo Cuello, Luis Márquez, Carlos Zapata, porque, a veces, no solo cuentan las ayudas para el desarrollo y finalización de un trabajo de grado, y las que tienen que ver solo con el mismo; cualquier ayuda con los problemas diarios, que permitan a la persona estar lo más tranquilo y fresco para poder continuar y seguir trabajando en cualquier trabajo de grado académico, vale, y con mucho.

A mis familiares y amigos por brindarme apoyo, además de las palabras de aliento necesarias para seguir adelante y finalizar esta empresa y la ayuda prestada en todas las maneras posibles para finalizar esta tesis.

Y al resto de los profesores, compañeros y amigos de la universidad, que de una manera u otra prestaron su ayuda y apoyo, tanto en el ámbito académico, como familiar, pues cualquier ayuda, en esos momentos tan duros y difíciles vividos, fue grande y muy apreciada, dando algo de tranquilidad y paz, que facilitó para el desarrollo y conclusión de este trabajo. Gracias Señor por permitirme conocerlos, y tener la gran dicha de ser su amigo. Dios bendícelos y llénalos de bendiciones a todos. De todo Corazón, y con la más grande humildad y sinceridad, gracias.

RESUMEN

Rodríguez M. Ángel J.

**“COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE ALTO CICLAJE DEL ACERO
SAE 4340”**

Tutor Académico: Prof. Eli Saúl Puchi.

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas-Venezuela.

Palabras Claves: **Acero SAE 4340, Daño acumulado por fatiga, límite de fatiga, resistencia a la fatiga, resistencia a la fluencia en tracción.**

El presente trabajo se realizó a fin de estudiar el daño acumulado por fatiga en muestras de un acero SAE 4340. Para ello, se realizaron ensayos de fatiga en flexión rotativa, empleando muestras de fatiga mecanizadas según la norma ASTM E606. Asimismo, se realizaron ensayos de tracción a muestras previamente sometidas a diversos grados de daño por fatiga, pudiéndose determinar que estas presentan un valor mayor del esfuerzo de fluencia, a medida que aumenta el número de ciclos aplicados. Los ensayos de fatiga fueron efectuados a distintos niveles de esfuerzo que representan diferentes fracciones del esfuerzo de fluencia del material. Dichos ensayos permitieron determinar el comportamiento a la fatiga del material bajo condiciones de alto ciclaje (número total de ciclos entre 10^5 y 10^6). Estos resultados se utilizaron para la construcción de la curva de Wöhler característica del material y en base a esta, fueron realizados los ensayos de daño acumulado en dos bloques de esfuerzos, tanto ascendentes como descendentes, incluyendo diferentes fracciones de vida consumida en cada bloque de aplicación de carga. Los resultados revelaron que el modelo de Kohout y Vechet describe satisfactoriamente la variación del número de ciclos a falla (N_f) con el máximo esfuerzo alternante aplicado a las muestras, particularmente en virtud de la elevada desviación estándar que se tiene en el valor de

RESUMEN

N_f a cada esfuerzo alternante. Los distintos modelos de daño acumulado empleados para determinar la vida remanente del material proveen resultados similares, con la excepción del modelo de Marco-Starky, el cual pareciera ser el que mejor predice el número de ciclos a falla para el segundo bloque de aplicación de carga. En el caso del modelo de Palmgren-Miner, el mismo sobre estima los valores de N_f para la secuencia descendente y los subestima en la secuencia ascendente. El análisis fractográfico indicó que tanto a altos como bajos esfuerzos alternantes la falla por fatiga está dominada por la iniciación y propagación de una grieta dominante, con ausencia notable de otras grietas primarias paralelas a la superficie de fractura, así como de grietas secundarias que se propaguen desde la superficie de fractura misma. Con La metodología empleada en este estudio, es posible determinar los cambios en las propiedades mecánicas estáticas en materiales previamente sometidos a fatiga, por lo que en principio sería posible evaluar el daño acumulado por fatiga a partir de los cambios en dichas propiedades, al menos en materiales tales como el acero SAE 4340.

ABSTRACT

Rodriguez M. Angel J.

“HIGH CYCLIC FATIGUE BEHAVIOR OF A SAE 4340 STEEL”

Academic supervisor: Prof. Eli Saul Puchi Cabrera.

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

Keywords: SAE 4340 steel, cumulative fatigue damage, fatigue limit, fatigue strength, tensile yield strength.

The present work has been carried out in order to study the cumulative fatigue damage in samples of a SAE 4340 steel. Rotating bending fatigue tests were conducted employing fatigue samples machined according to the ASTM E606 standard. Also, tensile tests were carried out employing samples with different prior cumulative fatigue damage, which allowed the conclusion that the yield stress of such samples increases as the cumulative fatigue damage also increases. Fatigue tests were conducted at different maximum alternating stresses, corresponding to different fractions of the initial static yield stress of the material. Such tests allowed the determination of the fatigue behavior of the material under high cycle fatigue conditions (total number of cycles between approximately 10^5 and 10^6). Such results were employed for determining the Wöhler curve of the material and for designing the two stress blocks cumulative fatigue tests, both under increasing and decreasing stress conditions. The results obtained indicated that the Kohout and Vechet model is able to describe satisfactorily the change in the number of cycles to fracture (N_f) with the maximum alternating stress applied to the material, particularly given the high standard deviation in the N_f values at each alternating stress. The different cumulative fatigue damage models employed for determining the remnant life of the material

ABSTRACT

provide similar results, with the exception of the Marco-Starky model, which seems to provide the best results regarding the number of cycles to fracture attained in the second stress block. The Palmgren-Miner model predicts an over estimation of the N_f values for the decreasing loading sequence and an under estimation for the increasing loading sequence. The fractographic analysis indicated that both at high and low maximum alternating stresses the fatigue failure is dominated by the initiation and growth of a single dominant crack, with a noticeable absence of other primary cracks parallel to the fracture surface, as well as secondary cracks propagating from the latter. The methodology that has been employed in this work allows the determination of the static mechanical properties of materials subjected to prior fatigue damage. Therefore, in principle, it would be possible to evaluate the prior cumulative fatigue damage from the change in such mechanical properties, at least for materials such as the SAE 4340 steel.

ÍNDICE

RESUMEN vii

ABSTRACT ix

ÍNDICE DE FIGURAS xv

ÍNDICE DE TABLAS xix

ÍNDICE DE ECUACIONES xx

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3

1.1. Justificación de la investigación 3

1.2. Objetivo de la investigación 3

1.2.1. Objetivo General 4

1.2.2. Objetivos Específicos 4

1.3. ALCANCES 4

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO 6

2. SUBSTRATO: ACERO AISI/SAE 4340 6

2.1. Aceros de baja aleación 6

2.2. Tratamientos Térmicos 8

2.2.1. Revenido 8

2.2.2. Normalizado 9

2.2.3. Recocido 9

2.2.4. Temple 9

2.2.5. Endurecimiento 9

2.2.6. Esferoidizado: 9

ÍNDICE

2.3.	ENSAYO DE TRACCIÓN.....	10
2.3.1.	Esfuerzo y deformación ingenieril ^[13]	11
2.3.2.	Propiedades obtenidas a partir del ensayo de tracción.....	12
2.4.	ENSAYOS DE FATIGA.....	14
2.4.1.	Resistencia y límite de fatiga:	15
2.4.2.	Máquinas de flexión rotatoria.	16
2.4.3.	Curva de Wöhler	18
2.4.4.	Relaciones paramétricas simples para la descripción de la curva S-N 19	
2.5.	Teorías de daños acumulados por fatiga	21
2.5.1.	Antecedentes Históricos.	21
2.5.2.	Modelo Regla lineal de Palmgren-Miner.	24
2.5.3.	Teorías de Daño No-Lineales.	25
2.6.	Estudios preliminares ó antecedentes.....	30
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL		34
3.1.	Procedimiento experimental.....	34
3.2.	Procedimiento y actividades	35
3.3.	Material	36
3.4.	Fabricación de las probetas	36
3.4.1.	Preparación de probetas para ensayos de tracción y fatiga.....	38
3.4.2.	Preparación de probetas para ensayos de dureza.	40
3.5.	Perfilometría óptica	41
3.6.	Ensayos de tracción.....	43
3.7.	Corrección por deformación elástica de los elementos de máquina .	45

ÍNDICE

3.8.	Curvas de Esfuerzo vs. Deformación.....	47
3.9.	Ensayo de fatiga	48
3.10.	Procedimiento de corrección para la obtención de las curvas esfuerzo vs deformación real en ensayos de tracción para las probetas de fatiga ASTM E 606 50	
3.11.	Curva de Wöhler	53
3.12.	Ensayo de dureza.....	54
3.13.	Ecuación de Basquin	55
3.14.	Preparación de las muestras para el estudio fractográfico.	56
3.14.1.	Preparación de probetas para análisis de la intercara longitudinal.	57
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		60
4.1.	Clasificación de las muestras estudiadas.....	60
4.2.	Descripción de los resultados de los ensayos de tracción realizados.	61
Las curvas esfuerzo-deformación que se obtuvieron, fueron las siguientes:		66
4.2.1.	Ensayos de Fatiga.	68
4.2.2.	Ensayos de daño acumulado en un bloque.....	68
4.2.3.	Ensayos de daño acumulado en dos bloques.....	71
4.2.4.	Modelo de Palmgren-Miner.....	73
4.2.5.	Modelo de Marco – Starkey.....	75
4.2.6.	Modelo de Manson- Halford.....	77
4.2.7.	Modelo de Mesmacque et al.	78
4.2.8.	Resultado del estudio fractográfico	79
4.2.9.	Estudio de las secciones transversales de las probetas de fatiga...	80
4.2.10.	Estudio de las zonas de propagación y zona de fractura por sobre carga presentes en las superficies de fractura de las muestras.	84

ÍNDICE

4.2.11. Cortes longitudinales de las probetas de fatiga	87
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES.....	91
BIBLIOGRAFÍA.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquema de una máquina de ensayo de tracción aplicándose la fuerza unidireccional a la probeta ^[13] 11

Figura 2-2. Curva esfuerzo-deformación ingenieril ^[13] 13

Figura 2-3. Tipos de esfuerzo de fatiga..... 15

Figura 2-4. Máquinas de fatiga de flexión rotatoria ^[16] 17

Figura 2-5. Máquina de ensayo de fatiga de viga en voladizo a flexión rotativa ^[1] 18

Figura 2-6. Curvas S-N típicas en aleaciones de acero y aluminio 19

Figura 2-7. Ciclos de aplicación de Esfuerzos alternantes a un elemento de máquina. 22

Figura 2-8. Uso de la Regla Palmgreen-Miner para la predicción de vida con una amplitud de carga variable. 25

Figura 2-9. Representación Gráfica de la curva de Daño vs Relación de Ciclos para la Teoría de Marco-Starkey 26

Figura 2-10. Resultados obtenidos por Manson-Halford en ensayos de dos bloques de esfuerzos Descendientes sobre un Acero inoxidable 316L..... 28

Figura 2-11. Definición de los parámetros usados en la teoría de Daño acumulado en el Modelo de Mesmacque et al..... 29

Figura 3-1. Diagrama de flujo del proceso..... 35

Figura 3-2. Probeta para ensayo de fatiga según norma ASTM E-606, unidades en mm..... 37

Figura 3-3. Probeta para ensayos de dureza, unidades en mm..... 38

Figura 3-4. Fotografía de las probetas utilizadas. En orden descendente: probeta para ensayos de fatiga, probeta para ensayos de tracción y probeta para ensayos de dureza..... 39

Figura 3-5. Fotografía del torno Myford, modelo ML7-R, donde se pulieron las probetas para el ensayo de fatiga..... 40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-6. Máquina para pulido de plato giratorio	41
Figura 3-7. Equipo de perfilometría óptica.	43
Figura 3-8. Máquina para ensayo de tracción.....	45
Figura 3-9. Máquina de fatiga y sus partes	48
Figura 3-10. Curva carga-alargamiento original de una probeta de fatiga ensayada a tracción.....	51
Figura 3-11. Ampliación de la primera zona de la curva de la figura 3-10....	51
Figura 3-12. Curva carga-alargamiento corregida por desplazamiento del origen.....	52
Figura 3-13 Curva carga-alargamiento.	53
Figura 3-14. Equipo de limpieza por ultrasonido.	56
Figura 3-15. Máquina de corte de disco de diamante Struers Minitorm.....	57
Figura 4-1. Gráficos obtenidos de los ensayos de tracción.....	62
Figura 4-2. Gráficos obtenidos de los ensayos de tracción.....	63
Figura 4-3. Gráficos obtenidos de los ensayos de tracción.....	65
Figura 4-4. Gráficos obtenidos de los ensayos de tracción.....	66
Figura 4-5. Gráfico de esfuerzo de fluencia vs Número de ciclos	67
Figura 4-6. Valor de los parámetros involucrados en la ecuación de Kohout y Vechet	70
Figura 4-7. Ensayos de la secuencia descendente.....	73
Figura 4-8. Gráficos comparativos del número de ciclos a falla alcanzados y predichos por la regla de daño lineal (RDL) de Palmgren - Miner.....	73
Figura 4-9. Resultados aplicando el modelo de Marco – Starkey para la secuencia ascendente	75
Figura 4-10. Resultados aplicando el modelo de Marco – Starkey para la secuencia descendente	76
Figura 4-11. Resultados aplicando la Regla de Manson – Halford para los ensayos descendentes.....	77
Figura 4-12. Resultados aplicando la Regla de Manson – Halford para los ensayos ascendentes	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-13. Resultados aplicando el modelo Mesmacque et al, para los ensayos descendentes.....	78
Figura 4-14. Resultados aplicando el modelo Mesmacque et al, para ensayos ascendentes	79
Figura 4-15. Vista general de la superficie de fractura de un probeta ensayada al aire a un esfuerzo alternante máximo $S_f = 510$ MPa y la cual falló después de 1009700 ciclos de aplicación de carga. Zona de inicio de la grieta dominante (ZIG), dirección de propagación de la grieta (DPG), zona de propagación de la grieta (ZPG) y zona de fractura por sobre carga (ZFS).	81
Figura 4.16: a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta ensayada al aire a 510 MPa y la cual falló después de 1009700 ciclos de aplicación de carga. b), c) y d) presentan una ampliación de la zona de inicio de grieta.	82
Figura 4-17. Vista general de la superficie de fractura de probeta ensayada al aire a 530 MPa y la cual falló después de 728700 ciclos de aplicación de carga. Se identifican las diversas zonas características de dicha superficie, tales como la zona de inicio de la grietas dominante (ZIG), dirección de propagación de la grieta (DPG), zona de propagación de la grieta (ZPG) y la zona de fractura por sobre carga (ZFS).	83
Figura 4.18: a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta ensayada al aire a 530 MPa y la cual falló después de 728700 ciclos de aplicación de carga. b) y c) ilustran una ampliación de la zona de inicio de grieta.	84
Figura 4-19. a) y b) fotomicrografías correspondientes a la zona de fractura por sobre carga de una probeta ensayada al aire a 510 MPa y la cual falló después de 1009700 ciclos de aplicación de carga. c) Detalle de la zona de propagación de grietas (textura de aspecto liso) cercana a la zona de fractura por sobre carga, donde se observa la existencia de facetas planas d) Posible faceta plana existente en la zona de transición entre las zonas de propagación y fractura dúctil, presentes en la superficie de fractura de la muestra.	85
Figura 4.20: a) Vista de la zona de fractura por sobre carga de la superficie de fractura de una probeta ensayada a 530 MPa y la cual falló a 728700 ciclos de	

ÍNDICE DE FIGURAS

aplicación de carga. Nótese el aspecto altamente rugoso de la misma. b) y c) de detalles de la fotomicrografía 20 a) d) y e) Detalles de la zona de propagación de la grieta (textura de aspecto liso), pudiéndose observar la presencia de estriaciones de fatiga.....	86
Figura 4-21:Fotomicrografía correspondiente a un corte longitudinal de la probeta ensayada a 510 MPa, la cual falló después de 1009700 ciclos de aplicación de carga, adyacente a la zona de inicio de grieta.	88
Figura 4.22. Fotomicrografía de un corte longitudinal de la probeta ensayada a 530 MPa, correspondiente a la zona interna de la muestra, ilustrando la presencia de inclusiones no metálicas.	88
Figura 4-23. Análisis de la composición química de una inclusión no metálica alargada, correspondiente a un MnS.	89
Figura 4-24. Análisis de la composición química de una inclusión no metálica redondeada, correspondiente posiblemente a un SiO ₂	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Composición química del acero SAE 4340, expresada en % en peso	7
Tabla 2-2. Propiedades mecánicas típicas del acero AISI 4340 ^[12]	8
Tabla 4-1. Dimensiones de las probetas de tracción ensayadas	61
Tabla 4-2. Resultados obtenidos del ensayo de tracción	62
Tabla 4-3. Diámetro de las probetas utilizadas	63
Tabla 4-4. Resultados obtenidos del ensayo de tracción	64
Tabla 4-5. Características de las probetas previamente sometidas a daño por fatiga	64
Tabla 4-6. Resultados obtenidos del ensayo de tracción	65
Tabla 4-7. Características de las probetas previamente sometidas a daño por fatiga	66
Tabla 4-8. Resultados de los ensayos de fatiga de un solo nivel de esfuerzos	69
Tabla 4-9. Tabla general de Resultados obtenidos de dos bloques de esfuerzos	71
Tabla 4-10. Resultados de los ensayos aplicados de forma descendente	71
Tabla 4-11. Resumen de los resultados obtenidos de los ensayos aplicados de forma ascendente	72
Tabla 4-12. Predicción Palmgren Miner	74

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 2-1	11
Ec. 2-2	11
Ec. 2-3	13
Ec. 2-4	19
Ec. 2.5	20
Ec. 2.6	21
Ec. 2-7	22
Ec. 2-8	24
Ec. 2-9	26
Ec. 2.10	27
Ec. 2-11	28
Ec. 3.1	41
Ec. 3.2	42
Ec. 3.3	42
Ec. 3.4	45
Ec. 3.5	46
Ec. 3.6	47
Ec. 3.7	47
Ec. 3.8	47
Ec. 3.9	47
Ec. 3.10	49
Ec. 3.11	49
Ec. 3.12	50
Ec. 3.13	50
Ec. 3.14	50
Ec. 3.15	50
Ec. 3.16	53

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 3.17	54
Ec. 3.18	55
Ec. 3.19	55
Ec. 3.20	55
Ec. 4.1	69
Ec. 4.2	70
Ec. 4.3	75
Ec. 4.4	76

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, es de suma importancia contar con materiales cada vez más resistentes a tensiones repetidas o fluctuantes a fin de reducir las fallas por fatiga de los componentes estructurales y piezas empleadas en nuestro acontecer diario, las cuales están comúnmente sometidas a cargas cíclicas. El estudio de la falla por fatiga de alto ciclaje es relevante en diferentes ámbitos industriales, donde los componentes estructurales empleados están sometidos a cargas repetidas y vibraciones; entre estos componentes y estructuras podemos mencionar: los automóviles, aviones, barcos, bombas, turbinas, reactores, etc. Se ha determinado que el 90% de las roturas en servicio se producen por fatiga.

El daño por fatiga se define como la relación de ciclo o fracción de vida utilizado para un evento o serie de eventos y que al alcanzar la unidad predice la falla; dicho de otra forma, el daño es la relación existente entre el número de ciclos aplicados a un cierto nivel de esfuerzo y el número de ciclos a falla a ese mismo nivel de esfuerzo.

El daño por fatiga incrementa cuando el componente es sometido a cargas cíclicas, pudiendo llegar a la fractura. El análisis del daño acumulado por fatiga juega un papel importante en la predicción de la vida de componentes y estructuras sujetas a cargas cíclicas de magnitud variable. Desde la introducción del concepto de acumulación de daño por Palmgren hace 70 años y la regla de daño lineal por Miner hace 50 años, el tratamiento del daño acumulado por fatiga ha recibido una mayor atención.

