

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA VIDA DE LA FATIGA AL AIRE DEL ACERO SAE 4340 TRATADO TERMOQUIMICAMENTE CON EL PROCESO DE NITRURACION

Presentado Ante La Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
Saúl E. Paspirgelis B.
Oscar M. Perdigón I.
Para optar por el título de
Ingeniero Mecánico.

Caracas Noviembre, 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA VIDA DE LA FATIGA AL AIRE DEL ACERO SAE 4340 TRATADO TERMOQUIMICAMENTE CON EL PROCESO DE NITRURACION

TUTOR ACADÉMICO: Profesor Crisanto Villalobos.

Presentado Ante La Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por Los Bachilleres:
Saúl E. Paspirgelis B.
Oscar M. Perdigón I
Para optar por el título de
Ingeniero Mecánico.

Caracas Noviembre, 2014



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 los Bachilleres:

Saúl Paspirgelis y Oscar Perdigón
Titulado

*“Estudio de la Vida de la Fatiga al Aire del Acero
SAE 4340 Tratado Termquímicamente con el Proceso de
Nitruración”*

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, a los treinta días del mes de octubre del año dos mil catorce.

Prof. Andrea Scagni
Jurado



Prof. Crisanto Villalobos
Tutor

Prof. Antonio Barragán
Jurado

DEDICATORIA

A mi Madre por el apoyo incondicional brindado en todo momento.

A mi Padre por la motivación que me brinda día a día.

A la escuela de Ingeniería Mecánica y todos aquellos que de alguna manera u otra ayudaron a la realización de este trabajo de investigación.

Saúl Paspirgelis.

DEDICATORIA

Para ti mamá que siempre estuviste allí apoyándome, que fuiste mi guía, que nunca me dejaste caer, que siempre luchaste porque saliera adelante, que has formado lo que soy ahora y que has hecho todo para que yo sea feliz.

Para ti papá que con tus consejos me has ayudado a ser una mejor persona.

Y a la memoria de mis abuelos que se que desde el cielo me cuidan y guían por el camino correcto.

Oscar Perdigón.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela por brindarnos su esencia y hacer de nosotros profesionales íntegros, éticos y enseñarnos a vencer las sombras.

A nuestro tutor académico y amigo, profesor Crisanto Villalobos quien de forma incondicional nos brindó apoyo, conocimientos e invaluables experiencias que fortalecieron nuestra personalidad y nuestra preparación para las etapas restantes en nuestras vidas.

Al Profesor Engels Ochoa por disposición y apoyo durante la realización de este trabajo de grado.

Al personal del Laboratorio de Microscopia Electrónica, de la UCV, por el tiempo dedicado en colaborar con nuestro trabajo.

A nuestros padres, madres, hermanos y amistades que se mantuvieron a nuestro lado en todo nuestro recorrido universitario brindando alegría, optimismo y entendimiento para motivarnos en este camino y fortalecernos internamente.

A todas las personas que de una forma u otra formaron parte de este camino y representaron motivación y apoyo para el correcto aprendizaje a lo largo de nuestra carrera universitaria.

Saúl E. Paspirgelis B.

Oscar M. Perdigón I.

**ESTUDIO DE LA VIDA DE LA FATIGA AL AIRE DEL ACERO SAE 4340
TRATADO TERMOQUIMICAMENTE CON EL PROCESO DE NITRURACION.**

Tutor Académico: Prof. Crisanto J. Villalobos G. Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2014. 71p.

Palabras Clave: Termoquímico, Fatiga, Nitruración, SAE 4340, Tracción.

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento a la fatiga en términos de la resistencia en un acero SAE 4340 templado, revenido y nitrurado por medio de la técnica de nitruración en horno. Se mecanizaron 24 probetas según las normas ASTM A 370 y ASTM E 606 para ensayos de tracción y de fatiga, respectivamente. Para los ensayos se seleccionaron 4 niveles de esfuerzos, siendo estos una fracción del esfuerzo de fluencia del material nitrurado, estos fueron de 790 MPa como valor mínimo inicial con escalones sucesivos de 40 MPa y como valor máximo 910 MPa. El estudio de vida, se realizó mediante la construcción de la curva S-N, modelada a partir de las ecuaciones de Basquin, previo tratamiento de los datos a través de la metodología propuesta por Weibull, para luego compararlos con ensayos previos del material sin nitrurar. Los resultados de los ensayos de tracción muestran una mejora de las propiedades mecánicas, en comparación con el material sin tratamiento. En los ensayos de fatiga se encontró, un incremento en la resistencia a la fatiga con respecto al material base de entre un 69 y 62.7%, Adicionalmente del análisis fractográfico se pudo inferir algunos aspectos relacionados con el proceso de fractura producto del ensayo. En la mayoría de las muestras no se observaron grietas adicionales paralelas a la superficie de fractura lo cual nos indica que la cantidad de ciclos que se presentan desde el inicio de la primera grieta discernible hasta la fractura es muy bajo, lo cual no permite la generación de grietas adicionales. No es posible hacer el cálculo de la tenacidad de fractura debido a que el intervalo de tiempo en que se crea la primera grieta hasta que se fractura la probeta es muy corto, impidiendo a que se generen grietas adicionales a la superficie de fractura.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	vi
Resumen.....	vii
Índice general.....	viii
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tablas.....	xiv

INTRODUCCION.....	1
--------------------------	----------

1.- CAPITULO I: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACION

1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 Aceros.....	5
2.1.2 Aceros SAE 4340.....	5
2.1.3 Tratamientos Térmicos.....	6
2.1.3.1 Tratamientos Termoquímicos.....	7
2.1.3.1.1 Nitruración.....	8
2.1.3.1.2 Microestructura de la capa nitrurada.....	9
2.1.3.1.3 Ventajas de la nitruración.....	10
2.2 Fractura de los materiales.....	10

2.2.1 Tipos de Fracturas.....	11
2.2.1.1 Fractura Frágil.....	11
2.2.1.2 Fractura dúctil.....	11
2.3 Fatiga.....	11
2.3.1 Etapas de una falla por fatiga	12
2.3.2 Esfuerzos presentes en la fatiga.....	13
2.3.2.1 Tensiones repetidas.....	13
2.3.2.2 Cargas oscilantes.....	14
2.3.2.3 Esfuerzos aleatorios.....	14
2.3.3 Limite de fatiga.....	16
2.3.4 Vida a la Fatiga.....	17
2.3.5 Curva Esfuerzo vs Número de ciclos.....	18
2.3.6 Modelos curva S/N.....	19
2.3.7 Modelo probabilístico de Weibull.....	20
2.3.8 Factores que influyen en el comportamiento de la curva S/N.....	21
2.4 Antecedentes.....	23

CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO

3.1 Diagrama de flujo.....	27
3.2 Distribucion de las probetas.....	28
3.3 Dimensionamiento de las probetas de tracción.....	28
3.4 Dimensionamiento de las probetas de fatiga de radio continuo.....	29

3.5 Proceso de fabricación de las probetas.....	29
3.6 Preparación de las probetas previo al tratamiento térmico.....	30
3.7 Proceso de nitruración.....	30
3.8 Pulido de las muestras.....	31
3.9 Ensayo de microindentación estática.....	33
3.10Análisis de la microestructura.....	34
3.11 Ensayo de tracción.....	35
3.12 Ensayo de fatiga.....	39
3.13 Estudio Fractográfico.....	42
 <i>CAPITULO IV: ANALISIS Y RESULTADOS</i>	
4.1 Estudio de la microindentación estática.....	43
4.2 Estudio de la Microestructura.....	44
4.3 Ensayo de tracción.....	45
4.4 Ensayo de Fatiga al aire.....	50
4.5 Evaluación fractográfica de los especímenes ensayados en fatiga.....	61
 <i>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	
5.1 Conclusiones.....	68
5.2 Recomendaciones.....	69
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</i>	70

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 Zonas distintivas de la capa nitrurada.....	9
Fig. 2.2 Etapas del fenómeno de la fatiga.....	12
Fig. 2.3 Curvas de Esfuerzo Vs Tiempo para cargas pulsatorias.....	13
Fig. 2.4 Curvas de Esfuerzo Vs. Tiempo para cargas oscilantes.....	14
Fig. 2.5 Representación de esfuerzos aleatorios.....	15
Fig. 2.6 Representación esfuerzos vs. Tiempo.....	16
Fig. 2.7 Curva de Wohler para fatiga.....	17
Fig. 2.8 Diagrama S-N.....	19
Fig. 2.9 Influencia de la tensión media σ_m en el comportamiento a la fatiga.....	24
Fig. 3.1 Diagrama de flujo de trabajo.....	27
Fig. 3.2 Esquema del dimensionamiento de las probetas de tracción según la norma A-370.....	28
Fig. 3.3 Esquema de las probetas de radio continuo para ensayos de fatiga en flexión rotativa según la norma ASTM E 606.....	29
Fig. 3.4 Probeta dibujada en programa CAD.....	29
Fig. 3.5 Torno CNC Milltronics ML14.....	30
Fig. 3.6 Probetas pulidas.....	30

Fig. 3.7 Bandeja de lijado marca Struers, modelo LunnMajor.....	32
Fig. 3.8 Pulidora marca BUEHLER, metaservmodelo 2000 variable “speed grinder-polisher”.....	32
Fig. 3.9 Probeta luego de la fase de pulido.....	32
Fig. 3.10 Equipo de microindentación estática BUEHLER.....	33
Fig. 3.11 Microscopio electrónico.....	34
Fig. 3.12 Máquina de ensayo de tracción Losenhausen, año 1969.....	35
Fig. 3.13 Montaje de la probeta en las mordazas.....	39
Fig. 3.14 Maquina de fatiga; Fatigue Dynamics, modelo RBF-200.....	39
Fig.3.15 Representación gráfica del momento flector ejercido en una probeta de radio continuo.....	40
Fig. 3.16 Microscopio electrónico de barrido marca Hitachi S-2400.....	42
Fig. 4.1 Microestructura de la sección transversal de una probeta de acero SAE 4340 nitrurada.....	44
Fig. 4.2 Probetas a ensayar bajo la norma ASTM A370.....	45
Fig. 4.3 Estriaciones en el cuello de las probetas de tracción.....	50
Fig. 4.4. Probetas después de fallar.....	52
Fig. 4.5 Gráfico Esfuerzos vs Numero de ciclos del acero SAE 4340 Nitrurado.....	53
Fig. 4.6 Función de densidad de probabilidad de Weibull para fatiga al aire	

del acero SAE 4340 nitrurado.....	55
Fig. 4.7 Curva corregida por Weibull S vN.....	56
Fig.4.8 Log(S) vs Log(N) del acero SAE 4340 Nitrurado.....	57
Fig. 4.9 Comparación Logarítmica del ensayo de fatiga a distintos niveles de esfuerzos entre el acero SAE 4340 sin nitruración y nitrurado.....	60
Fig 4.10. (a), (b) y (c) Macrografías de la superficie de fractura de especímenes del conjunto SAE 4340 Nitrurado, ensayados a distintos esfuerzos en fatiga al aire.....	63
Fig. 4.11 (a), (b) Grietas paralelas a la superficie de fractura ensayo de fatiga al aire.....	65
Fig. 4.12 Falla escalona probeta J Sa:830Mpa.....	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición química en % de peso del acero SAE 4340.....	6
Tabla 2.2 Propiedades del acero SAE4340.....	6
Tabla 3.1. Probetas requeridas para la realización de los ensayos.....	28
Tabla 4.1 Dureza HV promedio en cada zona distintiva de la capa de nitrurado.....	42
Tabla 4.2. Datos del ensayo de tracción Probeta N°1.....	45
Tabla 4.2. Datos del ensayo de tracción Probeta N°1 (<i>Continuación</i>).....	46
Tabla 4.3 Datos del ensayo de tracción probeta N° 2.....	46
Tabla 4.3 Datos del ensayo de tracción probeta N° 2 (<i>Continuación</i>).....	47
Tabla 4.4 Datos del ensayo de tracción probeta N°3.....	47
Tabla 4.4 Datos del ensayo de tracción probeta N°3(<i>Continuación</i>).....	48
Tabla 4.5 Datos del ensayo de tracción probeta N° 4.....	48
Tabla 4.5 Datos del ensayo de tracción probeta N°4 (<i>Continuación</i>).....	49
Tabla 4.6 Valores Promedios del ensayo de tracción.....	49
Tabla 4.7. Resultados ensayo de fatiga al aire a 910 MPa.....	51
Tabla 4.9. resultados ensayo de fatiga al aire a 830 MPa.....	51
Tabla 4.10. Resultados ensayo de fatiga al aire a 790 MPa.....	52
Tabla 4.11 Esfuerzos y vida media a través de Weibull.....	56

.Tabla 4.12 Resultados expresados logarítmicamente.....	57
Tabla 4.13. Datos de la curva obtenida a partir de la gráfica Log(S) vs Log(N) del acero SAE 4340 Nitrurado.	58
Tabla 4.14. Parámetros obtenidos para la ecuación de Basquin.....	58
Tabla 4.15. Resultados ensayo de fatiga acero SAE 4340.....	58
Tabla 4.16. Resultados corregidos de ensayo de fatiga en acero SAE 4340.....	59
Tabla 4.17 Comparación de las rectas.....	60

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, se han desarrollado numerosas técnicas de modificación de superficie capaces de alterar substancialmente las propiedades de los materiales dando paso a la era de los materiales compuestos, estos se pueden encontrar en nuestro entorno diario, ya sea en un vehículo, en nuestras casas o en nuestro lugar de trabajo. Estas aleaciones pueden ser tratadas térmicamente o termoquímicamente, se realizan estos tratamientos para así poder mejorar las capacidades mecánicas y su vida útil.

El presente trabajo no plantea un estudio desde la óptica de la tribología donde se hace énfasis en evaluar propiedades de carácter superficial, debido a que se busca obtener respuestas relacionadas con el desempeño del material y sus propiedades asociadas al comportamiento volumétrico haciendo énfasis en el comportamiento a la fatiga y adicionalmente se plantean evaluaciones en condiciones de carga estática.

En la mayoría de los casos al sustrato se le trata térmicamente o termoquímicamente antes de aplicarles algún recubrimiento que mejore sus propiedades. Entre los tratamientos termoquímicos se encuentra la nitruración la cual consiste en descomponer una atmosfera de amoníaco mediante cierto proceso en hidrógeno y nitrógeno, este último, al entrar en contacto con el sustrato se convierte en nitruros, aumentando en gran medida la dureza superficial del material. Por lo general este proceso se aplica a piezas que estarán sometidas a grandes fuerzas de rozamiento y carga generando un incremento en la vida a la fatiga de las piezas.

En esta investigación se usará un material base, compuesto de un acero SAE 4340, el cual es utilizado a nivel mundial en la fabricación de piezas de maquinarias que son sometidas a diversos ambientes de trabajo. A su vez, se estudiará el efecto del tratamiento de nitruración en el acero y su comportamiento en un ambiente controlado mediante un ensayo de fatiga al aire y plantear las ventajas que este tratamiento puede generar.

CAPITULO I: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En todo tipo de industria los costos de operación son dependientes del mantenimiento realizado a las máquinas, y como consecuencia directa existe la necesidad de detener un equipo para remplazar algún componente defectuoso, esto está claro, representa un periodo de merma en la productividad, lo cual se traduce en perdidas en el ejercicio económico de la organización. Debido a esto se presenta la imperiosa necesidad de utilizar materiales mucho más resistentes para fabricar dichos componentes que se adecuen a las condiciones de trabajo tales como el desgaste, los ambientes corrosivos y las cargas alternantes. Dichos materiales excepcionales son muy costosos y presentan características de conformado y maquinado especiales. Es por esto que nace la tecnología de los tratamientos térmicos, termoquímicos y recubrimientos, ya que estos permiten utilizar un sustrato relativamente económico y comercial de buenas propiedades mecánicas y por medio de un proceso se realzan características que son necesarias para un mejor y más duradero funcionamiento dentro de un componente mecánico.

Debido a este uso común de la tecnología de materiales se plantea la necesidad de conocer a fondo el comportamiento mecánico del material bajo cargas dinámicas, para así estimar la mejor relación entre el sustrato tratado y posteriormente recubierto, obteniendo las propiedades mecánicas requeridas en un proceso específico.

Por otra parte, es bien conocido que las aplicaciones de los aceros micro aleados por excelencia son para la fabricación de elementos de maquina comúnmente sometidos a sistemas dinámicos de carga, sin embargo, a pesar que estos aceros exponen un buen comportamiento de carácter superficial existen algunas aplicaciones que involucran por ejemplo impulsar flujos multifasicos con sólidos en suspensión altamente abrasivos, en los cuales estos aceros no soportan estas condiciones tan severas. Es aquí en donde la incorporación de materiales de ultra alta dureza y de estructuras lo suficientemente estables tanto desde el punto de vista de anclaje al sustrato y por supuesto estabilidad química a

bajas y altas temperaturas. Resulta interesante explorar el uso de tratamientos termoquímicos para el beneficio del anclaje de un recubrimiento y la mejora de las propiedades del conjunto. En este trabajo se pretende estudiar el acero 4340 nitrurado con la finalidad de obtener los posibles beneficios de la aplicación de un tratamiento térmico previo a un recubrimiento. Se desea evidenciar experimentalmente su comportamiento mecánico y presentarlo como una alternativa válida, para el diseño y desarrollo de nuevos componentes mecánicos más duraderos en general.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Estudio de la vida a la fatiga de aceros estructurales del tipo SAE 4340 templado y revenido, al cual se le ha aplicado un tratamiento termoquímico de nitrurado en horno.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar las variables que se utilizaran en los ensayos de fatiga.
- Realización del tratamiento termoquímico.
- Obtener parámetros iniciales de dureza del acero SAE 4340 con tratamiento termoquímico de nitruración.
- Realizar ensayo de tracción para obtener niveles de esfuerzos necesarios para realizar los ensayos de fatiga.
- Evaluación de la resistencia a la fatiga al aire, a través de la construcción de las curvas S-N correspondientes.
- Modelaje de los datos resistencia-vida a partir de las ecuaciones propuestas por Basquin previo tratamiento de los datos a través de la metodología propuesta por Weibull.
- Evaluación de las superficies fractográficas y establecimientos de los mecanismos de falla asociados a los eventos de nucleación y propagación de las grietas de los especímenes ensayados.
- Cálculo de la tenacidad de fractura a partir de la densidad de grietas.
- Análisis y comparación de resultados obtenidos de los diferentes ensayos.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Material base o Substrato

2.1.1 Aceros

En un principio se dijo que el acero es una aleación compuesta principalmente de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1% en peso de la composición de la aleación. Esta aleación conserva las características metálicas del hierro, pero con propiedades notablemente mejoradas gracias a la adición del carbono.

