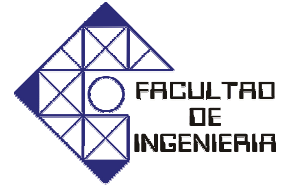




UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación de la Resistencia a la Fatiga del acero AISI 1018 sometido a tratamientos térmicos de Temple y Normalizado

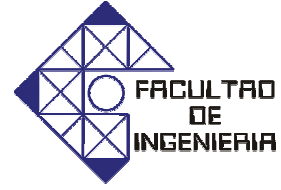
Tutor académico:
Laura Sáenz. *Ing. MSc.*

Autores:
Erick Piña.
José Ojeda.

Naguanagua, Junio de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación de la Resistencia a la Fatiga del acero AISI 1018 sometido a tratamientos térmicos de Temple y Normalizado

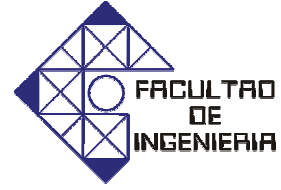
Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

Erick Piña.
José Ojeda.

Naguanagua, Junio de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada **“Evaluación de la Resistencia a la Fatiga del acero AISI 1018 sometido a tratamientos térmicos de Temple y Normalizado”**, presentada por los bachilleres: **Erick Piña y José Ojeda**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **17.397.308, 17.072.327**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Laura Sáenz, *Ing. MSc. PhD*
Presidente del jurado

Prof. Jurado1, *Ing. MSc. PhD*
Miembro del jurado

Prof. Jurado2, *Ing. MSc. PhD*
Miembro del jurado

En Naguanagua a los 05 días del mes de Junio de 2009

Agradecimientos

Queremos expresar, sin tomar en consideración un orden específico, nuestro más sincero agradecimiento a nuestro tutor, la Profesora Laura Sáenz, por sus consejos, guiatura y sugerencias oportunas durante el desarrollo de este trabajo de investigación. De igual manera agradecemos al Profesor David Ojeda, quien en todo momento, durante el desarrollo de la investigación, estuvo atento y prestó toda colaboración, orientación, guiatura y dirección académica para la realización de esta investigación. Igualmente queremos agradecer a la Universidad de Carabobo, a la Facultad de Ingeniería y a la Escuela de Ingeniería Mecánica por habernos abierto las puertas y recibirnos con los brazos abiertos durante estos años de estudios. Y por último pero no menos importantes a Dios Todopoderoso, a nuestros padres y hermanos y a todos nuestros demás familiares y amigos, gracias por sus ayudas y consejos en todo momento.

Resumen

En la presente investigación se evaluó la resistencia a la fatiga del acero AISI 1018. El material utilizado son barras de acero cilíndricas de media pulgada de diámetro (1/2") y se mecanizaron las probetas según la norma ASTM E606. Los ensayos de fatiga se realizaron en condición de flexión rotativa. Las condiciones del material ensayado son: en condición original de entrega, tratado térmicamente por temple y normalizado. Las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y esfuerzo a la fluencia se obtuvieron en base a la norma ASTM A370. El comportamiento a fatiga del material se presentó a través de las curvas de Wöhler, realizadas con los datos obtenidos de Esfuerzo-Número de ciclos de los ensayos a fatiga. La relación entre el esfuerzo alternante y el número de ciclos de vida del material se determinaron con una expresión conocida como la ecuación de Basquin. Por otra parte, se realizó el análisis de algunas superficies de fractura de las muestras rotas, mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB). La mayor resistencia a la tracción y dureza se presentaron en las probetas con tratamiento térmico de temple, mientras que la menor resistencia a la tracción y menor dureza, se obtuvo en las probetas normalizadas y en condición original, respectivamente. Las probetas con el tratamiento térmico de normalizado presentaron la mayor resistencia y límite a la fatiga, mientras que las que se les aplicó temple presentaron la menor resistencia y límite de fatiga. La pendiente de la curva de Wöhler no se afecta significativamente por la aplicación de tratamientos térmicos. Las superficies de ruptura presentaron un mecanismo de fractura mixta para valores de esfuerzo intermedio y frágil para altos valores de esfuerzos, con presencia de hoyuelos, grietas y facetas de clivajes, tanto para las condiciones de original y normalizado; mientras que para la condición de temple se observaron fracturas del tipo frágil con grietas pronunciadas.

Índice general

Índice general	i
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
CAPÍTULO 1	
Planteamiento del Problema	1
1.1 Situación problemática	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3 Justificación	3
1.4 Alcance	4
1.5 Limitaciones	5
1.6 Antecedentes	5
CAPÍTULO 2	
Marco Teórico	9
2.1 Fatiga	9
2.1.1 Antecedentes en la investigación de fatiga	9
2.1.2 Características de la fractura por fatiga	14
2.1.3 Factores que afectan la vida a la fatiga	24
2.1.4 Ensayos de fatiga	25
2.1.5 Resistencia y limite de fatiga	27
2.1.6 Tipos de ensayos de fatiga	29
2.1.7 Máquinas de ensayos de fatiga	30
2.1.8 Resistencia a la fatiga del hierro y del acero	31
2.2 Aceros	32

2.2.1	Definición y producción	32
2.2.2	Influencia de los elementos aleantes	35
2.2.3	Tratamiento térmico del acero	37
2.3	Propiedades mecánicas de los metales	41
2.3.1	Dureza	41
2.3.2	Dureza elástica	42
2.3.3	Resistencia al corte o a la abrasión	42
2.3.4	Resistencia a la indentación	43
2.3.5	Prueba o ensayo de dureza Brinell	43
2.3.6	Prueba o ensayo de dureza Rockwell	44
2.3.7	Prueba o ensayo de dureza Vickers	44
2.3.8	Límite elástico	45
2.3.9	Punto de fluencia	45
2.3.10	Resistencia límite	45
2.3.11	Ductilidad	45
CAPÍTULO 3	Marco Metodológico	47
3.1	Nivel de investigación	47
3.2	Diseño de la investigación	48
3.3	Población y muestra	48
3.4	Tipo de muestreo	48
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	49
3.6	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	49
3.7	Procedimiento experimental	49
3.7.1	Composición química	49
3.7.2	Cantidad y dimensiones de probetas de tracción y	50
fatiga	3.7.3 Tratamientos térmicos	52
	3.7.4 Análisis microscópico	53
	3.7.5 Ensayo de Dureza	56
	3.7.6 Ensayo de Tracción	56
	3.7.7 Ensayo de Fatiga	57
	3.7.8 Análisis Fractográfico	60
CAPÍTULO 4	Resultados y Análisis	63
4.1	Ensayos de Dureza	63
4.2	Ensayos de Tracción	64
4.3	Microscopía Óptica	68
4.4	Ensayos de Fatiga	72
4.5	Análisis Fractográfico	81
4.6	Comparación de las curvas de fatiga obtenidas con	89
trabajos previos		
CAPÍTULO 5	Conclusiones y Recomendaciones	91
5.1	Conclusiones	91

Índice general

iii

5.2 Recomendaciones

93

Referencias bibliográficas

95

Índice de figuras

2.1 Curva S-N	15
2.2 Cargas de fatiga	17
2.3 Cargas de fatiga	18
2.4 Tipos de esfuerzos	27
2.5 Curva S-N	28
2.6 Diagrama hierro-carbono	37
3.1 Probeta para ensayos de tracción	51
3.2 Probeta para ensayos de fatiga	51
3.3 Horno eléctrico	52
3.4 Tamaño de grano ordenado desde n=1 hasta 8	55
3.5 Microscopio óptico	55
3.6 Máquina universal de ensayos	57
3.7 Máquina para ensayos de fatiga	60
3.8 Microscopio electrónico de barrido	61
4.1 Curva esfuerzo-deformación, Probetas en condición original	65
4.2 Curva esfuerzo-deformación, Probetas en condición de temple	66
4.3 Curva esfuerzo-deformación, Probetas en condición normalizado	66
4.4 Microestructura del acero AISI 1018 en condición original	70
4.5 Microestructura del acero AISI 1018 en condición de temple	70
4.6 Microestructura del acero AISI 1018 en condición de normalizado	71
4.7 Curva esfuerzo-número de ciclos, condición original	75
4.8 Curva esfuerzo-número de ciclos, condición temple	75
4.9 Curva esfuerzo-número de ciclos, condición normalizado	76
4.10 Comparación de las curvas esfuerzo-número de ciclos para las tres condiciones estudiadas	76
4.11 Curva de Wohler del acero AISI 1018 en condición original	78
4.12 Curva de Wohler del acero AISI 1018 en condición de temple	79

4.13 Curva de Wohler del acero AISI 1018 en condición de normalizado	79
4.14 Comparación de las curvas Wohler del acero AISI 1018 para las tres condiciones estudiadas	80
4.15 Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de original	82
4.16 Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de original	83
4.17 Macrofotografía de la superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de original	84
4.18 Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de original	84
4.19 Macrofotografía de la superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de temple	85
4.20 Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de temple	85
4.21 Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de temple	86
4.22 Macrofotografía de la superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de normalizado	87
4.23 Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de normalizado	87
4.24 Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de normalizado	88
4.31 Curva esfuerzo-número de ciclos (S-N) del acero AISI 1020 en condición original	90

Índice de tablas

2.1 Composición química del acero AISI 1018, expresada en % en peso	34
2.2 Rapidez de enfriamiento en (°C/s) en el centro de una barra de 1 plg, para diversos medios de enfriamiento.	39
3.1 Composición química del acero AISI1018.	50
4.1 Resultados de los ensayos de dureza del acero AISI 1018 para las tres condiciones de estudio	63
4.2 Dimensiones de las probetas AISI 1018 ensayadas a tracción	64
4.3 Resultados de los ensayos a tracción para la condición original	67
4.4 Resultados de los ensayos a tracción para la condición de temple	67
4.5 Resultados de los ensayos a tracción para la condición de normalizado	68
4.6 Tamaño del grano en condición original y normalizado	69
4.7 Resultados de los ensayos a fatiga del acero AISI 1018 en condición original	72
4.8 Resultados de los ensayos a fatiga del acero AISI 1018 en condición de temple	73
4.9 Resultados de los ensayos a fatiga del acero AISI 1018 en condición de normalizado	74
4.10 Ecuación y parámetros de la ecuación de Basquin del acero AISI 1018 para las tres condiciones de estudio	81
4.11 Límites de fatiga y resistencias de fatiga de los aceros AISI 1020, 1030 y 1045	89

CAPÍTULO 1

Planteamiento del Problema

1.1 Situación problemática

Actualmente la información sobre la resistencia a la fatiga del acero AISI 1018 cuando éste es sometido a tratamientos térmicos como son el temple y el normalizado no es suficiente, es por esta razón, que se ha decidido realizar ésta investigación. Este tipo de acero es utilizado principalmente para la fabricación de partes de maquinaria, piñones, tornillos sin fin, pernos de dirección, pernos de cadena, catarinas, entre otras.