El acero SAE 4340 es un material muy utilizado industrialmente, por lo que el presente trabajo tiene como finalidad, investigar el efecto de las cargas cíclicas aplicadas, en la nucleación y propagación de grietas por fatiga. Este material es

INTRODUCCIÓN

utilizado frecuentemente en la industria metalmecánica, así como en la industria aeroespacial. El objetivo fundamental de este estudio es el de evaluar los cambios en propiedades mecánicas estáticas que induce el daño por fatiga, así como el de comparar las predicciones del número de ciclos a falla que provee la regla lineal de Palmgren-Miner con aquellas que proveen otras reglas de daño acumulado no lineal. Finalmente, se realizará un estudio fractográfico utilizando técnicas de microscopía electrónica de barrido (M.E.B) a fin de analizar las superficies de fractura y secciones perpendiculares a estas de algunas muestras seleccionadas ensayadas a fatiga.

**CAPÍTULO 1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA****1.1. Justificación de la investigación**

Actualmente, hay una creciente necesidad de disponer de materiales capaces de resistir condiciones de trabajo variables, a las que están sometidos los diferentes componentes estructurales de máquinas y mecanismos. En general, la falla de los metales por fatiga en diferentes ambientes constituye un estudio importante ya que un metal sometido a tensiones repetidas, falla a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la fractura en una sola aplicación de la carga. Estas fallas representan grandes pérdidas materiales y humanas, debido a que los componentes de carros, aviones, barcos, etc., fallan a esfuerzos cíclicos, que son menores al esfuerzo de fluencia del material, produciendo un daño sin deformación observable antes de producirse la falla. En otras palabras, la falla por fatiga se produce sin ningún indicio previo que permita precaverse de ella. ^[1]

En este sentido, el uso de diversos tratamientos térmicos constituye una forma de mejorar las propiedades mecánicas de los mismos, lo cual mejor a la resistencia a la fatiga del material. Es en este orden de ideas que para esta investigación utilizaremos un acero comercial SAE 4340, templado y revenido, ensayado bajo condiciones de fatiga de alto ciclaje (Número total de ciclos entre 10^5 - 10^6). ^[1]

1.2. Objetivo de la investigación

El presente trabajo tiene como objetivo principal estudiar diversos aspectos del comportamiento a la fatiga del acero SAE 4340 templado y revenido, incluyendo el daño acumulado por fatiga bajo condiciones de alto ciclaje. Esto nos permitirá dar una respuesta a la demanda creciente de la industria para producir piezas y

componentes estructurales confiables y económicos. Para ello se mecanizaron probetas estándar, a partir de una barra de acero SAE 4340 templado y revenido, las cuales fueron ensayadas en condiciones de flexión rotativa. Asimismo, algunas muestras se ensayaron hasta un determinado número de ciclos (N_f), inferior al correspondiente a su falla por fatiga, para luego ser ensayadas en tracción uniaxial y determinar la variación de las propiedades mecánicas del material como consecuencia del daño acumulado por fatiga. Finalmente, se han propuesto algunas conclusiones y recomendaciones que se consideran pertinentes.

1.2.1. Objetivo General

Realización de un estudio de diversos aspectos del comportamiento a la fatiga del acero SAE 4340 templado y revenido, incluyendo el daño acumulado por la aplicación de cargas cíclicas y su efecto en las propiedades mecánicas estáticas del material.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Evaluar el cambio en las propiedades mecánicas estáticas del acero SAE 4340 sometido a fatiga de alto ciclaje.
- Evaluar la aplicabilidad de diversas reglas de daño acumulado incluyendo aquellas propuestas por Palmgren-Miner, Manson-Halford y Mesmacque et al., a fin de predecir el número de ciclos remanente en ensayos de dos niveles de esfuerzo.
- Realización de un estudio del daño acumulado por fatiga de alto ciclaje del acero SAE 4340 para aplicaciones de carácter estructural.

1.3. ALCANCES

- 1.- Adquirir un mayor conocimiento sobre el comportamiento a la fatiga de alto ciclaje de un acero comercial SAE 4340.

2.- Analizar el efecto del daño por fatiga en las propiedades mecánicas estáticas del acero SAE 4340.

3.- Determinar la curva de Wohler para el acero SAE 4340.

4.- Evaluar las superficies de fractura y secciones normales a estas mediante técnicas de microscopía electrónica de barrido.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2. SUBSTRATO: ACERO AISI/SAE 4340

2.1. Aceros de baja aleación

El acero AISI 4340 es de los llamados de baja aleación. Estos aceros son esencialmente aleaciones de hierro carbono con algunos elementos aleantes adicionales en cantidades totales menores al 5% en peso. La función de estos elementos aleantes adicionales es mejorar propiedades mecánicas para ciertas aplicaciones específicas si se comparan con otros aceros no aleados. Las propiedades que por lo general son mejoradas comprenden la resistencia mecánica, dureza, resistencia al desgaste y tenacidad.

El acero 4340 es ampliamente usado en la fabricación de tornillos y pernos, entre otros elementos de seguridad; ejes, piñones, engranajes y componentes de máquina similares; bielas para motores y pasadores de pistón, cigüeñales; además de sus usos en materiales y aplicaciones de maquinaria pesada, tiene otros usos en elementos estructurales en aviación. En el mercado puede encontrarse en formas muy diversas tales como barras, forjados, varillas de soldadura, tubos, varas, así como planchas ligeras y fundiciones.

Se suministra bonificado, es decir templado y revenido, lo que permite en la mayoría de los casos su aplicación sin tener la necesidad de tratamiento térmico posterior. Es utilizado a temperaturas de hasta 773 K, sin perder su estado de bonificación ^[10].

Los elementos aleantes comunes más importantes en el acero AISI 4340 son Níquel, Cromo y Molibdeno, los cuales forman soluciones sólidas con el hierro y carburos, es decir, compuestos metálicos con el carbono.

Algunos de los efectos de estos elementos aleantes del AISI 4340 son:

- Níquel (Ni): Mejora la resistencia y tenacidad, incrementa la templabilidad, pero no tanto como los otros elementos de aleación. En cantidades significativas mejora la resistencia a la corrosión.
- Cromo (Cr): Mejora la resistencia, dureza, dureza en caliente y resistencia al desgaste. Tiene gran importancia en la templabilidad pues la incrementa. También mejora significativamente la resistencia a la corrosión.
- Molibdeno (Mo): Aumenta la tenacidad, dureza en caliente y resistencia a la termofluencia. También mejora la templabilidad y junto al carbono forma carburos que proporcionan mayor resistencia al desgaste.

En la tabla 2-1 se podrán apreciar el porcentaje peso (%) de los aleantes más comúnmente usados en el acero SAE 4340.

Tabla 2-1. **Composición química del acero SAE 4340, expresada en % en peso**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.38-0.43	0.15-0.35	0.60-0.80	0.035	0.040	0.70-0.90	1.65-2.00	0.20-0.30

El acero SAE 4340^[12] posee una elevada capacidad de endurecimiento con buena ductilidad, tenacidad y resistencia. Posee alta resistencia a la fatiga, es comúnmente empleado donde existen condiciones severas de servicio y donde se requieren secciones de alta resistencia mecánica. En secciones pequeñas, este acero es templado al aire y en la práctica, para secciones de tamaño normal, es templado en aceite. Presenta una baja resistencia a la corrosión bajo tensión, agrietándose cuando el esfuerzo de tensión es de aproximadamente 1500-1950 MPa. Este efecto se puede

reducir por medio de la nitruración lo cual ofrece mejoras a la vida en condiciones de fatiga.

Usualmente es forjado a temperaturas que van desde 1.065 a 1.230°C. Después del forjado las partes pueden ser enfriadas al aire en un lugar seco o preferiblemente enfriadas en el horno. El tratamiento de normalizado produce una estructura esferoidizada particular que mejora la maquinabilidad. Tiene buenas características de soldabilidad ya que el proceso se puede realizar por soldadura por gas o por arco, pero el material de aporte debe tener la misma composición. Las propiedades mecánicas usuales del acero SAE 4340 pueden ser vistas en la tabla 2-2.

Tabla 2-2. **Propiedades mecánicas típicas del acero AISI 4340^[12].**

Temperatura de temple (°C)	Resistencia a la tracción (MPa)	Esfuerzo de Cedencia (MPa)	Elongación en 50mm (%)	Reducción de área (%)	Dureza Brinell (HB)	Dureza Rockwell (HRC)	Ensayo Izod (J)
205	1980	1860	11	39	520	53	20
315	1760	1620	12	44	490	49,5	14
425	1500	1365	14	48	440	46	16
540	1240	1160	17	53	360	39	47
650	1020	860	20	60	290	31	100
705	860	740	23	63	250	24	102

2.2. Tratamientos Térmicos

Al acero AISI 4340, los tratamientos térmicos básicos más aplicados son:

2.2.1. Revenido

Este proceso consiste en disminuir esfuerzos residuales y la dureza de la martensita, producto del tratamiento térmico anterior, así como del trabajo en frío realizado previamente. Para ello se procede a realizar un calentamiento en un cierto espacio de tiempo a una temperatura inferior a la temperatura crítica y luego dejarse

enfriar al aire. Las temperaturas a las cuales se recalienta y el tiempo de duración del proceso dependen de la composición del acero así como también del grado de dureza y tenacidad que se requieren. Este procedimiento también es llamado calentamiento para alivio de tensiones y suavizado.

2.2.2. Normalizado

Se hace a temperaturas del orden de 845°- 900°C. La pieza permanece a estas temperaturas por un determinado período de tiempo, dependiendo del grosor de la sección y posterior a ello se le permite enfriamiento al aire.

2.2.3. Recocido

Se realiza a temperaturas del orden de 830°-860°C y la pieza se mantiene durante un tiempo que depende del grosor de la sección o carga del horno. Se permite el enfriamiento dentro del horno.

2.2.4. Temple

Se calienta durante una media hora a 200°-650°C, luego se permite un enfriamiento en agua o aceite. Las temperaturas y tiempo de temple dependen principalmente del grado de endurecimiento final deseado.

2.2.5. Endurecimiento

Se calienta la pieza a temperaturas de 800°-845°C por un período de 15 min., por cada 25 mm. de espesor. Posterior a ello se enfría en aceite a 65°C o en una solución de sales fundidas que se encuentran a 200°- 210°C, permaneciendo allí durante 10 min. Luego es colocado en un chorro de aire a 65°C.

2.2.6. Esferoidizado:

El esquema preferido es el de precalentar el acero a una temperatura de 690°C y dejar que este permanezca allí durante un tiempo de dos horas, incrementar la temperatura hasta 745°C y dejar que permanezca a ese nivel durante dos horas más, enfriar hasta 650°C durante 6 horas, colocar la temperatura del horno en 600°C y

finalmente dejar que se enfríe a temperatura ambiente. Una alternativa diferente en el proceso consiste en calentar el acero hasta una temperatura de 730°-745°C, dejar que el mismo permanezca allí durante muchas horas, luego permitir enfriamiento en el horno y posteriormente enfriamiento a temperatura ambiente.

2.3. ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción es usado para evaluar diversas características mecánicas del material, datos que luego serán muy útiles en el diseño de elementos de máquinas. Este ensayo mide la resistencia del material a una fuerza F aplicada gradualmente en una dirección. Para ello se emplea de una probeta con dimensiones normalizadas, la cual es colocada en la una máquina de ensayos y se le aplica una carga. El diámetro original y la longitud calibrada inicial se registran antes de iniciar el ensayo, medidas que servirán para determinar los valores de deformación.

Luego que la probeta es montada en la máquina y es cargada lentamente en tensión, se observan los valores de carga aplicada y de deformación producida. Al concluir la prueba o durante ella, los resultados se llevan a una gráfica llamada diagrama de esfuerzo-deformación. El esquema básico de una máquina para ensayos de tracción puede verse en la figura 2-1.

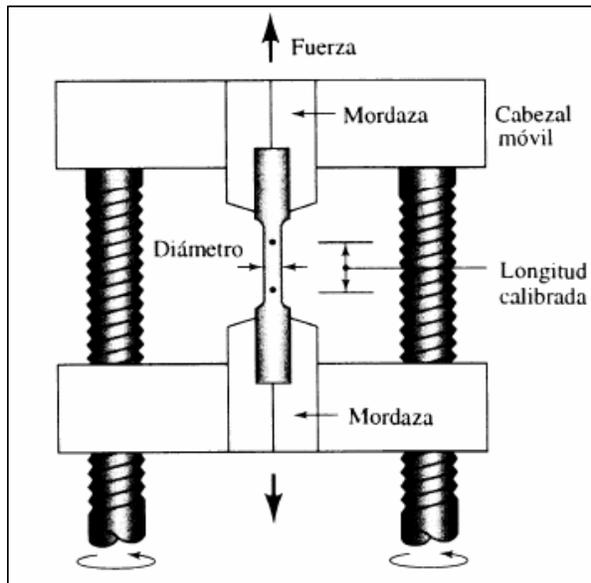


Figura 2-1.Esquema de una máquina de ensayo de tracción aplicándose la fuerza unidireccional a la probeta ^[13]

2.3.1. Esfuerzo y deformación ingenieril ^[13]

El esfuerzo y la deformación ingenieril son calculados mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo ingenieril: } \sigma = \frac{F}{A_0}$$

Ec. 2-1

$$\text{Deformación ingenieril: } \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Ec. 2-2

Dónde:

A_o : es el área original de la sección transversal de la probeta antes de efectuarse el ensayo.

l_o : Distancia original entre las marcas calibradas

l : distancia entre las marcas calibradas pero después de haberse aplicado la fuerza F.

2.3.2. Propiedades obtenidas a partir del ensayo de tracción

Por medio del ensayo de tracción se puede obtener información relacionada con las propiedades características mecánicas del material tales como rigidez, resistencia, y ductilidad.

Esfuerzo de cedencia.

Es el nivel de esfuerzo en que la deformación plástica del material cobra importancia y es el nivel de esfuerzo que divide los comportamientos elástico y plástico del material. También es llamado en la bibliografía como esfuerzo de fluencia. Se dice generalmente este es el esfuerzo requerido en los metales para que las dislocaciones comiencen a deslizar.

Hay materiales en que este esfuerzo no está definido claramente. En este caso, por convención, se determina un esfuerzo de cedencia (o de fluencia) convencional trazando una línea paralela a la porción inicial de la curva esfuerzo deformación, pero desplazada 0,2 % del origen; entonces, el esfuerzo de cedencia convencional de 0,2 % es el esfuerzo al cual dicha línea intersecta la curva esfuerzo deformación.

Resistencia a la Tensión

El esfuerzo producto de la fuerza de mayor magnitud aplicada es la resistencia a la tensión que es el esfuerzo máximo sobre la curva esfuerzo-deformación ingenieril.

Ductilidad

Una forma de determinar la ductilidad es calcular el cambio porcentual del área de la sección transversal de la probeta antes y después del ensayo. El porcentaje de reducción de área expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante la prueba y viene dada por la siguiente expresión:

$$\% \text{ reducción de área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} * 100$$

Ec. 2-3

Visualmente, podemos ver la ubicación de todas estas propiedades en una curva esfuerzo – deformación de un material en la figura 2-2.

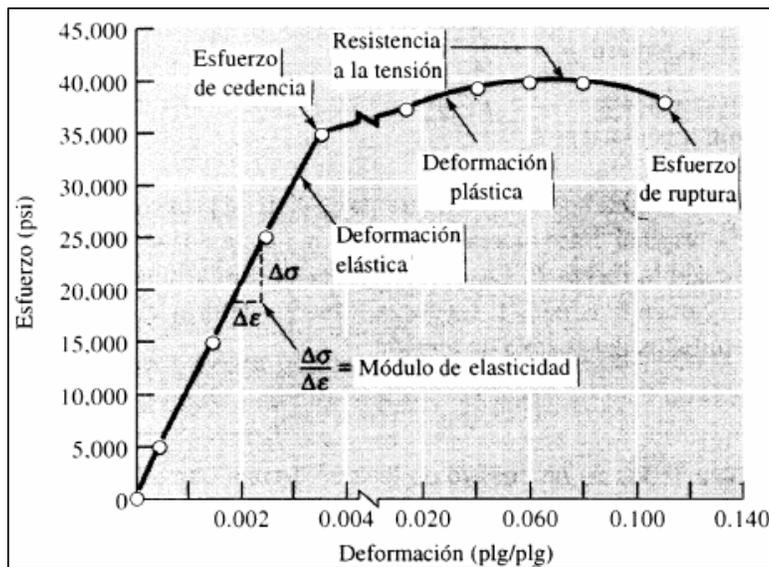


Figura 2-2. Curva esfuerzo-deformación ingenieril^[13]

2.4. ENSAYOS DE FATIGA

Para obtener medidas cuantitativas de resistencia a la fatiga, es necesario realizar los ensayos bajo condiciones controladas y para ello, se dispone de una amplia variedad de máquinas para ensayos de fatiga. Se pueden adoptar diferentes métodos de ensayos de fatiga, desde los ensayos de laboratorio con probetas, bajo las más simples condiciones de esfuerzo, a los ensayos a escala natural de componentes y estructuras bajo condiciones simuladas de lo que ocurre en la práctica. Los ensayos de laboratorio se usan principalmente para determinar la influencia de factores como elementos de aleación, tratamiento térmico o acabado superficial en la resistencia a la fatiga, ya que los resultados se pueden obtener rápida y económicamente. Tales ensayos se pueden hacer en probetas lisas o entalladas, a baja o alta temperatura, o bajo condiciones corrosivas. Sin embargo, para obtener datos prácticos, son más significativos los ensayos de fatiga con partes reales. Para este propósito se requieren, algunas veces, instalaciones especiales de ensayo, pero se pueden acomodar y ensayar en máquinas de fatiga normalizadas muchos componentes de tamaño pequeño.

Durante un ensayo de fatiga, el ciclo de sollicitación se mantiene usualmente constante, así las condiciones de los esfuerzos aplicados pueden escribirse $S_m \pm S_a$, donde S_m es el esfuerzo estático o medio y S_a es el esfuerzo alternativo, igual a la mitad del intervalo del esfuerzo. Se usa el signo positivo para expresar el esfuerzo de tracción, y el negativo para un esfuerzo de compresión. En la figura 1.3 se ilustran algunas combinaciones posibles de S_m y S_a .

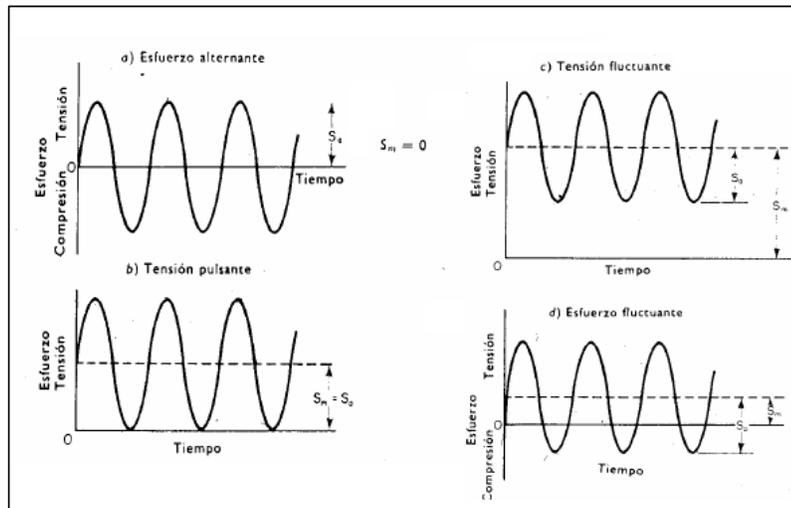


Figura 2-3. Tipos de esfuerzo de fatiga

Las condiciones de esfuerzo pueden definirse, alternativamente, en función de los esfuerzos máximo y mínimo en el ciclo, $S_{m\acute{a}x}$ y $S_{m\acute{m}n}$. A la relación algebraica $S_{m\acute{m}n}/S_{m\acute{a}x}$ se le denomina relación de esfuerzo R . Cuando las condiciones de las cargas son tales que los esfuerzos en la probeta no están uniformemente distribuidos, los resultados se presentan, usualmente, en función del esfuerzo nominal S , sin tener en cuenta sus variaciones en las condiciones producidas por las discontinuidades geométricas tales como agujeros, muescas y roscas.