Aunque es difícil establecer las propiedades físicas y mecánicas del acero, debido a que estas varían con los ajustes en su composición y los diversos tratamientos térmicos o a los métodos de endurecimiento por acritud, con los que pueden conseguirse aceros con combinaciones de características adecuadas para infinidad de aplicaciones.

Según su composición los aceros se pueden dividir en dos grandes grupos: Aceros al carbono, formados principalmente por hierro y carbono; Aceros aleados: Contienen, además del carbono, otros elementos en cantidades suficientes como para alterar sus propiedades (dureza, puntos críticos, tamaño del grano, templabilidad y resistencia a la corrosión). Algunos institutos que rigen la clasificación de los aceros según su composición son: SAE, AISI, ASTM, NMX, UNS, y en Venezuela son clasificados por COVENIN.

2.1.2 Acero SAE 4340

Se da el nombre de aceros aleados a los aceros que además de los cinco elementos: Carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre contienen también cantidades relativamente importantes de otros elementos como el cromo, níquel, molibdeno, ente otros, que sirven para mejorar algunas de sus características fundamentales.

La influencia que ejercen esos elementos es muy variada y empleados en proporciones convenientes se obtienen aceros con ciertas características, que en cambio, no se pueden alcanzar con los aceros ordinarios al carbono.

En el sistema S.A.E.-A.I.S.I., los aceros se clasifican con cuatro dígitos. Los primeros dos números se refieren a los dos elementos de aleación más importantes y los dos o tres últimos dígitos dan la cantidad de carbono presente en la aleación.; el acero AISI 4340, es un acero aleado que contiene 0.4% de carbono, de los dos primeros dígitos 4 indica la presencia de cromo y molibdeno y el 3 de níquel, donde el principal aleante es el cromo como se presenta en la siguiente tabla (Tabla 2.1).

Esta aleación en particular presenta una muy buena resistencia a la fatiga y por esto es una excelente opción para el diseño de elementos de máquinas y aplicaciones que requieran una alta resistencia mecánica. Cabe destacar que estas propiedades pueden variar dependiendo del tratamiento térmico que se le aplica a esta aleación.

Tabla 2.1 Composición química en % de peso del acero SAE 4340

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
Porcentaje (%)	0.34	0.3	0.5	1.5	0.20	1.5

Dadas sus excelentes propiedades mecánicas (Tabla 2.2) este es un material con un amplio uso comercial en aplicaciones que requieran alta resistencia mecánica y elevadas solicitudes de servicio.

Tabla 2.2 Propiedades del acero SAE 4340

Tipo de Proceso	Resistencia a la Tracción	Límite a la Fluencia	Alargamiento al 2”%	Reducción del área	Dureza Brinell
Caliente y Maquinado	1227	689	10	30	363
Templado y revenido	1200	1124	16	48	352

2.1.3 Tratamientos Térmicos

Se conoce como tratamiento térmico al conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de permanencia, velocidad y presión de los metales o las aleaciones en estado sólido, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la elasticidad.

Los materiales a los que se aplica el tratamiento térmico son, básicamente, el acero y la fundición, formados por hierro y carbono.

El temple es un tratamiento térmico que aumenta la dureza, la resistencia mecánica, la tenacidad y a su vez la fragilidad del acero. Este consiste en calentar el acero por encima de su temperatura crítica superior, para luego ser enfriado bruscamente en un medio comúnmente líquido de agua, aceite, otros fluidos u otras sales fundidas, consiguiendo con esto la formación de martensita, que se traduce en una alta dureza y resistencia mecánica. La tendencia de formación de martensita de un acero se denomina templabilidad y depende principalmente del contenido de carbono del acero y a otros elementos aleantes.

El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero después de templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones. El tiempo de calentamiento y la temperatura dependen del contenido de carbono y de los materiales aleantes, así como también de las condiciones que se requieran como resultado del tratamiento.

Para conocer a qué temperatura debe elevarse el metal para que se reciba un tratamiento térmico, se deben conocer los diagramas de fase del material a tratar. Estos diagramas especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase, dependiendo de los materiales diluidos.

2.1.3.1 Tratamientos Termoquímicos

Son tratamientos térmicos en los que, además de los cambios en la estructura del acero, también se producen cambios en la composición química de la capa superficial, añadiendo diferentes productos químicos hasta una profundidad determinada. Estos tratamientos requieren el uso de calentamiento y enfriamiento controlados en atmósferas especiales. Entre los objetivos más comunes de estos tratamientos está aumentar la dureza superficial de las piezas dejando el núcleo más blando y tenaz, disminuir el rozamiento aumentando el poder lubricante, aumentar la resistencia al desgaste, aumentar la resistencia a fatiga o aumentar la resistencia a la corrosión.

2.1.3.1.1 Nitruración

La nitruración es un procedimiento termoquímico de endurecimiento superficial de aleaciones ferrosas en el cual se incorpora nitrógeno a una superficie de un acero determinado, mediante el calentamiento en una atmósfera de amoníaco y sin necesidad de un temple final. El resultado es un incremento de la dureza superficial y la resistencia a la corrosión de las piezas.

Existen dos tipos de nitruración, en horno e iónica. En el primer caso la pieza se introduce en un horno con una atmósfera de amoníaco y luego se calienta a temperaturas de 500–575 °C. Esto hace que el amoníaco se descomponga en nitrógeno e hidrógeno, al entrar en contacto con la superficie de la pieza el nitrógeno difunde hacia el interior de la misma y forma nitruros de aluminio, cromo, molibdeno y hierro, creando una capa superficial de elevada dureza.

En el caso de la nitruración iónica, las moléculas de amoníaco se rompen mediante la aplicación de un campo eléctrico. Esto se logra sometiendo al amoníaco a una diferencia de potencial de entre 300 y 1000 V. Los iones de nitrógeno se dirigen hacia el cátodo (que consiste en la pieza a tratar) y reaccionan para formar los nitruros con los aleantes.

La nitruración permite la obtención de una capa superficial con una estructura rica en nitruros y carbonitruros, muy bien definida que está formada por una capa periférica (capa blanca), denominada capa de compuesto o capa de combinación, y una segunda capa subyacente a la primera, llamada zona de difusión.

Dado que después de la nitruración las piezas ya adquieren dureza superficial, no es necesario enfriarlas rápidamente desde la temperatura de nitruración. Esto evita las deformaciones provenientes del enfriamiento rápido. Además, siempre que la temperatura de nitruración sea inferior a la temperatura de revenido, las propiedades mecánicas del núcleo de la pieza quedarán inalteradas y serán las mismas a las obtenidas previamente del tratamiento de temple y revenido. En un principio, para lograr una nitruración efectiva en los aceros al carbono, es condición necesaria cumplir al menos con los siguientes factores:

Primero, la temperatura de nitruración debe ser inferior a la del eutectoide: si se nitrura un acero al carbono extradulce (sin aleantes) a 700°C en una atmósfera de amoníaco, se obtendría una capa relativamente dura, pero tan frágil que el proceso no tendría aplicación

industrial. La principal causa de esa gran fragilidad es la aparición del eutectoide braunita que se forma cuando la nitruración se realiza a temperatura superior a 590°C . El mecanismo de nitruración difiere bastante al de cementación, en la cementación se emplean temperaturas elevadas (mayores a la eutectoide) para facilitar la solubilidad del carbono en la austenita. La nitruración se efectúa a menores temperaturas (alrededor de 500°C), inferiores a la eutectoide braunita (590°C) en las que el porcentaje de nitrógeno que se puede disolver en el acero ferrítico es muy pequeño

Segundo Es necesaria la presencia de aleantes formadores de nitruros, en un acero al carbono ordinario, la difusión del nitrógeno hacia el interior se efectúa con más facilidad que en los aceros aleados. Sin embargo, se obtendrían durezas superficiales inferiores a los 60 HRC. Esta dureza se incrementa hasta 70 HRC (1000HV) si el acero presenta aleantes formadores de nitruros (Al, Cr, Mo, V). Además, la adherencia de la capa se incrementa significativamente. Los mecanismos de endurecimiento más importantes que explican el incremento de la dureza son: endurecimiento por la precipitación de los nitruros, bloqueo de planos de deslizamiento del hierro alfa y la presencia de tensiones de compresión originada por el incremento de volumen asociado a la formación de los nitruros.

2.1.3.1.2 Microestructura de la capa nitrurada

La capa nitrurada posee las siguientes zonas distintivas: La capa blanca, la zona de difusión, la zona de transición, y el núcleo, según se muestra en la Fig. 2.1

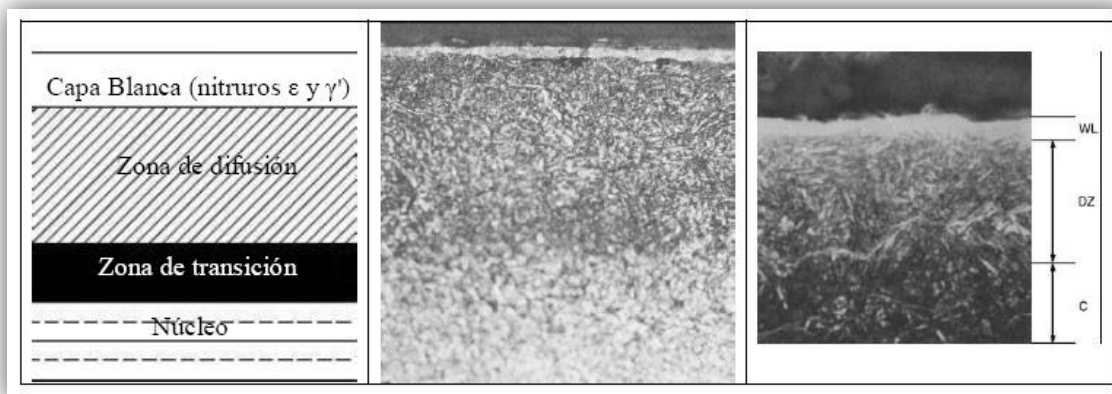


Fig. 2.1 Zonas distintivas de la capa nitrurada.

La capa blanca recibe este nombre por el color que toma cuando se la ataca con Nital. Está constituida por las fases ϵ y γ' y tiene un espesor típico de hasta 25 μm . La concentración de cada fase depende de la composición química del acero, principalmente el contenido de carbono, y de la temperatura, composición del gas y tiempo de nitruración. Esta capa es muy dura y quebradiza y no es deseada en la nitruración, pudiendo ser removida con un ligero mecanizado en caso de ser necesario

2.1.3.1.2 Ventajas de la nitruración

- Dureza elevada, después de la nitruración se consigue una gran dureza en donde se pueden conseguir valores de HV 650 a 110 según sea el material que se utiliza. Las capas con dureza elevada son menos tenaces que las de menores valores de HV. La capa nitrurada confiere resistencia al desgaste.
- Gran resistencia a la corrosión: después de la nitruración, los aceros tienen mayor resistencia a la corrosión por agua dulce, agua salada, vapor o atmósferas húmedas. En caso que interese la máxima resistencia a la corrosión, no debe rectificarse las piezas después de nitruradas.
- Ausencia de deformaciones: como las temperaturas del proceso no son tan elevadas no es necesario realizar un enfriamiento rápido desde la temperatura de nitruración.
- Retención de dureza a elevadas temperaturas. Las capas nitruradas conservan gran dureza hasta los 500 °C, especialmente cuando la duración del calentamiento no es muy prolongada.

2.2 Fractura de los materiales

La fractura simple es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a una tensión aplicada constante y a temperaturas que son relativamente bajas en comparación con la temperatura de fusión del material. Existen varios tipos de tensión entre estas están la de tracción, compresión, cizalladura o torsión. Cualquier proceso de fractura está compuesto de dos etapas, la formación y la propagación de una fisura.

2.2.1 Tipos de fracturas

2.2.1.1 Fractura frágil

La fractura frágil se caracteriza por tener una deformación plástica inapreciable, además ocurre por una propagación rápida de la grieta. La dirección del movimiento de la grieta es casi perpendicular a la dirección de la tensión aplicada y produce una superficie de fractura relativamente plana. En la mayoría de los materiales cristalinos frágiles, la propagación de la grieta corresponde a una sucesiva y repetida rotura de enlaces atómicos a lo largo de planos cristalográficos. Este tipo de fractura se denomina transgranular, debido a que las grietas pasan a través de los granos. Por el contrario, en algunas aleaciones, la propagación de la grieta ocurre a lo largo de los bordes de grano; esta fractura se denomina fractura intergranular.

2.2.1.2 Fractura dúctil

El proceso de fractura dúctil normalmente ocurre en varias etapas. En primer lugar, después de iniciarse la estricción, se forman pequeñas cavidades, o microcavidades, en el interior de la sección. Posteriormente, a medida que la deformación aumenta, estas microcavidades se hacen mayores, se juntan y coalescen para formar una grieta elíptica, la cual tiene su eje mayor perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada. La grieta continúa creciendo en esta dirección perpendicular y finalmente, se produce la fractura por la rápida propagación de una grieta alrededor del perímetro exterior de la estricción.

2.3 Fatiga

La fatiga es la disminución de la resistencia de un material debida a esfuerzos repetitivos o de forma variable, que pueden ser mayores o menores que la resistencia a la cedencia. Este fenómeno ocurre de forma común en componentes sujetos a cargas dinámicas de autos, aviones, álabes de turbinas, resortes, cigüeñales y demás maquinaria, implantes biomédicos y productos al consumidor como zapatos, que están sujetos en forma constante a cargas repetitivas en forma de tensión, compresión, flexión, vibración, dilatación térmica y contracción u otros. Aunque esos esfuerzos son con mucha frecuencia menores a la resistencia a la fluencia causan la falla por fatiga si se aplican una cantidad

suficiente de veces. Sin embargo este tipo de fractura también ocurre por encima de la resistencia a la cedencia del material.

Para obtener medidas cuantitativas de resistencia a la fatiga, es necesario realizar ensayos en condiciones controladas y para ello 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 son utilizados principalmente para determinar la influencia de la resistencia a la fatiga en factores como elementos de aleación, tratamiento térmico o acabado superficial y estos pueden hacerse en probetas lisas o entalladas, a baja o alta temperatura, o bajo condiciones corrosivas.

2.3.1 Etapas de una falla por fatiga

Cuando una pieza se rompe en cualquier tipo de aplicación, es posible al observar la superficie de falla determinar si esta ha fallado por sobrecarga, fatiga u otro fenómeno. Una falla por el fenómeno de la fatiga se generaliza en tres etapas: nucleación de la grieta, propagación de la grieta y fractura. Es posible establecer si una pieza ha fallado por fatiga en el caso que se pueda observar el desarrollo de estas sobre la superficie de falla de la misma.

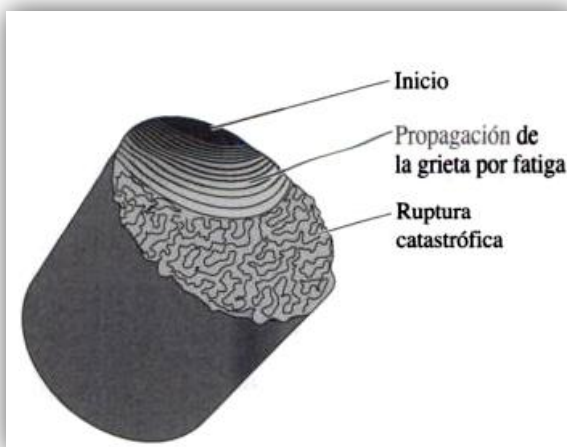


Fig. 2.2 Etapas del fenómeno de la fatiga.

2.3.2 Esfuerzos presente en la fatiga

Como ya se ha definido anteriormente, los esfuerzos que deben estar presentes para que ocurra el fenómeno de la fatiga deben ser cíclicos o periódicos de tensión. Estos esfuerzos se pueden encontrar en cualquier tipo de máquina en operación y también es posible determinarlos al conocer la naturaleza de la aplicación de dicha máquina.

Generalmente se pueden clasificar estas solicitaciones para conocer de mejor manera como están siendo afectados los componentes de una máquina determinada a lo largo del tiempo. Durante estos ciclos de esfuerzo se pueden determinar un esfuerzo máximo, un esfuerzo mínimo y un esfuerzo medio. Las solicitaciones repetitivas pueden ser clasificadas en:

2.3.2.1 Tensiones repetidas

En este caso los elementos de máquina o piezas están sometidos a esfuerzos pulsantes o intermitentes que no varían su signo a lo largo del tiempo. Es decir que tanto el esfuerzo máximo, mínimo y medio son del mismo signo. Un caso particular de este tipo de cargas es el de tensiones repetidas intermitentes, donde una de la tensión mínima es igual a cero (0). Como se muestra en la fig. 2.3

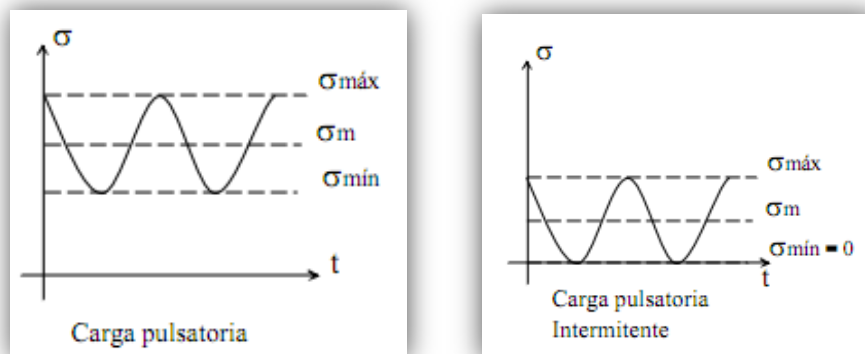


Fig. 2.3 Curvas de Esfuerzo Vs Tiempo para cargas pulsatorias.

2.3.2.2 Cargas oscilantes

Durante este tipo de cargas o esfuerzos máximos y mínimos son de distinto signo. Es decir que el esfuerzo máximo será de signo contrario al esfuerzo mínimo para un período de tiempo dado, el signo del esfuerzo medio dependerá del caso. Para este tipo de cargas también existe un caso particular en donde las cargas extremas son de igual magnitud pero de distinto signo, es decir son directamente opuestas y el valor del esfuerzo medio es nulo.