A causa de la desinformación que existe hoy en día sobre las características y propiedades de este material, el uso del mismo queda limitado para ciertas y muy específicas aplicaciones lo que ocasiona que este material no sea objeto de estudio ni sea aplicado para otras áreas distintas a las que ya se conoce.

Si esa problemática continuase pudiese ocurrir que el material quede limitado en cuanto a su uso solamente para la fabricación de ciertos elementos o piezas mecánicas. Por otro lado también pudiese ocurrir que llegue a un punto crítico en donde el material sea reemplazado a nivel comercial debido al desarrollo de nuevos aceros en donde se compruebe la factibilidad de su uso y

de mayores aplicaciones y que este material sea objeto de estudio para conocer sus características y propiedades mecánicas y químicas.

Considerando la importancia que tiene ese acero en el campo de la industria metalúrgica y debido a que la información actual con la que se cuenta en el material bibliográfico tanto dentro del recinto universitario como fuera de ella es insuficiente y escaso, es por ello que se requiere de un estudio a fondo para resaltar y dar a conocer las características de este acero sometido a condiciones de trabajo que pudiesen estar presentes en estos elementos fabricados a partir de dicho acero, y que hasta los momentos son vagamente conocidos debido a la falta de investigación.

Adicionalmente se aspira que la investigación que se logre realizar sea de gran utilidad y que proporcione información veraz y confiable, la cual esté a disposición para personas interesadas en el área, ya sea pertenecientes a la Universidad o ajenas a ella en seguir desarrollando nuevas investigaciones sobre este tema o alguno similar.

Se espera que ésta investigación suministre una información completa y detallada sobre el acero AISI 1018 en donde se suministre de manera explícita sus características y propiedades tanto mecánicas como químicas obtenidos a través de ensayos mecánicos para así ampliar su aplicación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la resistencia a la fatiga del acero AISI 1018 sometiéndolo a tratamientos térmicos de temple (en aceite) y normalizado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ? Caracterizar el material por medio de análisis químicos, microscopía óptica, ensayos de tracción y dureza.
- ? Realizar ensayos a fatiga a las respectivas probetas en su estado original y con tratamientos térmicos de temple (en aceite) y normalizado, para construir la curva a fatiga.
- ? Determinar la ecuación de Basquin para cada condición ensayada.
- ? Comparar las curvas de fatiga obtenidas del ensayo con las ya establecidas.
- ? Evaluar las superficies de fractura a través de microscopía electrónica de barrido (MEB).

1.3 Justificación

Considerando la importancia que tienen los aceros en general para la elaboración de piezas y partes mecánicas, es necesario el estudio de las propiedades que poseen estos materiales para determinar sus usos y aplicaciones en la rama industrial. El poseer una información detallada sobre las características del acero nos brinda la posibilidad de realizar una adecuada selección a la hora de diseñar, mejorar un producto o proceso donde intervenga esta materia prima.

El aspecto más resaltante de esta investigación, es la evaluación de la resistencia a la fatiga del acero AISI 1018 cuando este es sometido a tratamientos térmicos como son el temple y el normalizado, ya que facilita la selección de estos materiales para su posterior uso, garantizando a la comunidad seguridad en su aplicación, así como también el comportamiento que va a tener este acero en las diferentes situaciones y requerimientos para el cual sea utilizado.

El aporte que otorga esta investigación a la Universidad de Carabobo es de gran importancia porque a partir de ahora ésta quedará con la información y con los conocimientos adquiridos sobre el comportamiento de este material y promoverá el desarrollo de estudios posteriores para beneficio de los futuros profesionales egresados de esta casa de estudio y al sector industrial.

1.4 Alcance

Como fin de la presente investigación, sólo se trabajará con probetas de acero AISI 1018 en su condición original y tratados térmicamente bajo condiciones de temple (en aceite) y normalizado, dichas probetas serán sometidas a ensayos de fatiga para determinar su comportamiento mecánico, con el objetivo de predecir dicho comportamiento para el diseño de dispositivos y piezas mecánicas utilizados en la industria.

Cabe destacar que para la condición de tratamiento térmico de temple, se calentarán las probetas a la temperatura de austenización (870°C) y luego se dejarán en un medio de enfriamiento de aceite sin agitar a temperatura ambiente.

De acuerdo a las normas ASTM A370, ASTM E606 y ASTM E739, para el desarrollo de los ensayos de tracción, límite de fatiga y la construcción de la curva S-N, respectivamente; el establecimiento del número mínimo de probetas requerido para la construcción de la curva S-N, depende del tipo de ensayo; teniendo que, para ensayos de caracterización del material entregado se requiere un mínimo de 6 a 12 probetas. Para los ensayos de tracción se requieren ensayar 3 probetas por cada condición a estudiar y para los ensayos a fatiga, se ensayan 12 probetas por cada condición a estudiar, es decir, se necesitará de 3 probetas por cada nivel de esfuerzo y la aplicación de 4 niveles de esfuerzos, según la norma ASTM E739. Por otro lado se tomará en cuenta un exceso de 3 probetas para cada condición de fatiga, y así prever cualquier eventualidad, por lo que se realizaran ensayos a un mínimo de 60 probetas para así obtener una muestra representativa del experimento.

1.5 Limitaciones

Entre los factores encontrados que podrían afectar el logro de los objetivos planteados se encuentran:

- ? Factor Económico: Para realizar este tipo de ensayos se requiere de una gran cantidad de material para la fabricación de probetas, y debido a que el precio de este acero en el mercado nacional es muy elevado podría convertirse en un inconveniente ya que los gastos serán cubiertos por los responsables de esta investigación y no se cuenta con subsidios por parte de algún ente público o privado.
- ? Disponibilidad de la máquina: Actualmente existe el problema de que la Universidad cuenta con una sola máquina de ensayo a fatiga y la cantidad de personas que realizan investigaciones similares son numerosas, por lo que se deberán coordinar todos los grupos para el tiempo y buen uso de este equipo.

1.6 Antecedentes

Cuando se aplican tratamientos térmicos de normalizado a los aceros AISI 4140 y AISI 4340, estos aumentan sus propiedades mecánicas logrando una alta resistencia a la fatiga, manteniendo la resistencia a la tracción y dureza. Mientras que cuando se aplican tratamientos térmicos como el recocido a estos aceros ocurre todo lo contrario, se reducen los valores de resistencia a la fatiga y dureza. Todas estas conclusiones fueron comparadas con respecto a las condiciones de entrega del material. (Moreno et al 2005).

Los ensayos a fatiga se pueden llevar a cabo bajo las condiciones de esfuerzos cíclicos. En esta condición la aplicación de tratamientos térmicos de temple y revenido influyen sobre la resistencia a la fatiga. Basándose en lo anterior el acero AISI 4340 sometido a tratamiento térmico de temple presenta la mayor resistencia a la tracción siendo las probetas con tratamiento térmico de temple y revenido las de menor resistencia a la tracción. El acero AISI 4340, con tratamiento térmico de temple y revenido, presenta la mayor resistencia a

la fatiga en comparación a las otras condiciones estudiadas. Con respecto a la condición sin tratamiento térmico, aumenta la dureza, tanto para la condición de temple como para la condición de temple y revenido. Para las condiciones de sin tratamiento térmico y tratamiento térmico de temple se presenta una fractura de tipo frágil para altos esfuerzos y dúctil para bajos esfuerzos. Para la condición de temple y revenido el tipo de fractura es de tipo mixta para altos esfuerzos y dúctil para bajos esfuerzos (Acosta 2005).

El comportamiento a la fatiga varía según las condiciones a la que esté sometido el material. Es por ello que cuando el acero se somete a condiciones de pulido, granallado con partículas de arena, de alúmina y de acero su resistencia a la fatiga se va incrementando o disminuyendo según la condición aplicada, es decir, en el caso de las probetas granalladas con arena se presentó el mayor límite de resistencia a la fatiga, seguida de las probetas granalladas con alúmina. Por otro lado se realizó una comparación entre los aceros SAE 1045 con acabado de pulido y las probetas granalladas con acero y alúmina, resultando que estas últimas poseen menor resistencia a fatiga ya que en la superficie existen esfuerzos de compresión debido al impacto de las partículas (Coronado 2006).

Los aceros que poseen alto porcentaje en carbono poseen un alto límite de fatiga y una alta resistencia a fatiga. Cuando un acero de bajo porcentaje en carbono como es el caso del acero AISI 1020, sobrepasa el límite de fatiga, el tipo de fractura que se produce en la pieza es dúctil. Mientras que en los aceros de alto porcentaje de carbono, cuando estos sobrepasan el límite de fatiga, se produce una fractura del tipo frágil, es decir, que a medida que aumenta el porcentaje de carbono en los aceros, la pieza se vuelve cada vez más frágil en cuanto fatiga se refiere (Este et al 2004).

En otro contexto, cuando se utiliza un acero laminado en caliente, con un porcentaje de carbono muy bajo y son sometidos a tratamientos térmicos, para

una supuesta mejora de sus propiedades mecánicas, es imposible que esto ocurra ya que se comprobó en este trabajo que las probetas con estas características en condición de entrega poseen mayor resistencia y ductilidad que el material tratado térmicamente en ambas direcciones de laminación (Aparicio et al 2005).

Se ha comprobado por medio de estudios que el proceso de falla en la fatiga de contacto por rodadura está compuesto por diferentes etapas: nucleación, propagación y fractura final. En la etapa de nucleación puede llegar a consumir hasta el 85% de la vida del material, y también se ha demostrado, que al estar presente algún defecto artificial, reducen significativamente la duración de esta etapa (Salvande et al 2000).