2.4.1. Resistencia y límite de fatiga:

El procedimiento para determinar la resistencia a la fatiga es ensayar un número de probetas similares, sometiendo cada una a un valor particular de carga fluctuante (denotado comúnmente con una S) y determinándose el número de ciclos a la fractura (denotado comúnmente como N_f). Donde N_f se usualmente representa en una escala logarítmica, ya que su valor puede variar en un amplio espectro. El esfuerzo también puede representarse en una escala logarítmica y se ha pretendido

que los resultados puedan representarse por una línea recta cuando se utilice una representación doble logarítmica.

2.4.2. Máquinas de flexión rotatoria.

Las máquinas de flexión rotatoria se han usado por más de cien años, desde el tiempo en que Whöler construyó la primera para investigar los fallos por fatiga en los ejes de ferrocarriles. Desde entonces, se han proyectado y construido muchas máquinas para probetas entre 1,27 mm a 241,3 mm de diámetro y a éstas se les denomina a menudo, maquinas Wöhler^[16]. De las máquinas rotatorias en voladizo como las representadas en la figura 2-4., la (a) es el tipo más simple para este ensayo. Un extremo de la probeta se sujeta en un mandril por medio de tornillos que sirven para alinear la probeta y se aplica la carga a través de un soporte situado en el otro extremo, por pesos o bien por un muelle. Con este montaje el momento aumenta linealmente a lo largo de la probeta y el fallo tiene lugar donde el radio de transición coincide con la porción paralela de la probeta.

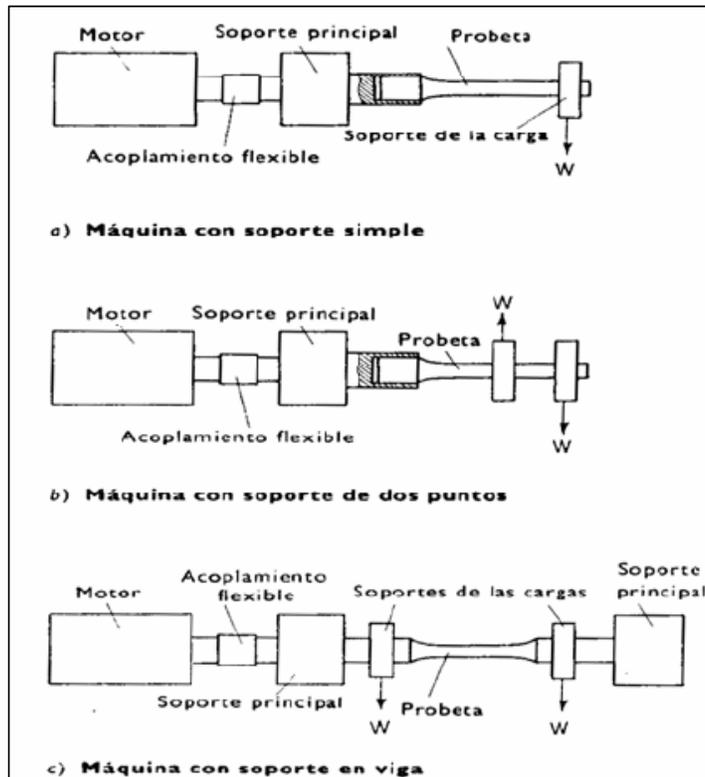


Figura 2-4. Máquinas de fatiga de flexión rotatoria^[16]

En la figura 2-5, podemos ver cómo va colocada una probeta de fatiga entre las mordazas de una máquina de fatiga del modelo más simple. Si ubicamos un punto A imaginario en la superficie, justamente en todo el centro del cuello curvo de la probeta (el propósito del cuello curvo es asegurar que el esfuerzo aplicado sea aplicado justamente en el centro del cuello.), veremos que al ser sometida la probeta a un proceso de fatiga rotatoria (a una determinada velocidad angular ω), dicho punto A estará sometido a esfuerzos de tracción (por convención, esfuerzos de tracción será de signo positivo) al estar en la parte inferior de la probeta, punto A estará sometido a esfuerzos de compresión (por convención, esfuerzos de tracción será de signo negativo). Cada vez que el punto A pase por el eje medio horizontal la probeta, no

habrá ni esfuerzo a tracción ni a compresión, por lo cual, pasara por un eje cuyo nivel de esfuerzo es de valor cero. Estos esfuerzos alternantes igualmente pueden ser vistos en la figura 2-5.

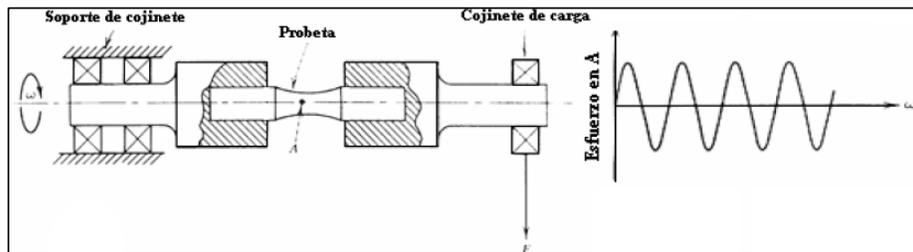


Figura 2-5. Máquina de ensayo de fatiga de viga en voladizo a flexión rotativa ^[1]

2.4.3. Curva de Wöhler

Una vez realizados los ensayos de fatiga, se grafica la curva de Wöhler con los datos obtenidos de número de ciclos a falla en función del esfuerzo aplicado por la muestra. Estos datos son representados en un escala semi logarítmica.

Para el límite de fatiga son utilizadas no menos de quince (15) probetas. Los ensayos para determinar el límite de fatiga se realizaron hasta alcanzar un número de ciclos entre $5-10 \times 10^6$. Las probetas que alcanzan este valor se consideran con vida infinita. Para obtener el límite de fatiga se emplea el método de la escalera. Un ejemplo de unas típicas curvas de fatiga puede ser vista en la figura 2-6

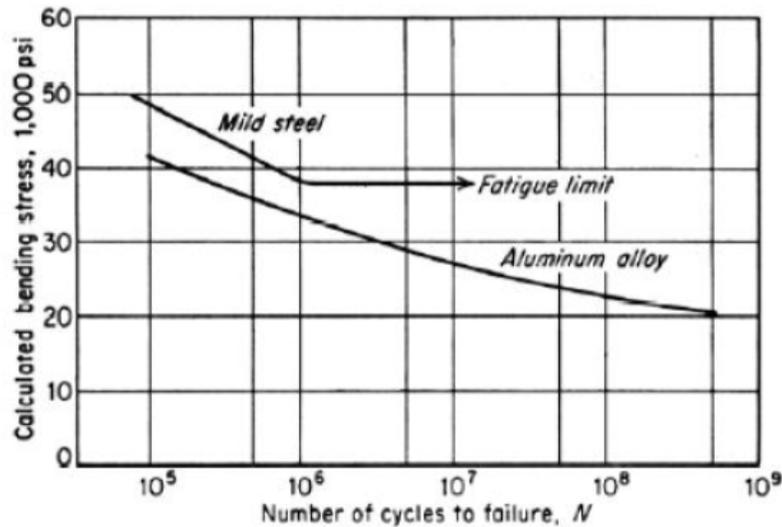


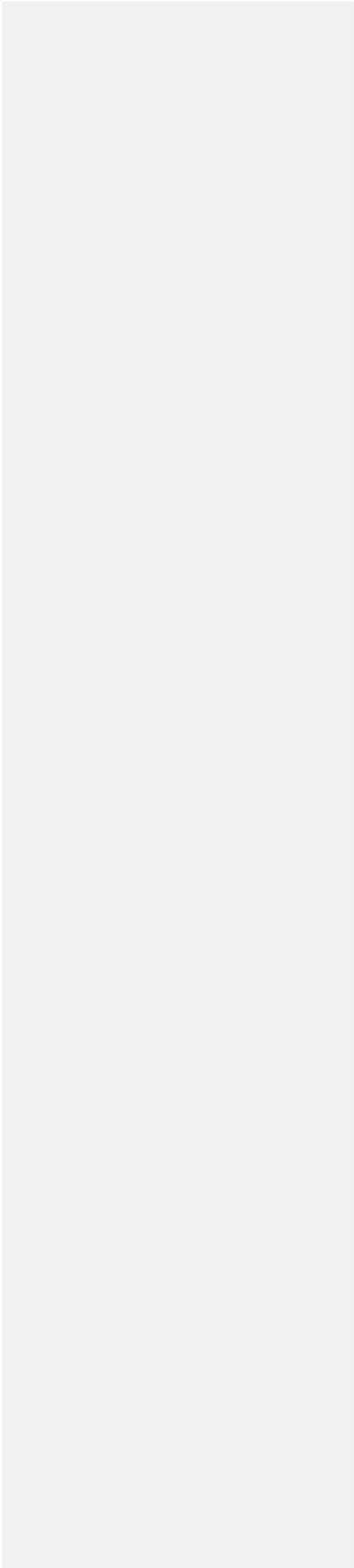
Figura 2-6. Curvas S-N típicas en aleaciones de acero y aluminio

2.4.4. Relaciones paramétricas simples para la descripción de la curva S-N

Para la descripción de la curva S-N (o curva de Wöhler) es necesario representar en escala semi logarítmica los valores obtenidos de los ensayos de fatiga colocando los esfuerzos alternantes (S) en la ordenada y el logaritmo decimal del número de ciclos a falla ($\log N$) en la abscisa. La ecuación paramétrica simple propuesta por Basquin establece que la relación entre S_a y N se puede expresar como:

El contenido de este libro es el resultado de un trabajo de investigación y de una experiencia profesional que se ha desarrollado durante los últimos años en el ámbito de la gestión de la información y de la comunicación. El autor desea agradecer a los profesores de la Universidad de Zaragoza, especialmente a los profesores de la Facultad de Ciencias de la Información, por su colaboración y apoyo durante el desarrollo de este libro. También desea agradecer a los profesores de la Facultad de Ciencias de la Información de la Universidad de Zaragoza, especialmente a los profesores de la Facultad de Ciencias de la Información, por su colaboración y apoyo durante el desarrollo de este libro. También desea agradecer a los profesores de la Facultad de Ciencias de la Información de la Universidad de Zaragoza, especialmente a los profesores de la Facultad de Ciencias de la Información, por su colaboración y apoyo durante el desarrollo de este libro.

Small text block at the top left of the page.



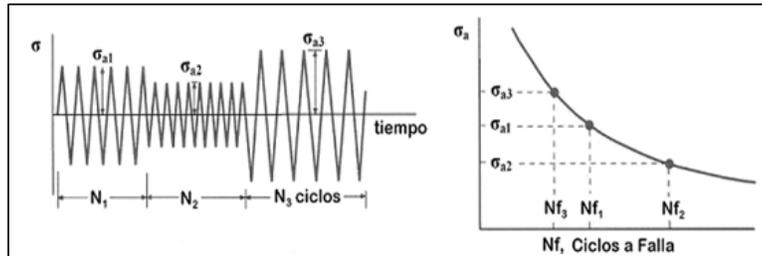


Figura 2-7. Ciclos de aplicación de Esfuerzos alternantes a un elemento de máquina.

El estudio convencional de la fatiga se realiza sometiendo especímenes a ensayos con 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”. De todas las teorías estudiadas hasta ahora, la que universalmente ha sido aceptada como la de mayor contribución es el modelo de “Daño Lineal” (RDL, proveniente del inglés *Rule of Damage Line*) propuesto por A. Palmgren en 1924 durante su estadía en la compañía sueca SKF, como una contribución a la industria de rodamientos de bola, y que posteriormente A. M. Miner, de la compañía Douglas Aircraft, en 1945, hizo un desarrollo matemático de esta teoría, la cual se expresa como:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_{fi}}$$

Ec. 2-7

Pero lamentablemente, la Regla de Palmgren-Miner ó (RDL) no proveía una predicción satisfactoria debido a los efectos de interacción de las cargas aplicadas y efecto del orden de aplicación de las mismas; en los ensayos descendientes el número

de ciclos que se alcanza es menor al que se espera, mientras que en los ensayos ascendentes la situación es la contraria. Debido a esto, se ha buscado desde entonces constantemente una teoría que explique y provea un modelo fiable de este fenómeno, y que prediga aceptablemente fallas en los materiales. Debido a la predicción no del todo satisfactoria del modelo RDL, varios investigadores luego propusieron teorías no lineales, que mejoraron la aproximación al modelado del fenómeno físico, complicando más el desarrollo matemático inicial del modelo Palmgren-Miner, pero al aplicar los iniciales modelos no lineales, se encontró que los resultados de los ensayos ascendentes se encuentran más alejados de la predicción que los ensayos descendentes.

Desde entonces, el tema de daño acumulado por fatiga ha recibido cada vez más atención, por lo que cada vez más cantidad de investigadores publican sus investigaciones cada año, y muchos modelos que intentan explicar el fenómeno han sido desarrollados, buscando obtener teorías que den resultados confiables y eficientes de predicción de la vida útil de componentes de maquina en condiciones reales de servicio.

Según Fatemi y Yang^[14], los estudios realizados en el tema del daño acumulado por fatiga se pueden dividir en aquellos que se produjeron antes de los años 1970 y los que se realizaron después, lo cual permite afirmar que el daño acumulado no es un problema reciente y a pesar de los enormes esfuerzos realizados, aún no ha sido un problema resuelto satisfactoriamente.^[14]

Los estudios desarrollados antes de los años 70 se llegaron principalmente a teorías fenomenológicas, mientras que en los estudios desarrollados posteriores a ese año, se desarrollaron gradualmente teorías semianalíticas o analíticas. Tal ha sido la gran cantidad de teorías desarrolladas hasta la fecha, que han sido agrupadas en seis categorías distintas^[14]:

- Reglas de daño lineal;

- Curvas de daño no lineal y aproximaciones de linearización de dos etapas;
- Métodos de modificación de la curva de vida;
- Aproximaciones basadas en conceptos de crecimiento de grieta;
- Modelos de daño mecánico continuo;
- Teorías basadas en la energía.

Para este trabajo se evaluaron la Regla de Palmgren-Miner, la teoría de Marco-Starky, el modelo de Manson-Halford y el modelo Mesmacque et al.; El primero es un modelo lineal, mientras que los tres últimos son modelos no lineales.

2.5.2. Modelo Regla lineal de Palmgren-Miner.

Palmgren sugirió un concepto, el cual es actualmente conocido como "la regla lineal"[Palmgren, 1924]. En 1945, Miner expreso este concepto en forma matemática, de la siguiente manera:

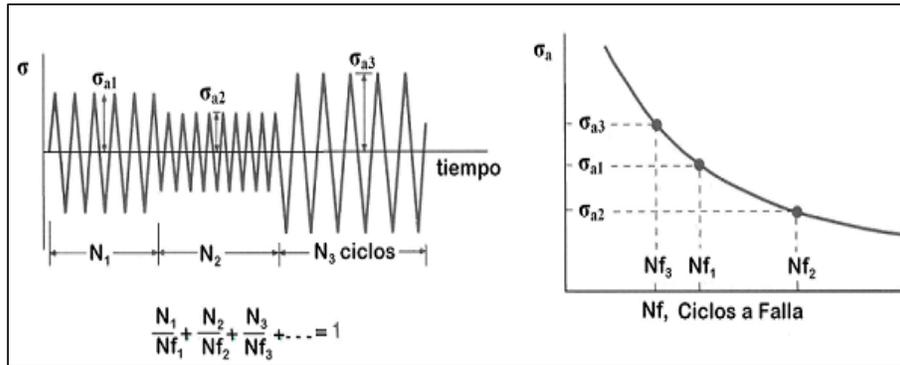
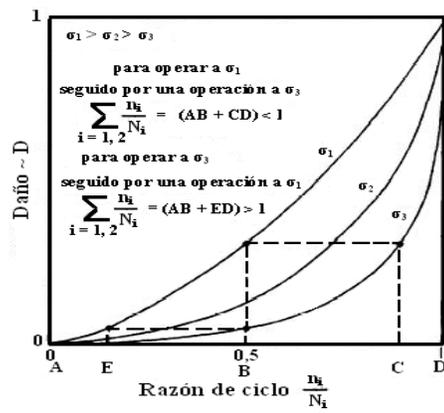


Figura 2-8. Uso de la Regla Palmgreen-Miner para la predicción de vida con una amplitud de carga variable.

Además, Miner postuló que el fallo se produce cuando el valor



Approach), propuesto por Mason (1986). Este modelo lo propuso como una refinación del modelo de la Ley Doble de Daño Acumulado Lineal (LDDAL), también propuesto por Mason (1966) en oposición a los trabajos de Grover, que consideraba la relación de ciclos “

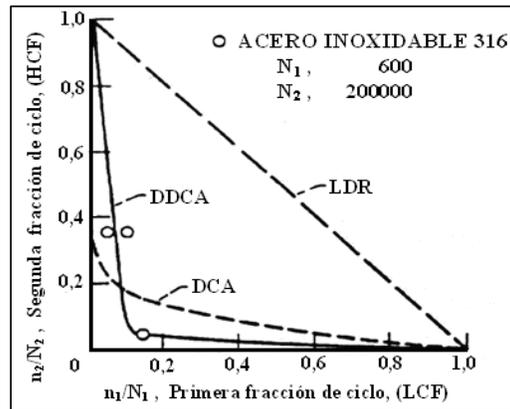


Figura 2-10. Resultados obtenidos por Manson–Halford en ensayos de dos bloques de esfuerzos Descendentes sobre un Acero inoxidable 316L

- **Modelo de Mesmacque et al.**

Este modelo sólo se requiere de la curva de Wöhler o una parte de ella y el campo de esfuerzos puede ser considerado en términos equivalentes al esfuerzo de Von Mises o en términos del máximo esfuerzo de corte, permitiendo ser utilizado condiciones de carga multiaxiales^[15].

La hipótesis en la que se sustenta este método radica en que si el estado físico de daño siempre es el mismo, entonces la vida a fatiga dependerá únicamente de las condiciones de carga. Se encuentra representado por la siguiente ecuación:

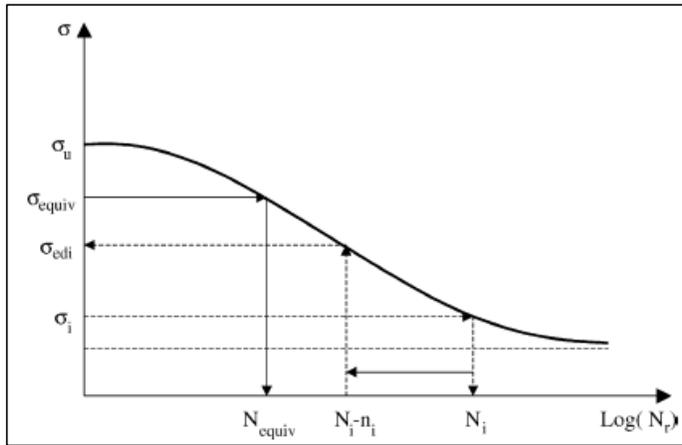




Figura 2-12. Durómetro.

2.6. Estudios preliminares ó antecedentes

En la investigación bibliográfica realizada, constatamos que existe una gran necesidad de información relacionada con el comportamiento a la fatiga de metales y sobre los mecanismos de nucleación y propagación de grietas por fatiga, así como los efectos del daño acumulado. Es bien conocido que la mayoría de las fallas se inician en la superficie libre de los componentes, particularmente en defectos tales como grietas y entallas, por lo que la presencia de estos pudiera afectar negativamente el comportamiento del material sometido a cargas cíclicas.