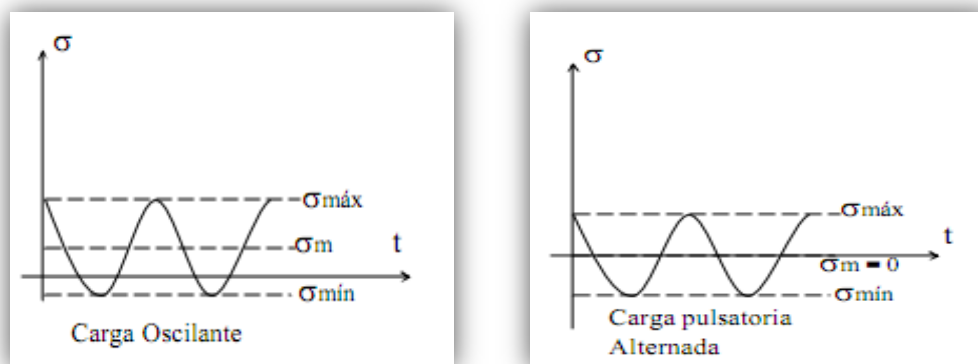


Fig.2.4 Curvas de Esfuerzo Vs. Tiempo para cargas Oscilantes

2.3.2.3 Esfuerzos aleatorios

En esta clasificación de esfuerzos se consigue la presencia de todos los tipos de esfuerzos estudiados anteriormente ya que se consiguen magnitudes positivas de esfuerzos que representan valores de crecimiento diferentes, magnitudes negativas bajo períodos de tiempo diferentes, así como períodos de arresto donde no existen cargas de ninguna naturaleza.

Se puede inferir que la realidad de muchos elementos de máquinas no es gobernada bajo patrones regulares donde se consigan períodos de tiempo establecidos, crecimientos constantes de esfuerzos y valores exactos de magnitudes máximas o mínimas, así que en la realidad el acercamiento que mejor describe la gran mayoría de elementos estudiados en fatiga es este tipo de esfuerzos mixtos que entre otras cosas originan la variación entre morfologías de superficie de fractura, otorgándole particularidades al estudio de las

superficie, como distintos puntos de nucleación de grietas, velocidades variantes en la propagación de grietas, períodos de arresto prolongados que ocasionan la oxidación y corrosión en un sector particular de la superficie, entre muchas otras situaciones que no se pudieran dar explicación si se siguiera un patrón regular e invariable de ciclos y esfuerzos. (ASM Handbook (1985) “Failure Analysis and Prevention”).

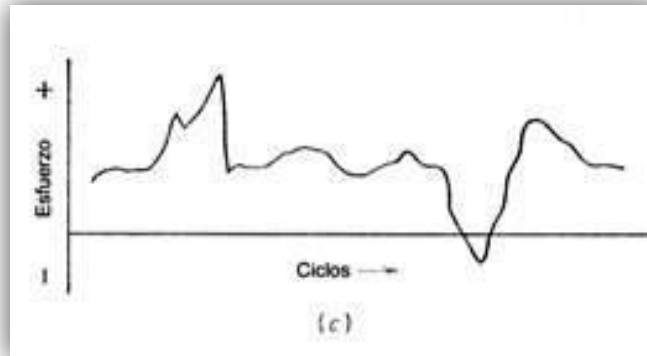


Fig.2.5 Representación de esfuerzos aleatorios

Para los casos anteriores de esfuerzos durante la fatiga podemos definir el esfuerzo medio como:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (E.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (E.2)$$

Como la amplitud de tensión dinámica, también conocida como tensión variable o revertida. Finalmente llamaremos relación de carga a:

$$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (E.3)$$

- Los ciclos con igual valor de r se denominan ciclos semejantes.
- Para ciclo intermitente $r = 0$
- Para ciclo alterno simétrico $r = -1$

Cualquiera de las cargas que hemos mencionado recientemente puede ser considerada como resultante de la superposición de dos tensiones: una constante de valor σ_m y otra alternada de amplitud σ_a .

La experiencia indica que la resistencia a la fatiga depende sólo de la amplitud de la tensión dinámica σ_a y del valor de la tensión media, influyendo muy poco la variación entre las tensiones extremas. Es decir que no influye la variación del tiempo en el cual estos esfuerzos sean aplicados. Entonces para un mismo material la resistencia a la rotura será la misma en cualquiera de los casos representados en la figura.

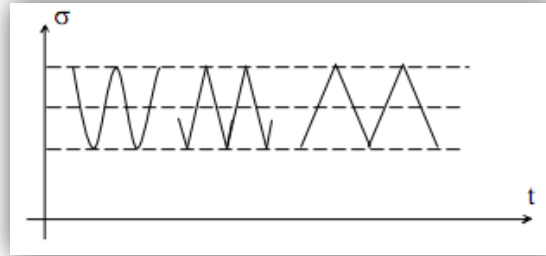


Fig.2.6 Representación esfuerzos vs. Tiempo

Quiere decir que para juzgar sobre la resistencia a la fatiga en el caso del ciclo dado, es suficiente conocer los valores de σ_{\max} y σ_{\min} o bien σ_m y σ_a .

2.3.3 Límite de fatiga

Cada metal sometido a un esfuerzo constante y periódico posee un límite a la fatiga que corresponde a la amplitud máxima del esfuerzo que puede ser aplicado, este concepto está asociado al valor de esfuerzo por debajo del cual no ocurre fractura independientemente del número de ciclos de esfuerzo bajo los cuales está sometido el material.

Existen factores involucrados que determinan el nivel de esfuerzos que siempre están vinculados las particularidades encontradas en el elemento que se relacionan con situaciones como: posibles concentradores de esfuerzos, debido a rugosidad superficial derivada del proceso de fabricación del elemento, esfuerzos residuales en la superficie del material que condiciona puntos para nucleación de grietas en potencia, así como ambientes en los cuales operan dichos elementos y las condiciones de corrosión presentes en el servicio del elemento. La unión de estos y otros factores determinan la variación en la resistencia de fatiga de un elemento, ya que a pesar de contar con un comportamiento definido para un material en específico, las particularidades encontradas en cada elemento

hace que el nivel de esfuerzos para el cual un elemento se considera que tiene vida infinita o mayor a 10 millones de ciclos fluctúe alrededor de un punto conocido y ofreciendo un intervalo de esfuerzos que está íntimamente relacionado a las características que puede presentar el elemento mencionadas anteriormente.

Para conocer este valor del esfuerzo en cualquier material se deben de hacer un número de ensayos normalizados para la fatiga. El procedimiento más común y preciso es de ensayar un número de probetas idénticas variando la carga aplicada en cada ensayo y registrando para cada valor de esfuerzo aplicado el número de ciclos para el cual falla cada probeta. Cuando se alcanza el valor de esfuerzo durante el cual la probeta ensayada no falla, para un número de ciclos establecidos, entonces se ha alcanzado el límite a la fatiga. Generalmente esta información es ilustrada en gráficas donde se puede encontrar el valor de esfuerzo utilizado en el eje de las ordenadas y el número de ciclos al que falló la probeta en el eje de las abscisas como se observa en la Fig.2.7.

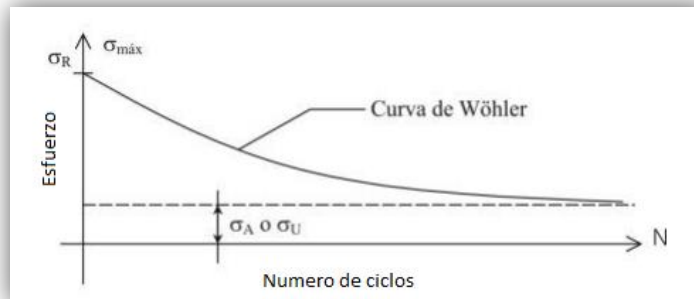


Fig.2.7 Curva de Wohler para fatiga

2.3.4 Vida a la fatiga

Es el parámetro que indica la cantidad de ciclos (N_f), necesarios para que un material sometido a esfuerzos pueda fallar. Se divide en tres etapas en las que se encuentra la iniciación de la grieta (N_i), la propagación de grietas (N_p) y la fractura súbita. Debido a esto la vida en condiciones de fatiga se puede establecer en términos de cantidad de ciclos aplicando la siguiente ecuación.

$$N_f = N_i + N_p \quad (\text{E.4})$$

N_i : Cantidad de ciclos que se requieren para iniciar una grieta discernible, lo que está influido principalmente por el nivel de esfuerzos, concentradores de esfuerzos, partículas de segunda fase, imperfecciones cristalinas y condiciones del medio ambiente.

N_p : Cantidad de ciclos que se requieren para propagar o hacer crecer la grieta en forma estable hasta un tamaño crítico, después del cual se presenta la fractura súbita; Dicho número es afectado principalmente por el nivel de esfuerzos, orientación microestructural y medio ambiente.

2.3.5 Curva Esfuerzo vs Numero de Ciclos

Existen múltiples ensayos para medir las propiedades de fatiga en materiales, uno de los más comunes es el ensayo de flexión rotativa, el cual se lleva a cabo bajo condiciones controladas, donde el esfuerzo medio, S_m , es nulo y la relación de esfuerzos $R = -1$. Los datos obtenidos de este ensayo son utilizados para realizar la curva $S-N$.

La curva $S-N$ o curva de Whöler se genera ensayando un numero de probetas similares, sometiendo cada una a un valor particular de carga. Se comienza por un valor alto de esfuerzo, el cual usualmente tiene un valor de dos tercios del límite de fluencia, y se cuenta el número de ciclos (N) que resiste la probeta bajo esta carga. Este procedimiento se repite disminuyendo gradualmente el valor de la carga y contabilizándose el número de ciclos para cada ensayo.

Estos datos son representados en escala log-log, o semi-log. Es el número de ciclos (N) el que se representa en la escala logarítmica ya que este puede variar de unos millares a muchos millones, cuando se representan los valores de esfuerzo en escala logarítmica, lo que se busca es que la representación de los datos se aproxime a una línea recta.

Es posible separar en zonas características y bien definidas, la mayoría de las curvas $S-N$, a) zona de bajo y medio ciclaje y una zona b) de alto ciclaje. Otras zonas que pueden identificarse y que son independientes de las antes mencionadas son, c) vida finita y d) vida infinita.

Se considera bajo ciclaje al área de la curva que se encuentra entre 1 y 10^3 ciclos, donde los especímenes resisten altas cargas que producen deformación tanto plástica como

elástica. A partir de los 10^3 ciclos se considera zona de alto ciclase y esta se asocia a cargas más bajas, donde la deformación es netamente elástica y se obtienen vidas más prolongadas

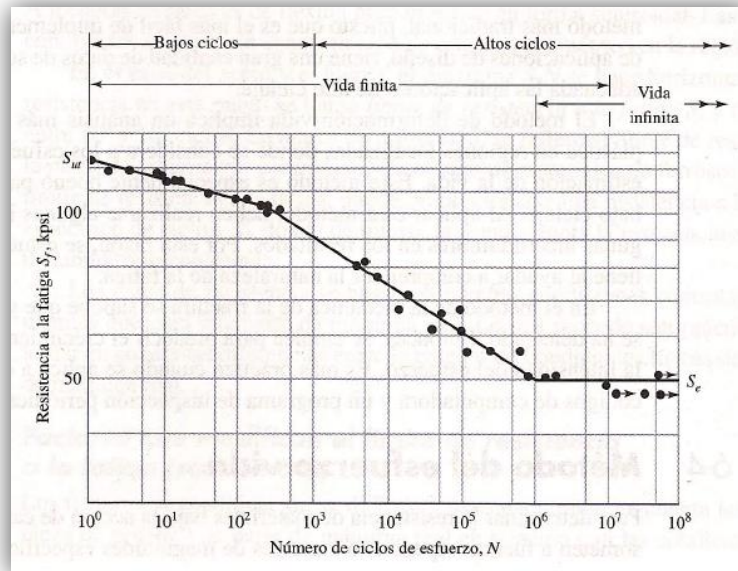


Fig. 2.8 Diagrama S-N.

En la figura se aprecia un cambio brusco en el comportamiento de la curva, entre la zona de vida finita (10^0 a 10^6 ciclos) y vida infinita (más de 10^6 ciclos), esto para el caso de los aceros. A partir de la zona de vida infinita no se aprecian daños en el material, por lo que podríamos inducir que para esfuerzos por debajo de este valor, el material resistirá infinitamente los esfuerzos alternantes, por lo que no se evidenciara el fenómeno de fatiga.

2.3.6 Modelos curva S/N

Desde que A. Whöler, alrededor de 1850, comenzó a estudiar en Alemania el comportamiento de los materiales sometidos a cargas cíclicas, muchas han sido las funciones sugeridas para presentar la conducta del material. Una de las más comunes es la relación de Basquin, en la cual se modela mediante una hipérbola, donde b es el llamado coeficiente de Basquin, el cual es de valor negativo, que para la mayoría de los metales su valor se encuentra entre $-0,05$ y $-0,12$; Se representa el valor del coeficiente de resistencia a la fatiga:

Modelo de Basquin $S_a = S_f(N_f)^b$ (E. 5)

Otros modelos como el de Stromeyer, Palmgren o Weibull, son modificaciones o caracterizaciones del modelo de Basquin.

Para la zona de alto ciclaje, la cual incorpora el límite de fatiga, un modelo que da una aproximación para esta área es la ecuación de Stromeyer:

Modelo de Stromeyer $S_a = S_e + \left(\frac{N_f}{C}\right)^m$ (E. 6)

Donde: S_e : Límite de fatiga del material

C y m : son valores constantes propios de cada material y se pueden determinar por mínimos cuadrados.

Ya que el modelo de Stromeyer posee poca exactitud con los resultados para bajo ciclaje, se introduce el valor K , que ajusta dichos resultados, a esta nueva ecuación se le conoce como modelo de Palmgren:

Modelo de Palmgren $S_a = S_e + \left(\frac{N_f+K}{C}\right)^m$ (E. 7)

2.3.7 Modelo probabilístico de Weibull.

En la actualidad es de vital importancia recurrir a los modelos probabilísticos, para estudiar la prevención de fallas en los procesos industriales, ya que estos nos permiten contar con técnicas de predicción adecuadas, las cuales son fundamentales para asegurar una producción de calidad.

La Distribución de Weibull es un complemento entre la Distribución Normal y la Distribución Exponencial, que son casos particulares de ella. Por su complejidad, sólo se usa cuando se anticipa que una de ellas es la que mejor describe la distribución de fallas o cuando se producen muchas fallas y los tiempos correspondientes no se ajustan a una distribución más simple. Este modelo tiene una extensa gama de uso, desde previsiones meteorológicas hasta prevención de fallas de cojinetes y mecanismos transmisores de potencia.

El modelo de Weibull permite estudiar la distribución de fallas de cierto componente que deseemos conocer, la cual a través de un registro de las fallas nos permite observar la variación en el tiempo, en el intervalo considerado como vida del elemento, además facilita la identificación de las fallas aparte de permitirnos contar con una herramienta de predicción de comportamientos.

Es posible modelar los esfuerzos a los que son sometidos tanto los materiales mediante la Distribución de frecuencias de Weibull, así como también pueden modelarse situaciones del tipo tiempo-falla, ó bien puede indicar la vida útil y la seguridad de un elemento de maquina gracias a la capacidad de cambiar de forma dependiendo de la variación del valor del parámetro de forma β .

En 1951 Weibull propuso que la expresión empírica más simple que podía representar una gran variedad de datos reales podía obtenerse escribiendo:

$$\int \lambda(\tau) d\tau = \left(\frac{\tau - \delta}{\alpha} \right)^\beta \quad (\text{E. 8})$$

Por lo que la fiabilidad será:

$$R(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau - \delta}{\alpha} \right)^\beta} \quad (\text{E. 9})$$

Donde: δ = Parámetro inicial de localización, el cual se utiliza para desplazar una distribución hacia un lado u otro. Este parámetro define el punto de partida u origen de la distribución.

α = Parámetro de escala o vida característica, Este es el parámetro que caracteriza a las distribuciones uniparamétricas. El parámetro de escala define cuán dispersa se encuentra la distribución.

β = parámetro de forma o pendiente de Weibull. Este parámetro define la forma de la distribución, y representa la pendiente de la recta de $F(t)$ vs t , describiendo el grado de variación de la tasa de fallas.

2.3.8 Factores que influyen en el comportamiento de la curva S/N

El comportamiento de los materiales sometidos a cargas fluctuantes se ve modificado por diversos factores que deben ser tomados en cuenta ya que estos cambian la resistencia a la fatiga, y al actuar en muchos casos en forma sinérgica podrían causar resultados no deseados en la respuesta del material. Entre estos factores se encuentran: la microestructura, tamaño, condición de la superficie, frecuencia de aplicación de carga y tensión media entre otros.

En cuanto a la microestructura, en la mecánica de sólidos se suelen modelar los metales como materiales homogéneos, isotrópicos y elásticamente lineales. En un nivel microscópico, algunas de estas suposiciones no son reales y la fatiga de metales es significativamente influenciada por la Microestructura.

La composición química, tratamiento térmico y trabajo en frío tienen una amplia influencia en el límite de fatiga de un material. Estos tres factores tienen un enorme número de variaciones sinérgicas y las generalizaciones concernientes a sus efectos en el comportamiento de la fatiga no son prácticas. Sin embargo, algunas consideraciones pueden ser formuladas para otros aspectos microestructurales.

En lo que respecta al tamaño del grano, los granos finos generalmente proveen una mejor resistencia a la fatiga que los gruesos, excepto a elevadas temperaturas donde puede existir el efecto combinado de fatiga y fluencia lenta. Estos reducen las deformaciones locales a lo largo de las bandas de deslizamiento disminuyendo la cantidad de deslizamiento irreversible y proveen de mayores bordes de grano para asistir la deflexión o detención de grietas transcrystalinas, reduciendo de esta forma la tasa de crecimiento de estas.

Igualmente, la anisotropía causada por el trabajo en frío incrementa la resistencia a fatiga cuando el material se somete a carga en la dirección del trabajo, a diferencia de cuando la carga es aplicada en una dirección transversal. Esto se debe al endurecimiento por deformación y también al producto de las estructuras orientadas en la dirección del trabajo en frío.

También, las inclusiones y porosidades actúan como concentradores de esfuerzo y son sitio común para la nucleación de microgrietas de fatiga, aunque también se producen fisuras en estos lugares durante el tratamiento térmico o el trabajo en frío del material. Bajo cualquiera de estas condiciones la resistencia a la fatiga es reducida por dichas discontinuidades.