Actualmente se ha venido sustituyendo el acero al carbono por el acero inoxidable dúplex en el armado de estructuras que deban trabajar bajo ambientes salinos, debido a su elevada resistencia y a su excelente comportamiento frente a la corrosión. No obstante, aunque el uso de este tipo de armaduras se ha ido extendiendo y ya existen algunas normas muy recientes que las contemplan, dichas normas se siguen fundamentando en la adopción de una tensión máxima constante (normalmente un porcentaje del límite elástico) variando la tensión mínima para conseguir los distintos valores de amplitud de tensiones debido fundamentalmente a los escasos estudios sobre el comportamiento mecánico en general y principalmente a fatiga (Real et al 2005).

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2.1 Fatiga

Es el fenómeno general de falla de materiales que están sometidos a esfuerzos alternantes o cíclicos; consiste en la ruptura del material sin presentar un indicio previo, por lo general a una carga mucho menor a la cual el material falla durante una sola aplicación de carga. También se define como el cambio estructural permanente, localizado y progresivo que ocurre en materiales sometidos a esfuerzos y deformaciones fluctuantes que pueden resultar en grietas o fracturas después de un determinado número de fluctuaciones. (Shigley, Joseph 1999).

2.1.1 Antecedentes en la investigación de fatiga.

En la actualidad y en los últimos años, el área del desarrollo de materiales ha evolucionado enormemente con el descubrimiento y fabricación de materiales cada vez más singulares y cuyas propiedades son cada vez más adecuadas a las necesidades del mundo de la ingeniería actual. Uno de los materiales más versátiles debido a su relativa fácil fabricación y fácil

manejo es el acero. Según datos estadísticos de la revista "Steel World" en 2007, el acero es el material más consumido a nivel mundial, solamente en el mes de Octubre del 2006 Estados Unidos produjo 10,893 toneladas métricas de acero en productos terminados, mientras que la unión europea y el continente asiático consumieron 14,797 y 51,026 toneladas métricas respectivamente.

La atención de los investigadores en área de ingeniería de materiales está dirigida a búsqueda del "material perfecto" el que une las propiedades de alta resistencia mecánica y de fatiga, con relativamente buena ductilidad, soldabilidad y elevada resistencia a la corrosión. Esta tarea es actual especialmente en la industria automotriz en la cual se busca disminuir el peso de vehículo lo que se refleja en menor consumo de gasolina. Otra propiedad buscada es un material que presenta alto grado de endurecimiento por deformación lo que es importante en caso de un choque. Este tipo de aceros por poseer una elevada capacidad de absorber energías a impacto ofrecen una mayor seguridad frente al impacto en caso de accidente. La seguridad junto con la reducción de peso que se alcanza comparativamente con la utilización del acero común, han resultado factores clave para su interés en proyectos de investigación cuyos objetivos son los de alcanzar aceros que resulten competitivos con materiales metálicos como aluminio y no metálicos como los materiales compuestos.

Sin embargo el acero no es un material perfecto, y es porque el gran problema que presenta es el reto siempre presente de ser un material capaz de ser tan duro y resistente como sea posible, pero además que sea suficientemente plástico para aplicar procesos tecnológicos basados en deformabilidad.

Algunos de los aceros encontrados dentro de ésta categoría son los aceros HSLA (High Strenght Low Alloy), aceros TRIP y aceros de Doble Fase. En la actualidad, el Instituto Americano del hierro y el acero (AISI) y en conjunto con el departamento de energía Estadounidense (DOE), han estado desarrollando proyectos destinados a la conformación de aceros de alta resistencia (high-strenght steels), incluyéndose entre éstos los aceros de doble fase (dual-phase steels) y de transformación plástica inducida (TRIP steels), los cuales están actualmente siendo desarrollados internacionalmente alrededor del mundo en la industria del acero.

Como se mencionó anteriormente, existen aceros para todo propósito, al permitírsele tener combinaciones con elementos aleantes, sus rangos en cuanto a propiedades le permiten ubicarse en una gran cantidad de usos o propósitos. Los llamados aceros de alta resistencia o high-strenght son muchas de las veces generados a partir de aceros al carbono, como en el caso de los aceros de doble fase, los cuales son tratados térmicamente para contener microestructuras ferrítico-martensíticas, para tener la alta dureza de la martensita y la ductilidad de la ferrita, o el caso de los aceros TRIP o de Transformación Plástica Inducida, los cuales a partir de algunos elementos aleantes logran llegar a una microestructura de matriz ferrítica con bainita y austenita retenida en donde la austenita retenida se transforma en martensita durante el procesamiento termomecánico y se evita tener que pasar por el tratamiento térmico y provee un material con excelente resistencia a la fatiga y excelentes propiedades de resistencia a la corrosión. (CIBIM 8, 2007)

El hecho de que existen materiales que pueden romperse bajo la aplicación repetida de un esfuerzo insuficiente para causar su falla en la primera aplicación, fue conocido por primera vez a mediados del siglo XIX,

principalmente como consecuencia de la experiencia adquirida en la ingeniería de ferrocarriles. Se observaron y analizaron las fracturas inesperadas que algunas veces se producían en los ejes de las ruedas de los ferrocarriles originalmente nuevos después del funcionamiento durante varios años y atribuyó esta conducta al deterioro gradual del metal durante el curso de su trabajo. Se apreció el efecto perjudicial de los bordes angulares y se demostró que la introducción de un radio mayor de curvatura mejoraba la resistencia a impactos repetidos. Aproximadamente en esos mismos años, se realizaron experimentos con vigas de fundición de hierro y se demostró que las vigas podían resistir una carga estática casi tan grande como la carga de rotura por espacio de cuatro años sin fallar, pero si las vigas se deformaban repetidamente a la flecha producida por solamente la mitad de la carga de rotura, se romperían en menos de 1000 inversiones.

El fallo de los metales por fatiga se produce por las cargas aplicadas en forma variable o repetida. La carga máxima requerida de esta forma para producir el fallo es mucho menor que la carga de rotura estática. Muchos componentes y estructuras en servicio, están sometidos a cargas variables y si bien los esfuerzos promedio son a menudo bajos, las concentraciones locales de tensiones, que no reducen mucho la resistencia estática, pueden a veces producir el fallo por fatiga. Realmente, el mayor número de fallas en servicio son debidas a las fatigas y relativamente pocas debido a fallas estáticas.

La característica más notable de los fallos por fatiga es la falta de deformación en la región de las fracturas, incluso en materiales como el acero suave, que son bastante dúctiles cuando se rompen por una carga estática. Las grietas producidas por fatiga en su inicio son tan diminutas que no se

pueden percibir a simple vista y es bastante difícil localizarlas por inspección con magnaflux o con rayos X, y una vez que se han desarrollado a tamaño microscópico pueden difundirse y causar la fractura completa en un tiempo corto.

Las fracturas por fatiga están asociadas usualmente con muchos miles o millones de inversiones de esfuerzos, pero pueden ocurrir y ocurren después de cientos o incluso de decenas de ciclos.

Cuando las piezas de máquina fallan estáticamente, por lo general sufren una deformación muy grande debido a que el esfuerzo excedió a la resistencia de fluencia. Entonces debe reemplazarse antes de que ocurra la ruptura. Por lo tanto, muchas fallas estáticas son visibles y se detectan anticipadamente, pero una por fatiga no da señal alguna, es repentina y total y, por lo tanto, peligrosa. El diseño contra fallas estáticas es relativamente sencillo, pues los conocimientos actuales sobre el asunto son bastante completos. Pero la fatiga es un fenómeno mucho más complicado, solo explicado parcialmente. Cualquiera que no conozca lo suficiente sobre fallas por fatiga puede duplicar o triplicar los factores de seguridad y, así, crear un diseño que no fallará, pero tales diseños no serán competitivos en el mercado actual.

Entre los muchos factores que afectan la resistencia a la fatiga, el más importante es el de las concentraciones de esfuerzos el cual hace el cálculo más difícil que el correspondiente a los esfuerzos estáticos. A la vez, la resistencia a la fatiga depende del tamaño de un componente, de la magnitud relativa de las cargas estáticas y fluctuantes y del número de inversiones de la

carga. Además, la resistencia a la fatiga está adversamente afectada por la corrosión en un grado mayor que lo está la resistencia estática y particularmente por la corrosión por frotamiento, que es debida a pequeños movimientos repetidos, entre dos partes en contacto.

La fatiga no es exclusiva de los metales, sino que aparece también en los materiales no metálicos. En estos se incluyen la madera, plásticos, hormigón e incluso los huesos humanos y en muchos casos el comportamiento a la fatiga de estos materiales es similar al de los metales. (Moreno Félix, 2005)

2.1.2 Características de las fracturas por fatiga

La fatiga es una forma de fractura que se produce en estructuras sujetas a tensiones dinámicas y fluctuantes. Bajo estas circunstancias es posible que la fractura se produzca a niveles de esfuerzos considerablemente bajos.

El término fatiga es usado debido a que este tipo de fractura normalmente se produce después de un periodo de esfuerzos repetitivos o cíclicos. Se estima que la fatiga comprende aproximadamente un 90% de todas las fracturas metálicas, siendo de tipo catastrófica y ocurriendo rápidamente y sin aviso.

La fractura por fatiga es semejante por naturaleza a la fractura frágil aún en metales normalmente dúctiles en los que hay muy poco, o ninguna deformación plástica asociada con la fractura.

Las etapas del proceso son la iniciación y propagación de fisuras. Generalmente la superficie de fractura es perpendicular a la dirección de las tensiones de tracción aplicada.

Whoeler llevó a cabo experimentos sistemáticos sobre lo así llamado fatiga durante 1852 y 1870. El introdujo la curva S-N (Esfuerzo - Número de ciclos) (llamadas curvas de Whoeler), lo cual representa una de las características básicas de fatiga. Estas curvas dan la relación entre la amplitud de los esfuerzos cíclicos y el número de ciclos para su rotura. (Echevarria, 2003)

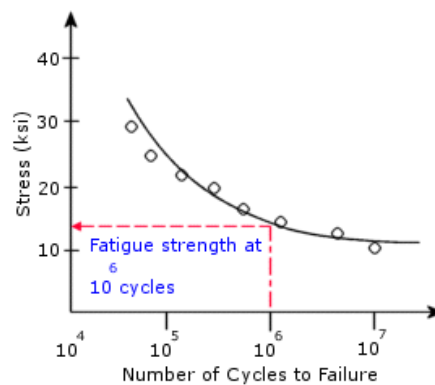


Figura 2.1. Curva S-N.