En este sentido, Ochoa ^[5] se planteó la realización de ensayos de fatiga en flexión rotativa de un acero SAE 4340, con la finalidad de obtener los parámetros de la ecuación de Paris – Erdogan, la tenacidad de fractura del material, el límite de fatiga e información sobre el umbral de fatiga, esto a diferentes tamaños de entalla: 0,25; 0,50 y 0,75 mm de diámetro. Se emplearon cuatro diferentes niveles de esfuerzo alternante (694, 654, 614 y 574 MPa), que permitieron el cálculo de los parámetros de

la ecuación de Basquin. Por medio de técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido, se analizaron superficies de fractura representativas para cada nivel de esfuerzo, con la finalidad de determinar el tamaño de grieta crítico.

Se obtuvieron las constantes de la ecuación de Paris - Erdogan y los valores de tenacidad de fractura para cada tamaño de entalla. Se observó que la presencia de la entalla disminuye la resistencia a la fatiga del material considerablemente con respecto a las probetas no entalladas, aproximadamente un 60% para el nivel de esfuerzo más alto (694 MPa) y un 94% para el nivel de esfuerzo menor (574 MPa). En el límite de fatiga la disminución si fue apreciable, con una reducción cercana al 30% para la entalla de 0,25 mm y de 45% para la entalla de 0,75 mm comparadas con la muestras sin entalla.

El coeficiente de resistencia a la fatiga y el exponente de Basquin de las probetas entalladas fueron tres veces mayor que el de las muestras no entalladas. Por otro lado, los promedios de los tamaños de grieta críticos fueron de 3,43 mm para el esfuerzo de 694 MPa y de 3,73 mm para el esfuerzo de 574 MPa. Las constantes de la ecuación de Paris - Erdogan (C y m) no presentan una variación sistemática que dependa del tamaño de la entalla, Además, se determinó la tenacidad de fractura del material, con un promedio de $79 \text{ MPam}^{1/2}$. Por último, se encontraron los valores de umbral de fatiga (ΔK_{th}) para la entalla de 0,25 mm; 0,50 mm y 0,75 mm, resultando estos entre 7 y $9 \text{ MPam}^{1/2}$.

Asimismo, Gomes.^[6] realizó un estudio sobre este tema, pero con la intención de determinar la efectividad de la regla de Palmgren-Miner en la predicción de daño, para lo que fue necesario obtener datos experimentales mediante ensayos de fatiga en condición de flexión rotatoria. Fueron usadas 60 probetas de fatiga de acero SAE 4340 templado y revenido, maquinas bajo la norma ASTM E-606 A las probetas se le mecanizo una entalla de 0,5 mm de diámetro utilizando el proceso de electro erosión. Se emplearon cuatro niveles de esfuerzo alternante (694, 654, 614 y 574 MPa),

utilizando seis probetas para cada nivel, para un total de 24 probetas ensayadas, lo que permitió la construcción de la curva de Wöhler y la obtención de los parámetros de la ecuación de Basquin.

En esta investigación se diseñaron ensayos de dos y tres bloques, los cuales fueron realizados de manera creciente y decreciente utilizándose tres probetas para cada grupo de ensayos, los cuales arrojaron resultados muy cercanos a la linealidad expresa de la regla de Palmgren-Miner. Por medio de la microscopia electrónica de barrido se analizaron la superficies de fractura representativas para cada grupo de ensayo pudiéndose identificar las diferentes zonas de esta superficie además de realizar la medición del tamaño crítico de grieta para cada condición. También se estudiaron de los planos perpendiculares a la superficie de fractura a fin de detectar existencia de otras grietas paralelas al plano principal de fractura.

Un estudio adicional en este trabajo ^[6], realizado en el Laboratorio de Mecánica de la Universidad de Lille, Francia, involucró un análisis numérico a través de un modelo de elemento finito con el uso del programa ANSYS, para establecer la distribución de esfuerzos y deformaciones de la probeta. Según los resultados obtenidos, se consiguió un comportamiento satisfactorio de la regla de Palmgren-Miner para todos los grupos de ensayos, independientemente de los niveles de esfuerzos utilizados o si los ensayos fueron realizados de manera creciente o decreciente. Se evidenció que la entalla actúa como sitio preferencial para la nucleación de la grietas de fatiga. A través del estudio con el modelo de elemento finito se pudo determinar que existe plastificación en el entorno de la entalla.

En otra investigación, Ramos ^[9] evaluó el efecto del daño acumulado sobre el comportamiento a la fatiga del acero SAE 4340 templado y revenido. Se realizaron ensayos de fatiga al aire en condiciones de flexión rotativa sobre especímenes 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, y se determinó el comportamiento a fatiga del material bajo condiciones de alto ciclaje (Número total de ciclos $> 10^5$); con estos resultados se elaboró la curva de Wöhler característica del material, y en base a esta, se realizaron posteriormente 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 reportados^[9], 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 Regla de Daño Acumulativo Lineal propuesta por Palmgren-Miner, Lo que indica 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 Palmgren-Miner, lo que implica una subestimación de la vida real del material con la aplicación de esta teoría, hecho este que se evidencia más claramente para fracciones de vida consumida superiores a 0,5.

En el estudio Fractográfico de las superficies de fractura, realizado posteriormente a 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.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Procedimiento experimental.

El trabajo experimental realizado para lograr los objetivos de la tesis abarcó esencialmente cinco etapas, las cuales se pueden describir someramente de la siguiente manera:

- a) **Adquisición del material.** El acero SAE 4340 fue adquirido en la empresa Ferrum C.A., en forma de barras de 5.30 m de longitud y diámetro

3.3. Material

Para realizar este trabajo se requirió de la fabricación de probetas para ensayos de dureza, tracción y fatiga. Para ello se obtuvieron barras de acero AISI 4340 cuya composición química, en % en peso, es la siguiente: C% 0.34, Si% 0.3, Mn% 0.50, Cr% 1.50, Mo% 0.20, Ni% 1.5 y Fe bal. Estas barras fueron adquiridas en la empresa Ferrum C.A. cuya sede se encuentra en la zona industrial Lebrún, Municipio Sucre, Estado Miranda.

Una vez obtenido el material se mecanizaron las probetas en el taller de precisión J.V. C.A. ubicado en la zona industrial de Turumo, Carretera vieja Caracas-Guarenas, Edo. Miranda. Las probetas de tracción fueron elaboradas según la Norma ASTM A-370 y las probetas de fatiga de acuerdo a la Norma ASTM E 606.

3.4. Fabricación de las probetas

El diámetro de los extremos de las probetas de fatiga es de 12,7 mm y la longitud de 101,6 mm, de acuerdo a lo sugerido por el fabricante del equipo de flexión rotativa, la empresa Fatigue Dynamics, en sus manuales.

Las probetas de fatiga en la sección de ensayo son de radio continuo y tienen las siguientes dimensiones: diámetro menor de la sección de ensayo (d_o) aproximadamente igual a 6,35 mm y radio continuo de la sección de ensayo (R) igual a 58,74 mm. En la figura 3-2, se puede visualizar una probeta de fatiga, con las dimensiones antes especificadas.

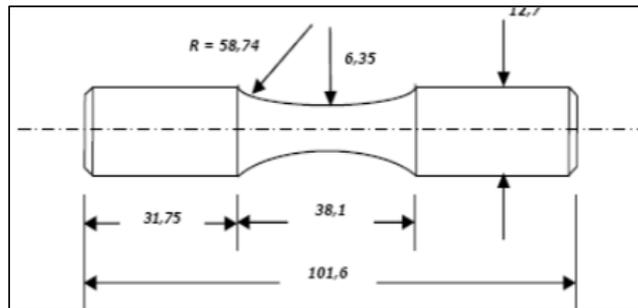


Figura 3-2. Probeta para ensayo de fatiga según norma ASTM E-606, unidades en mm

Las probetas de tracción, de acuerdo a la ASTM A 370, poseen un diámetro en sus extremos de 12,7 mm. Su longitud es de 120 mm. En la sección de ensayo, las probetas tienen las siguientes dimensiones: diámetro (d) igual a $6,25 \pm 0,12$ mm, longitud de 32 mm y radio de filete entre la sección de ensayo y el hombro de la probeta R de 5 mm. La figura 3-3 ilustra el diagrama de estas probetas con sus medidas respectivas.

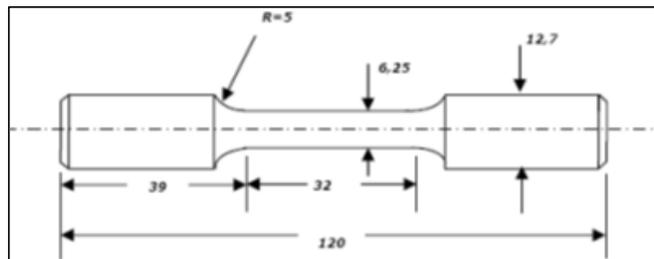


Figura 3.3. Probeta para ensayos de tracción según norma ASTM A- 370, unidades en mm

A través de las normas ASTM E 606 se determinó que para determinar la curva de Wohler con confiabilidad aceptable, es necesario ensayar de doce (12) a veinticuatro (24) probetas, mientras que, de acuerdo a la Norma ASTM A-370 correspondiente al ensayo de tracción, para reportar confiablemente las propiedades estáticas se necesita ensayar como mínimo tres (3) probetas.

Para los ensayos de dureza, las probetas están normalizadas según la Norma ASTM E 384, y esta las especifica como de forma rectangular con dimensiones de 10 mm de altura por 30 mm de largo y 18 mm de ancho. Se pueden ver las dimensiones de esta probeta en la figura 3-3.

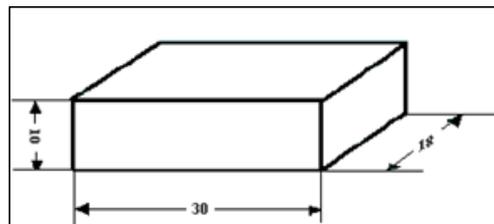


Figura 3-3. Probeta para ensayos de dureza, unidades en mm

3.4.1. Preparación de probetas para ensayos de tracción y fatiga

Una vez mecanizadas las probetas fue necesario mejorar su acabado superficial eliminando las marcas circunferenciales que deja el mecanizado previo, así como las imperfecciones en la superficie, tratando de impartir un pulido tipo espejo. Con esto se busca evitar las fallas de fatiga por defectos superficiales que modifiquen el verdadero comportamiento de falla por fatiga del material. La figura 3-4 ilustra la condición final de las probetas posterior a su preparación.

Se utilizó un torno marca Myford Modelo ML7-R, el cual podemos ver en la figura 3-5. Esta se empleó para pulir las probetas y el mismo opera a velocidad constante, tiene un plato de mordaza ajustable y un centro punto donde se apoya uno de los extremos de la probeta.

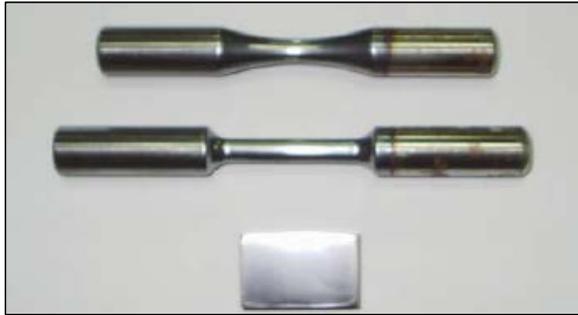


Figura 3-4. Fotografía de las probetas utilizadas. En orden descendente: probeta para ensayos de fatiga, probeta para ensayos de tracción y probeta para ensayos de dureza

Para el proceso de pulido, estas las probetas fueron montadas en el torno a baja velocidad, para ser sometidas a distintos tipos de papel de lija de distinta granulometría. El proceso de pulido se realizó con un movimiento longitudinal al eje de la probeta para eliminar las entallas circunferenciales de la misma, mientras las probetas rotaban en el torno a una velocidad fija.

El proceso se realizó empleando la siguiente secuencia de lijas: 320, 400, 600, 1200, 1500 y 2000. Para eliminar los defectos de mayor tamaño se usó una lija de menor grado, la cual se les pasó a todas las probetas de fatiga y tracción, después de lo cual se fue aumentando consecutivamente hasta llevar las probetas a una superficie pulida con un valor de rugosidad aritmética del orden de $0,03 \mu\text{m}$, medida obtenida mediante técnicas de perfilometría óptica.



Figura 3-5. Fotografía del torno Myford, modelo ML7-R, donde se pulieron las probetas para el ensayo de fatiga

3.4.2. Preparación de probetas para ensayos de dureza.

La preparación de las probetas para los ensayos de dureza se realizó empleando un equipo de pulido de plato giratorio modelo Ecomet 5 (figura 3-6), el cual consta de dos discos donde se colocan papeles de lija de diferentes grados, con un suministro de agua para su lubricación. El equipo tiene la posibilidad de trabajar a dos velocidades distintas, pero en este caso se trabajó a 240 rpm. Las probetas fueron pulidas uniformemente mediante la sucesión progresiva en el número de granulometría de cada papel de lija, de acuerdo a la siguiente secuencia: 320, 400, 600, 1200, 1500 y 2000. La colocación de la probeta fue alternada respecto al giro del plato contenedor del papel de lija, con la finalidad de ir eliminando el rayado anterior producido por el papel de lija en una dirección. Al final de todo el proceso, se confirió a las superficies de las probetas un acabado brillante tipo espejo.



Figura 3-6. Máquina para pulido de plato giratorio

3.5. Perfilometría óptica

Para conocer la rugosidad asociada al acabado de las probetas luego de ser pulidas, se procedió a medir dicho parámetro empleando un perfilómetro Zygo, modelo New View 200, equipo capaz de evaluar una cierta área de la muestra y representar los datos de rugosidad en forma numérica y gráfica. El equipo posee suspensión de aire, es decir, un mecanismo que permite aislar en un alto grado el equipo, de las vibraciones externas que pudiesen transmitirse hacia el instrumento, afectando de manera significativa la medición realizada.

El análisis arroja los siguientes resultados:

Donde:

Reservados todos los derechos. No se permite la explotación económica ni la transformación de esta obra. Queda permitida la impresión en su totalidad.

El rms resultante es la raíz cuadrada promedio de la superficie de la figura con el error transmitido relativo a una superficie de referencia. Es calculado como la desviación estándar de las alturas (o profundidades) de una superficie de prueba relativa a la referencia de todos los puntos en el diagrama de superficie.



Figura 3-7. Equipo de perfilometría óptica.

3.6. Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción fueron realizados en una máquina servo-hidráulica Instron modelo 1137. Dicho equipo consta de un móvil en la parte inferior que posee un amplio espectro de velocidades, y un cabezal fijo en la parte superior. En el presente trabajo se empleó una velocidad de cabezal móvil de 3 mm/min. Estos

ensayos fueron realizados en el Instituto de Ingeniería de Sartenejas y en los laboratorios de la Universidad Simón Bolívar.

Este ensayo se realizó a diecinueve (19) probetas (3 probetas de tracción según Norma ASTM A307, cuatro (4) probetas de fatiga según Norma ASTM E606 sin ningún tipo de daño acumulado (grupo de control y para ver la influencia del factor geométrico al compararlas a tracción con el comportamiento de las probetas de tracción ASTM A307) y 12 probetas de fatiga según Norma ASTM E606 sometidas a un proceso previo de fatiga (o daño acumulado), de las cuales a seis (6) de estas probetas les fue aplicado dicho daño acumulado mediante la aplicación de un porcentaje de vida estimada (50%, 60%, 75%) del ciclaje aceptado como máximo para fracturar a un determinado nivel de esfuerzo alto (Esfuerzo aplicado 580MPa, $N_f = 100.000$) y 6 les fue aplicado dicho daño acumulado mediante la aplicación de un porcentaje de vida estimada (50%, 60%, 75%) del ciclaje aceptado como máximo para fracturar a un determinado nivel de esfuerzo bajo (Esfuerzo aplicado 530MPa, $N_f = 1.000.000$).

Antes de montar la probeta en la máquina, se midió con un vernier electrónico el radio de la sección calibrada, luego fue montada verticalmente la probeta y asegurada con las mordazas hidráulicas y con los cabezales cilíndricos, verificando que la probeta quede lo menos descubierta posible. Mediante un programa de computadora que posee el equipo, se controla en el ensayo la velocidad de cabezal constante aplicada, el inicio del ensayo y otras funciones de operación del equipo. Durante el ensayo se observa como es el desarrollo de la curva esfuerzo-deformación nominal hasta la fractura final. Al terminar el ensayo se desmonta la probeta y se realiza de nuevo en la probeta la medición de la sección de menor diámetro donde ocurre la falla. Luego se toman los datos obtenidos para determinar la curva esfuerzo-deformación realizando el procedimiento correspondiente y las debidas correcciones por deformación elástica de los elementos de máquina. Esta máquina puede ser vista en la figura 3-8.



Figura 3-8.Máquina para ensayo de tracción

3.7. Corrección por deformación elástica de los elementos de máquina

En los ensayos de tensión ocurren deformaciones elásticas en el conjunto máquina-muestra. Para evitar que estas alteren los resultados reales, es necesario hacer una corrección de los datos de alargamiento. A continuación se presenta la ecuación que será empleada para la corrección de los datos:

$$(\Delta L_i)_{corr} = \Delta L_i - \Delta L_i \left(\frac{1}{K_{exp}} - \frac{1}{K_{prob}} \right)$$

Ec. 3.4

Donde:

K_{exp} = rigidez experimental del conjunto,

K_{prob} = rigidez teórica del material de la probeta.

$$K_{exp} = \frac{\sum F_i}{\sum \Delta L_i} \quad K_{prob} = \frac{A_o E}{L_o}$$

Ec. 3.5

Donde:

A_o = área transversal inicial de la sección de ensayo de la probeta.

E = módulo de elasticidad del material.

L_o = longitud inicial de la sección de ensayo de la probeta.

Para obtener los valores del alargamiento corregido y debido a la cantidad de datos provenientes del ensayo de tracción hasta la fractura final, requerimos la utilización de hojas de cálculos como las del programa Microsoft Excel® y manejar con estas las ecuaciones antes mencionadas.

Obtenidos los valores de resistencia a la tracción y límite de fluencia del material, se puede seleccionar un intervalo de valores de niveles de esfuerzos, en los cuales se van a realizar los ensayos de fatiga en flexión rotativa sin que se produzca fluencia del material.

Al realizar estas pruebas de tensión se puede establecer una comparación del comportamiento de material con y sin daño acumulado, para saber si el proceso de fatiga afecta o no en el esfuerzo de fluencia del material.

Al obtener los valores de alargamiento corregido $(\Delta L_i)_{corr}$, para cada estado de carga correspondiente (F_i), se construye la curva de esfuerzo real vs. deformación real (σ vs ϵ), a partir de la curva esfuerzo-deformación ingenieril (S vs e) con valores provenientes de las siguientes ecuaciones:

- Esfuerzo ingenieril:

$$S_i = \frac{F_i}{A_0}$$

Ec. 3.6

- Deformación ingenieril:

$$e = \frac{(\Delta L_i)_{corr}}{L_0}$$

Ec. 3.7

- Esfuerzo real:

$$\sigma_i = S_i(1 + e_i)$$

Ec. 3.8

- Deformación real:

$$\varepsilon_i = \ln(1 + e_i)$$

Ec. 3.9

3.8. Curvas de Esfuerzo vs. Deformación

Luego de realizar la corrección de los datos originales del alargamiento, se procede a graficar la curva esfuerzo vs. Deformación, junto con la recta paralela a la porción inicial de la curva de esfuerzo-deformación, desplazada una distancia de 0.002 (mm/mm) del origen. Luego se obtienen el esfuerzo de fluencia (o cedencia convencional) (σ_y) de 0,2% que es el esfuerzo al cual dicha línea interseca la curva de esfuerzo-deformación y además se obtiene el esfuerzo real a carga máxima (σ_u).