En lo que se refiere al tamaño de la pieza, si el diámetro o espesor del espécimen es $<10\text{mm}$, entonces el comportamiento a fatiga (curvas S-N) es razonablemente independiente al diámetro o espesor. A medida que el diámetro o espesor incrementa hasta 50 mm, el límite de fatiga disminuye hasta un factor límite de alrededor de 0.7 a 0.8 del límite de la fatiga para especímenes menores de 10 mm en diámetro o espesor. Lo anterior es válido para el caso de flexión alternativa.

De la misma manera, en lo concerniente al acabado superficial, la mayoría de las fallas por fatiga se originan en la superficie, debido a que comúnmente el esfuerzo máximo se encuentra en esta zona, por lo tanto estas tendrán una influencia sustancial en el comportamiento a la fatiga. Los efectos de la superficie son causados por diferencias en la rugosidad, microestructura, composición química y esfuerzos residuales. La influencia será más pronunciada para vidas largas donde un mayor porcentaje de los ciclos transcurre en la nucleación de la grieta.

En las operaciones de mecanizado se producen inevitablemente pequeñas rayas y surcos en la superficie de la pieza por acción de las herramientas de corte. Estas marcas superficiales pueden limitar la vida a fatiga. Se ha observado que mejorando el acabado superficial mediante pulido aumenta significativamente la vida a fatiga.

Uno de los métodos más efectivos para aumentar la vida a la fatiga es mediante la introducción de esfuerzos residuales de compresión en una capa delgada superficial. Por consiguiente, cualquier tensión externa de tracción es parcialmente contrarrestada y reducida en magnitud por el esfuerzo residual de compresión. El efecto neto es que la probabilidad de nucleación de la grieta, y por tanto de fractura por fatiga se reduce.

Por otra parte, en lo que concierne a la frecuencia de aplicación de carga, su influencia en el comportamiento a la fatiga de los metales es complicado por los efectos sinérgicos de la temperatura, ambiente corrosivo y sensibilidad del comportamiento esfuerzo-deformación del material con la tasa de deformación. Independientemente, las temperaturas elevadas y los ambientes corrosivos disminuyen la resistencia a la fatiga. El calentamiento del espécimen a frecuencias muy elevadas, debido al amortiguamiento de la histéresis, puede incrementar la temperatura del espécimen y cambiar el verdadero comportamiento a temperatura ambiente, lo cual es particularmente importante para metales de baja resistencia. En ausencia de corrosión y efectos de temperaturas y otros ambientes agresivos, los efectos de la frecuencia por encima de los 200 Hz pueden no ser tomados en cuenta. Mientras que para frecuencias en el rango de 1Hz a 200Hz los efectos en el comportamiento de fatiga son bajos para la mayoría de los aceros estructurales. Por lo contrario, si el intervalo de frecuencias es del mayor a los 1000 Hz, ocurren grandes cambios en la resistencia a la fatiga.

La dependencia de la vida a la fatiga con la amplitud de la tensión mediana se observa en el diagrama S-N (Fig.2.9), donde el aumento de la tensión media conduce a una disminución de la vida a fatiga.

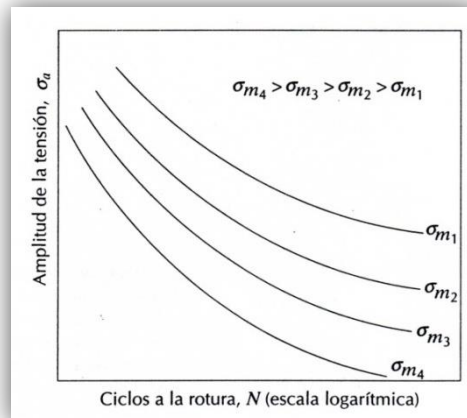


Fig. 2.9 Influencia de la tensión media σ_m en el comportamiento a la fatiga.

Asimismo, el diseño de un componente puede tener una influencia significativa en sus características de fatiga. Cualquier entalla o discontinuidad geométrica puede actuar

como un concentrador de tensiones y como lugar donde se puede nuclear la grieta de fatiga; estos detalles del diseño incluyen orificios, ranuras de chavetas, roscas y otros. Cuanto más aguda es la discontinuidad (es decir, cuanto menor es el radio de curvatura), más severa es la concentración de tensiones.

2.4 Antecedentes

Entre las investigaciones anteriores relacionadas al tema de este trabajo especial de grado podemos hacer referencia a las que a continuación se exponen

Conociendo con este trabajo la técnica para realizar nuestras evaluaciones podemos observar un trabajo que sintetiza los procedimientos que se realizaran durante este trabajo de investigación.

- **RODRÍGUEZ GONZALO; et al (2010)**, titulado ***“Evaluación del comportamiento a la fatiga de un acero microaleado AISI 4340 recubierto con depósitos nanoestructurados de WC-12%Co sintetizados por termo-rocado”***. Este trabajo tiene por objeto la evaluación del comportamiento a la fatiga de probetas de acero AISI 4340 recubiertas con polvos nano estructurados de WC-12%Co a través del método de deposición de proyección de partículas fundidas a altas velocidades HVOF. Además, también se realizó una optimización del método de deposición del recubrimiento. La evaluación del comportamiento del sustrato recubierto se realizó en el intervalo de vida finita en términos de resistencia a la fatiga con esfuerzos que variaron entre 471MPa y 650MPa. En la optimización realizada en este estudio se recubrieron 6 muestras con condiciones de deposición diferentes, los parámetros a variar para lograr las 6 condiciones diferentes fueron la tasa de alimentación de los polvos y el flujo de combustible, en valores comprendidos entre (70 y 100 gr/min) y (5-6, 6-7, 7-8 GPH) respectivamente.

Con relación a los ensayos de fatiga, se determinó que ligeras diferencias en la resistencia a fluencia no generan una diferencia apreciable en la resistencia a la fatiga. Por otra parte, los ensayos de fatiga-corrosión han demostrado que a bajos esfuerzos alternantes, la reducción de la vida a la fatiga es mayor que a elevados esfuerzos, en comparación con los ensayos de fatiga al aire.

- *DA SILVA, JOSE A; et al (2001)*. Nos presentan su trabajo titulado **“Comportamiento a la fatiga y fatiga-corrosión del acero SAE 4140 recubierto por termo-rociado”** en el cual se determina como afecta el NiCrBSiW (Colmonoy 88) termo-rociado mediante HVOF en la vida a la fatiga y fatiga-corrosión. De este estudio se concluye que efectivamente la aplicación de un recubrimiento de este tipo sobre el acero SAE 4140 disminuye la vida a la fatiga del metal base. Como material de recubrimiento para seguir mejorando las propiedades mecánicas y tribológicas de los materiales de manera económica se ha desarrollado la tecnología de los recubrimientos metálicos y cerámicos.

Debido al comportamiento mecánico en los últimos años se han realizado una serie de estudios a evaluar las propiedades mecánicas

- *VILLALOBOS CRISANTO; et al (2012)* propone su trabajo llamado **“comportamiento a la fatiga del acero SAE 4340 recubierto con películas delgadas, obtenidas por deposición física en fase vapor asistida por plasma (PAPVD)”** en el cual evaluó el comportamiento a la fatiga y fatiga corrosión en términos tanto de la resistencia y vida a la fatiga como del límite de fatiga en un acero AISI 4340 templado y revenido recubierto con películas delgadas del tipo multicapa denominada Balinit Futura (TiAlN/TiN) y del tipo bicapa denominada BalinitHardlube (TiAlN/WC/C), obtenidas por medio de la técnica PAPVD. Donde el utilizo 206 probetas normalizada según la norma ASTM A 370 y ASTM E606 para ensayos de tracción y fatiga. El realizo una comparación entre ambos recubrimientos a través de ensayos de Fatiga al aire y corrosión y 4 niveles de esfuerzos distintos. El estudio de vida a la fatiga, se realizó mediante la construcción de la curva S-N tanto del metal base, como de los sistemas substratos recubrimientos objetos del presente estudio, modeladas a partir de las ecuaciones de *Basquin* y *Stromeyer*, previo tratamiento de los datos a través de la metodología propuesta por *Weibull*. También evaluó superficialmente muestras cilíndricas para determinar la dureza compuesta del conjunto recubrimiento-substrato. De estos resultados se utilizaran para comparar nuestro material y sus mejoras en función a la configuración propuesta por VILLALOBOS C. (2012).

CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO

3.1 Diagrama de Flujo

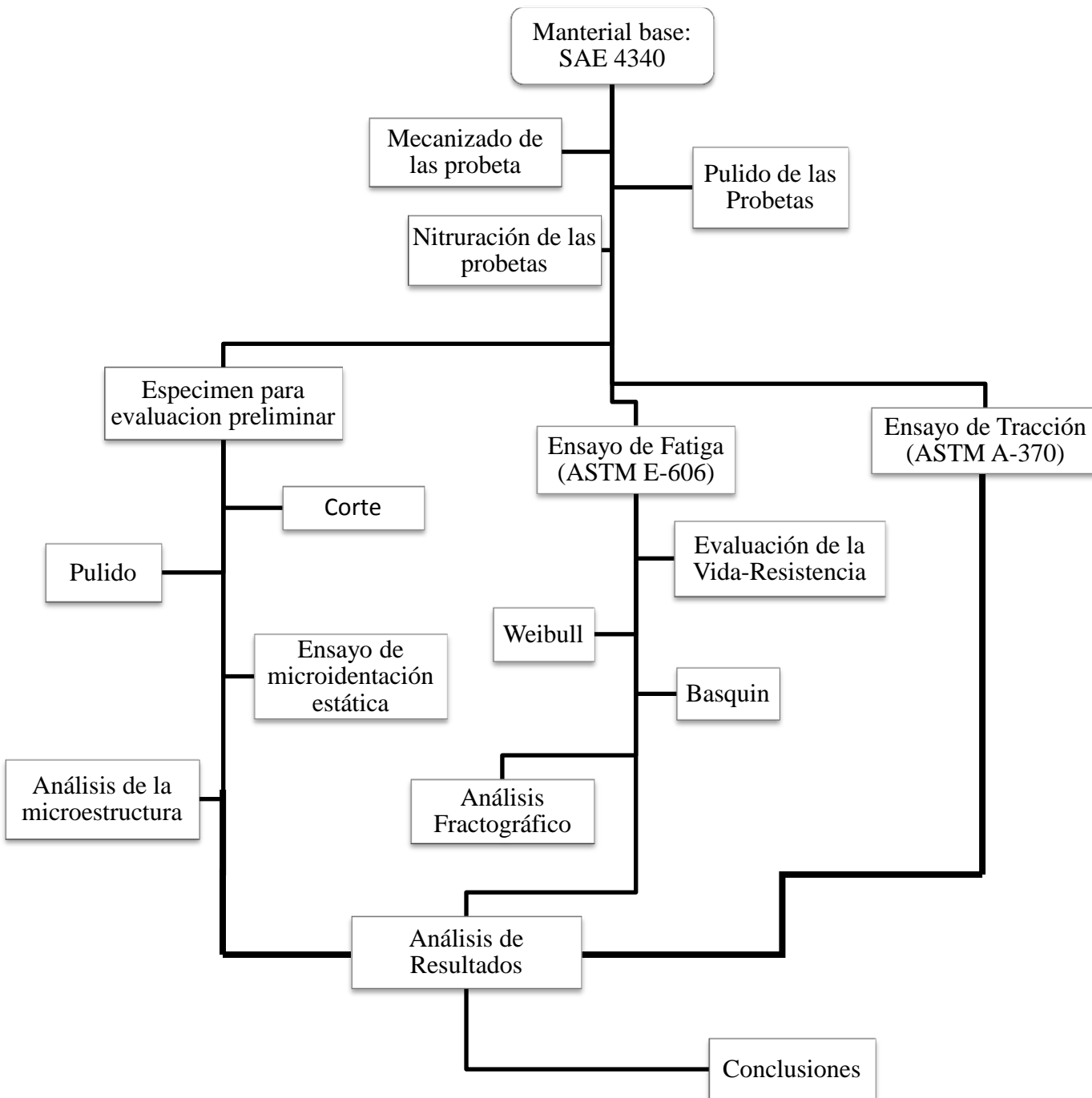


Fig. 2.1 Diagrama de flujo de trabajo

3.2 Distribución de las probetas

En la tabla 3.1 se pueden observar los tres tipos diferentes de probetas para los diversos ensayos con sus respectivas normas que las caracterizan.

Tabla 3.1. Probetas requeridas para la realización de los ensayos.

Ensayo	Condición	Cantidad	Norma
Microindentación Estática	SAE 4340 Nitrurado	6	S/N
Ensayo de Tracción	SAE 4340 Nitrurado	4	ASTM A-370
Ensayo de fatiga al aire	SAE 4340 Nitrurado	24	ASTME E-606

3.3 Dimensionamiento de las probetas de tracción

El diámetro de los hombros de las probetas de tracción fue de 12,7 mm. Además, la longitud de las probetas de tracción fue de 120 mm, ya que las mordazas de la máquina donde se realizarán los ensayos pueden alojar probetas de 120 mm de longitud mínima sin la utilización de barras o accesorios de extensión.

En lo referente a las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de tracción, éstas deben cumplir con las recomendaciones sugeridas por la norma ASTM A 370. Dichas dimensiones son: diámetro de la sección de ensayo (d) igual a $6,25 \pm 0,12$ mm, longitud de la sección de ensayo de 32 mm y radio de filete entre la sección de ensayo y el hombro de la probeta R igual a 5 mm.

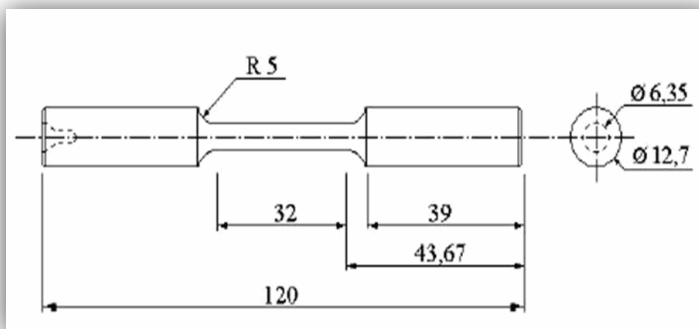


Fig. 3.2 Esquema del dimensionamiento de las probetas de Tracción según la norma A-370

3.4 Dimensionamiento de las probetas de fatiga de radio continuo

El diámetro de los hombros de las probetas de fatiga es comúnmente de 12,7 mm y la longitud de 101,6 mm. Esto a partir de la norma ASTM E-606.

En lo referente a las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de fatiga de radio continuo, estos son comúnmente los siguientes: diámetro menor de la sección de ensayo (d) igual a 6,35 mm, radio continuo de la sección de ensayo de la probeta R igual a 58,74 mm. La figura 3.3 presenta esquemáticamente el dimensionamiento de las probetas antes mencionadas.

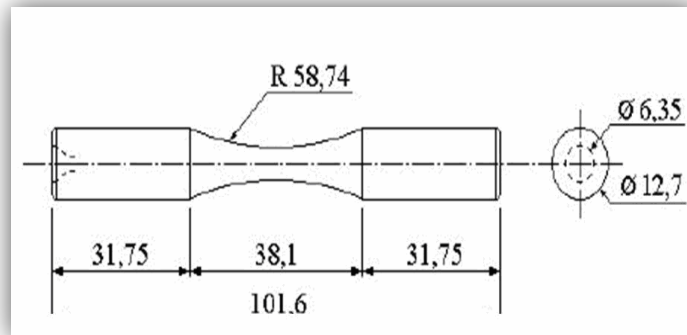


Fig. 3.3 Esquema de las probetas de radio continuo para ensayos de fatiga en flexión rotativa según la norma ASTM E 606

3.5 Proceso de fabricación de las probetas

Primero se procedió a dibujar la probeta en tres dimensiones en un programa CAD (Dibujo asistido por computadora).

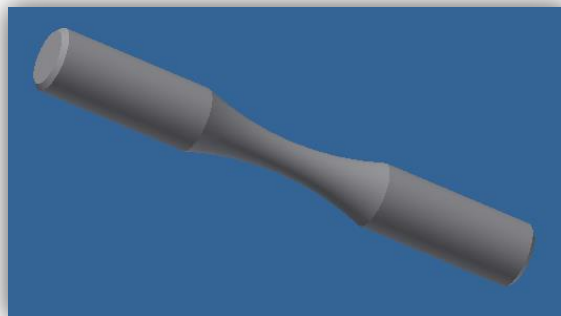


Fig. 3.4 Probeta dibujada en programa CAD

Luego se trasladó esta información en un programa CAM (Mecanizado asistido por computadora). Donde se pudo programar el proceso de mecanizado.

Se utilizó un torno CNC para la fabricación de las probetas, con este proceso se pudo minimizar el margen de error en los diámetros de las probetas y así obtener unos resultados más confiables.



Fig. 3.5 Torno CNC Milltronics ML14

3.6 Preparación de las probetas previo al tratamiento termoquímico

Fue necesario la realización de una serie de procedimientos previo al proceso de nitruración del material. Para que se obtuviera una distribución uniforme de la capa de nitrurado en las probetas fue necesario pulirlas en su totalidad utilizando como ayuda un torno eléctrico, las probetas pasaron por cierta cantidad de lijas de diferentes granulometrías hasta llegar al punto en que no se podía apreciar ningún rastro o marca del mecanizado, luego fueron recubiertas por un petrolato para evitar la oxidación previa al tratamiento de nitruración.



Fig. 3.6 Probetas pulidas

3.7 Proceso de nitruración

El proceso de tratamiento termoquímico de nitruración fue realizado en la empresa Ferrum Aceros, C.A. Ubicada al final de la Av. Zona industrial, Petare. Esta es una empresa venezolana encargada de la venta y distribución de acero como también en realización de tratamientos térmicos y termoquímicos, que con su amplio recorrido en el mercado poseen la experiencia para la selección de los parámetros a utilizar en el proceso de nitrurado.

Dicho tratamiento fue realizado mediante el proceso TENIFER® el cual se lleva a cabo a temperaturas entre 480-620°C, aunque la temperatura estándar es de 580°C. El proceso se lleva a cabo en un crisol de material especial, en donde se encuentra la sal fundida compuesta por Cianato y Carbonato, el agente activo en el baño de nitrurado es el cianato que se calienta en presencia de oxígeno y luego se descompone carbonatos y nitrógeno este último al reaccionar con la superficie del acero se forma la capa de nitruros con los aleantes del mismo y como residuo quedan los carbonatos.