La Curva S-N de un material define valores de esfuerzos alternos vs. el n^o de ciclos requeridos para causar el fallo a un determinado ratio de esfuerzo. La siguiente figura muestra una curva típica S-N. El eje-Y representa el esfuerzo alterno (S) y el eje X representa el n^o de ciclos (N). La curva S-N se basa en una fracción de esfuerzos o esfuerzo medio s_m . Para cada material se pueden definir múltiples curvas S-N con diferentes valores de tensión media.

Las curvas S-N se basan en la vida a fatiga media o en una probabilidad de fallo dada. La generación de la curva S-N de un material requiere muchos ensayos para de una forma estadística variar los esfuerzos alternos, los esfuerzos medios (o fracción de esfuerzos) y contar el nº de ciclos. Para caracterizar un material se toma un conjunto de probetas y se las somete a sollicitaciones variables con diferentes niveles de esfuerzos, contándose el nº de ciclos que resiste hasta la rotura. Debido a la elevada dispersión estadística propia de la fatiga los resultados se agrupan en una banda de roturas. Una parte de esta dispersión puede atribuirse a errores del ensayo, pero es una propiedad del fenómeno físico lo cual obliga a realizar un gran nº de ensayos de probetas a fin de determinar la banda de fractura con suficiente precisión. Por tanto, caracterizar un material a fatiga supone un coste muy importante.

Los fundamentos para la predicción de vida a fatiga se basan en las propiedades del material obtenidas en el laboratorio ensayando con pequeños especímenes sujetos a cargas dinámicas hasta que parten o aparece la primera grieta. El método de esfuerzo-deformación local asume que la vida del espécimen en el laboratorio se puede relacionar con la vida de la estructura real. Es más, se asume que las cargas utilizadas en la estimación de vida a fatiga de la estructura son esfuerzos locales o deformaciones locales en posiciones críticas.

Dado que los fundamentos del análisis de fatiga están basados en datos empíricos, se debe considerar los siguientes puntos antes de realizar un análisis de fatiga:

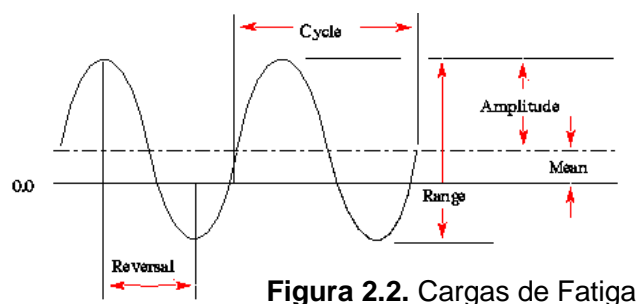
? Si se utilizan propiedades del material publicados en tablas, debe

tenerse en cuenta las condiciones del ensayo utilizadas para obtener esos datos. Asegúrese de que las condiciones corresponden al problema que se está investigando, y que se incluyen los procesos utilizados para la fabricación del material y las mismas condiciones de carga del ensayo.

? Verificar la validez de las cargas y su aplicación correcta.

Aparte de estas limitaciones, el análisis de fatiga es muy interesante, especialmente si se utiliza como una herramienta para ver características y tendencias de un posible fallo a fatiga. Modificando parámetros y comparando estimaciones de vida, se pueden observar tendencias a favor de un diseño más seguro. Únicamente a través de estudios comparativos el ingeniero podrá obtener un conocimiento real de los mecanismos de trabajo. (Iberisa, 2006).

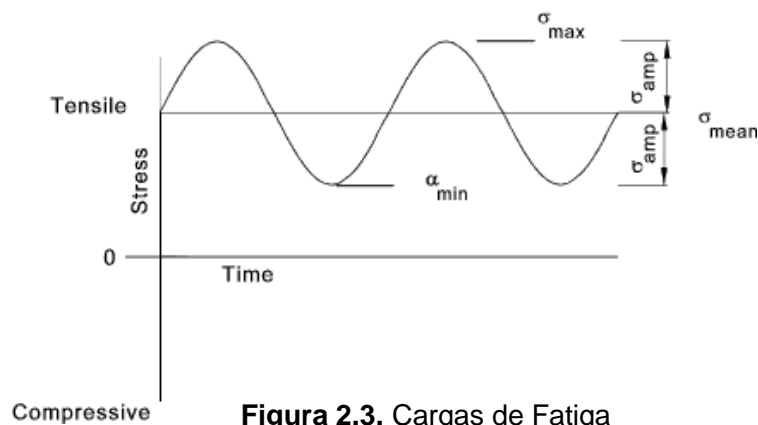
En las siguientes figuras que ilustran los conceptos básicos de las cargas de fatiga junto con el significado de los símbolos utilizados en el análisis de fatiga:



- $\Delta\varepsilon$ = local strain range
- $\Delta\sigma$ = local stress range
- $\frac{\Delta\varepsilon}{2}$ = local strain amplitude
- $\frac{\Delta\sigma}{2}$ = local stress amplitude
- σ_m = mean stress
- $\Delta\varepsilon$ = nominal strain range
- $\Delta\sigma$ = nominal stress range
- N_f = cycles to failure
- $2N_f$ = reversals to failure

? Esfuerzo máximo = S_{max}

- ? Esfuerzo mínima = S_{min}
- ? Esfuerzo media = $S_{mean} = (S_{max} + S_{min})/2$
- ? Esfuerzo variable = $S_{amp} = (S_{max}-S_{min})/2$
- ? Rango de esfuerzos $Ds = S_{max} - S_{min}$



- ? Razón de esfuerzos = $R = S_{min} / S_{max}$
- ? Razón de amplitud = $A = S_{amp} / S_{mean}$

Una de las características más notables que presentan las piezas que fallan por fatiga, es la poca deformación plástica en la región de fractura. La falla por fatiga comienza con una pequeña grieta, siendo esta tan diminuta que es imperceptible a simple vista. La grieta se desarrolla en un punto de discontinuidad en el material, tal como un cambio de sección transversal, un chavetero, un orificio, irregularidades causadas por el maquinado o grietas internas; una vez iniciada la grieta el efecto de concentración del esfuerzo se hace mayor y se extiende más rápidamente. Como el área forzada disminuye

en tamaño, el esfuerzo aumenta en magnitud hasta que, finalmente, el área restante falla de repente. (Acosta, 2005).

Si un componente está repetidamente sometido a cargas de suficiente magnitud, se formará eventualmente una grieta o grietas de fatiga en alguna región de tensiones altas, generalmente en la superficie, y progresará gradualmente a través del material hasta producir la fractura total. Las superficies fracturadas de las partes que han sido sometidas a la fatiga, tienen generalmente un aspecto característico por lo que se puede reconocer. Existen dos o tres zonas que pueden identificarse en cada superficie fracturada. Alrededor de la región de origen de la grieta, la superficie tiene a menudo un aspecto liso mostrando señales concoidales; esta es la zona en la que la grieta de fatiga se ha extendido con relativa lentitud. A veces puede distinguirse otra zona menos lisa en la que la grieta se ha propagado más rápidamente, quizás en varios lugares a la vez, de modo que la superficie de fractura es irregular. La tercera zona es el área en cual se produjo la fractura final cuando se redujo la sección y el metal no pudo aguantar la aplicación última de la carga. Esta zona puede tener un aspecto cristalino indicando que la fractura final fue frágil o un aspecto fibroso indicando una fractura final dúctil. Otra característica de una falla por fatiga es la coloración u oxidación de parte de las superficies fracturadas indicando que ha existido una grieta durante algún tiempo. (Moreno & Salazar, 2005).

La vida a fatiga se puede definir como el fallo debido a cargas repetitivas que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura (Fuchs, 1980). El análisis de fatiga estructural es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o complejas conocidas como cargas de servicio. Los resultados del análisis de fatiga se representan mediante

contornos en color que muestran la duración de los ciclos de carga que la estructura puede soportar antes de que se inicie cualquier grieta.

Los estudios estructurales lineales y no lineales no predicen los fallos por fatiga. Calculan la respuesta de un diseño sujeto a un entorno específico de cargas y restricciones. Si los resultados de desplazamientos y tensiones están por debajo de un cierto nivel admisible el ingeniero proyectista puede concluir que el diseño es seguro en ese entorno de solicitaciones con independencia de cuantas veces se aplique la carga.

Los resultados de los estudios estructurales (estáticos y dinámicos, lineales y no lineales) se usan como los datos básicos de partida para definir el estudio de fatiga. El nº de ciclos requeridos para que el fallo por fatiga ocurra en un punto depende del material y de la fluctuación de los esfuerzos. Esta información, para ciertos tipos de materiales férricos, nos la proporciona la llamada Curva S-N.

Las grietas por Fatiga se inician en la superficie del material. Por ello debe evitarse en lo posible ralladuras y desgarres en las superficies de buen acabado (por ejemplo, grabar el nombre comercial en la pieza), sobre todo en zonas con elevado nivel de esfuerzo. Cualquier tratamiento superficial (térmico o mecánico) que produzcan un estado de esfuerzos residuales de compresión en la superficie de las piezas aumentando la dureza de la superficie (por ejemplo, el temple, granallado o laminado superficial) incrementará la vida a fatiga de la pieza.

El análisis de fatiga se basa en la regla de Miner de daño acumulado para estimar la vida a fatiga a partir de una historia de tensiones o

deformaciones. La estimación se realiza reduciendo los datos de carga a una secuencia de picos y valles, contando los ciclos y calculando la vida a fatiga.

Los fallos por Fatiga se producen en tres fases:

- ? Fase 1 (iniciación): Una o más grietas se desarrollan en el material. Las grietas pueden aparecer en cualquier punto del material pero en general ocurren alrededor de alguna fuente de concentración de esfuerzo y en la superficie exterior donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas. Las grietas pueden aparecer por muchas razones: imperfecciones en la estructura microscópica del material, ralladuras, desgarres, muescas y entallas causadas por la herramienta de fabricación o medios de manipulación. En materiales frágiles el inicio de grieta puede producirse por defectos del material (poros e inclusiones) y discontinuidades geométricas.
- ? Fase 2 (propagación): Alguna o todas las grietas crecen por efecto de las cargas. Además, las grietas generalmente son finas y de difícil detección, aún cuando se encuentren próximas a producir la rotura de la pieza.
- ? Fase 3 (rotura): La pieza continua deteriorándose por el crecimiento de la grieta quedando tan reducida la sección neta de la pieza que es incapaz de resistir la carga desde un punto de vista estático produciéndose la rotura por fatiga. (Iberisa, 2006).