Se obtiene al final el porcentaje de reducción de área con los datos de medición del radio de la probeta antes y después del ensayo de tracción.

3.9. Ensayo de fatiga

Los ensayos de fatiga en flexión rotativa se realizaron en los equipos marca Fatigue Dynamics, modelo RBF-200, los cuales se encuentran en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela. Cada equipo consta de un motor cuyo eje está acoplado al conjunto de mordaza y un dado que sujeta la probeta en uno de sus extremos. Además, tiene conectado un contador de ciclos mediante un mecanismo tipo cremallera y tornillo sinfín. Tiene además un graduador de velocidad y un contrapeso con una regleta calibrada para colocarle la carga adecuada para aplicar el momento flector, según el esfuerzo requerido para el ensayo en base a la sección de menor diámetro de la probeta. Esta máquina puede verse en la Figura 3-9

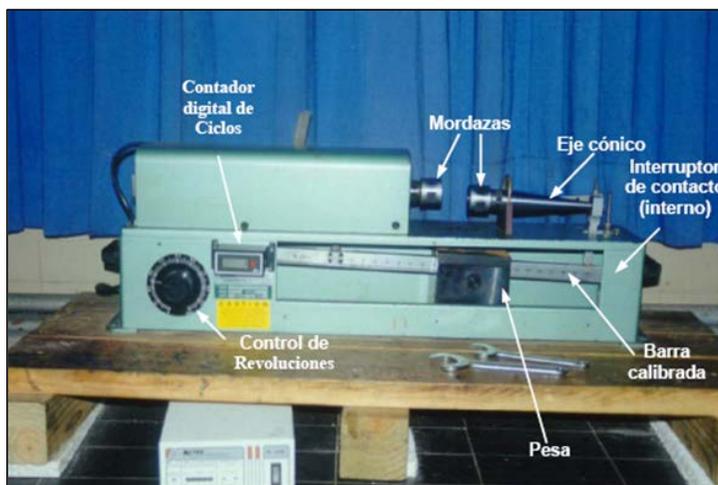


Figura 3-9. Máquina de fatiga y sus partes

Los ensayos de fatiga se realizaron a una frecuencia de 50 Hz equivalente a una velocidad promedio de 3000 rpm. Se ensayaron a una misma velocidad para

disminuir la dispersión de los resultados y a una temperatura de 24°C. Los datos obtenidos de estos ensayos fueron número de ciclos a falla en función del nivel de esfuerzo alternante.

Para calcular el valor del momento flector de cada nivel de esfuerzos preestablecidos se utilizó la siguiente ecuación:

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

Ec. 3.10

Dónde:

S = Esfuerzo aplicado [MPa].

M = Momento flector [N.m].

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

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

Y se conoce que:

$$C = \frac{D}{2}$$

Ec. 3.11

Dónde:

D = Diámetro de la probeta [mm.]

Para una barra circular, se tiene que:

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

Ec. 3.12

Sustituyendo, se tiene que:

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

Ec. 3.13

Entonces el momento flector (M) se obtiene como:

$$M = 0,0982 * S * D^3 \quad [Lbf * Pulg^3]$$

Ec. 3.14

$$M = 11,0955 * S * D^3 \quad [MPa * mm^3]$$

Ec. 3.15**3.10. Procedimiento de corrección para la obtención de las curvas esfuerzo vs deformación real en ensayos de tracción para las probetas de fatiga ASTM E 606**

La determinación de las curvas esfuerzo-deformación real empleando las probetas de fatiga se llevó a cabo siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

- 1) Se obtiene la curva carga-alargamiento original de la probeta de fatiga ensayada a tracción. Ver figura 3-10.

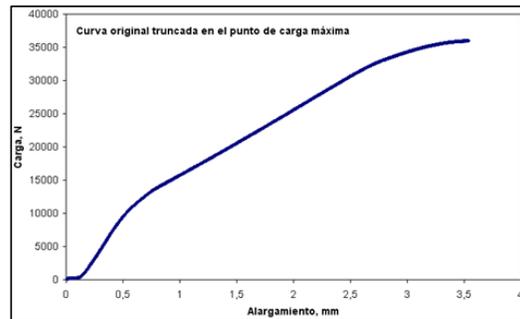


Figura 3-10. Curva carga-alargamiento original de una probeta de fatiga ensayada a tracción.

- 2) Véase la primera parte de la curva (primera pendiente de la curva de la figura 3-10). En la figura 3-11 se ilustra una ampliación de la misma. Allí se puede ver que la relación entre la carga y el alargamiento es aproximadamente lineal entre valores de alargamiento dados. Por lo tanto, este será el intervalo que se empleará para el cálculo de la rigidez experimental (K_{exp}). Véase figura 3-11. Se determina la pendiente (K_{exp}) haciendo una regresión lineal empleando todos los puntos que se encuentran en este intervalo. Se determina el valor numérico del punto de corte de la recta (línea de color rojo) con el eje de las abscisas (punto ΔL), tal como se ilustra en el gráfico.

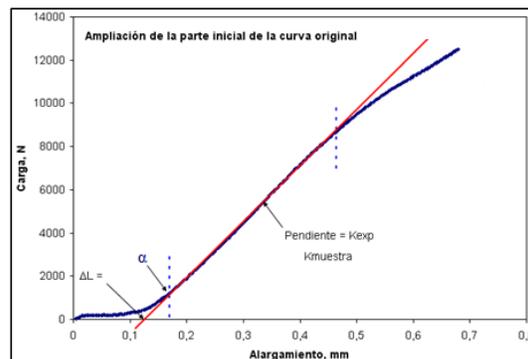
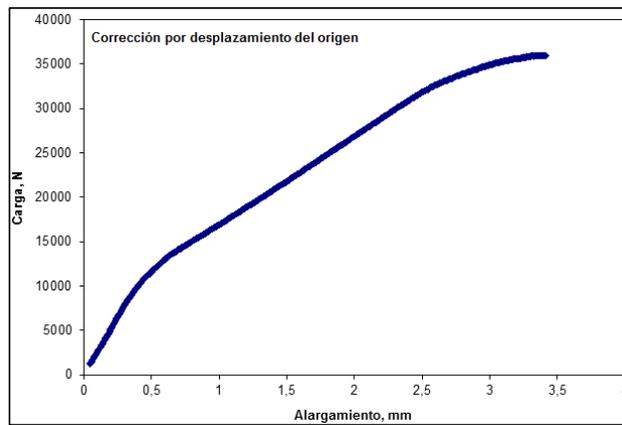
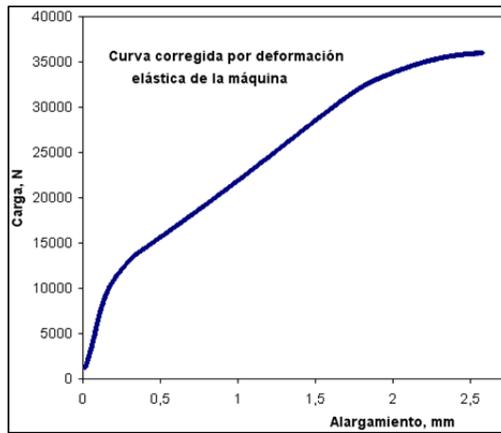


Figura 3-11. Ampliación de la primera zona de la curva de la figura 3-10.

- 3) Se ubica también el punto donde la curva original y la recta de la primera pendiente tienen contacto (punto α) y determina su valor numérico (ver figura 3-11).
- 4) Se procede a excluir de los datos originales todos aquellos puntos para los cuales el alargamiento sea inferior al valor numérico donde la curva original y la recta de la primera pendiente tienen contacto (el valor numérico del punto α , el cual lo denotaremos como



$$\Delta L_{\text{corregido}_i} = \Delta L_{\text{inicial}_i} - F_i \cdot \text{Fact} = (\Delta L_{\text{inicial}_i} -$$



3.12. Ensayo de dureza

Los ensayos de Dureza del material se hicieron en la escala Rockwell C. Estos se realizaron empleando un durómetro que se encuentra en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos, marca Wilson Rockwell, Tipo Hardeness Tester serie 500, Modelo B 504-T.

Tabla 3-1 Resultados de Ensayos de Dureza. Rockwell C

Penetrador cónico de diamante (ángulo de 120° +/- 30°)	
Ensayo.	Valor Obtenido
<i>Ensayo 1</i>	31
<i>Ensayo 2</i>	34
<i>Ensayo 3</i>	33
<i>Ensayo 4</i>	30
<i>Ensayo 5</i>	32
<i>Ensayo 6</i>	32
PROMEDIO	32
DESV. ESTANDAR	1,4

De donde el promedio (

2. El primer paso de la investigación científica es la observación.
3. El segundo paso de la investigación científica es la formulación de hipótesis.

3.14. Preparación de las muestras para el estudio fractográfico.

Para realizar el estudio fractográfico de las muestras ensayadas se ubicaron en la curva de Wohler dos probetas correspondientes a los esfuerzos mayor y menor aplicados a las probetas, seleccionándose aquellas probetas más cercanas a la curva.

Luego de determinar las dos (2) probetas a ser analizadas, se procedió a efectuar los cortes de las secciones transversales y longitudinales respectivamente, necesarias para el estudio fractográfico. El corte transversal, paralelo a la superficie de fractura, se realizó en la parte positiva de la superficie de fractura a una distancia de la superficie de aproximadamente 6 mm. Dichos cortes fueron realizados en una máquina cortadora de disco de diamante. Cada muestra fue identificada y almacenada individualmente cuidando la superficie de fractura.

Posteriormente, las muestras fueron limpiadas con acetona en un equipo de limpieza por ultrasonido, sumergiendo las mismas y manteniendo la zona de fractura hacia abajo para que los desechos desprendidos de la superficie a estudiar caigan y no sean retenidos nuevamente. Finalmente, las muestras son limpiadas con alcohol y secadas con el secador de muestras.



Figura 3-14.Equipo de limpieza por ultrasonido.

3.14.1. Preparación de probetas para análisis de la intercara longitudinal.

Con la otra mitad de las muestras, es decir la parte negativa de la superficie de fractura, se realizó un corte longitudinal, empleándose una máquina cortadora de disco de diamante (ver figura 3-15). El montaje de las probetas se realizó de tal manera que el corte se realizara paralelo al eje longitudinal de la probeta, teniendo en cuenta que el corte fuese realizado aproximadamente a la mitad de la sección transversal circular de la probeta, con la finalidad de obtener información relacionada con la formación de las grietas y su subsecuente preparación. Seguidamente, se montó la probeta para realizar el corte transversal que permitiría separar la muestra a estudiar del resto de la probeta.



Figura 3-15. Máquina de corte de disco de diamante Struers Minitorm.

Una vez efectuado el corte longitudinal se procedió al embutido de las muestras en una máquina que realiza el proceso, empleando una resina en polvo la cual es moldeada a presión y temperatura altas, (ver figura 3-17), para posteriormente ser pulidas hasta lograr que la superficie a estudiar tenga apariencia tipo espejo , como se puede ver en la figura 3-18.



Figura 3-17. Equipo para embutido de probetas
BUEHLER SIMPLIMET 2

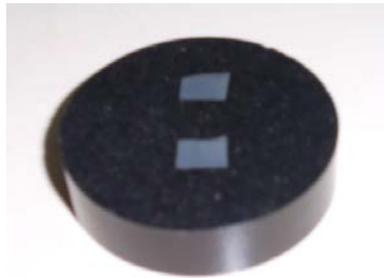


Figura 3-18. Muestras preparadas para la evaluación
fractográfica mediante MEB.

Luego del pulido se retiró el embutido y se procedió a la limpieza de las muestras en el equipo de ultrasonido con acetona (ver figura 3-14). El estudio fractográfico se realizó con la ayuda de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), empleando un voltaje de aceleración de 25 KV. El modelo de Microscopio Electrónico de Barrido fue un Philips XL 30, que puede ser visto en la Figura 3-19, el cual se encuentra ubicado en el Instituto Universitario de Tecnología de la Región

Capital (I.U.T), ubicado en la carretera Panamericana Caracas Los Teques, Edo. Miranda.



Figura 3-19. Microscopio Electrónico de Barrido Philips XL 30.

CAPÍTULO 4
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos de los diferentes estudios realizados, tanto en forma de tablas como en algunas gráficas representativas, así como fotomicrografías. Conjuntamente, se realizará el análisis correspondiente.

4.1. Clasificación de las muestras estudiadas

Las muestras estudiadas fueron divididas en seis grupos distintos, de la siguiente manera:

(1) Un grupo de probetas para ensayos de fatiga sin daño acumulado previo, las cuales fueron ensayadas a tracción y utilizadas como grupo de control para el estudio de la incidencia de su geometría en la evaluación de las propiedades mecánicas estáticas y su respectiva comparación con otras probetas de fatiga con daño acumulado previo, también ensayadas en tracción. Este grupo constaba de tres probetas, y lo denotaremos como grupo 1.

(2) Un grupo de probetas de tracción para evaluar las propiedades mecánicas del material y comparar los resultados con aquellos de los otros ensayos de tracción realizados con probetas de fatiga. Este grupo también constaba de tres probetas y lo denotaremos grupo 2.

(3) Un grupo de probetas de fatiga con daño acumulado previo, alcanzado mediante la aplicación de una cantidad relativamente baja de ciclos ($N_f = 100.000$ a

Informe de resultados de ensayos de fatiga de materiales de construcción de acero

Ensayo	Resultado
1	1000000
2	1000000
3	1000000

El presente informe describe los resultados de los ensayos de fatiga de materiales de construcción de acero, realizados en el laboratorio de ensayos de materiales de la Universidad de Sevilla, en el marco del proyecto de investigación "Análisis de la resistencia a la fatiga de los puentes de acero".

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de ensayos de materiales de la Universidad de Sevilla, en el marco del proyecto de investigación "Análisis de la resistencia a la fatiga de los puentes de acero".

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de ensayos de materiales de la Universidad de Sevilla, en el marco del proyecto de investigación "Análisis de la resistencia a la fatiga de los puentes de acero".

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de ensayos de materiales de la Universidad de Sevilla, en el marco del proyecto de investigación "Análisis de la resistencia a la fatiga de los puentes de acero".

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de ensayos de materiales de la Universidad de Sevilla, en el marco del proyecto de investigación "Análisis de la resistencia a la fatiga de los puentes de acero".

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- (4) Un grupo de probetas de fatiga con daño acumulado previo, alcanzado mediante la aplicación de una cantidad relativamente alta de ciclos ($N_f = 1.000.000$, a

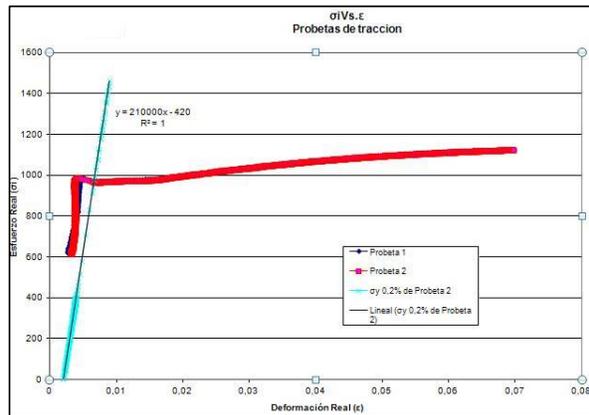


Figura 4-1. Gráficos obtenidos de los ensayos de tracción

Los resultados del ensayo de tracción, en términos del límite de fluencia y resistencia a la tracción del material, se presentan en la Tabla siguiente:

Tabla 4-2. Resultados obtenidos del ensayo de tracción

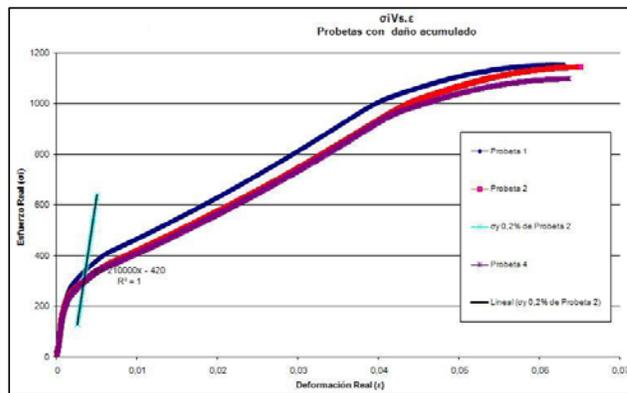
Número de Probeta	Resistencia a la Tracción (MPa)	Límite de Fluencia (MPa)
Probeta 1	1136	979
Probeta 2	1135	965
PROMEDIO	1135	972
DESV. EST	1	10

En cuanto a los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas del Grupo 1, la Tabla siguiente resume la información concerniente al diámetro de las probetas ensayadas:

Tabla 4-3. Diámetro de las probetas utilizadas

Probeta de fatiga	Diámetro (mm)
1	6,4
2	6,48
3	6,48
4	6,77

En la realización de estos ensayos, una de las probetas deslizó y no fue tomada en cuenta en los resultados. La figura 4-2 ilustra las gráficas esfuerzo-deformación que fueron obtenidas:

**Figura 4-2.** Gráficos obtenidos de los ensayos de tracción

Los resultados de los ensayos, en términos de las propiedades mecánicas evaluadas, se resumen en la Tabla siguiente:

Tabla 4-4.Resultados obtenidos del ensayo de tracción

Número de Probeta	Resistencia a la Tracción (MPa)	Límite de Fluencia (MPa)
Probeta 1	1152	346
Probeta 2	1145	304
Probeta 4	1099	297
PROMEDIO	1135	330
DESV. EST	24	37

De acuerdo a los resultados anteriores, es evidente que existe una diferencia significativa entre los valores del esfuerzo de fluencia determinados en ambos tipos de probetas, siendo muy inferior el valor obtenido en las probetas de radio continuo empleadas en los ensayos de fatiga, mientras que el esfuerzo real a carga máxima es muy similar en ambas probetas. Dado que los valores del esfuerzo de fluencia determinado en las probetas de tracción se corresponde con los valores de dicho parámetro reportado en la literatura, se concluye que los resultados de los ensayos de tracción realizados en probetas de fatiga solo pudieran tener valor para propósitos comparativos.