3.8 Pulido de Muestras

Antes de realizar el ensayo de microindentación estática se tomaron varias muestras de las probetas ya nitruradas las cuales fueron cortadas de manera que se pueda obtener con mayor precisión los datos procedentes del indentador, debido a que dichas muestras poseían superficies irregulares o diámetros muy pequeño para ser manipuladas manualmente, se debió hacer un molde de acrílico alrededor de ellas para facilitar su manipulación.

Luego se procedió al proceso de pulido superficial de las muestras que consistió en pasar cada una de las 6 probetas por un conjunto de lijas de diferentes granulometrías las cuales fueron: 120, 180, 240, 360, 400, 600, 1000, 1200, 2000 granos por pulgada lineal. El procedimiento se basa en frotar la muestra contra la superficie de la lija, hasta que todas las marcas presentes en la probeta estén en la misma dirección del lijado, luego se gira la probeta 90 grados y se lija hasta que se borren las marcas de la dirección anterior y todas estén orientadas en la dirección actual, en este momento se pasa a siguiente lija de menor tamaño de grano. En la fig. 3.7 se ilustra la máquina para pulido marca STRUERS.



Fig. 3.7 Bandeja de lijado marca Struers, modelo LunnMajor.

Posteriormente se realizó un micrópulgura con alúmina en suspensión de 0.3 micrómetros al cual nos permito tener como resultado una condición totalmente uniforme desde el punto de vista superficial fig. 3.9 utilizando una pulidora marca BUEHLER fig. 3.8.



Fig. 3.8 Pulidora marca BUEHLER, modelo metaserv 2000 variable “speedgrinder-polisher”.



Fig. 3.9 Probeta luego de la fase de pulido.

3.9 Ensayo de Microindentación estática

Para conocer la dureza superficial que le proporciona el tratamiento termoquímico a nuestro acero se realizaron ensayos de indentación estática. Para garantizar confiabilidad se tomaron mediciones de 2 probetas de 3 distintos tipos de corte de la muestras nitruradas, las cuales fueron especificadas anteriormente, sumando un total de 6 especímenes, a través de un durómetro con un indentador piramidal de base cuadrada marca Buehler que se muestra en la fig. 3.10 en el cual se determina la dureza Vickers.



Fig. 3.10Equipo de microindentación estática BUEHLER

Este durómetro trabaja con un indentador piramidal de diamante de base cuadrada con un Angulo entre caras de 136° . Para obtener las dimensiones de las huellas es necesario medir las diagonales a través de oculares incorporados al sistema óptico del equipo. Para obtener la distancia de trabajo se debe ajustar el foco a través de tornillos micrométricos.

Luego de ser medidas estas diagonales se utiliza la siguiente formula la cual determina el valor de dureza en escala Vickers.

$$HV = \frac{1.854 L}{d^2} \quad (\text{E. 1})$$

Dónde:

L = carga aplicada

d = el promedio de la longitud de las diagonales medidas en la huella.

Este procedimiento se realizó con un barrido de cargas de 10g, 25g, 50g para cada corte, todo esto con la intención de lograr un muestreo representativo de la dureza, además de observar la dependencia funcional existente entre la carga y los valores de dureza obtenidos en el ensayo.

3.10 Análisis de la microestructura.

Luego del ensayo de indentación estática se procedió a analizar la microestructura de las probetas para comprobar y visualizar la profundidad de penetración del tratamiento termoquímico de nitruración. Para realizar este análisis se tuvo que hacer nuevamente un micropulido y seguidamente atacar las probetas con nital al 2% por 5 segundos cada una el cual permite observar y diferenciar la microestructura. Fue utilizado un microscopio óptico de marca Dell, modelo OPTIPLEX 330 que posee un zoom máximo de 500x el cual es el resultado de distintos juegos de lentes.



Fig. 3.11 Microscopio electrónico

Luego se utilizó para obtener las imágenes de la microestructura un programado llamado Buehler Omnimet 9.5 en donde se tomaron y compararon en los distintos cortes de las probetas nitruradas y material original sin ser nitrurado.

3.11 Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción se realizaron en la máquina de ensayo de tracción Losenhausen ubicada en el laboratorio de ensayos mecánicos de la escuela de mecánica de la facultad de ingeniería de la UCV, como se muestra en la fig. 3.12.



Fig. 3.12 Máquina de ensayo de tracción Losenhausen, año 1969

Esta máquina proporciona, mediante un sistema de poleas, la gráfica fuerza Vs. elongación en Megapondios y metros respectivamente. Para obtener los gráficos de Esfuerzo Vs. Elongación se deben utilizar los valores de las dimensiones iniciales de las probetas. Además de esto se debe realizar un ajuste a los valores de deformaciones conseguidos ya que la máquina no es infinitamente rígida y también sufre una deformación en el régimen elástico. Se corrigen los valores tomando la siguiente consideración.

$$\Delta L_{exp} = \Delta L_{prob} + \Delta L_{maq} \quad (E.2)$$

Donde:

ΔL : Variación de la longitud.

De la ley de Hooke (E.3) procedemos a despejar la variación de longitud (E.4).

$$F = \Delta L * K \quad (E.3)$$

$$\Delta L = \frac{F}{K} \quad (E.4)$$

Donde:

F: Carga.

K: Rigidez.

Sustituyendo la ecuación E.4 en la ecuación E.2 obtenemos.

$$\frac{F}{K_{exp}} = \frac{F}{K_{prob}} + \frac{F}{K_{maq}} \quad (E.5)$$

Al multiplicar por el inverso de la carga y despejar de la ecuación E.5 el valor de la K_{maq} , obtenemos.

$$K_{maq} = \frac{K_{prob} * K_{exp}}{K_{prob} - K_{exp}} \quad (E.6)$$

El valor de la constante de elasticidad experimental se obtiene de la pendiente del la curva de zona elástica de la gráfica carga vs variación de longitud.

$$K_{exp} = m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (E.7)$$

Por otra parte los valores de la variación de la longitud experimental se obtienen al leer de la gráfica producto del ensayo de tracción. Los valores de la variación de la longitud máquina se obtienen al sustituir en la ecuación E.18 el valor de la carga aplicada y de la constante previamente calculada.

Partiendo de (E.8) sabiendo que la deformación unitaria es (E.10) sustituimos en (E.9) y al despejar la Carga.

$$S = E * e \quad (\text{E.8})$$

$$S = \frac{F}{A_o} \quad (\text{E.9})$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (\text{E.10})$$

Donde:

e= Deformación unitaria.

E = Modulo de Elasticidad del Acero.

S= Esfuerzo.

Lo= Longitud inicial.

Ao = Área transversal inicial.

Se obtiene la expresión.

$$F = \frac{E * A}{L_o} * \Delta L \quad (\text{E.11})$$

Igualando de la ecuación (E.11) con la ley de Hooke (E.3), se obtiene la expresión que indica el valor de la constante de elasticidad de la probeta.

$$K_{prob} = \frac{E * A}{L_o} \quad (\text{E.12})$$

Previo al ensayo se registró la longitud inicial de la probeta, y el diámetro del cuello, con este se calcula el área de sección transversal de la probeta.

$$A_o = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (\text{E.13})$$

Donde d: Diámetro de la probeta.

Despejando de la ecuación (E.2) se obtiene el valor de la longitud corregida de la probeta.

$$\Delta L_{prob} = \Delta L_{exp} - \Delta L_{maq} \quad (E.14)$$

Una vez calculada la variación de la longitud de la probeta se procede a realizar la gráfica esfuerzo ingenieril (S) vs deformación unitaria (e), y esfuerzo real (σ) vs deformación real (ϵ).

Donde:

$$e_i = \frac{\Delta L_i}{L_o}$$

$$e_i = \frac{L_i - L_o}{L_o}$$

$$e_i = \frac{L_i}{L_o} - 1$$

$$\frac{L_i}{L_o} = e_i + 1 \quad (E.24)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_i}; A_i = \frac{A * L_o}{L_i}$$

$$\sigma = S * \left(\frac{L_i}{L_o} \right)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior la ecuación, se obtiene que:

$$\sigma = S * (1 + e_i) \quad (E.15)$$

$$\epsilon = \ln(1 + e_i) \quad (E.16)$$



Fig. 3.13 Montaje de la probeta en las mordazas.

3.12 Ensayo de fatiga

Los ensayos de fatiga fueron realizados en las instalaciones de la escuela de metalurgia y ciencia de los materiales, de la facultad de ingeniería, de la Universidad Central de Venezuela, utilizando una máquina de ensayo de fatiga en flexión rotativa tipo viga en voladizo, marca Fatigue Dynamics, modelo RBF-200, como la que se observa en la figura 3.14

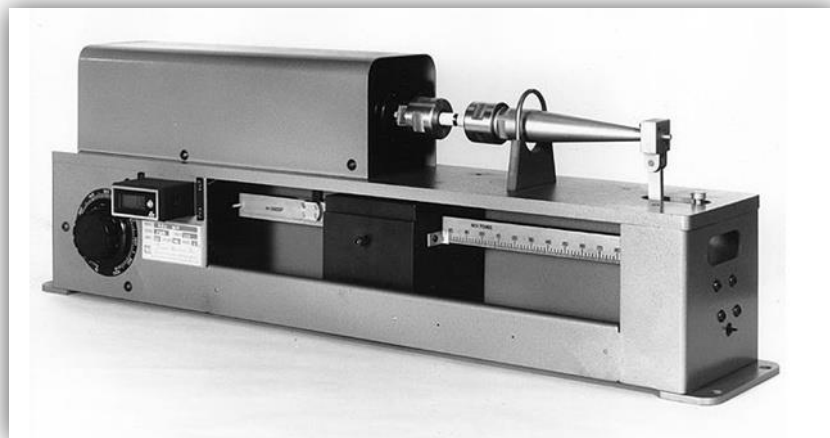


Fig. 3.14 Máquina de fatiga; Fatigue Dynamics, modelo RBF-200

Esta máquina cuenta con un variador de frecuencia que permite seleccionar velocidades entre 500 y 10.000 rpm y un registrador que permite contabilizar el número de ciclos. Cuando la probeta falla el contador se detiene y el número obtenido en éste será

directamente el número de ciclos de falla de la probeta ensayada. La máquina cuenta también con una barra calibrada con un contrapeso y su función es aplicar un momento flector en los especímenes siendo esta la responsable de generar el esfuerzo durante el ensayo.

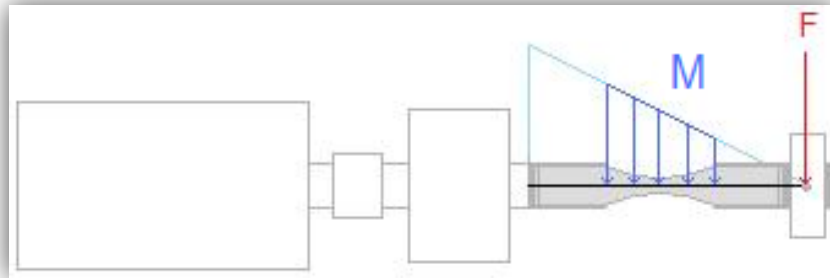


Fig 3.15 Representación Gráfica del Momento Flector ejercido en una Probeta de radio continuo

El montaje de las probetas se realizó sujetando sus extremos mediante mordazas acopladas al eje del motor eléctrico y a un eje cónico a través del cual se aplica una carga sobre la probeta con la barra graduada en función del momento flector (M) producido por un contrapeso móvil (figura 3.15). En vista que el nivel de esfuerzo necesario en cada ensayo se aplica a través de la barra calibrada, en función del momento flector, se debe calcular el valor del mismo para cada uno de los niveles de esfuerzo preestablecidos. Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$S = \frac{Mx C}{I} \quad (\text{E.17})$$

$$M = \frac{Sx I}{C} \quad (\text{E.18})$$

Donde:

M: Momento flector [Nm].

S: Esfuerzo aplicado [MPa].

I: Momento Polar del Inercia [mm^4].

C: Distancia entre el eje neutro de la carga hasta la superficie de la probeta en [mm].

Para una barra circular se tiene que:

$$I = \frac{\pi x D^4}{64} \quad (\text{E.19})$$

$$C = \frac{D}{2} \quad (\text{E.20})$$

Donde:

D: Diámetro de la probeta [mm].

Sustituyendo la ecuación E.19 y la ecuación E.20 en la ecuación E.18, se obtiene la siguiente ecuación:

$$M = \left(\frac{Sx \left(\pi x \frac{D^4}{64} \right)}{\frac{D}{2}} \right) = \frac{Sx \pi x D^3}{32} \quad (\text{E.21})$$

Por lo tanto la ecuación para el momento flector será:

$$M = 11,0955 x Sx D^3 [MPamm^3] \quad (\text{E.22})$$

Se estudiaron 20 probetas termoquímicamente nitruradas con 4 niveles de esfuerzo distintos (910; 850; 830; 790MPa) todos estos inferiores al esfuerzo de fluencia obtenido en el ensayo de tracción.

Los ensayos fueron realizados a una velocidad de 3500 rpm. Por razones estadísticas de minimización de la dispersión este parámetro fue constante en todo momento. Los resultados obtenidos fueron número de ciclos a falla para cada ensayo a diferentes niveles de esfuerzos. Estos datos fueron agrupados en una tabla de forma ordenada para posteriormente ser tratados estadísticamente con una herramienta computacional a través del modelo propuesto por Weibull. Se procedió a la construcción de la curva S-N de los

especímenes ensayados para facilitar una rápida visualización y así mismo ser comparado con la curva de la misma naturaleza pero sin la condición corrosiva.

3.13 Estudio Fractográfico

El siguiente estudio fue llevado a cabo para determinar los mecanismos de falla que actuaron sobre las probetas ensayadas a fatiga al aire. La técnica aplicada fue de microscopia electrónica por barrido (MEB) la cual permite analizar a través de la observación la superficie de fractura, zonas características como puntos de nucleación y crecimiento de grietas, marcas radiales, estriaciones y zonas de despegue. Se observó una muestra de cada nivel des esfuerzo aplicado a las probetas las cuales previamente debieron pasar por una limpieza ultrasónica debido a que estas poseían una capa de petrolato para evitar que se forme una capa de corrosión indeseada.

El estudio se realizó en el Centro de Microscopía Electrónica de la Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de los materiales de la Universidad Central de Venezuela. Para ello se empleó un microscopio electrónico marca HITACHI, modelo S-2400 “Scanning Electron Microscope” el cual es mostrado en la figura 3.16. El estudio fue realizado utilizando un voltaje de aceleración de 18kV y obtención de imágenes de haz de electrones secundarios.



Fig 3.16 Microscopio electrónico de barrido marca Hitachi S-2400

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación presentaremos de forma ordenada los resultados obtenidos por los ensayos realizados, en los cuales se incluyen tablas, gráficos y fotografías que permiten un mejor entendimiento y complemento de lo analizado para cada uno de los estudios que fueron realizados para luego ser comprados y discutidos. Primeramente se analizarán los valores obtenidos al ensayar las probetas de muestra nitruradas con el microindentador estático. Seguidamente se presentará tablas y gráficos que representan los ensayos de tracción aplicados en 5 probetas nitruradas donde se analizará su comportamiento, luego los valores conseguidos a través del ensayo de fatiga al aire de las 20 probetas nitruradas, y por último se presentará los puntos más relevantes de la evaluación fractográfica realizada a través del microscopio electrónico de barrido.

4.1 Estudio de microindentación estática

De las probetas de SAE 4340 nitrurado se tomó una muestra que consiste en 4 probetas distintas a las cuales se le hicieron ensayos de microindentación estática para conocer la dureza que le proporciona el tratamiento termoquímico. Para garantizar la confiabilidad se tomaron 4 mediciones por cada zona distintiva de la capa nitrurada de la muestra y se promedió utilizando cargas de 50g, a través de un durómetro con indentador piramidal de base cuadrada marca Buehler en el cual determina la dureza Vickers. Obteniendo como resultado la siguiente tabla de datos.

Tabla 4.1 Dureza HV promedio en cada zona distintiva de la capa de nitrurado

N° de Probetas	Superficie	Capa Blanca (11.0 μm)	Zona de Difusión (38.5 μm)	Zona de Difusión (52 μm)
Probeta 1	712,1	648,25	440,1	431,25
Probeta 2	768,8	661,85	406	414,95
Probeta 3	749,2	567,4	445,1	401,1
Probeta 4	777,5	645	444,75	356,35
Promedio	751,9	630,625	433,98	400,91

De estos valores obtenidos de las 4 probetas indentadas, se puede inferir que se genera una disminución de la dureza Vickers a medida que se acerca al núcleo de las probetas, este comportamiento es el esperado por el tratamiento termoquímico de nitruración realizado.

También se puede observar que a tan solo 52 μm en promedio de profundidad el aumento en la dureza disminuye casi un 100% su efecto en las probetas, obteniendo valores cercanos a la dureza del acero SAE 4340 sin tratamiento termoquímico. Esto se debe a que la penetración del tratamiento depende de la temperatura y tiempo del proceso y se puede apreciar que el tiempo fue menor a lo recomendado debido a que esta capa llamada zona de difusión tiene un espesor promedio de 1 mm después de la capa blanca la cual es de un máximo de 25 μm .

Para poder observar dicho tratamiento se realizó un estudio de la microestructura y apreciar las zonas distintivas de la capa nitrurada, en el acero a través del microscopio óptico.

4.2 Estudio de la Microestructura

El estudio de la microestructura se realizó para poder observar y diferenciar las diferentes zonas de la capa nitrurada, en la figura 4.1 revela una primera capa superficial oscura y uniforme que representa la capa de nitruros proveniente del tratamiento.



Fig. 4.1 Microestructura de la sección transversal de una probeta de acero SAE 4340 nitrurada.

4.3 Ensayo de tracción

Se realizó el ensayo de tracción de 4 probetas nitruradas cuyas medidas estaban regidas bajo la norma ASTM A370. A continuación se presenta los resultados obtenidos de las gráficas producto del ensayo de tracción a avance constante.



Fig. 4.2 Probetas a ensayar bajo la norma ASTM A370

De la probeta 1, 2, 3 y 4 se obtuvieron las siguientes tablas de resultados.