Así la vida a la fractura o el número total de ciclos para la fractura, se puede tomar como la suma de los ciclos requeridos para la iniciación N_i más los de propagación N_p :

$$N_r = N_i + N_p \qquad \text{Ec. (2.1)}$$

La contribución de la etapa de fractura final es insignificante ya que ella se produce muy rápidamente.

Las proporciones relativas a la vida total de N_i y N_p , dependen del material en particular y de las condiciones de ensayo.

A niveles bajo de esfuerzos (por ejemplo por fatiga de altos ciclos), una gran fracción de la vida a la fatiga se utiliza en la iniciación de la fisura. Cuando se incrementan los niveles de esfuerzos, N_i disminuye y las fisuras se forman más rápidamente. Así para fatiga de bajos ciclos (alto nivel de tensiones), la etapa de propagación es predominante (por ejemplo $N_p > N_i$).

Las fisuras asociadas con la fractura por fatiga casi siempre se inician o nuclean sobre la superficie de la pieza en algún punto de concentración de esfuerzo.

Los sitios de nucleación de fisuras incluyen ralladuras, filetes de maquinado, rugosidades, filetes, dentados, etc. Además las cargas cíclicas pueden producir discontinuidades superficiales microscópicas resultado del deslizamiento de dislocaciones las cuales también pueden actuar como concentradores de esfuerzos, y ser iniciadores de fisuras.

Una vez que una fisura estable ha nucleado, comenzará a propagar inicialmente muy despacio y, en metales policristalinos, a lo largo de planos

cristalinos con altas tensiones de corte. A esto algunas veces se le llama etapa I de propagación.

Esta etapa puede constituir una fracción grande o pequeña del total de la vida a la fatiga dependiendo del nivel de esfuerzos y la naturaleza de la pieza en ensayo. Altos esfuerzos y la presencia de entallas favorece una duración de la etapa I corta.

En la etapa I en metales policristalinos, las fisuras se extienden a través de solo algunos granos. La superficie de fatiga que se forma en esta etapa tiene una apariencia plana y sin características.

Una segunda etapa de propagación (etapa II) comienza mientras que la velocidad de propagación de la fisura aumente pronunciadamente. Además, en este punto hay también un cambio en la dirección de propagación siendo globalmente perpendiculares a las tensiones aplicadas. Durante esta etapa de propagación, el crecimiento de la fisura se produce por un proceso repetitivo de redondeo y afinado de la punta de la fisura. Al comienzo del ciclo de esfuerzos (carga cero), la punta de la fisura tiene la forma de una entalla doble. A medida que el esfuerzo de tracción se aplica, se produce una deformación localizada de las puntas de las entallas a lo largo de planos de deslizamiento que están orientados en un ángulo a 45° relativos al plano de la fisura. Con el incremento del ancho de la fisura, la punta avanza continuamente por una deformación por corte, tomando una forma redondeada. Durante la compresión, la dirección de la deformación por corte se invierte hasta que, cuando culmina el ciclo, se ha formado una nueva punta con doble entalla. Así la punta de la fisura ha avanzado la distancia de una

entalla durante el transcurso de un ciclo completo. Este proceso se repite con cada ciclo, hasta que se alcance eventualmente algún tamaño de fisura crítico lo cual precipitará la etapa del final y fracturará catastróficamente. (Echevarría, 2003).

2.1.3 Factores que afectan la vida a la fatiga

- ? Esfuerzos Medios: La dependencia de la vida a la fatiga con respecto a la amplitud de esfuerzos se representa en el gráfico S-N. Acá se toman para esfuerzos medios constantes σ_m , frecuentemente para una situación de ciclos de inversión completa ($\sigma_m = 0$). Sin embargo, los esfuerzos medios, también afectarán la vida a la fatiga, cuya influencia puede ser representada por una serie de curvas S-N medidas a diferente σ_m .
- ? Efectos de la superficie: Para muchas situaciones de cargas, los máximos esfuerzos en un componente o estructura se producen en su superficie. Consecuentemente, la mayoría de las fisuras que llevan a la fractura por fatiga, se originan en la superficie; específicamente en lugares de concentración de esfuerzos. Por esto se ha observado que la vida a la fatiga es especialmente sensible a las condiciones y configuración de la superficie de los componentes. Numerosos factores influyen sobre la resistencia a la fatiga y el manejo ingenieril apropiado guiará a un mejoramiento en la vida a la fatiga.
- ? Factores de diseño: Cualquier entalla o discontinuidad puede actuar como un concentrador de esfuerzos y luego sitio de origen de fisuras. La forma de la discontinuidad (por ejemplo el tamaño del radio de curvatura) actuará como un mayor o menor concentrador de esfuerzos. La probabilidad de fractura por fatiga

puede ser reducida evitando estas irregularidades o haciendo modificaciones de diseño en donde los contornos cambian abruptamente de tal forma que, las esquinas sean eliminadas, suavizando sus radios de curvatura.

- ? Tratamientos superficiales: Durante las operaciones de maquinado, pequeños rayones y entallas se introducen invariablemente en la superficie de la pieza por acción de las herramientas de corte. Estas marcas pueden limitar la vida a la fatiga. Se ha observado que mejorando la terminación superficial por pulido se alcanza un incremento significativo en la vida a la fatiga.

Uno de los métodos más efectivo de incrementar el rendimiento a la fatiga es introduciendo esfuerzos de compresión residuales en una fina capa externa de la superficie. Así los esfuerzos de tracción superficiales de origen externo serán parcialmente contrarrestados y reducidos por los esfuerzos residuales de compresión. El efecto neto es que se reduce la probabilidad de la formación de fisuras y por lo tanto la fractura por fatiga. (Echevarría, 2003).

2.1.4 Ensayos de fatiga

Para obtener medidas cuantitativas de resistencia a la fatiga, es necesario realizar los ensayos bajo condiciones controladas y, por ello, se dispone de una amplia variedad de máquinas de ensayo de fatiga. Se pueden aplicar diferentes métodos de ensayos de fatiga, desde los ensayos de laboratorio con probetas, bajo las más simples condiciones de esfuerzo, hasta los ensayos a escala natural de componentes y estructuras bajo condiciones simuladas de los que ocurre en la práctica. Los ensayos de laboratorio se

usan principalmente para determinar la influencia de la resistencia a la fatiga en factores como elementos de aleación, tratamiento térmico o acabado superficial, ya que los resultados se pueden obtener de una manera rápida y económicamente. Tales ensayos se pueden realizar en probetas lisas o entalladas, a baja o alta temperatura, o bajo condiciones corrosivas. Sin embargo para obtener datos prácticos son más significativos los ensayos de fatiga con partes reales. (Moreno & Salazar, 2005)

En base a los ensayos sobre probetas se han desarrollado métodos para cálculo y diseño a fatiga. La extrapolación de los resultados de los ensayos de fatiga a las piezas reales está basado en la utilización de una serie de valores modificativos empíricos, y por ello la fiabilidad de los métodos de cálculo es reducida si se compara por ejemplo con un cálculo estático lineal ya que existen numerosos factores que intervienen en el comportamiento a fatiga de un sistema físico que son imposibles de introducir en un modelo de elementos finitos, teniendo el usuario que "estimar" su efecto. Por tanto, en sistemas de alta responsabilidad es imprescindible recurrir a ensayos sobre prototipos. (Iberiza, 2006)

Durante un ensayo de fatiga, el ciclo de sollicitación se mantiene usualmente constante, así las condiciones de los esfuerzos aplicados pueden escribirse $S_m \pm S_a$, donde S_m es el esfuerzo estático o medio y S_a es el esfuerzo alternativo, igual a la mitad del intervalo del esfuerzo. S_e usa el signo positivo para expresar un esfuerzo de tracción, y el negativo para un esfuerzo de compresión. (Moreno & Salazar, 2005).

En general existen tres tipos de esfuerzos fluctuantes-tiempo.

- ? Donde la amplitud de los esfuerzos pasando por su media cero es simétrica y es igual, es decir los esfuerzos de compresión y tensión tienen igual magnitud.
- ? Donde la amplitud de los esfuerzos es asimétrica relativo al nivel cero de esfuerzo.
- ? Ciclos de esfuerzos aleatorios. (Franco, 2004).

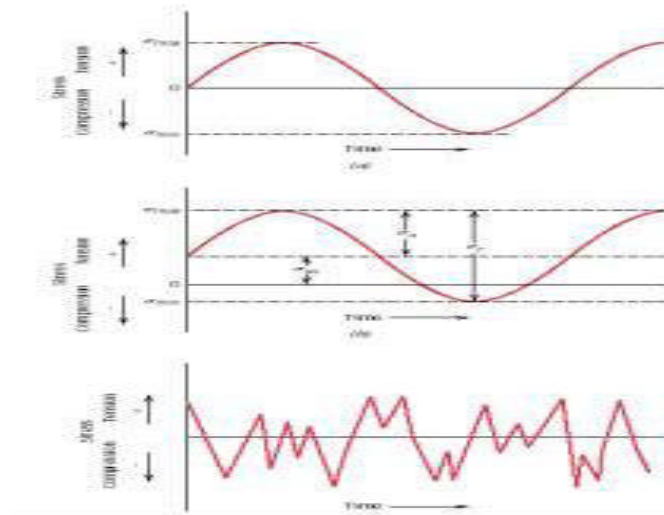


Figura 2.4. Tipos de esfuerzos.

2.1.5 Resistencia y límite de fatiga

El procedimiento para determinar la resistencia a la fatiga es ensayar un número de probetas similares, sometiendo cada una a un valor particular de carga fluctuante o alternante hasta su rotura; así se obtiene una relación entre la carga o esfuerzo S y el número de ciclos para la fractura N . La curva típica S - N , se representa en una escala logarítmica, ya que su valor puede variar entre unos millares a muchos millones.