Posteriormente, se ensayó en tracción otro grupo de probetas previamente sometidas a daño por fatiga (Grupo 3). La tabla 4-5 resume la historia de aplicación de carga de estas probetas:

Tabla 4-5.Características de las probetas previamente sometidas a daño por fatiga

Identificación de la probeta	Diámetro (mm.)	Esfuerzo aplicado (MPa)	Momento Aplicado	Grado de daño aplicado (%)	Número de Ciclos Aplicado
1	6,33	580	127,98	50	50.000
2	6,35	580	129,20	50	50.000
3	6,39	580	131,66	60	60.000
4	6,40	580	132,28	60	60.000
5	6,48	580	137,30	75	75.000
6	6,36	580	129,81	75	75.000
7	6,37	530	119,18	50	500.000

Los resultados de estos ensayos se ilustran de manera gráfica en la figura 4-3:

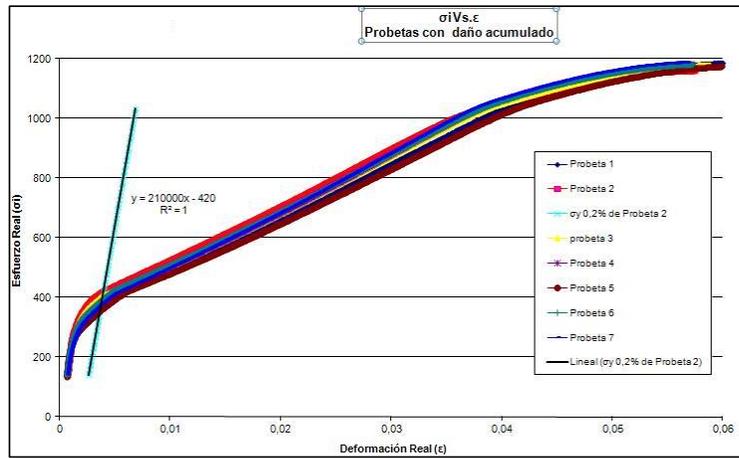


Figura 4-3. Gráficos obtenidos de los ensayos de tracción

Mientras que los valores de las propiedades mecánicas evaluadas se presentan en la siguiente Tabla 4-6:

Tabla 4-6. Resultados obtenidos del ensayo de tracción

Número de Probeta	Resistencia a la Tracción (MPa)	Límite de Fluencia (MPa)
Probeta 1	1189	352
Probeta 2	1164	419
Probeta 3	1181	405
Probeta 4	1186	386
Probeta 5	1179	356
Probeta 6	1185	392
Probeta 7	1193	379

Un segundo grupo de probetas de fatiga fue ensayado para acumular daño a menores esfuerzos alternantes (grupo 4), de acuerdo a las siguientes condiciones:

Tabla 4-7.Características de las probetas previamente sometidas a daño por fatiga

Probeta	Diámetro (mm)	Esfuerzo aplicado (MPa)	Grado de daño aplicado (%)	Ciclos aplicados (N)	Magnitud esfuerzo de fluencia (MPa)	Resistencia a la Tracción (MPa)
1	6,35	530	75	789100	487	1135
2	6,36	530	60	614900	427	1163
3	6,36	530	50	514800	543	1144
4	6,39	530	75	761100	472	1139
5	6,39	530	60	607900	669	1120

Las curvas esfuerzo-deformación que se obtuvieron, fueron las siguientes:

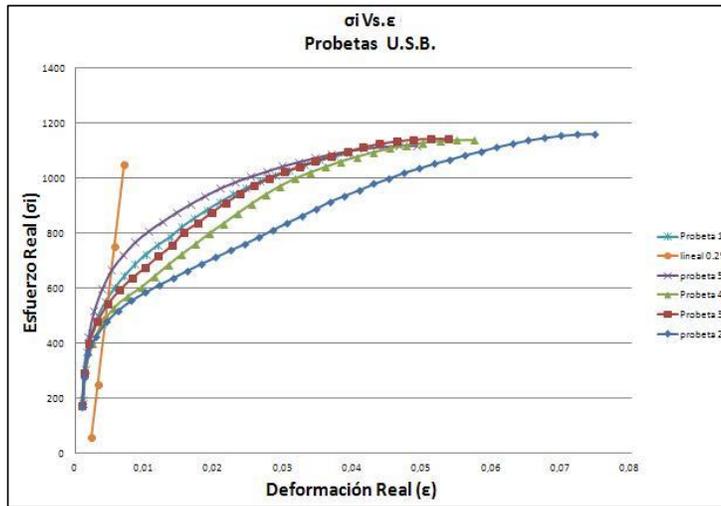


Figura 4-4.Gráficos obtenidos de los ensayos de tracción

Los resultados obtenidos de estos todos ensayos en relación a la evaluación del límite de fluencia se pueden resumir en las siguientes figuras:

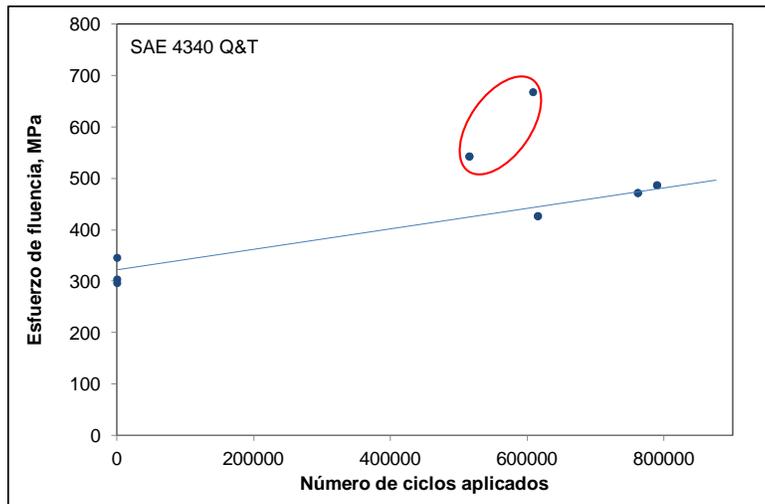


Figura 4-5. Gráfico de esfuerzo de fluencia vs Número de ciclos

En las Figuras 4-5 se observa claramente que, en las probetas con daño acumulado por fatiga, el esfuerzo de fluencia determinado empleando dichas probetas tiende a aumentar con el número de ciclos aplicados. En la figura 4-5, como primera aproximación, este incremento se podría representar por medio de una relación lineal, con la excepción de los dos puntos señalados en la figura 4-8 (puntos dentro del óvalo de color rojo).

Resumiendo, es interesante observar el hecho que los mayores valores del esfuerzo de fluencia corresponden a las probetas en las cuales se aplicó la mayor cantidad de ciclos, mientras que el menor corresponde al grupo de probetas sin daño acumulado previo. En líneas generales, se puede entonces concluir que las probetas de fatiga ensayadas en tracción, las cuales fueron sometidas a daño acumulado previo presentan un valor mayor del esfuerzo de fluencia a medida que aumenta el número de ciclos aplicados.

4.2.1. Ensayos de Fatiga.

Los ensayos de fatiga fueron realizados a uno y dos niveles de esfuerzo. Para los de un solo nivel de esfuerzos, a los fines de obtener la curva de Wöhler y la descripción de la misma por medio de alguno de los modelos existentes reportados en la literatura, se utilizaron quince (15) probetas las cuales fueron ensayadas a distintos esfuerzos alternantes máximos en el intervalo de 500 MPa a 630 MPa (grupo 6).

Para los ensayos realizados a dos niveles de esfuerzo, se utilizaron un total de doce (12) probetas (grupo 5), las cuales fueron ensayadas a 580 y 530 MPa, a fracciones de vida consumida (X_c) de 0.50, 0.60 y 0.75 de la vida estimada en el primer nivel de esfuerzo. Se instrumentaron 2 formas de aplicación de los esfuerzos; 6 probetas fueron empleadas en ensayos de aplicación de esfuerzos de forma descendente, pasando de 580 MPa a 530 MPa. Las otras 6 probetas fueron empleadas en ensayos de aplicación de esfuerzos de forma ascendente, pasando de 530 a 580 MPa. Mediante estos ensayos se estudiará la aplicabilidad de diversos modelos de predicción de vida a fatiga, incluyendo aquellos de Palmgren - Miner (Modelo Lineal, 1924-1945), Marco - Starkey (Modelo no lineal, 1954), Manson - Halford (Modelo no lineal, 1981-1997), Mesmacque et al. (Modelo no lineal, 2005).

4.2.2. Ensayos de daño acumulado en un bloque.

En la tabla 4-8 pueden observarse los resultados de los ensayos de fatiga de un solo nivel de esfuerzos.

Tabla 4-8. Resultados de los ensayos de fatiga de un solo nivel de esfuerzos

σ_y (MPa).	500	510	520	530	550	580	630
N_f	5838000 *(→)	1009700	384600	119600	3485200	916200	73500
			126500	444700		580800	99500
			177800	179900			
			396500	728700			
Promedio	5838000 *(→)	1009700	271350	368225	3485200	748500	86500
Desv. Est.			139309	278730		237164	18385

*(→) La probeta alcanzo vida infinita.

En la gráfica siguiente se observa la curva S-N de vida a la fatiga, la cual se construyó a partir de la mayoría de los resultados reportados en la tabla anterior, utilizando un método de regresión no lineal. En este caso, la modelación se llevó a cabo a través de la ecuación de Kohout y Vechet en lugar de la ecuación de Basquin. Gráficamente, tanto estos resultados como el valor de los parámetros involucrados en la ecuación de Kohout y Vechet se pueden observar en la figura 4-6.

De esta manera, el máximo esfuerzo alternante, S, se puede expresar en términos del número de ciclos a falla, N_f , por medio de la expresión:

$$S = 524.5 \left(\frac{N_f + 1.27 \times 10^4}{N_f + 1.5 \times 10^4} \right)^{-4.49}, \text{ MPa}$$

Ec. 4.1

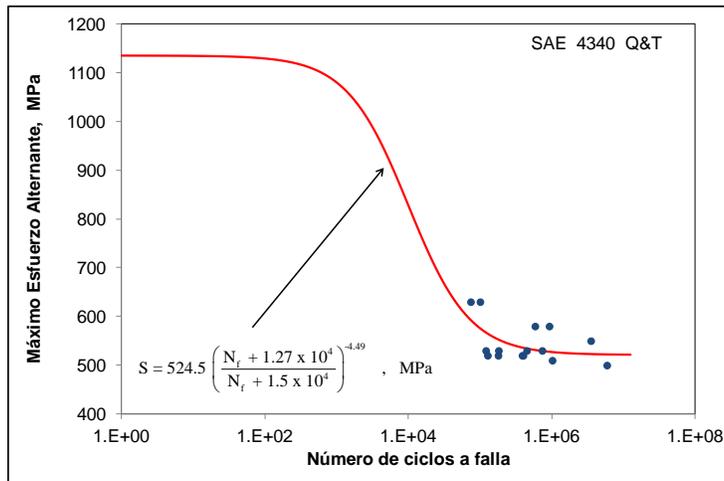


Figura 4-6. Valor de los parámetros involucrados en la ecuación de Kohout y Vechet

De esta manera, el máximo esfuerzo alternante, S , se puede expresar en términos del número de ciclos a falla, N_f , por medio de la expresión:

$$S = 524.5 \left(\frac{N_f + 1.27 \times 10^4}{N_f + 1.5 \times 10^4} \right)^{-4.49}, \text{ MPa}$$

Ec. 4.2

De acuerdo con la ecuación anterior, el límite de fatiga $S_L = 525$ MPa. Asimismo, de acuerdo a este resultado, la aplicación de un máximo esfuerzo alternante de aproximadamente 576 MPa daría lugar a la falla por fatiga del material a unos 100 mil ciclos, mientras que la aplicación de un esfuerzo alternante de aproximadamente 530 MPa, daría lugar a la falla alrededor de un millón de ciclos.

4.2.3. Ensayos de daño acumulado en dos bloques.

Los resultados correspondientes a la aplicación de dos bloques de esfuerzos se presentan en la Tabla siguiente:

Tabla 4-9. Tabla general de Resultados obtenidos de dos bloques de esfuerzos

Probeta	Diámetro	1er.esf. aplicado	Vida consumida (Xc)	Número ciclos aplicados	2do.esf. aplicado	Ciclos a falla
1	6,34	580	0,54	50000	530	459800
2	6,41	580	0,54	50000	530	131400
3	6,40	580	0,65	60000	530	205200
4	6,43	580	0,65	60000	530	108800
5	6,45	580	0,81	75000	530	149200
6	6,37	580	0,81	75000	530	98200
7	6,39	530	0,50	500000	580	1202300
8	6,33	530	0,50	500000	580	1344000
9	6,49	530	0,60	600000	580	692500
10	6,37	530	0,60	600000	580	612400
11	6,38	530	0,75	750000	580	901600
12	6,41	530	0,75	750000	580	1064900

Los resultados de los ensayos aplicados de forma descendente se presentan a continuación:

Tabla 4-10. Resultados de los ensayos aplicados de forma descendente

Probeta	Diámetro	1er.esf. aplicado	Fracción de vida consumida (Xc)	Número ciclos aplicados	2do.esf. aplicado	Ciclos a falla
1	6,34	580	0.54	50000	530	459800
2	6,41	580	0.54	50000	530	131400
3	6,4	580	0.65	60000	530	205200
4	6,43	580	0.65	60000	530	108800
5	6,45	580	0.81	75000	530	149200
6	6,37	580	0.81	75000	530	98200

Los resultados de los ensayos aplicados de forma ascendente se resumen en la Tabla siguiente:

Tabla 4-11. Resumen de los resultados obtenidos de los ensayos aplicados de forma ascendente

Probeta	Diámetro	1er.esf. aplicado	Vida consumida (Xc)	Número ciclos aplicados	2do.esf. aplicado	Ciclos a falla
7	6,39	530	0.50	500000	580	1202300
8	6,33	530	0.50	500000	580	1344000
9	6,49	530	0.60	600000	580	692500
10	6,37	530	0.60	600000	580	612400
11	6,38	530	0.75	750000	580	901600
12	6,41	530	0.75	750000	580	1064900

El resultado de la evaluación de la vida a la fatiga del material en el segundo bloque de esfuerzo, por medio de los diversos modelos de daño acumulado indicados anteriormente, se resume en las siguientes tablas y figuras:

4.2.4. Modelo de Palmgren-Miner

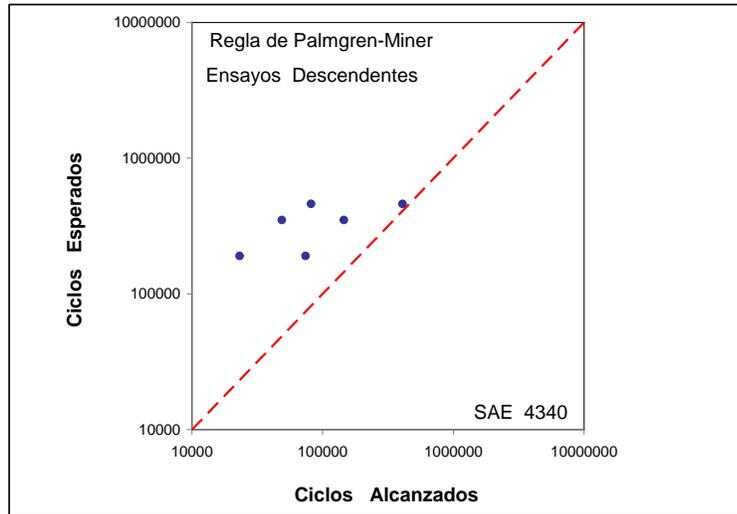


Figura 4-7. Ensayos de la secuencia descendente

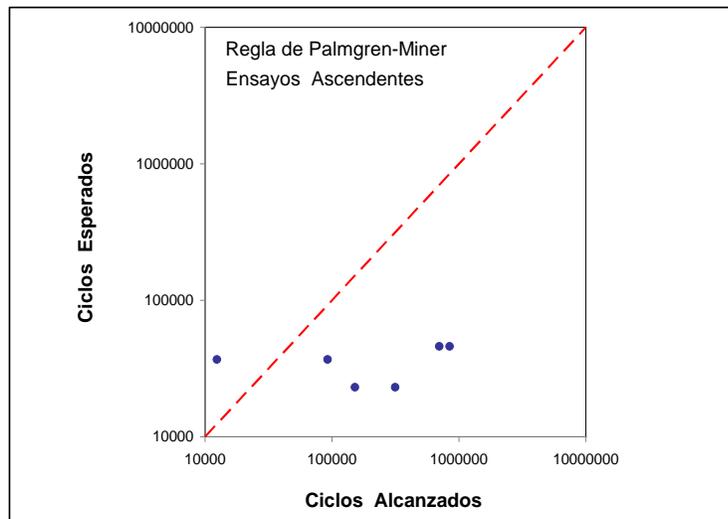


Figura 4-8. Gráficos comparativos del número de ciclos a falla alcanzados y predichos por la regla de daño lineal (RDL) de Palmgren - Miner. En el primer caso para los ensayos de la secuencia descendente (figura 4-7) y en el segundo caso (figura 4-8), para los ensayos de la secuencia ascendente.

Tabla 4-12. Predicción Palmgren Miner

<i>1er.esf. aplicado</i>	<i>Vida consumida (Xc)</i>	<i>Numero ciclos I (Ncb1)</i>	<i>2do.esf. aplicado</i>	<i>Vida Ciclos remanente (Ncb2)</i>	<i>Vida remanente $Xr = Ncb2 / Nf2$</i>	<i>Ciclos totales reales (Ncb1+Ncb2)</i>	<i>Predicción Palmgren Miner $Xr pm$</i>
580	0,5	50.000	530	409.800	0,41	459.800	500.000
580	0,5	50.000	530	71.400	0,07	131.400	500.000
580	0,6	60.000	530	130.200	0,13	205.200	400.000
580	0,6	60.000	530	48.800	0,05	108.800	400.000
580	0,75	75.000	530	74.200	0,07	149.200	250.000
580	0,75	75.000	530	23.200	0,02	98.200	250.000
530	0,5	500.000	580	702.300	7,02	1.202.300	50.000
530	0,5	500.000	580	844.000	8,44	1.344.000	50.000
530	0,6	600.000	580	92.500	0,93	692.500	40.000
530	0,6	600.000	580	12.400	0,12	612.400	40.000
530	0,75	750.000	580	151.600	1,52	901.600	25.000
530	0,75	750.000	580	314.900	3,15	1.064.900	25.000

4.2.5. Modelo de Marco – Starkey

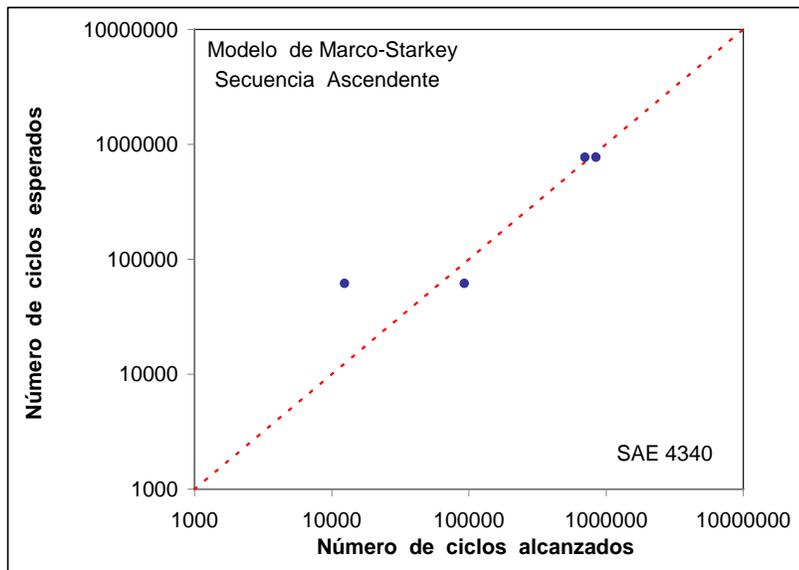


Figura 4-9. Resultados aplicando el modelo de Marco – Starkey para la secuencia ascendente

Para la secuencia ascendente, el número de ciclos predicho por el modelo se calculó a partir de la siguiente expresión:

$$N_f(n_1) = 92049 \left[\left(1 - \frac{n_1}{500000} \right)^{-1.29} \right]^{0.17}$$

Ec. 4.3

En esta expresión, n_1 representa el número de ciclos aplicados en la primera etapa, es decir a 530 MPa. Los exponentes que aparecen en la ecuación fueron determinados por medio de regresión no lineal, de manera de minimizar la suma de las diferencias cuadráticas entre los ciclos predichos y los determinados experimentalmente. En la Figura 4-9 correspondiente a la secuencia ascendente solo aparecen 4 de los 6 puntos experimentales ya que dos de las predicciones son

inferiores a 1000 ciclos. En la figura 4-10 se presentan los resultados de la secuencia descendente.