Tabla 4.2. Datos del ensayo de tracción Probeta N°1

Longitud Inicial (L_0)[mm]	Diámetro Inicial (D_0)[mm]	Fuerza Máxima (F_{max})[Mpa]	Longitud Final (L_f)[mm]
32,8	6,2	3,91	37
Diámetro Final (D_f)[mm]	Área Inicial (A_0) [mm ²]	Esfuerzo de Fluencia (S_y) [Mpa]	Área Final (A_f)[mm ²]
4,9	30,19	1215,974	18,86
Ctte. Elasticidad Muestra ($K_{muestra}$) [N/mm2.]	Resistencia ultima a la Tracción (S_{ut})[Mpa]		Ctte. Elasticidad experimental ($K_{experimental}$) [N/mm2.]
184084,238	1341,547		103057,747
Reducción del área (RA) [%]	Módulo de elasticidad (E) [Mpa]		Diferencia de longitud (ΔL) [%]
37,5	200000		12,8

Tabla 4.2. Datos del ensayo de tracción Probeta N°1 (Continuación)

Punto N°	Esfuerzo Nominal (S)[MPa]	Deformación Nominal (e) [adim]	Esfuerzo Real (σ)[MPa]	Deformación Real (ϵ) [adim]
1	0,000	0,000000	0,000	0,000
3	36,290	0,000395	36,304	0,000
4	217,739	0,001834	218,138	0,002
5	562,492	0,003169	564,274	0,003
6	1204,821	0,006024	1212,079	0,006
7	1201,192	0,008728	1211,677	0,009
8	1237,482	0,022036	1264,751	0,022
9	1241,111	0,027402	1275,120	0,027
10	1262,885	0,035387	1307,574	0,035
11	1270,143	0,001392	1271,911	0,001
12	1262,885	0,062288	1341,547	0,060
13	1233,853	0,070472	1320,805	0,068
14	1226,595	0,075881	1319,670	0,073
15	1172,160	0,089546	1277,122	0,086
16	1081,436	0,103353	1193,205	0,098
17	997,969	0,117131	1114,863	0,111

Tabla 4.3 Datos del ensayo de tracción probeta N° 2

Longitud Inicial (L_0) [mm]	Diámetro Inicial (D_0) [mm]	Fuerza Máxima (F_{max}) [Mpa]	Longitud Final (L_f) [mm]
27,1	6,2	3,75	31,4
Diámetro Final (D_f) [mm]	Área Inicial (A_0) [mm ²]	Esfuerzo de Fluencia (S_y) [Mpa]	Área Final (A_f) [mm ²]
4,1	30,19	1150,371	13,20
Ctte. Elasticidad Muestra ($K_{muestra}$) [N/mm ² .]	Resistencia ultima a la Tracción (S_{ut}) [Mpa]	Ctte. Elasticidad experimental ($K_{experimental}$) [N/mm ² .]	
222803,063	1320,668	54906,006	
Reducción del área (RA) [%]	Módulo de elasticidad (E) [Mpa]	Diferencia de longitud (ΔL) [%]	
56,3	200000	15,9	

Tabla 4.3 Datos del ensayo de tracción probeta N° 2(Continuación)

Punto N°	Esfuerzo Nominal (S) [MPa]	Deformación Nominal (e) [adim]	Esfuerzo Real (σ) [MPa]	Deformación Real (ϵ) [adim]
1	0,000	0,000000	0,000	0,000
2	278,441	0,001049	278,733	0,001
3	580,175	0,002014	581,344	0,002
4	876,056	0,000378	876,387	0,000
5	1151,809	0,005759	1158,442	0,006
6	1147,927	0,013036	1162,891	0,013
7	1164,053	0,018369	1185,435	0,018
8	1183,046	0,026466	1214,356	0,026
9	1198,694	0,033679	1239,064	0,033
10	1214,820	0,042093	1265,956	0,041
11	1214,820	0,051769	1277,710	0,050
12	1234,410	0,063603	1312,922	0,062
13	1227,840	0,075603	1320,668	0,073
14	1182,030	0,087266	1285,182	0,084
15	1140,222	0,092704	1245,926	0,089
16	1007,930	0,116926	1125,783	0,111
17	737,253	0,147399	845,924	0,137

Tabla 4.4 Datos del ensayo de tracción probeta N°3

Longitud Inicial (L_0) [mm]	Diámetro Inicial (D_0) [mm]	Fuerza Máxima (F_{max}) [Mpa]	Longitud Final (L_f) [mm]
25,7	6	3,50	29,6
Diámetro Final (D_f) [mm]	Área Inicial (A_0) [mm ²]	Esfuerzo de Fluencia (S_y) [Mpa]	Área Final (A_f) [mm ²]
4,5	28,27	1164,615	15,90
Ctte. Elasticidad Muestra ($K_{muestra}$) [N/mm ²]		Resistencia última a la Tracción (S_{ut}) [Mpa]	Ctte. Elasticidad experimental ($K_{experimental}$) [N/mm ²]
220027,237		1276,592	37717,124
Reducción del área (RA) [%]		Módulo de elasticidad (E) [Mpa]	Diferencia de longitud (ΔL) [%]
43,7		200000	15,2

Tabla 4.4 Datos del ensayo de tracción probeta N°3(Continuación)

Punto N°	Esfuerzo Nominal (S) [MPa]	Deformación Nominal (e) [adim]	Esfuerzo Real (σ) [MPa]	Deformación Real (ϵ) [adim]
1	0,000	0,000000	0,000	0,000
2	179,068	0,002389	179,495	0,002
3	542,203	0,004605	544,700	0,005
4	1016,736	0,003370	1020,162	0,003
5	1149,631	0,005748	1156,239	0,006
6	1148,646	0,008212	1158,078	0,008
7	1166,312	0,010585	1178,657	0,011
8	1182,773	0,019496	1205,832	0,019
9	1192,993	0,026294	1224,361	0,026
10	1206,790	0,036409	1250,728	0,036
11	1209,199	0,042347	1260,405	0,041
12	1214,017	0,048505	1272,903	0,047
13	1209,199	0,055734	1276,592	0,054
14	1179,415	0,069328	1261,182	0,067
15	1123,023	0,084410	1217,817	0,081
16	1016,736	0,107891	1126,432	0,102
17	886,359	0,130329	1001,877	0,123

Tabla 4.5 Datos del ensayo de tracción probeta N° 4

Longitud Inicial (L_0) [mm]	Diámetro Inicial (D_0) [mm]	Fuerza Máxima (F_{max}) [Mpa]	Longitud Final (L_f) [mm]
27	3,75	3,75	32,1
Diámetro Final (D_f) [mm]	Área Inicial (A_0) [mm ²]	Esfuerzo de Fluencia (S_y) [Mpa]	Área Final (A_f) [mm ²]
4,1	29,22	1195,582	13,20
Ctte. Elasticidad Muestra ($K_{muestra}$) [N/mm ²]	Resistencia última a la Tracción (S_{ut}) [Mpa]	Ctte. Elasticidad experimental ($K_{experimental}$) [N/mm ²]	
216472,620	1353,104	72746,984	
Reducción del área (RA) [%]	Módulo de elasticidad (E) [Mpa]	Diferencia de longitud (ΔL) [%]	
54,8	200000	18,9	

Tabla 4.5 Datos del ensayo de tracción probeta N°4 (*Continuación*)

Punto N°	Esfuerzo Nominal (S) [MPa]	Deformación Nominal (e) [adim]	Esfuerzo Real (σ) [MPa]	Deformación Real (ϵ) [adim]
1	0,000	0,000000	0,000	0,000
2	177,486	0,000107	177,505	0,000
3	532,282	-0,001797	531,326	-0,002
4	979,783	0,001791	981,537	0,002
5	1188,263	0,005941	1195,323	0,006
6	1198,280	0,013653	1214,641	0,014
7	1198,280	0,021460	1223,996	0,021
8	1213,952	0,026975	1246,699	0,027
9	1226,622	0,032394	1266,357	0,032
10	1239,990	0,044280	1294,897	0,043
11	1244,144	0,057284	1315,413	0,056
12	1248,367	0,068544	1333,935	0,066
13	1244,144	0,081400	1345,417	0,078
14	1239,990	0,091221	1353,104	0,087
15	1209,031	0,105021	1336,004	0,100
16	1142,330	0,126762	1287,133	0,119
17	929,522	0,179707	1096,563	0,165

De esta manera se pudo obtener un promedio de los valores obtenidos los cuales son representados en la Tabla 4.6.

Tabla. 4.6 Valores Promedios del ensayo de tracción

Esfuerzo de Fluencia Promedio ($\overline{S_y}$) [Mpa]	1174,601774
Resistencia última a la Tracción Promedio ($\overline{S_{ut}}$) [Mpa]	1322,977796
Módulo de elasticidad Promedio (\overline{E}) [Mpa]	200000
Diferencia de longitud Promedio ($\overline{\Delta L}$) [%]	15,68400572
Reducción del área Promedio (\overline{RA}) [%]	48,09410617

De estos resultados obtuvimos un nivel de esfuerzo de fluencia σ_y que fue de 1174,60MPa el cual fue utilizado para poder estimar los niveles de esfuerzos a utilizar en el ensayo de fatiga y poder calcular el porcentaje de los mismo.

Del análisis del ensayo de tracción se obtiene que la morfología de la superficie de fractura en los especímenes y la presencia de agrietamiento circunferencial en el cuello de las probetas debido a la dureza superficial que estas poseen sean evidencias de la ductilidad del material. El agrietamiento puede ser consecuencia de las diferencias importantes en el comportamiento plástico de los dos materiales, la capa nitrurada al no poder seguir al material base durante el flujo plástico a elevadas deformaciones se desprende del mismo y fractura presentándose el patrón de agrietamiento circunferencial.


Fig. 4.3 Estriaciones en el cuello de las probetas de tracción

4.4 Ensayo de fatiga al aire.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga al aire realizados sobre especímenes de radio continuo, tratados termoquímicamente bajo el proceso de nitruración. Cabe destacar que los valores de esfuerzos alternantes fueron corregidos o normalizados por el diámetro inicial de la probeta, Una vez realizada dicha corrección, se presenta a continuación la correspondiente tabla contentiva de los datos provenientes de los ensayos de fatiga.

Para el nivel de esfuerzo de 910MPa se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 4.7. Resultados ensayo de fatiga al aire a 910 MPa.

Probeta	Diametro (mm)	Momento ()	Esfuerzo (MPa)	Nº de Ciclos (adim.)
A	6,16	185,055834	910	47200
B	6,02	172,722979		6500
C	6,08	177,939097		56300
D	6,09	155,238065		61200
E	6,22	165,393142		69000
Promedio				48040
Desviaciòn estàndar				24530,6543

Para el nivel de esfuerzo de 870 MPa:

Tabla 4.8. Resultados ensayo de fatiga al aire a 870 MPa.

Probeta	Diametro (mm)	Momento ()	Esfuerzo (MPa)	Nº de Ciclos (adim.)
F	6,22	182,141815	870	158600
H	6,25	184,790039		64900
I	6,2	180,390463		66200
J	6,23	183,021725		226300
K	6,17	177,784542		112800
Promedio				125760
Desviaciòn estàndar				68202,0014

Resultados obtenido con 830 MPa:

Tabla 4.9. Resultados ensayo de fatiga al aire a 830 MPa.

Probeta	Diametro (mm)	Momento ()	Esfuerzo (MPa)	Nº de Ciclos (adim.)
L	6,31	181,420109	830	372700
M	6,26	177,141511		736400
N	6,27	177,991789		515400
O	6,21	172,930718		648300
P	6,17	169,61054		567400
Promedio				568040
Desviación estándar				137582,568

Por último el nivel de esfuerzo de 790 MPa:

Tabla 4.10. Resultados ensayo de fatiga al aire a 790 MPa.

Probeta	Diametro (mm)	Momento ()	Esfuerzo (MPa)	Nº de Ciclos (adim.)
Q	6,37	177,649766	790	413600
R	6,41	181,017446		1116400
S	6,32	173,499241		737000
T	6,13	166,333133		668000
U	6,42	191,074367		538000
Promedio				694600
Desviaciòn estàndar				266413,738

A continuación se presenta la imagen con algunas de las probetas ensalladas.



Fig. 4.4 Probetas después de fallar.

De los resultados obtenidos de los distintos niveles de esfuerzos se generó la siguiente curva S-N.

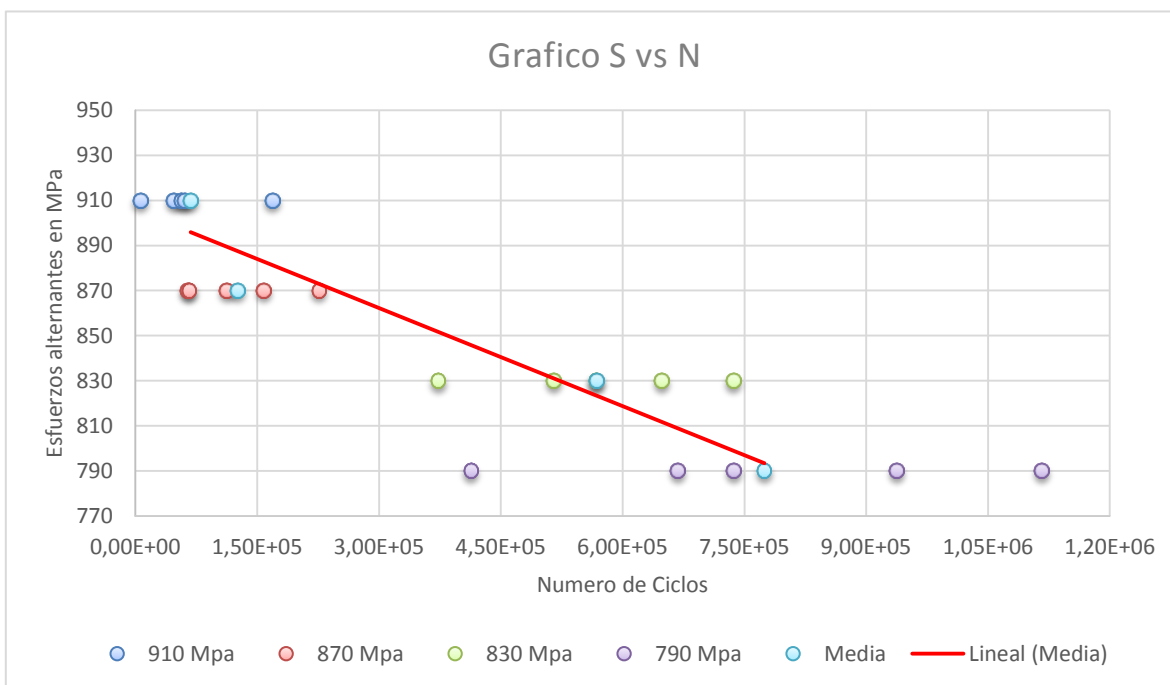


Fig. 4.5 Gráfico Esfuerzos vs Numero de ciclos del acero SAE 4340 Nitruado.

Obtenidos los resultados se observó una disminución en la desviación estándar a medida que se aumenta el nivel de esfuerzo. Esto indica que a bajos niveles de esfuerzo el evento que condiciona la vida a la fatiga es la etapa de nucleación, por el contrario para altos niveles de esfuerzo es la etapa de propagación, lo cual es altamente dependiente de los valores de esfuerzos aplicados.

De acuerdo a lo reflejado en los resultados se evidencia una elevada dispersión que varía ampliamente a medida que se varía el nivel de esfuerzo, por lo que el análisis debe realizarse considerando cada nivel de esfuerzo como una clase estadística diferente y evaluar en ella la dispersión de la muestra, En el caso particular del presente estudio se intentó establecer la influencia del tratamiento en estas primeras etapas y si retarda o no la nucleación por efectos del estado de esfuerzos alternantes.

Ahora bien, la curva mostrada anteriormente fue obtenida de acuerdo a lo establecido en la Norma respectiva, en donde se toma el conjunto total de puntos y se aplica la regresión correspondiente. Esta metodología ocasionalmente ha sido cuestionada por presentar un cierto grado de incertidumbre en torno al valor real de la vida a la fatiga para un esfuerzo dado. Por ello, en la presente investigación se aplicó un tratamiento estadístico previo a los datos experimentales, a partir del cual se originó una nueva curva que en principio serían más representativa del comportamiento resistencia-vida del material sometido a sistemas dinámicos de carga, de acuerdo a las nuevas filosofías de confiabilidad las cuales desde hace algún tiempo han tomado importancia en el campo de la ingeniería, tal como es el caso de la distribución de Weibull.

A partir de los datos obtenidos se construyeron las curvas de vida, empleando el método de distribución de Weibull, utilizando para esto el software Weibull++ 9, lo cual permitió determinar los valores apropiados para una confiabilidad del 90%.

En la la figura 4.6 se observan las curvas de Función de Densidad de Probabilidad o Distribución de Probabilidad para variables aleatorias continuas vs. Número de ciclos para cada nivel de esfuerzo.