Las curvas S-N están determinadas usualmente en un intervalo de aproximadamente 10^5 a 10^8 ciclos. Para algunas aplicaciones especiales se utiliza la resistencia a la fatiga para ensayos de menos de 10^4 ciclos, pero para muchas aplicaciones prácticas se requiere la resistencia a la fatiga para 10^9 o 10^{10} ciclos; pero para realizar los ensayos de fatiga a esos ciclos se necesitan tiempos muy largos usando máquinas de fatiga convencionales que operan a velocidades de 1000 a 10000 ciclos por minuto. Afortunadamente, las curvas S-N tienden a aplanarse en ensayos con alto número de ciclos, así que se pueden extrapolar con algún grado de confianza. El diagrama S-N representa una línea inclinada en la cual las probetas se rompen; otra horizontal por debajo de la cual las probetas no se rompen. La sollicitación a la cual la curva llega a ser horizontal se conoce como límite de fatiga.

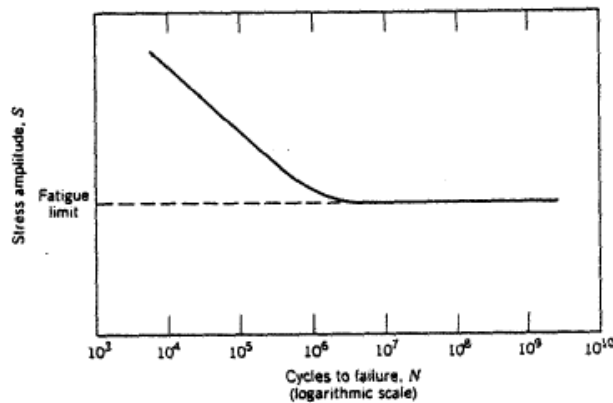


Figura 2.5. Curva S-N

El conjunto de conocimientos disponibles acerca de la falla por fatiga desde $N=1/2$ hasta $N=1000$ ciclos generalmente se clasifica como fatiga de ciclo bajo. La fatiga de ciclo alto es la falla correspondiente a los ciclos de esfuerzo con frecuencia mayor que 10^3 ciclos. (Moreno & Salazar, 2005).

2.1.6 Tipos de ensayo de fatiga

Las máquinas de ensayo de fatiga pueden clasificarse por el tipo de acción deformante que se aplica a la probeta, que pueden ser esfuerzo axial o directo, flexión, torsión y esfuerzos complejos o combinados. En las máquinas de esfuerzo directo, la probeta está sometida a esfuerzo de tracción-compresión; para una probeta plana, sin concentraciones de esfuerzos y las curvas de transición entre la sección de ensayo y los extremos ensanchados, bien proyectada, el esfuerzo a través de la sección de ensayo es uniforme y se calcula simplemente dividiendo la carga aplicada por el área de la sección. Las máquinas de fatiga por flexión son de dos tipos, uno en el que la probeta está girando, y otro en el que es flexada repetidamente. En la máquina de flexión rotatoria, la probeta se soporta como una viga y se carga con pesos muertos aplicados por medio de cojinetes, que permiten girar a la probeta. Cuando la probeta tiene movimiento de rotación, cada punto de la circunferencia de la sección de ensayo está sometido a un esfuerzo alternante que varía sinusoidalmente desde un valor de tracción a otro igual de compresión. Para los ensayos de flexión el esfuerzo nominal S está calculado a partir del momento de flexión aplicada M por la ecuación:

$$S=M*Y/I \qquad \text{Ec. (2.2)}$$

Donde Y es la distancia entre las fibras neutras y la extrema o más alejada, e I es el momento de inercia del área de la sección de ensayo; esto se transforma para una probeta cilíndrica de diámetro d en:

$$S=32M/p *d^3 \qquad \text{Ec. (2.3)}$$

Los esfuerzos de cizalla se obtienen usualmente, aplicando a la probeta un momento de torsión alternante y los esfuerzos complejos son fáciles de obtener por combinación de torsión y flexión, o sometiendo a una probeta tubular a una presión interna fluctuante. En un ensayo de fatiga por torsión, el esfuerzo nominal de cizalla S_s se calcula a partir del momento de torsión aplicado T_s por la ecuación:

$$S_s = T \cdot Y / J \quad \text{Ec. (2.4)}$$

donde J es el momento polar de inercia, y se transforma en:

$$S_s = 16T / \rho \cdot d^3 \quad \text{Ec. (2.5)}$$

para una probeta cilíndrica de diámetro d . (Moreno & Salazar, 2005).

2.1.7 Máquinas de ensayos de fatiga

Se puede decir que la mayoría de las investigaciones de fatiga se realizan en máquinas de fatiga de flexión rotatoria. En parte es debido a que estas máquinas son seguras, baratas y requieren poca atención, pero también porque el tipo de esfuerzo es igual al que se aplica a un gran número de componentes en las condiciones de servicio. Existen dos limitaciones importantes para este método de ensayo; primero, está virtualmente limitado a probetas cilíndricas, y segundo, que la probeta puede estar sometida solamente a esfuerzos alternantes. Las máquinas de flexión plana son más adecuadas para muchas aplicaciones, particularmente para ensayar componentes y estructuras de forma compleja. Las máquinas de acción directa son generalmente más complicadas y más caras, pero se prefieren a menudo porque se les puede adaptar fácilmente una carga estática y porque se obtiene una distribución uniforme de esfuerzos. Además, si la probeta está

sometida a una carga constante, el esfuerzo no está afectado por la deformación plástica.

El dispositivo para ensayos de fatiga más usado es la máquina de viga rotatoria de alta velocidad de R.R. Moore. Esta somete a la probeta a flexión pura por medio de pesos.

Una característica común de casi todas las máquinas de fatiga, es un contador para registrar el número de ciclos de esfuerzos a los que se ha sometido la probeta y un dispositivo para parar la máquina automáticamente cuando la probeta se rompe. (Moreno & Salazar, 2005).

2.1.8 Resistencia a la fatiga del hierro y del acero

Una de las características del comportamiento a la fatiga de los aceros, es que la curva S-N, muestra usualmente un límite de fatiga preciso. Esto está más acusado en los aceros al carbono y tiene lugar a un valor de N entre 10^5 y 10^7 . Para estos materiales, es posible determinar el límite de fatiga por ensayos de 10^7 ciclos solamente y este procedimiento es el adoptado usualmente. Con aceros aleados el límite de fatiga no es tan preciso por lo que es necesario continuar los ensayos de fatiga a más ciclos. El acero al carbono, muestra un límite a la fatiga preciso; las fracturas no tienen lugar hasta después de $2,3 \times 10^6$ ciclos.

Para el caso de la ingeniería de diseño se dispone de varias opciones para estimar el límite de fatiga, si el costo del proyecto lo justifica, deben utilizarse procedimientos experimentales para obtener la media y la desviación

estándar del límite de fatiga. Esta es buena práctica y debe utilizarse siempre que sea posible. Un segundo procedimiento recomendado es utilizar la siguiente ecuación:

$$S'_e = 0,5 S_{ut} \quad S_{ut} = (1400 \text{ MPa}) \quad \text{Ec. (2.6)}$$

$$S'_e = 700 \text{ MPa} \quad S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Donde S'_e es el límite medio de resistencia a la fatiga de la probeta rotatoria, pero se debe considerar una amplia desviación estándar. Un tercer método sería el de emplear la recta $(S'_e / S_{ut}) = 0,35$, y utilizar luego el límite medio de resistencia a la fatiga $S'_e = 552 \text{ MPa}$ cuando $S_{ut} > 1380 \text{ MPa}$. La marca prima en S'_e indica probeta de viga rotatoria, porque el símbolo S_e se reserva para límite de resistencia a la fatiga de un elemento de máquina particular. Estas dos resistencias pueden ser completamente distintas, la raya superior sobre el símbolo S'_e señala el hecho de que el valor de resistencia que se especifica es un valor medio y, por lo tanto, los resultados reales pueden variar en un sentido o en otro respecto a este. (Moreno & Salazar, 2005).

2.2 Aceros.

2.2.1 Definición y producción.

El acero es una aleación maleable de hierro y carbono que se produce por fusión y que endurecen cuando se le enfría bruscamente después de estar por encima de su temperatura crítica; contiene aproximadamente 0,05% - 2%

de carbono, entre 0,25% - 1% de manganeso y menores porcentajes de otros elementos aleantes.

El acero se produce a partir del arrabio, mediante la eliminación de impurezas hasta que el contenido de carbono en el hierro se reduce al nivel requerido. El proceso más frecuente usado para transformar los lingotes de hierro en acero es el soplado con oxígeno en medio básico; el cual produce el acero básico al oxígeno. (Acosta, 2005).

Los aceros pueden ser clasificados en variedades de sistemas, entre los cuales podemos nombrar:

- ? En base a la composición química: Al carbono, aleados, inoxidable.
- ? De acuerdo al método de manufactura: de hogar abierto, de proceso de oxígeno básico, método de horno eléctrico.
- ? El método de acabado: laminado en caliente, laminado en frío.
- ? Método de desoxidación: calmados, semicalmados, intermedios, efervescentes.
- ? La microestructura: ferríticos, perlíticos, martensíticos, etc.
- ? Al tratamiento térmico: recocido, temple-revenido, procesos termoquímicos, etc.

La clasificación de acuerdo a la composición química es el más utilizado en el ámbito internacional.

La designación SAE – AISI, corresponde a la American Iron and Steel Institute (AISI) y a la Society of Automotive Engineers (SAE). Este sistema es aplicado a productos semiterminados forjados, barras laminadas en caliente y acabadas en frío, alambrón y tubos sin costura, perfiles estructurales, planchas, láminas, tiras y tuberías soldadas. Los principales elementos aleantes son indicados por los primeros dígitos de la designación; los dos o los tres últimos dígitos indican el contenido de carbono en porcentaje. (Acosta, 2005).

En la designación AISI 1018, la primera cifra de la designación indica el tipo de acero según los principales elementos de aleantes, manganeso, fósforo, silicio, cromo níquel, molibdeno y azufre; y los dos últimos dígitos proporcionan información del contenido medio de carbono en porcentaje (%) en peso; aproximadamente 18% de carbono.

Este acero es conocido por ser un acero de bajo medio carbono, poseer buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condiciones de calibrado, es decir, acabado en frío. Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria.