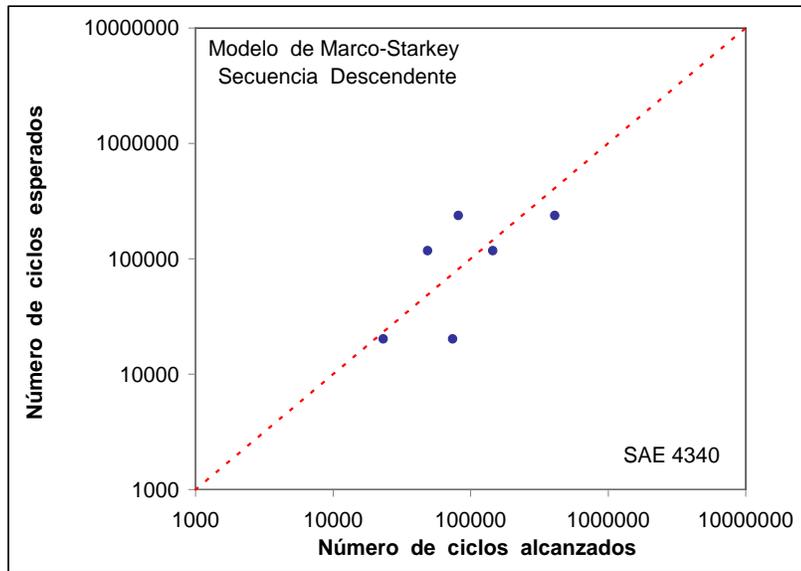


Figura 4-10.Resultados aplicando el modelo de Marco – Starkey para la secuencia descendente

Para estos ensayos, la ecuación que predice el número de ciclos a falla en el segundo bloque de esfuerzos aplicado se expresa como:

$$N_f (n_1) = 92049 \left[\left(1 - \frac{n_1}{500000} \right)^{1.62} \right]^{0.32}$$

Ec. 4.4

De nuevo, n_1 (ecuación 4.4) representa el número de ciclos aplicados en el primer bloque de esfuerzos. Se debe indicar que la descripción de los datos experimentales es bastante satisfactoria. Sin embargo, es importante señalar que este un método descriptivo más que predictivo ya que los exponentes involucrados en las dos expresiones anteriores sólo se pueden determinar a partir de los datos experimentales.

4.2.6. Modelo de Manson- Halford

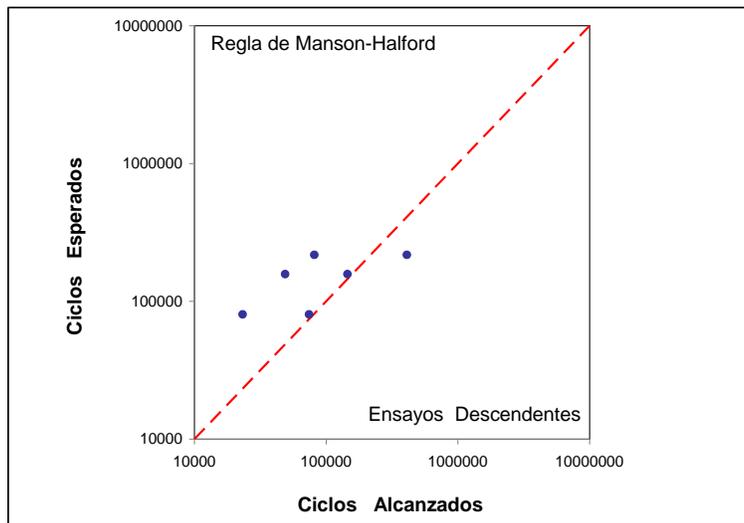


Figura 4-11. Resultados aplicando la Regla de Manson – Halford para los ensayos descendentes

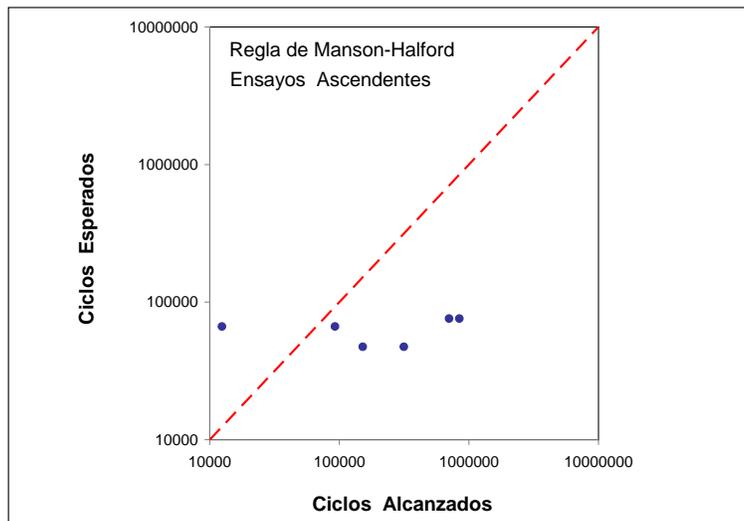


Figura 4-12. Resultados aplicando la Regla de Manson – Halford para los ensayos ascendentes

Con respecto a este modelo, se observa que la predicción es algo mejor en el caso de los ensayos descendentes (figura 4-11), en comparación a los ensayos ascendentes (figura 4-12), tal como es de esperarse a partir de los valores del número de ciclos a falla determinados experimentalmente.

4.2.7. Modelo de Mesmacque et al.

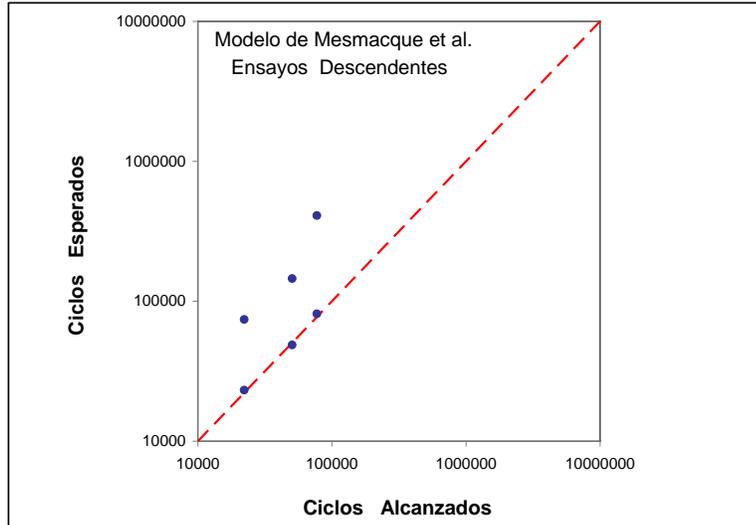


Figura 4-13. Resultados aplicando el modelo Mesmacque et al, para los ensayos descendentes

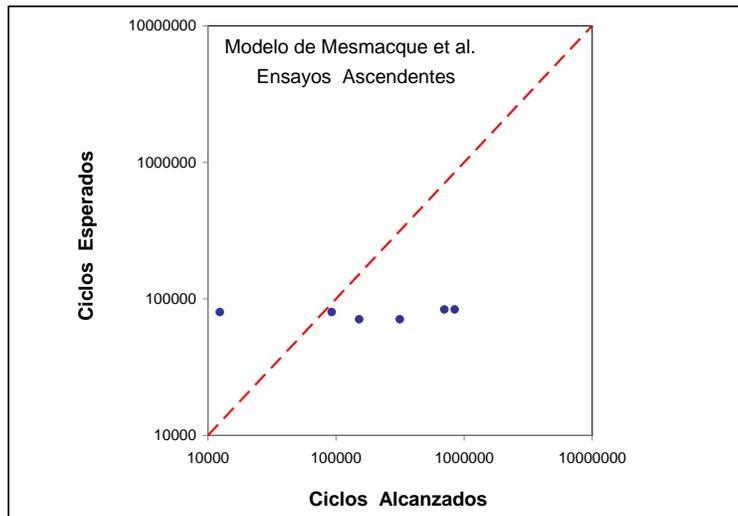


Figura 4-14. Resultados aplicando el modelo Mesmacque et al, para ensayos ascendentes

De acuerdo a este modelo, las predicciones también son algo mejor para el caso de los ensayos descendentes (figura 4-13) en comparación con los ensayos descendentes (figura 4-14). . Se debe señalar que este es un modelo predictivo ya que solo depende de la curva de Wohler.

4.2.8. Resultado del estudio fractográfico

En esta sección se presentan los resultados del análisis fractográfico realizado por medio de técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Este estudio fue llevado a cabo tanto en algunas superficies de fractura seleccionadas, así como en sus respectivos cortes longitudinales, perpendiculares a dichas superficies.

Esencialmente, para el estudio se emplearon dos muestras representativas de las probetas fracturadas, correspondientes a probetas que fallaron a esfuerzos alternantes máximos de 510 y 530 MPa, las cuales alcanzaron un número de ciclos a

falla de 1009700 y 728700, respectivamente. Específicamente, estas muestras corresponden a muestras cuyo número de ciclos a falla son los más cercanos a los predichos por la curva de Wöhler, determinada experimentalmente en condiciones de fatiga al aire, para los niveles de esfuerzo alternante extremos.

Con el propósito de llevar a cabo un análisis general de las superficies de fractura y particularmente para determinar los posibles sitios de inicio de las grietas, se tomaron una serie de fotomicrograffias a distintos aumentos en la modalidad de electrones secundarios (SE). Para el estudio de los cortes longitudinales, el análisis se realizó en la modalidad de electrones retrodispersados (BSE).

Las secciones transversales de las muestras fueron observadas a distintos aumentos, particularmente con el objetivo de determinar la existencia de otras grietas primarias paralelas a aquellas que dieron lugar a la falla de la muestras, así como de posibles grietas secundarias que se propagaran desde la superficie de fractura misma. Asimismo, se realizó un análisis de composición en algunas inclusiones no metálicas, de morfología distinta, por medio de técnicas de Espectroscopía por Dispersión en Energía de Rayos X (EDS).

4.2.9. Estudio de las secciones transversales de las probetas de fatiga

La figura 4-15 muestra la superficie de fractura de una probeta ensayada al aire a un esfuerzo de 510 MPa y que falló después de 1009700 ciclos de aplicación de carga. En la misma es posible observar claramente que la muestra falló como consecuencia de la propagación de una grieta dominante. Asimismo, se observa la zona de propagación misma y la zona de fractura dúctil, correspondiente a la falla por sobre carga. Se diferencian estas dos últimas zonas por la morfología presentada en la superficie de fractura, observándose el cambio gradual en su textura. La zona de propagación de la grieta presenta una textura de aspecto liso, mientras que la zona de

fractura final de fractura por sobre carga (fractura dúctil) presenta una textura rugosa. Todas estas zonas aparecen claramente indicadas en la superficie de fractura.

Las figuras 4-16 (a) a 4-16(d) ilustran la zona de inicio de la grieta a mayores aumentos. En las mismas se observa claramente que la grieta de fatiga se originó en una entalla cuasi esférica situada en la superficie de la probeta, la cual posiblemente actuó como un concentrador de tensiones. Asimismo, se pueden observar las marcas radiales que emanan del sitio de iniciación de grieta y que indican la dirección de propagación de la misma.

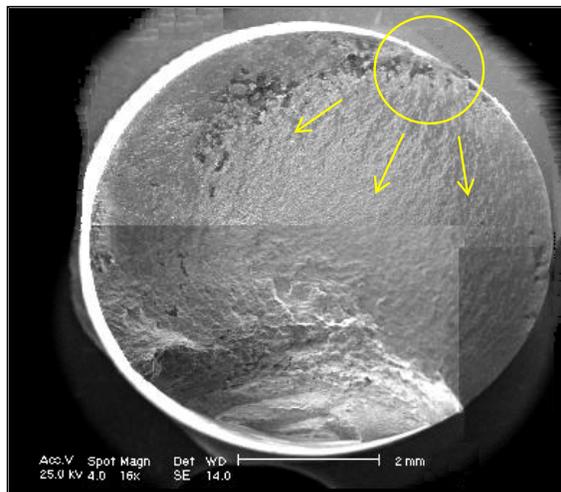


Figura 4-15. Vista general de la superficie de fractura de un probeta ensayada al aire a un esfuerzo alternante máximo $S_f = 510$ MPa y la cual falló después de 1009700 ciclos de aplicación de carga. Zona de inicio de la grieta dominante (ZIG), dirección de propagación de la grieta (DPG), zona de propagación de la grieta (ZPG) y zona de fractura por sobre carga (ZFS).

La figura 4-17 ilustra la superficie de fractura de una probeta ensayada al aire a un esfuerzo alternante máximo de 530 MPa y la cual falló después de 728700 ciclos de aplicación de carga. En la misma se observa que, aun cuando el esfuerzo alternante máximo es algo superior al aplicado a la probeta anterior, la fractura de esta muestra también se caracteriza por la presencia de una grieta dominante cuyo sitio de inicio

también se encuentra en la superficie de la probeta. Las diversas zonas correspondientes a la superficie de fractura se identifican sobre la fotomicrografía misma. Asimismo, es de esperarse que, debido al mayor esfuerzo alternante al que fue sometido la probeta, la zona de propagación de la grieta sea menor en comparación con la de la probeta anterior, ensayada a 510 Mpa, como consecuencia de la ocurrencia de una mayor intensidad de esfuerzos en la punta de la grieta.

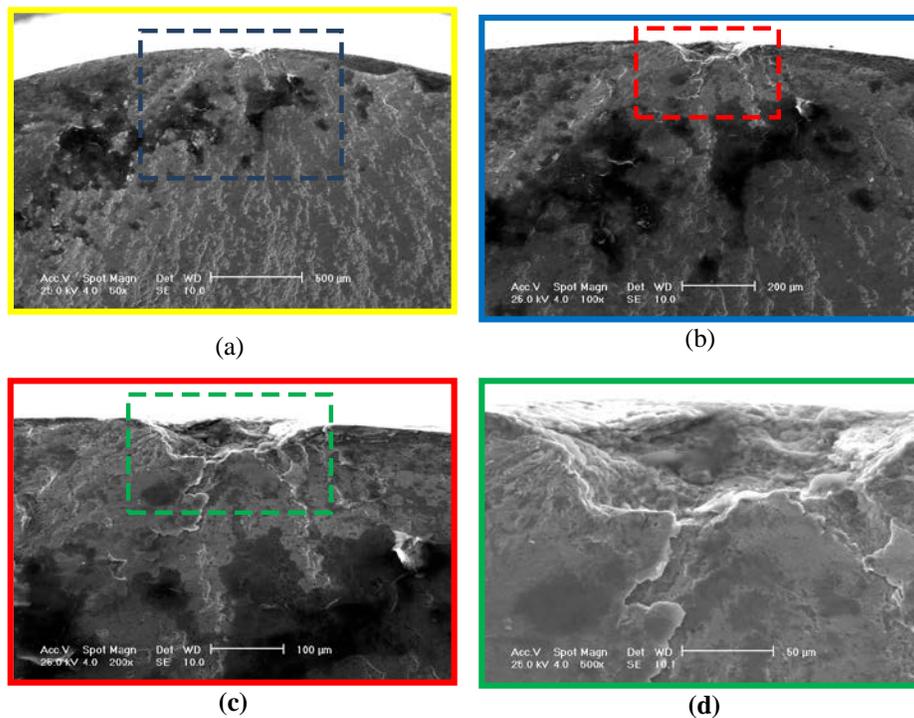


Figura 4.16: a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta ensayada al aire a 510 MPa y la cual falló después de 1009700 ciclos de aplicación de carga. b), c) y d) presentan una ampliación de la zona de inicio de grieta.

La figura 4-16 ilustra una serie de fotomicrografías que presentan una observación detallada de la zona de inicio de la grieta dominante, la cual no pareciera estar asociada a alguna entalla particular, lo que indica que la iniciación de la misma

es consecuencia de la deformación plástica localizada que tiene lugar en la superficie de la probeta, a través de mecanismos de formación de intrusiones y extrusiones, como consecuencia de la distribución de esfuerzos al que se ve sometida la muestra durante su sollicitación bajo condiciones de flexión rotativa.

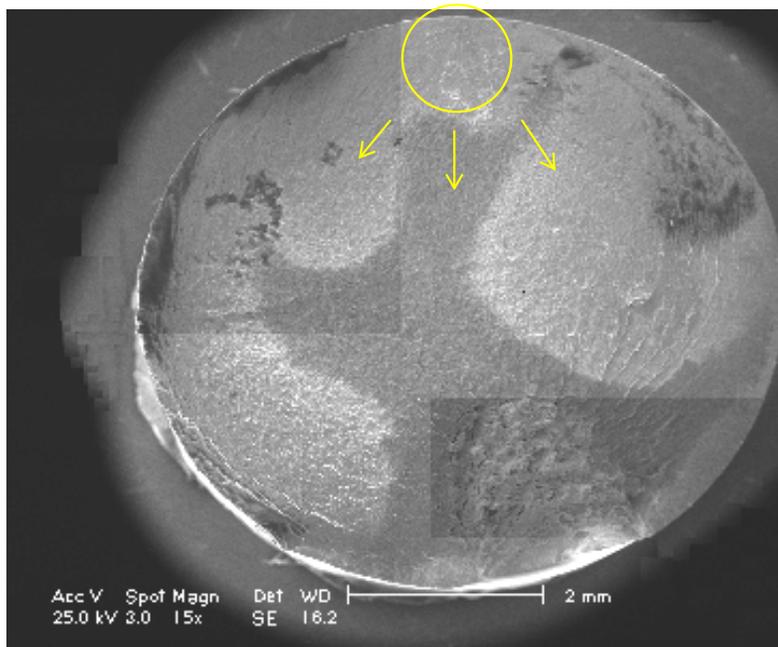


Figura 4-17. Vista general de la superficie de fractura de probeta ensayada al aire a 530 MPa y la cual falló después de 728700 ciclos de aplicación de carga. Se identifican las diversas zonas características de dicha superficie, tales como la zona de inicio de la grietas dominante (ZIG), dirección de propagación de la grieta (DPG), zona de propagación de la grieta (ZPG) y la zona de fractura por sobre carga (ZFS).

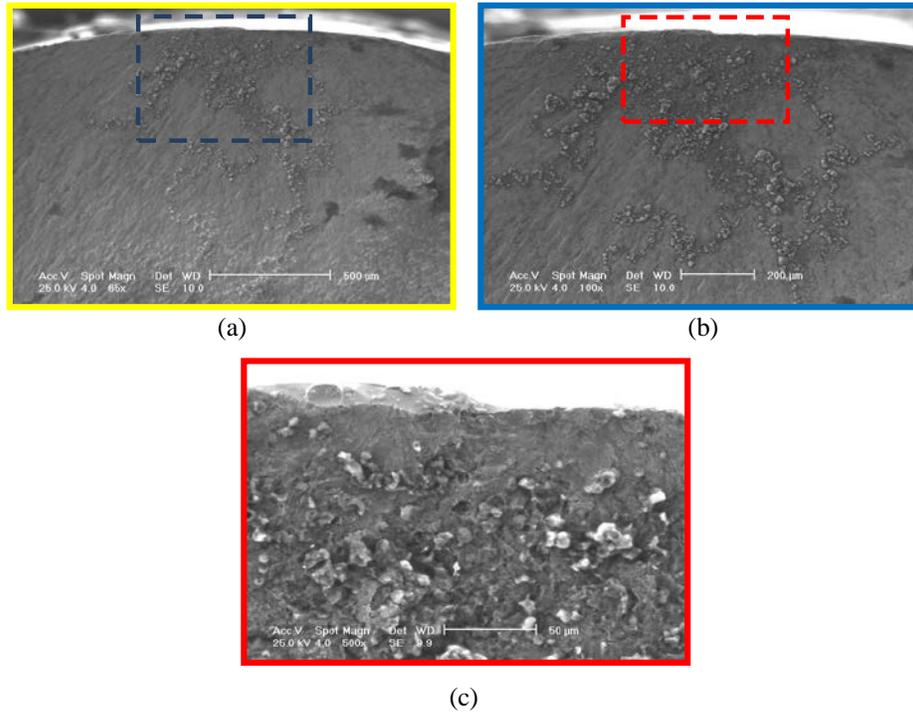


Figura 4.18: a) Vista general de la superficie de fractura de una probeta ensayada al aire a 530 MPa y la cual falló después de 728700 ciclos de aplicación de carga. b) y c) ilustran una ampliación de la zona de inicio de grieta.