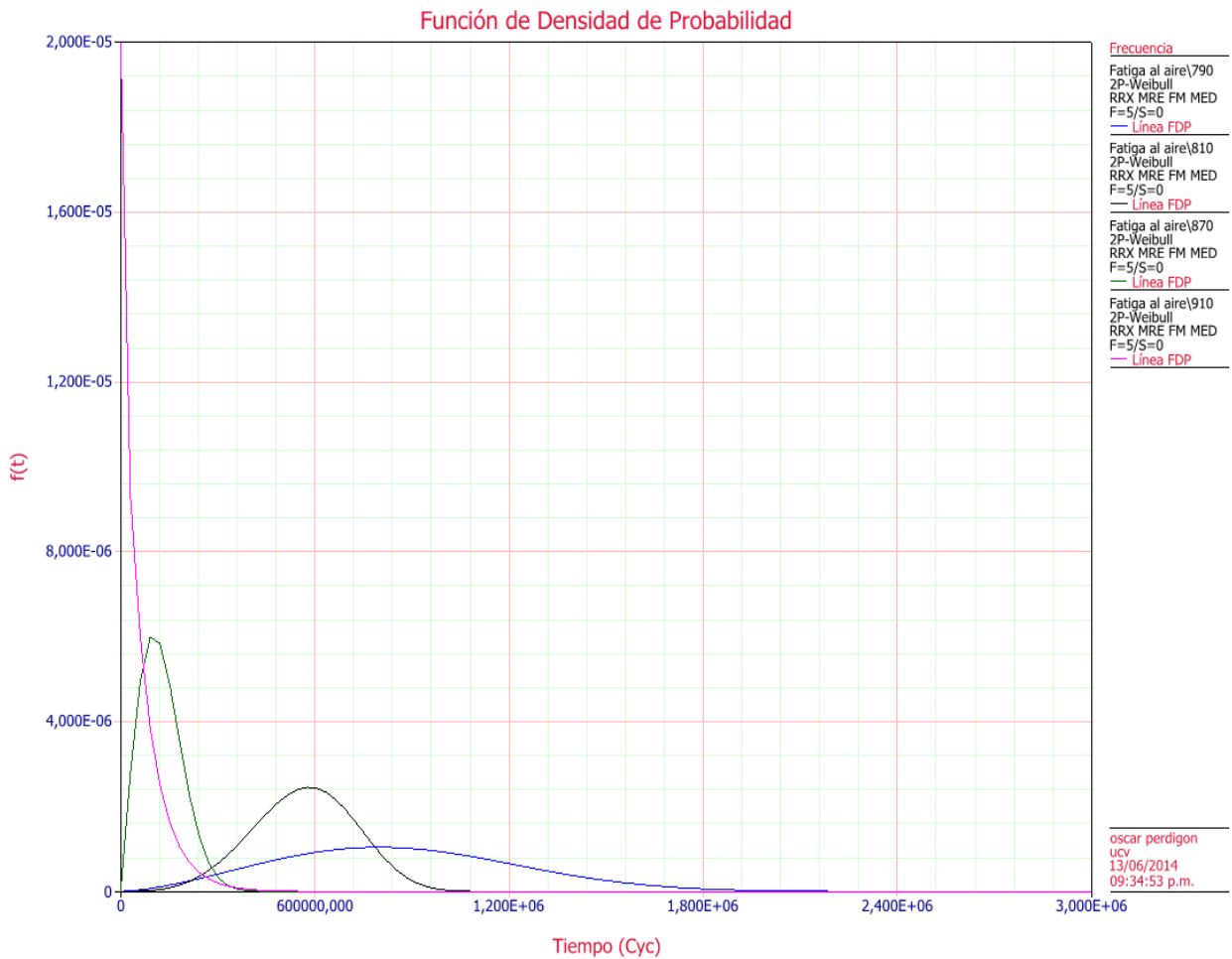


Fig. 4.6 Función de densidad de probabilidad de Weibull. Para fatiga al aire del acero SAE 4340 nitrurado.

En general, se observa cierta dependencia entre la forma de la curva de densidad de probabilidad y el nivel de esfuerzo bajo el cual fue realizado el ensayo. De acuerdo a estas observaciones, en la medida que incrementa el nivel de esfuerzo, el valor del parámetro de escala disminuye rápidamente generando curvas más cerradas. Esto sugiere una menor desviación estándar y por ende mayor certeza de que el valor en tiempo de ocurrencia del evento de falla estará más cercano al así denominado valor esperado o esperanza matemática.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de dicha distribución reportando el nivel de esfuerzo empleado, la vida media promedio para ese nivel de esfuerzo y el tipo de distribución de Weibull utilizada.

Tabla 4.11 Esfuerzos y vida media a través de Weibull

Esfuerzo [MPa]	Vida Media	Distribución empleada
539	704661	Weibull 2 parámetros
571	292486	Weibull 2 parámetros
603	194669	Weibull 2 parámetros
634	125144	Weibull 2 parámetros

Ahora bien, con los datos obtenidos de valor representativo para cada nivel de esfuerzo, de acuerdo a la metodología propuesta, se procedió a graficar las curvas S-N utilizando la metodología de Weibull.

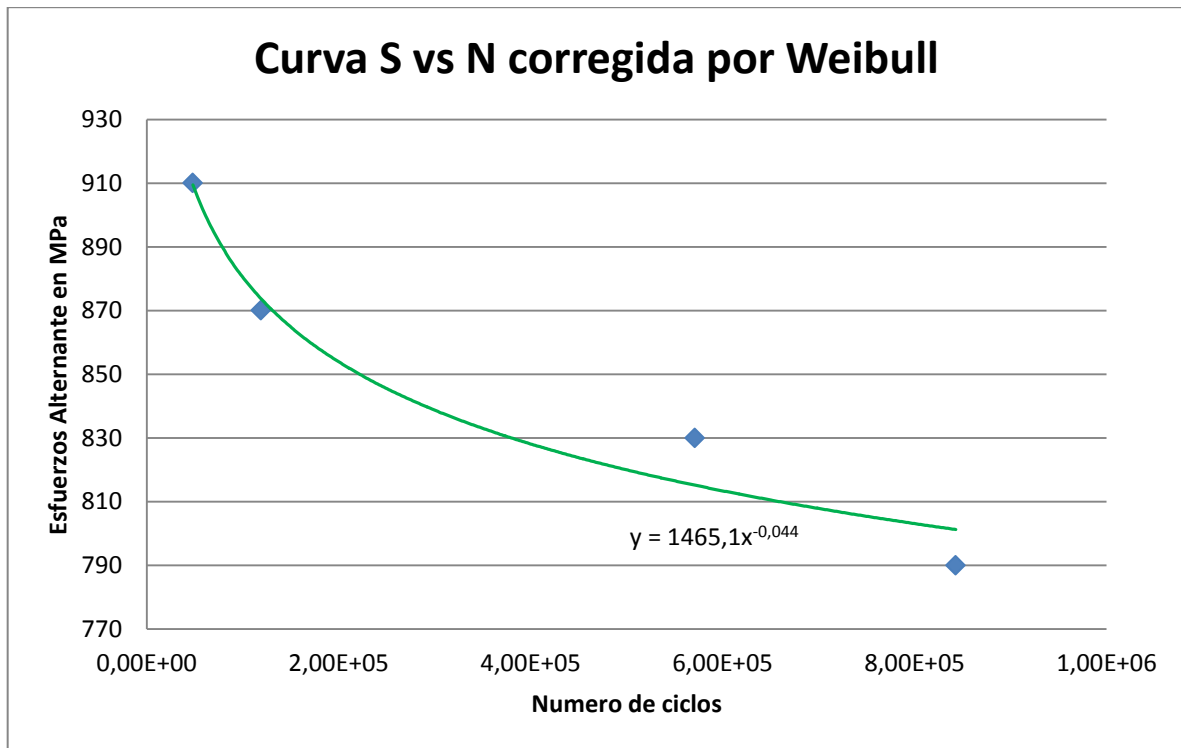


Fig. 4.7. Curva corregida por Weibull S vs N.

Para realizar la curva Log (S) vs Log (Nf) del Acero SAE 4340 nitrurado. Se obtuvieron los siguientes datos

Tabla 4.12 Resultados expresados logarítmicamente.

Log(S)	Log(Nf)
2,89762709	5,92581109
2,91907809	5,75668402
2,93951925	5,07488955
2,95904139	4,681603

En la Fig. 4.8 se encuentra la grafica Log(S) vs. Log(N) donde se ve reflejada la curva de Wholer expresada logarítmicamente para el acero SAE 4340 nitrurado.

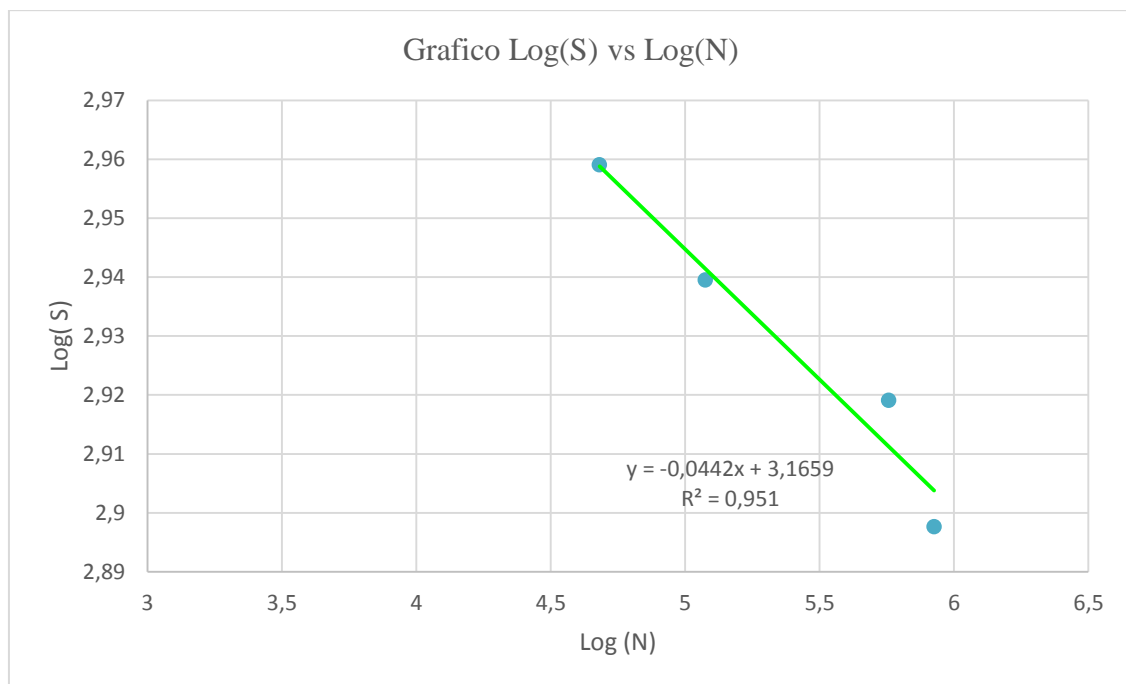


Fig. 4.8. Log(S) vs Log(N) del acero SAE 4340 Nitrurado.

Por medio de las rectas obtenidas anteriormente para el ensayo de fatiga de las probetas tratadas termoquímicamente, se pueden determinar los parámetros de las ecuaciones de Basquin. Dichos valores se encuentran reflejados en las tabla 4.13.

Tabla 4.13. Datos de la curva obtenida a partir de la gráfica Log(S) vs Log(N) del acero SAE 4340 Nitrurado.

Pendiente	Interseccion (ejeY)	R2
-0,04422557	3,16585433	0,95103101

Tabla 4.14. Parámetros obtenidos para la ecuación de Basquin.

b	Sf
-0,04422557	1465,05635

De esta manera se expresa la ecuación de Basquin como:

$$S_a = 1465,05(N_f)^{-0.0442} \quad (\text{E. 4.1})$$

Obteniendo estos datos podemos comprar con un ensayo de fatiga al aire realizado a un acero SAE 4340 sin tratamiento termoquímico de nitruración hecho por **M. Moreno y L. Cabeza at (2004)** donde reflejan la siguiente tabla de resultados.

Tabla 4.15. Resultados ensayo de fatiga acero SAE 4340

Esfuerzos [Mpa]	N. Ciclos
539	554.700
	495.000
	581.700
	383.000
	877.200
	1.499.500
	731.850
571	242.600
	422.000
	274.600
	281.000
	298.900
	226.400
	290.917

603	190.200
	174.400
	206.600
	203.300
	229.300
	152.800
	192.767
634	127.900
	91.500
	131.900
	111.600
	143.600
	136.800
	123.883

Dicha tabla presenta cierto nivel de incertidumbre en la vida útil de cada probeta ensayada por lo que tuvimos que aplicar la metodología de Weibull nuevamente para así tener una mayor precisión al momento de graficar los datos para poder comparar ambas gráficas.

De esta manera surge la siguiente tabla con los valores corregido por Weibull expresado logarítmicamente.

Tabla 4.16. Resultados corregidos de ensayo de fatiga en acero SAE 4340

Log(S)	Log(Nf)
2,731589	5,84798
2,756636	5,466105
2,780317	5,289297
2,802089	5,09741

De esta manera se muestra una gráfica comparativa entre el acero SAE 4340 nitrurado y sin tratamiento termoquímico donde se observa la diferencia en generada por tratamiento.

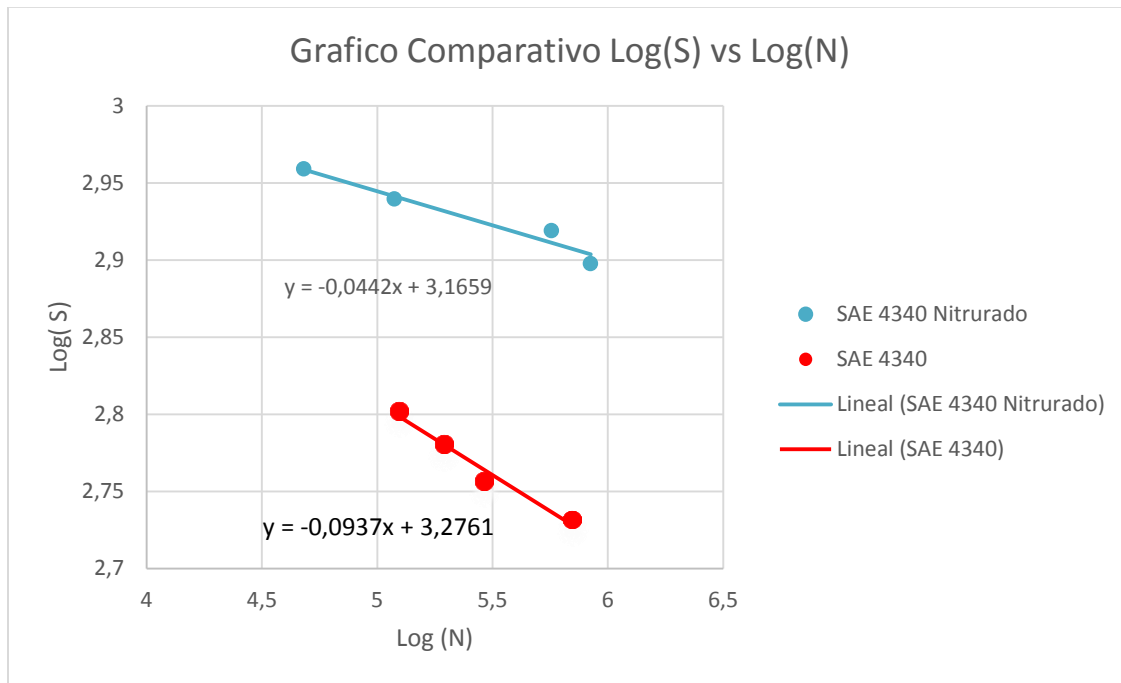


Fig. 4.9 .Comparación Logarítmica del ensayo de fatiga a distintos niveles de esfuerzos entre el acero SAE 4340 sin nitruración y nitrurado.

En esta comparación se puede ver que hubo una diferencia en relación al nivel de esfuerzos entre ambas situaciones, por lo que se procedió a calcular porcentualmente la diferencia del comportamiento de la vida a la fatiga.

Para esto utilizaron las ecuaciones de las rectas para calcular la vida a la fatiga en ambos casos para los niveles de esfuerzo ensayados en la recta inferior (Acero SAE 4340 sin nitrurar) Lo cual proporciono la siguiente tabla de datos.

Tabla 4.17 Comparación de las rectas.

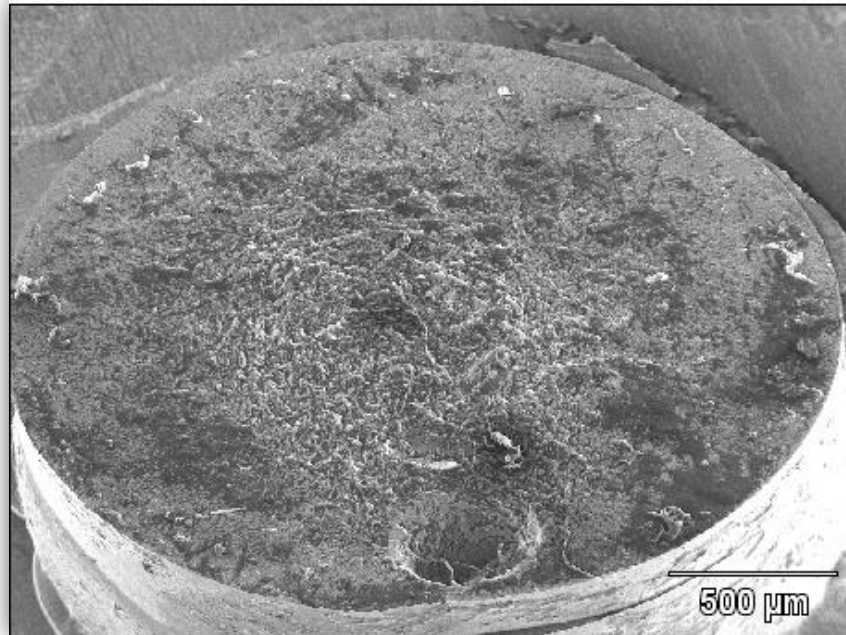
Log (S)	Log (Nf) 4340	Log (Nf) Nitrurado
2,731589	5,811216649	9,826040724
2,756636	5,543906083	9,259366516
2,780317	5,291173959	8,723597285
2,802089	5,058815368	8,2310181

Revelando un aumento en la resistencia a la fatiga con respecto al material base (Acero SAE 4340 no nitrurado) de entre un 69 y 62.7%, este intervalo porcentual se debe a que las rectas tienen pendientes diferentes, esto produce una diferencia en el cambio en la vida a la fatiga para una misma variación de esfuerzo. Para calcular esta diferencia se tomaron dos niveles de esfuerzo y se calculó el porcentaje de reducción de la vida a la fatiga en ambos casos, presentando así para una misma variación de esfuerzo una reducción de la vida a la fatiga de un 13% en el caso del material sin tratar y de un 16% en el materia nitrurado.

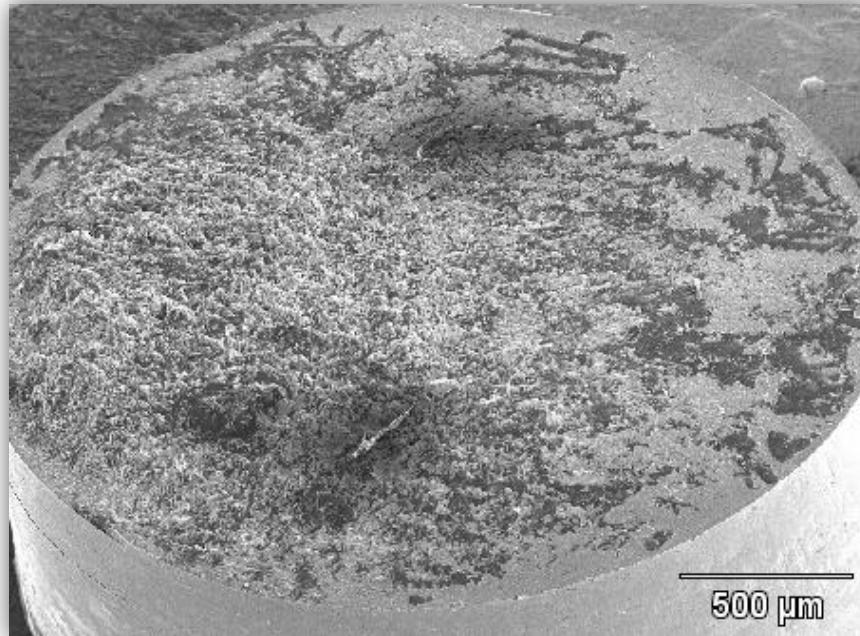
Esto nos indica que al variar los niveles de esfuerzo el material nitrurado tiende a reducir más rápidamente su expectativa de vida por lo que se necesita un factor de seguridad más alto al diseñar con este tipo de material.