Tabla 2.1. Composición Química del acero AISI 1018, expresada en % en peso (Iirsacero, 2007)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0,15 - 0,20	0,15 – 0,30	0,60 – 0,90	Máx. 0,04	Máx. 0,05	0,70 – 0,90	1,65 - 2	0,20 – 0,30

Cabe resaltar que los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumple el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o construir algún componente o estructura pero en ningún momento se deben considerar como valores estrictamente exactos para su uso en el diseño.

El acero cromo-níquel-molibdeno, es utilizado en partes de maquinarias sometidas a muy altas cargas dinámicas, como cigüeñales, ejes de leva, árboles de transmisión, barras de torsión, ejes de bomba, cardan y de hélices de aviones, pernos y tuercas a alta carga de tracción, rodillos transportadoras, vástagos y pines, muñones, engranajes, discos de embrague, piezas de chasis, acoples, ruedas dentadas y moldes para inyección de plástico, entre otros. (Acosta, 2005)

2.2.2 Influencia de los elementos aleantes

En el acero AISI 1018, los principales aleantes son el cromo, el níquel y el molibdeno; encontrándose también elementos como el silicio, el manganeso y el fósforo, cada uno de ellos influye en las propiedades del acero. A continuación se describe su influencia en las aleaciones de acero. (Sumindu, 2008).

- ? **Cromo:** Mejora la templabilidad, la resistencia a la corrosión, la resistencia mecánica a altas temperaturas y las propiedades de resistencia al desgaste. Sirve para aumentar la dureza e impide las deformaciones en el temple. Es uno de los elementos más usados en las aleaciones, debido a la versatilidad que otorga en la aleación.

- ? **Níquel:** Es el elemento más eficaz para reducir la fragilidad en el acero, evita el crecimiento de granos en los tratamientos térmicos, lo cual sirve para producir gran tenacidad; también hace descender los puntos críticos a los cuales ocurren las transformaciones en los tratamientos térmicos posteriores que se le realicen a la aleación.
- ? **Molibdeno:** Otorga gran resistencia al desgaste y a altas temperaturas, mejora la resistencia a la tracción y la templabilidad, disminuye el ablandamiento en el revenido. El molibdeno se disuelve en la ferrita, pero tiene una fuerte tendencia a formar carburos, sin embargo es estabilizador de los carburos complejos.
- ? **Silicio:** Aumenta la resistencia de los aceros de baja aleación y mejora la resistencia a la oxidación a altas temperaturas; es buen desoxidante y refina el tamaño del grano.
- ? **Manganeso:** Mejora la resistencia y aumenta moderadamente la templabilidad, contrarresta la fragilidad producida por el azufre, y se considera aleante cuando está presente en una proporción mayor al 0,6%.
- ? **Carbono:** Es el elemento que tiene más influencia en el comportamiento del acero. Al aumentar el contenido de carbono mejoran la resistencia mecánica y la templabilidad pero disminuyen la ductilidad y la forjabilidad, soldadura y corte.
- ? **Azufre y Fósforo:** Todos los aceros contienen pequeñas cantidades de Azufre y Fósforo principalmente como elementos residuales. En algunos aceros se realizan agregados extra de azufre para incrementar la maquinabilidad.

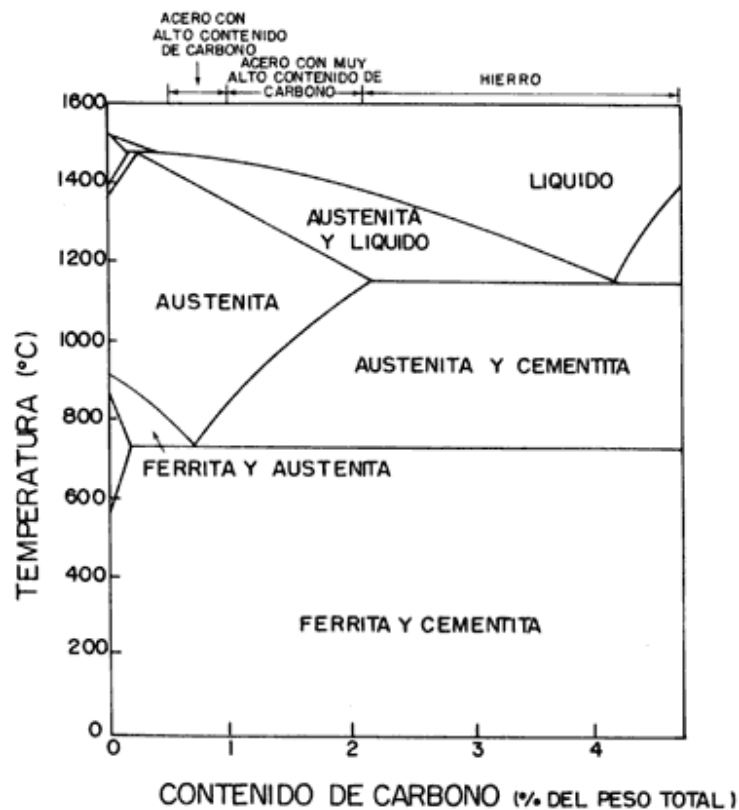


Figura 2.6. Diagrama Hierro-Carbono. (UTP, 2004).

2.2.3 Tratamiento térmico del acero

El tratamiento térmico es una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento de tiempos determinados y aplicadas a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas.

Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita. La naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero. El primer paso en el

tratamiento térmico del acero es calentar el material a alguna temperatura en o por encima del intervalo crítico para formar austenita. En la mayoría de los casos, la rapidez de calentamiento a la temperatura deseada es menos importante que otros factores en el ciclo del tratamiento térmico. Los materiales altamente esforzados producidos por trabajo en frío deben calentarse más lentamente que los que se hallan libres de esfuerzos para evitar distorsión. Por lo general, se hará menos daño al acero al utilizar una rapidez de calentamiento tan lenta como sea posible. (Acosta, 2005).

Existen numerosos tratamientos térmicos, pero a continuación se hará una breve descripción sólo de los tratamientos térmicos de temple y normalizado por ser los tratamientos térmicos relacionados con el presente trabajo. (Moreno & Salazar, 2005).

? **Temple:** Consiste en un enfriamiento rápido, utilizando diferentes medios de enfriamiento (agua, aceite, agua-sal-hielo, polímeros fundidos); el objetivo principal de este tratamiento es aumentar la dureza, obteniendo una estructura totalmente martensítica.

En el proceso de temple, debido a que la velocidad de enfriamiento aumenta, los átomos de carbono no tienen la posibilidad de difundirse en la estructura de la austenita, y aún cuando los átomos de hierro se desplazan ligeramente, no pueden llegar a alcanzar la estructura de cuerpo centrado, porque parte del carbono queda retenido en la solución; la estructura resultante es la martensita, una solución sólida sobresaturada de carbono retenido en una estructura tetragonal de cuerpo centrado.

Esta distorsión tan grande de la estructura cristalina es la causa principal de la elevada dureza de la martensita.

La variación de las propiedades mecánicas está directamente relacionada con la velocidad de enfriamiento, la cual depende de varios factores, tales como que la superficie de la pieza se enfría más rápidamente que el centro; además, conforme el tamaño de la pieza aumenta, menor es la rapidez de enfriamiento en cualquiera de sus partes; y finalmente, la velocidad de enfriamiento depende de la temperatura y de las características térmicas del medio usado para el temple, en la tabla 2.2, podemos observar la rapidez de enfriamiento en el centro de una barra de 1 plg, para diversos medios de enfriamiento.

Tabla 2.2 Rapidez de enfriamiento en (°C/s) en el centro de una barra de 1 plg, para diversos medios de enfriamiento. (Acosta, 2005)

Medio de enfriamiento	Rapidez de enfriamiento (°C/s)
Aceite (sin agitar)	18
Aceite (agitado)	45
H ₂ O (sin agitar)	45
H ₂ O (agitado)	190
Salmuera (sin agitar)	90
Salmuera (agitada)	230

La transformación se realiza solamente mientras dura el enfriamiento, cesando al interrumpirse este, por tanto, la transformación depende solamente de la disminución de temperatura y es independiente del tiempo. La martensita que se forma no guarda una relación lineal con el descenso de temperatura; al principio el número de agujas de martensita formado es pequeño, luego aumenta y al final, próximo a acabar la transformación, vuelve a disminuir.

- ? La martensita no está probablemente nunca en equilibrio, aunque su estructura se mantiene indefinidamente a temperatura ambiente; antes bien puede considerarse como una estructura de transición entre la fase de austenita metaestable y la ferrita que aparece en el equilibrio final.
- ? Las temperaturas de austenización para el temple son:

Aceros hipoeutectoides $\longrightarrow T_2 + 80^\circ\text{C}$

Aceros hipereutectoides $\longrightarrow T_1 + 50^\circ\text{C}$

T_1 : Temperatura crítica inferior (725°C)

T_2 : Temperatura crítica superior para aceros hipoeutectoides ($725^\circ\text{C} - 910^\circ\text{C}$).

- ? **Normalizado:** Consiste en el calentamiento de la pieza a temperatura de austenización, con un tiempo de permanencia en el horno según el espesor de la pieza y el posterior enfriamiento de la misma fuera del horno al aire tranquilo. Por medio del normalizado se consigue en el acero una mayor dureza y resistencia, se homogeniza la estructura y se mejora la maquinabilidad; esto debido a que, en la microestructura ocurre

un afinamiento o refinamiento del grano, obteniéndose un tamaño de grano pequeño y una microestructura compacta.

El realizar tratamiento térmico de normalizado en aceros a los cuales se les ha aplicado algún otro tratamiento térmico previo, se realiza con la finalidad de restablecer las condiciones originales del mismo. (Sumindu, 2008).

2.3 Propiedades mecánicas de los metales

El conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales, es de carácter necesario e imprescindible para todo diseñador independientemente de la especialidad donde se desenvuelva, ya que las mismas son la principal referencia con la que se puede contar para determinar o estimar el comportamiento que se espera tener con un material cuando es sometido a un trabajo determinado. A continuación se hará referencia a algunas de las propiedades mecánicas más importantes:

2.3.1 Dureza

Es difícil definir la propiedad dureza, excepto en relación con la prueba empleada en particular para determinar su valor. Debe tenerse en cuenta que un número o valor de dureza no puede utilizarse directamente en trabajos de diseño, como se puede hacer con un valor de resistencia a la tensión, ya que los números de dureza no tienen significado intrínseco. El valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve solo como comparación entre materiales o tratamientos y dicho valor es ampliamente utilizado para inspección y control. (Iriza, 2003)

Las diversas pruebas de dureza se pueden dividir en tres categorías:

- ? Dureza elástica.
- ? Resistencia al corte o abrasión.
- ? Resistencia a la indentación.