4.2.10. Estudio de las zonas de propagación y zona de fractura por sobre carga presentes en las superficies de fractura de las muestras.

Las figuras 4-17 y 4-18 (a), (b) y (c) presentan un conjunto de fotomicrografías a diversos aumentos, las cuales identifican algunos aspectos particulares tanto de la superficie de propagación de las grietas como de las zonas de fractura por sobre carga presentes en las superficies de fractura de las probetas ensayadas al aire a esfuerzos alternantes máximos de 510 y 530 MPa. Las figuras 5a y b ilustran detalles diversos de la zona de fractura por sobre carga correspondiente a la probeta ensayada a 510 MPa. En las mismas se puede observar la presencia de

microhoyuelos en una matriz altamente deformada plásticamente, así como de grietas secundarias. Los microhoyuelos se forman como consecuencia de la elevada deformación plástica que sufre el material, particularmente en la vecindad de las partículas duras de fases secundarias o inclusiones presentes en el acero. Por otra parte, las figuras 4-19c y d presentan un detalle de la región de transición entre la zona de propagación y la de fractura por sobre carga, donde se observa la presencia de numerosas facetas planas y pocos microhoyuelos. En este caso, la superficie de fractura presenta un aspecto mucho más liso que el que se observa en las figuras 4-19a y 4-19b.

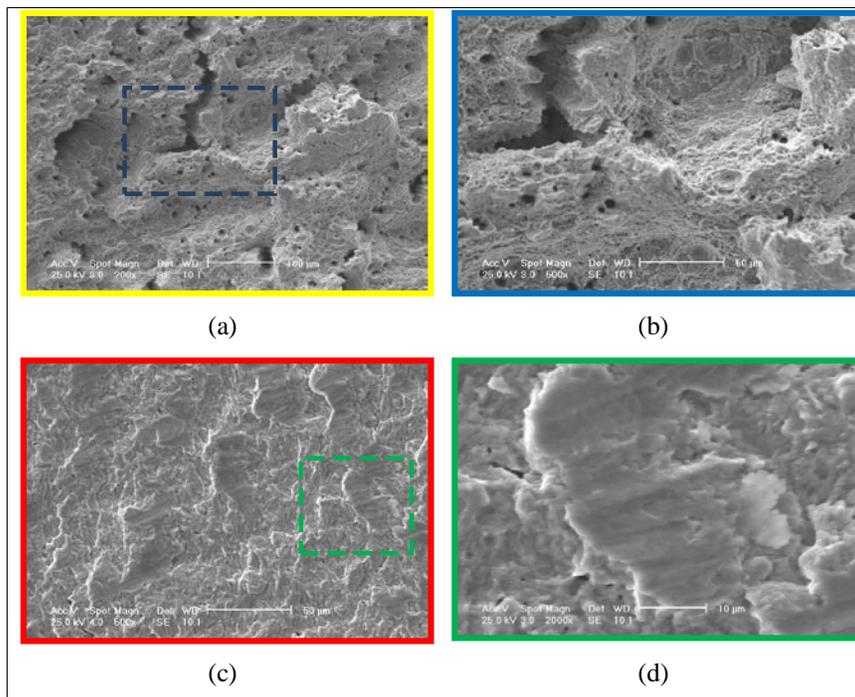


Figura 4-19. a) y b) fotomicrografías correspondientes a la zona de fractura por sobre carga de una probeta ensayada al aire a 510 MPa y la cual falló después de 1009700 ciclos de aplicación de carga. c) Detalle de la zona de propagación de grietas (textura de aspecto liso) cercana a la zona de fractura por sobre carga, donde se observa la existencia de facetas planas d) Posible faceta plana existente en la zona de transición entre las zonas de propagación y fractura dúctil, presentes en la superficie de fractura de la muestra.

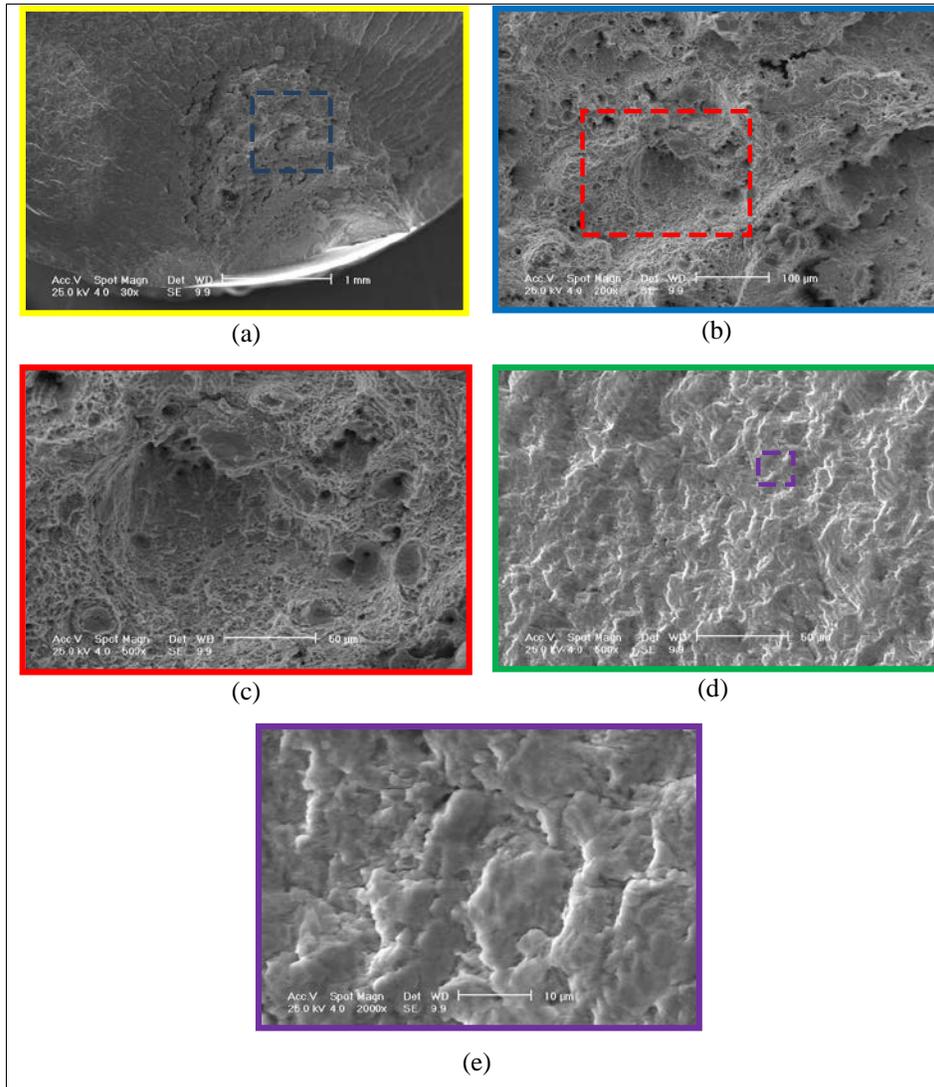


Figura 4.20: a) Vista de la zona de fractura por sobre carga de la superficie de fractura de una probeta ensayada a 530 MPa y la cual falló a 728700 ciclos de aplicación de carga. Nótese el aspecto altamente rugoso de la misma. b) y c) de detalles de la fotomicrografía 20 a) d) y e) Detalles de la zona de propagación de la grieta (textura de aspecto liso), pudiéndose observar la presencia de estrías de fatiga.

La figura 4-20, correspondiente a la muestra ensayada a 530 MPa, ilustra diversos detalles tanto de la zona de fractura por sobre carga como de la zona de propagación de la grieta. Las figuras 4-20(a), (b) y (c) presentan diversos detalles de la zona de fractura por sobre carga, donde es posible observar claramente la presencia de numerosos microhoyuelos, así como el típico aspecto rugoso de la matriz como consecuencia de su pronunciada deformación plástica. Por otra parte, las figuras 4-20 (d) y (e) presentan detalles de la zona de propagación de la grieta. Particularmente, la figura 4-24(d) permite la observación de las estriaciones de fatiga. La determinación de la separación media entre las mismas hace posible calcular la tasa promedio de propagación de la grieta. Asimismo, se observa el aspecto mucho más liso de la superficie de fractura en esta zona.

4.2.11. Cortes longitudinales de las probetas de fatiga

La figura 4-21 ilustra un corte longitudinal, perpendicular a la superficie de fractura de la probeta ensayada a 510 MPa, cercano a la zona de inicio de la grieta. La fotomicrografía revela la total ausencia de otras grietas primarias, paralelas a la grieta dominante, así como de grietas secundarias que se propaguen desde la superficie de fractura misma.

Por otra parte, la figura 4-22 ilustra la presencia de inclusiones no metálicas típicas del material, incluyendo algunas alargadas de MnS, las cuales deben su forma al proceso de conformación de la barra a partir de la cual se extrajeron las muestras empleadas en la presente investigación. La naturaleza química de estas inclusiones se ilustra en la figura 4-23. Asimismo, se ilustra la presencia de otras inclusiones redondeadas, aparentemente de SiO₂, los cuales es visible en la figura 4-24

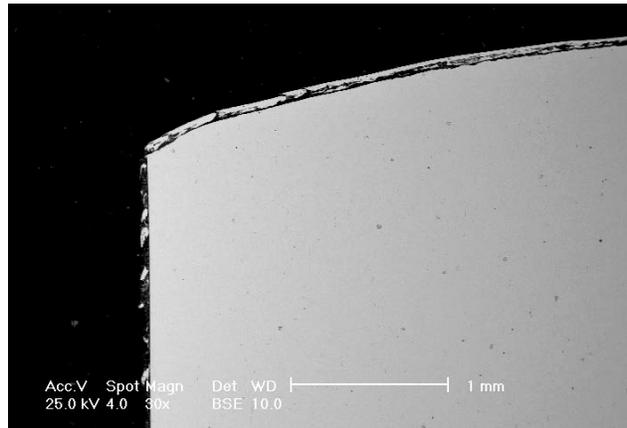


Figura 4-21: Fotomicrografía correspondiente a un corte longitudinal de la probeta ensayada a 510 MPa, la cual falló después de 1009700 ciclos de aplicación de carga, adyacente a la zona de inicio de grieta.

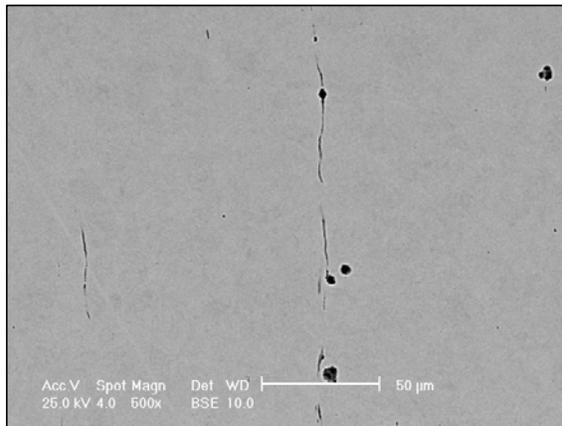


Figura 4.22. Fotomicrografía de un corte longitudinal de la probeta ensayada a 530 MPa, correspondiente a la zona interna de la muestra, ilustrando la presencia de inclusiones no metálicas.

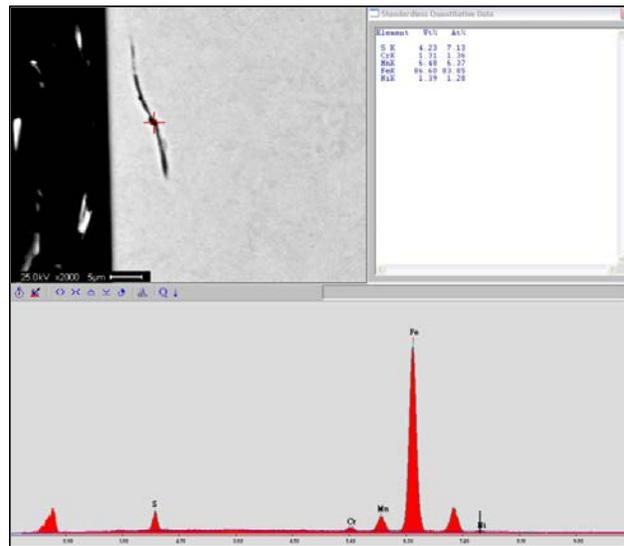


Figura 4-23. Análisis de la composición química de una inclusión no metálica alargada, correspondiente a un MnS.

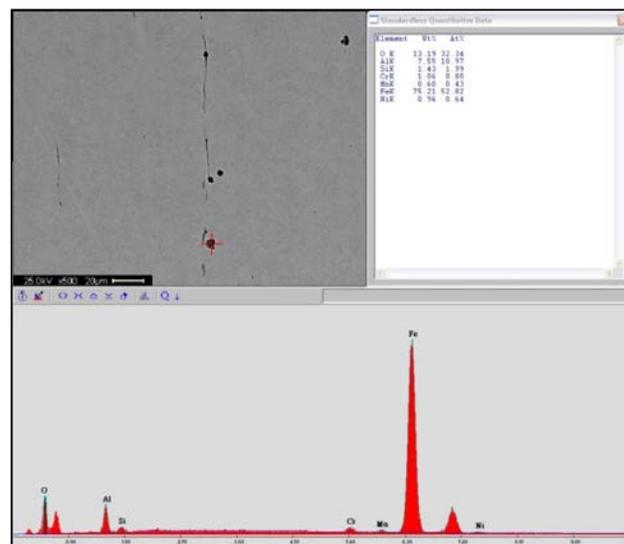


Figura 4-24. Análisis de la composición química de una inclusión no metálica redondeada, correspondiente posiblemente a un SiO_2 .

CONCLUSIONES

- Se determinó que las probetas de fatiga ensayadas en tracción, las cuales fueron sometidas previamente a daño acumulado presentan un valor mayor del esfuerzo de fluencia a medida que aumenta el número de ciclos aplicados.
- El modelo de Kohout y Vechet describe satisfactoriamente la variación del número de ciclos a falla con el máximo esfuerzo alternante aplicado a la muestra, particularmente en virtud de la elevada desviación estándar que se tiene en el valor del N_f .
- Los distintos modelos de daño acumulado empleados para determinar la vida remanente del material proveen resultados similares, con la excepción del modelo de Marco-Starky, el cual pareciera ser el que mejor predice el número de ciclos a falla para el segundo bloque de aplicación de carga. En el caso del modelo de Palgren-Miner, el mismo sobre estima los valores de N_f para la secuencia descendente, y los subestima en la secuencia ascendente.
- El análisis fractográfico indicó que tanto a altos como bajos esfuerzos alternantes la falla por fatiga está dominada por la iniciación y propagación de una grieta dominante, con ausencia notable de otras grietas primarias paralelas a la superficie de fractura, así como de grietas secundarias que se propaguen desde la superficie de fractura misma.
- En general, la metodología empleada en el presente estudio permite determinar los cambios en las propiedades mecánicas estáticas en materiales previamente sometidos a fatiga, por lo que en principio sería posible evaluar el daño acumulado por fatiga a partir de los cambios en dichas propiedades, al menos en materiales tales como el acero SAE 4340.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados reportados, una de las principales limitaciones del presente estudio ha sido la determinación precisa de la curva de Wohler del material, como consecuencia de la elevada desviación estándar de los valores del número de ciclos a falla obtenidos a niveles de esfuerzo alternante constante, así como la imprecisión en la determinación del límite de fatiga del material. Por lo tanto, sería recomendable que los estudios de esta naturaleza fuesen llevados a cabo empleando muestras pre entalladas, de tal manera de reducir la variabilidad en el número de ciclos a falla que se obtiene a cada nivel de esfuerzo alternante aplicado al material.

Por otra parte, se ha demostrado claramente que, tal como cabría esperarse, las probetas empleadas para realizar los ensayos de fatiga no son apropiadas para evaluar y cuantificar la variación en propiedades mecánicas estáticas subsecuente al daño por fatiga inducido en las muestras, debido a la diferencia significativa de su geometría en comparación con aquella de las muestras empleadas para realizar los ensayos de tracción normalizados. Por lo tanto, ante la limitación de realizar los estudios de fatiga bajo condiciones de carga axial a través de ensayos en condiciones de tracción-tracción, sería conveniente evaluar la posibilidad de analizar el cambio en las propiedades estáticas del material inducido por el daño por fatiga a través de otros ensayos mecánicos, como por ejemplo compresión axial o indentación.

Finalmente, el presente estudio demuestra claramente que es necesario aumentar significativamente el número de muestras empleadas en la evaluación de la vida remanente del material en los ensayos de dos bloques de aplicación de carga. La disponibilidad de un mayor número de datos experimentales para este tipo de ensayos permitiría una mejor evaluación de los diversos modelos existentes en la literatura para la predicción del daño acumulado por fatiga.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Collins (1981), "Failure of materials in mechanical design, analysis prediction prevention", John Wiley & Sons. Inc., USA.
- [2] E. S. Puchi et al (2007). "Fatigue life of AISI 316L stainless steel welded joints, obtained by GMAW". Revista de Metalurgia, Vol. 43, No 3.
- [3] E. S. Puchi et al (2004). "High-cycle Fatigue behavior of AISI 4340 steel quenched and tempered". Surface and Coatings Technology 108-109, 466-472.
- [4] E.S. Puchi et al (2000). "Fatigue properties of SAE 4340 steel quenched and tempered at high-cycle fatigue". Surface and Coatings Technology 133-134, 572-582.
- [5] OCHOA, E. (2002) "Estudios de Fatiga de un Acero SAE 4340 Templado y Revenido, Entallado", Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales, U.C.V., Tesis de grado.
- [6] GOMES, C (2004) "Análisis del Daño Acumulado por fatiga en un acero SAE 4340 Templado y Revenido, Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales, U.C.V., Tesis de grado.
- [7] MARCANO, J. (2005), "Análisis de Daño Acumulado en Fatiga, en el Acero AISI 1045", Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, U.C.V., Tesis de grado.
- [8] TOVAR C. (2006), "Daño Acumulado por Fatiga en el Acero Inoxidable 316L", Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales, U.C.V., Tesis de grado.

BIBLIOGRAFÍA

- [9] RAMOS, A (2004) "Efecto del Daño Acumulado en el comportamiento a la fatiga del acero SAE 4340 Templado y Revenido", escuela de Metalúrgia y Ciencia de los Materiales, U.C.V., tesis de grado.
- [10] PAIVA A., CORSI F.,(2003) "Comportamiento a la fatiga - corrosión en depósitos de tipo multicapa sobre acero estructurales" Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, U.C.V., Tesis de grado.
- [11] Flinn, R. A.; Trojan, P. K. (1989) "Materiales de ingeniería y sus aplicaciones". Editorial Mc Graw-Hill. Bogotá, pp. 245, 246.
- [12] Metals Handbook, American Society for Metals, Carbon and Low-Alloy Steels, (1987) Tomo 1, pp. 432-434.
- [13] Askeland, D. R.(1998), "Ciencia e ingeniería de los materiales". Grupo editorial Internacional Thomson Editores, México.
- [14] Fatemi, A. y Yang, L.(1998), "Cumulative Fatigue Damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials", International Journal of Fatigue, Vol. 20. No. I, pp.Y-34, Elsevier.
- [15] P. Forrest (1972). "Fatiga de los Metales" Ediciones URMO. Bilbao.
- [16] Mesmacque, G., García, S. Amrouche, A. y Rubio – González, C., (2005). "Sequential law in multiaxial fatigue, a new damage indicator". International Journal of Fatigue. Vol. 27, pp. 461-467.]
- [17] Kohout J, Vechet S. (2001) A new function for fatigue curves characterization and its multiple merits. Int J Fatigue; 23:175–83