4.5 Evaluación fractográfica de los especímenes ensayados en fatiga.

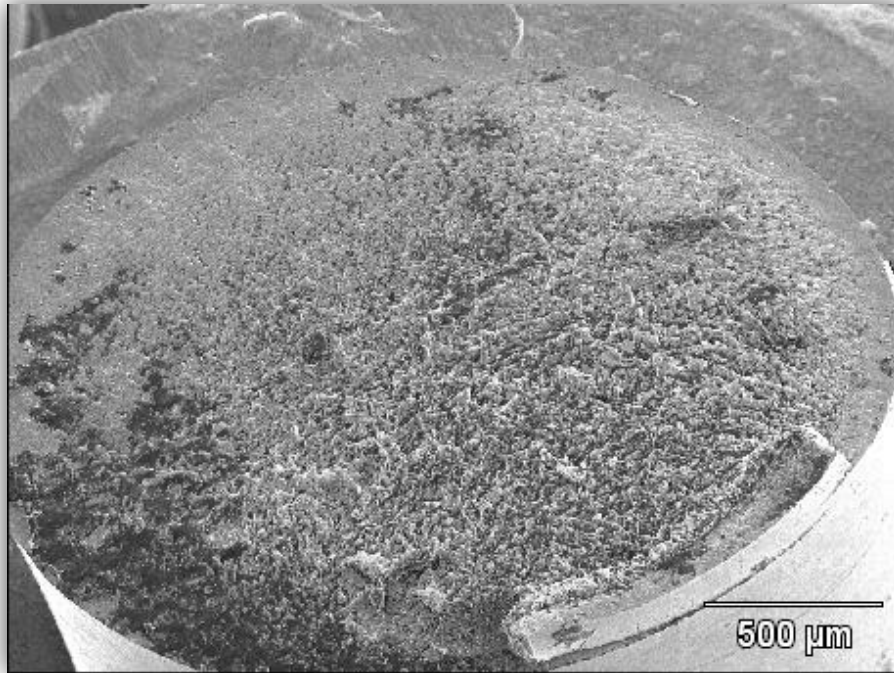
En el conjunto de imágenes mostradas a continuación, se presentan las superficies de fractura de las muestras ensayadas en condiciones de fatiga al aire las cuales fueron ensayadas de 76% a 66% del valor del límite de fluencia, lo que representa 910 y 790 MPa respectivamente. En principio, se tratará de inferir a partir de las distintas morfologías expuestas y los mecanismos de falla, objeto del presente estudio. Se tomó un espécimen por nivel de esfuerzos. Dicha muestra se corresponde a la condición de falla más próxima al valor medio del correspondiente nivel de esfuerzo.



(a) Voltaje de Aceleración: 18.0 kV, Magnificación: 20., Sa:910 MPa



(b) Voltaje de Aceleración: 18.0 kV, Magnificación: 20 Sa: 870 MPa



(c) Voltaje de Aceleración: 18.0 kV Magnificación: 20 Sa: 790 MPa

Fig 4.10. (a), (b) y (c) Macrografías de la superficie de fractura de especímenes del conjunto AISI 4340 Nitrurado, Ensayados a distintos esfuerzos en Fatiga al Aire.

Dicho estudio se presenta, en principio, con una descripción general de las superficies de fractura, destacando tanto los aspectos comunes como los particulares en cada condición ensayada. Dentro de estas particularidades se busca identificar aspectos morfológicos que permitan esclarecer cómo la presencia de la película condiciona el evento de falla. En este caso, extendiendo la vida útil del material nitrurado en comparación con la del metal base.

Uno de los aspectos de mayor interés en este sentido está relacionado con la etapa de nucleación y propagación temprana de la grieta de fatiga. En la Fig.4.10 (a), (b) y (c), se presentan las macrografías de la superficie de fractura de los especímenes SAE 4340 Nitrurado, ensayados a distintos niveles de esfuerzos en condiciones de fatiga al aire, a saber 910, 870 y 710MPa, respectivamente. En las imágenes se evidencia claramente la presencia de múltiples puntos de nucleación de grietas de fatiga.

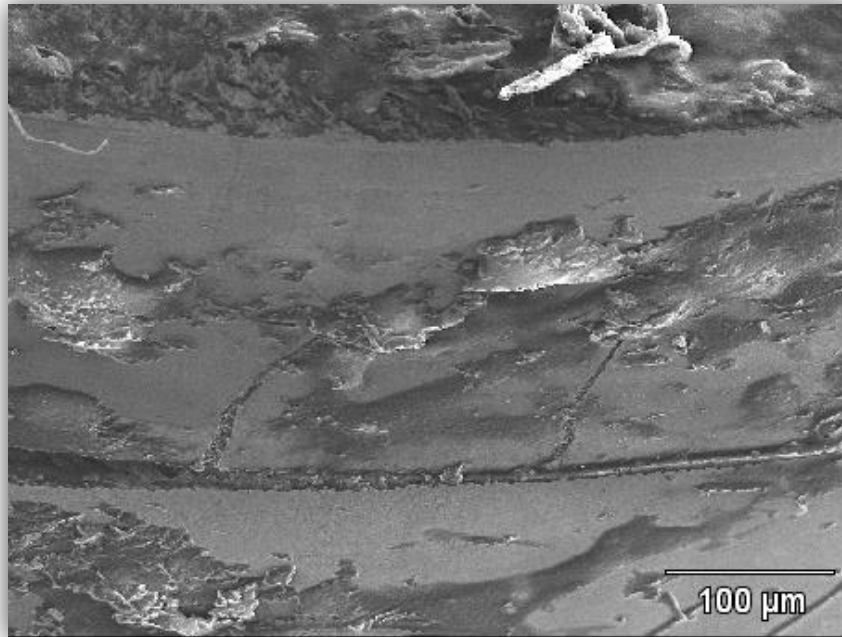
Una característica topográfica típica de esta condición está representada en la observación de varios escalones en la zona de propagación. Dicha topografía es

consecuencia de la coalición de dos o más frentes de crecimiento durante su propagación. A pesar de esta condición de multiplicidad en el evento de nucleación, en los casos evaluados es común observar como uno de los frentes de avance de la grieta consume mayoritariamente el área de la sección transversal, motivo por el cual la zona de fractura por sobre carga no está centrada.

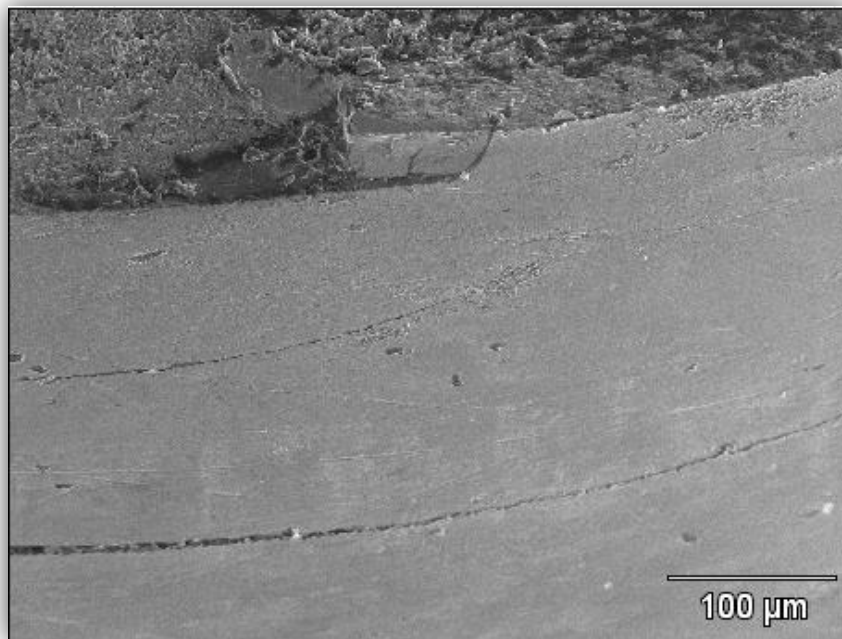
Por el contrario, esta se encuentra desplazada hacia una región más cercana al borde de la probeta sin llegar a estar sobre este. En todos los casos se aprecia una zona de propagación de grieta relativamente lisa, indistintamente del nivel de esfuerzo aplicado. No obstante y como era de esperarse, a menores niveles de esfuerzo, mayor será la región de propagación estable. Siguiendo con el estudio de estas superficies, se tomaron algunas imágenes a mayores aumentos en aquellas zonas en donde, de acuerdo a lo sugerido por la evidencia fractográfica, fuesen puntos potenciales de nucleación de grietas de fatiga.

Agregando a esto en la Fig. 4.10 (a), (b) y (c). Se pueden ver manchas blancas en toda la superficie de fractura, esto se debe a una capa de óxido que se generó a pesar de estar protegidas contra el óxido, no fue suficiente para que este no actuara en el largo tiempo en el que se realizó el ensayo fractográfico después de que las probetas fallaran. Evitando así apreciar con mayor claridad la propagación de la grieta a través de la superficie y dejando en evidencia los rasgos característicos de estas.

En la Fig. 4.11 (a) se puede observar como la grieta de fatiga en las primeras etapas de crecimiento provoca el desprendimiento de forma localizada en la superficie. Esta observación sugiere que posiblemente la nucleación de la grieta de fatiga ocurre en la intercara, propagándose inicialmente a lo largo de esta y posteriormente propiciando las particulares grietas paralelas a la superficie de fractura.



(a) Grietas paralelas superficie de fractura Sa: 910 MPa



(b) Grietas paralelas superficie de fractura Sa: 870MPa.

Fig. 4.11 (a), (b). Grietas paralelas a la superficie de fractura ensayo de fatiga al aire.

También se apreció que la cantidad de grietas de fatiga, paralelas a la superficie de fractura es menor a lo esperado. Este comportamiento es probable que se deba a varios factores, uno de ellos puede ser que el nivel de esfuerzo fue tan alto que al momento de generarse la primera grieta, esta se propagó a través de la superficie a muy alta velocidad hasta que la pieza fallara y esto evitó que hubiese el tiempo suficiente para que se generaran otras grietas.

Un caso peculiar se muestra en la Fig.4.12. En donde se observó una fractura de forma escalonada, lo cual se debe a que se generaron dos puntos de nucleación en distintos planos de la pieza y se fueron propagando las grietas de fatiga de forma paralela hasta intersectarse y generar la falla característica que se logra apreciar. Esto nos dice que si es posible la generación de varias grietas primaria a pesar de la principal, con capacidad de expandirse a una velocidad tal que pueda generar este fenómeno.

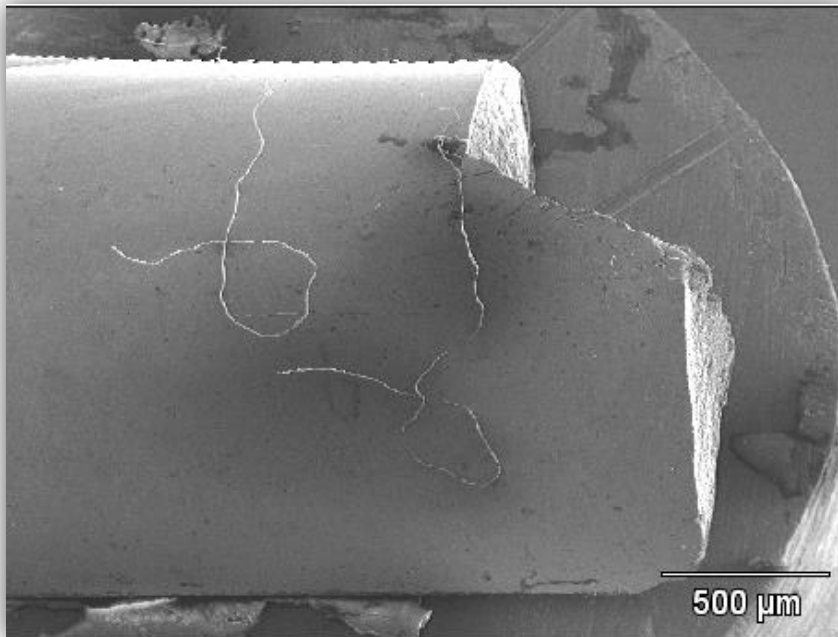


Fig. 4.12 Falla escalona probeta J Sa:830MPa

Al observar las muestras ensayadas en esta investigación, se aprecia la escasa formación múltiple de grietas de fatiga paralelas en la superficie lateral de los especímenes,

perpendiculares al eje de aplicación de carga, encontrándose que en la medida en que la deformación incrementa se nuclea un mayor número de grietas, disminuyendo la separación entre ellas. Estas grietas continuarán su desarrollo concentrando la deformación plástica en su frente de avance. Este resultado hace prácticamente imposible realizar un estudio del cálculo de la tenacidad de fractura ya que a estos niveles de esfuerzos la densidad de grieta es muy baja debido a que la formación de la grieta principal se propaga con alta velocidad en un intervalo de tiempo tan corto que no es posible la formación de múltiples grietas secundarias.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Ya analizados los resultados obtenidos se presentan a continuación las conclusiones más relevantes:

- Del estudio de microindentación estática del acero SAE 4340nitrurado mostró que existe una capa de alta dureza en la superficie, cuyo efecto prácticamente desaparece a un promedio de 52 μ m de profundidad en las probetas.
- En el estudio de la microestructura, se observó que la nitruración produjo una capa bastante regular de nitruros y no se observaron cambios en la microestructura del metal base.
- El ensayo de fatiga a al aire de las probetas nitruradas presentó una mejoría en la vida a la fatiga de entre un 69 y 62.7%, con respecto al material sin nitruración lo cual puede ser explicado en términos de la posible incorporación de esfuerzos residuales en compresión en la superficie del espécimen.
- En la mayoría de las muestras no se observaron grietas adicionales paralelas a la superficie de fractura lo cual nos indica que la cantidad de ciclos que se presentan desde el inicio de la primera grieta discernible hasta la fractura es muy bajo, lo cual no permite la generación de grietas adicionales, esto nos indica que el acero SAE 4340 nitrurado posee una menor capacidad elástica.
- No es posible hacer el cálculo de la tenacidad de fractura debido a que el intervalo de tiempo en que se crea la primera grieta hasta que se fractura la probeta es muy corto, impidiendo a que se generen grietas adicionales a la superficie de fractura.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda la adquisición de pinzas nuevas para las máquinas de ensayos de fatiga ya que están desgastadas y es difícil que la probeta quede centrada adecuadamente lo cual genera cargas externas que producen desviaciones en los resultados.
- Sumergir las muestras en algún medio que las mantenga fuera de contacto con el oxígeno para protegerlas luego del ensayo de fatiga para prevenir la oxidación y de esta manera obtener mejores imágenes de la microscopia electrónica de barrido.
- Realizar un estudio de la vida a la fatiga en medio corrosivo.
- Realizar un estudio del material tratado y posteriormente recubierto para evaluar si el tratamiento favorece el desempeño de un recubrimiento.
- En general se recomienda el uso de este tratamiento para piezas que estén sometidas a cargas dinámicas ya que se observó una mejora en el desempeño de la vida a la fatiga.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ASTM designations a-370-03a (2003) Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. Editorial ASTM International.
2. ASTM designations E-606-04 (2005) Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing. Editorial ASTM International. Cincinnati.
3. ASM handbook (1992) Metallography and Microstructures Volumen 9. 9th edition.
4. ASTM handbook (1985) Failure Analysis and Prevention Volumen 10. 9na.edición.
5. Callister, W. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2004. 3ra edición, Edit. Reverte, E.E.U.U.
6. Cardier F. Y Marcano C. (2010) Evaluación en fatiga al aire y fatiga-corrosión del acero sandvik sanicro 28 para la sustitución del material utilizado en condensadores de tope de torres de destilación en un complejo refinador. Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
7. C. Villalobos, G. Gedler, J. La Barbera, A. Piñeiro, M Staia, J. Lesage, D. Chicot, G. Mesmacque y E.S. Puchi-Cabrera. (2008) Publican: Fatigue and corrosion fatigue behavior of an AA6063-T6 aluminum alloy coated with a WC-10Co-4Cr alloy deposited by HVOF thermal spraying. Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
8. Crisanto Villalobos. (2012) Comportamiento a la fatiga del acero SAE 4340 recubierto con película delgadas, obtenidas por deposición física en fase vapor asistida por plasma (PAPVD). Escuela de Ingeniería Mecánica,

Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

9. Ferrero I. (2012) Publico: Procesos termoquímicos de endurecimiento superficial. Universidad Nacional de Lujan Departamento de Tecnología y ciencia de los materiales Luján, Buenos Aires, Argentina.
10. Hernandez J y Rada L. (2011) Evaluación del comportamiento a la fatiga al aire y fatiga corrosión de un acero micro aleado 4340 recubierto con depósitos de WC-12%CO reforzados por nanotubos de carbono. Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
11. Hung M. Y Plaz D., (2010) Estudio probabilístico de la fatiga al aire de una aleación de aluminio a partir de muestras con defectos de colada. Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
12. Ledezma P., (2012) Comportamiento a la fatiga de un acero SAE 4140 Nitrurado. Escuela de ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
13. Puga F. y Blanco S (2011) Evaluación del comportamiento a la fatiga-corrosión de un acero estructural 4340 bonificado recubierto con depósitos nanoestructurados de wc-12%co obtenidos por plasma atmosférico. Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
14. Stephens, R. ET AL (2000) Metal fatigue in engineering. Nueva York: Wiley- IEEE
15. Weibull, W. (1961) Fatigue Testing and Analysis of results. Oxford: Pergamond Press.