2.3.2 Dureza elástica

Este tipo de dureza se mide mediante un escleroscopio, el cual es un dispositivo para medir la altura de rebote de un pequeño martillo con emboquillado de diamante, después de que cae por su propio peso desde una altura definida sobre la superficie de la pieza a prueba. La altura de rebote se indica por un número sobre una escala arbitraria tal que cuanto mayor sea el rebote, mayor será el número y la pieza a prueba será más dura. (Iriza, 2003).

2.3.3 Resistencia al corte o abrasión

La resistencia al corte o abrasión puede ser determinada mediante la prueba de ralladura y la prueba o ensayo de lima, la prueba de ralladura fue ideada por Friedrich Mohs. La escala consta de diez minerales estándar arreglados siguiendo un orden de incremento de dureza. El talco es el 1, el yeso el 2, y así; hasta el 9 para el corindón y el diez para el diamante. Si un material desconocido es rayado apreciablemente por el seis y no por el cinco, el valor de dureza está entre cinco y seis. Esta prueba no se utiliza mucho en metalurgia, pero aún se emplea en mineralogía. La principal desventaja es que la escala no es uniforme. En la prueba o ensayo de lima, la pieza a prueba se somete a la acción de corte de una lima de dureza conocida, para determinar si se produce un corte visible. Las pruebas comparativas con una lima dependen del tamaño, forma y dureza de la lima, de la velocidad, presión

y ángulo de limado durante la prueba; y de la composición y tratamiento térmico del material a prueba. (Moreno & Salazar, 2005)

2.3.4 Resistencia a la indentación

Esta prueba generalmente es realizada imprimiendo en la muestra, la que está en reposo sobre una plataforma rígida, un marcador o indentador de geometría determinada, bajo una carga estática conocida que se aplique directamente o por medio de un sistema de palanca. Dependiendo del sistema de prueba, la dureza se expresa por un número inversamente proporcional a la profundidad de la indentación para una carga y marcador especificados, o proporcionales a una carga media sobre el área de mella. Los métodos comunes para pruebas de dureza por indentación se describen a continuación. (Iriza, 2003).

2.3.5 Prueba o ensayo de dureza Brinell

El probador de dureza Brinell generalmente consta de una prensa hidráulica vertical de operación manual, diseñada para forzar un marcador de bola de 10 mm de diámetro bajo una carga de 3000 kg para metales ferrosos y a 500Kg para metales no ferrosos. Para metales ferrosos, la bola es presionada sobre la muestra a prueba por lo menos durante diez segundos; para metales no ferrosos el tiempo es de 30 segundos. (Iriza, 2003).

El número de dureza Brinell (HB) es la razón de la carga en kilogramos al área en milímetros cuadrados de la impresión, y se calcula mediante la fórmula:

$$HB = \frac{L}{\pi \frac{D}{2} \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]} \quad \text{Ec. (2.8)}$$

Donde L= carga de prueba (Kg)

D= diámetro de la bola (mm)

d= diámetro de la impresión (mm)

2.3.6 Prueba o ensayo de dureza Rockwell

En esta prueba de dureza se utiliza un instrumento de lectura directa basado en el principio de medición de profundidad diferencial. La prueba se lleva a cabo al elevar la muestra lentamente contra el marcador hasta que sea aplicada una carga determinada menor. Esto se indica en el disco medidor. Luego se aplica la carga mayor a través de un sistema de palanca de carga. Después de que la aguja del disco llega al reposo, se quita la carga mayor y, con la carga menor todavía en acción, el número de dureza Rockwell es leído en el disco medidor. (Iriza, 2003)

2.3.7 Prueba o ensayo de dureza Vickers

En esta prueba, el instrumento utiliza un marcador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo incluido de 136° entre las caras opuestas. El intervalo de carga está generalmente entre 1 y 120 Kg. El probador de dureza Vickers funciona bajo el mismo principio que el probador Brinell, y los números se expresan en términos de carga y área de impresión. (Iriza, 2003)

$$HV = \frac{1.854L}{d^2} \quad \text{Ec. (2.9)}$$

L = carga aplicada (Kg)

d = longitud de la diagonal del cuadrado de impresión (mm)

2.3.8 Límite elástico

Si se retira una pequeña carga aplicada sobre la pieza a prueba, la aguja del extensómetro regresará a cero, indicando que la deformación producida por la carga es elástica. Si la carga se aumenta continuamente, se libera después de cada incremento y se revisa el extensómetro, entonces se alcanzará un punto en que la aguja no regresará a cero. Esto indica que ahora el material tiene una deformación permanente; por lo tanto, el límite elástico puede definirse como el esfuerzo mínimo al que ocurre la primera deformación permanente. (Smith, 1993).

2.3.9 Punto de fluencia

Cuando la carga en una pieza a prueba aumenta más allá del límite elástico, se alcanza un esfuerzo al cual el material continuo deformándose sin que haya incremento de la carga. (Smith, 1993).

2.3.10 Resistencia límite

Conforme aumenta la carga aplicada sobre la pieza a prueba, el esfuerzo y la deformación se incrementan, para un material dúctil, hasta que se alcanza el esfuerzo máximo; por tanto, la resistencia límite o la resistencia de tensión es el esfuerzo máximo desarrollado por el material, basado en el área transversal original. (Smith, 1993).

2.3.11 Ductilidad

La ductilidad de un material se determina a partir de la cantidad de deformación que le es posible soportar hasta que se fractura. Esta se determina en una prueba de tracción mediante dos mediciones, las cuales son

deformación o alargamiento y reducción de área, expresadas siempre en forma porcentual. (Smith, 1993).

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} * 100 \quad \text{Ec. (2.10)}$$

ε = es la deformación

l y l_0 = longitud final y longitud inicial respectivamente.

La reducción de área está dada por la fórmula:

$$\%RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} * 100 \quad \text{Ec. (2.11)}$$

CAPÍTULO 3

Marco Metodológico

3.1 Nivel de la investigación

La investigación a desarrollar es del tipo experimental, cuyo propósito es el de interpretar realidades de hecho, de la naturaleza actual. La misma tiene como objetivo principal, evaluar el comportamiento de un acero bajo tratamientos térmicos de temple y normalizado, razón por la cual se hace necesario describir de manera detallada, como se produce o se desarrolla el fenómeno de la fatiga en el material a ensayar, además de detallar las características metalográficas del material, así como la superficie en donde se produce y se propaga la grieta del material debido al efecto de la fatiga. Además existe un enfoque explicativo, debido a que se tiene que determinar la relación causa-efecto que existe entre los tratamientos térmicos y el fenómeno de fatiga.

3.2 Diseño de la investigación

El tipo de investigación que se desarrollará, corresponderá a una investigación documental y experimental. Se aplicará la investigación documental, ya que se debe recurrir a referencias bibliográficas, información en la Web, además de trabajos de investigación previos como los que se han expuesto en los antecedentes de la investigación. La investigación experimental también se adoptará, debido a que los datos necesarios se obtendrán de las observaciones y ensayos realizados en el laboratorio.

3.3 Población y muestra

Para la investigación, la población esta constituida por 81 probetas a ensayar de las cuales, 9 probetas están destinadas para los ensayos de tracción y 72 probetas para los ensayos de fatiga, de manera que para que una probeta sea considerada dentro de la muestra, debe presentarse la fractura de la misma en una zona previamente definida y establecida por parámetros y especificaciones fácilmente identificables por el investigador.

3.4 Tipo de muestreo

El tipo de muestra de esta investigación no es probabilística, debido a que la selección de los elementos de la muestra depende del criterio del investigador y de características propias de la misma, es decir, la selección se realiza en desconocimiento de la probabilidad que tienen las probetas para integrar la muestra.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos que se emplearán en ésta investigación para la recolección de datos, serán la observación directa y el análisis documental proveniente de la bibliografía recopilada. Los resultados obtenidos serán por medio de la observación de microscopios, toma de fotografías, todos ellos provenientes de los ensayos de tracción, dureza y fatiga. Los instrumentos utilizados para la recolección de datos, serán las tablas, gráficos y fotografías obtenidas del ensayo a fatiga, así como del estudio metalográfico.

3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos recopilados se hará mediante la evaluación de los valores experimentales obtenidos del laboratorio para verificar si guardan relación entre si, esto se aplica a los ensayos de fatiga. A los resultados obtenidos también se le aplicará un análisis teórico mediante el empleo de ecuaciones y condiciones que permitan obtener valores de manera de compararlos con los parámetros establecidos. Del mismo modo se analizarán las fotografías de las pruebas metalográficas, para concluir acerca de sus características y propiedades.

3.7 Procedimiento experimental

3.7.1 Composición química

El material a utilizar para la elaboración de las probetas es el acero AISI 1018, del cual se conoce su composición química según la información obtenida del fabricante. La información es la siguiente:

Tabla 3.1 Composición química del acero AISI1018. Sumindu (2008)

Material	Carbono(C)	Azufre(S)	Fósforo(P)	Silicio(S)	Manganeso(Mn)
Acero AISI 1018	(0,15-0,20)%	0,04% máx.	0,04% máx.	(0,15-0,35)%	(0,60-0,90)%

3.7.2 Cantidad y dimensiones de probetas de tracción y fatiga

Basándose en lo establecido en las normas ASTM A370, ASTM E606 Y ASTM E739, las cuales son para el desarrollo de los ensayos a tracción, límite de fatiga y para la construcción de la curva S-N, respectivamente, se tiene que la cantidad mínima de probetas requeridas depende de cada tipo de ensayo; estableciendo que para ensayos preliminares y exploratorios se requiere de un mínimo de 6 a 12 probetas, para los ensayos a tracción se necesita ensayar un mínimo de 3 probetas por cada condición a ensayar y para los ensayos a fatiga se requiere de 24 probetas por cada condición a ensayar, esto es, el ensayo de 6 probetas por cada nivel de esfuerzo y la aplicación de 4 niveles de esfuerzos, basándose en lo establecido por la norma ASTM E739. Se utilizarán las siguientes condiciones a ensayar en la investigación: probetas en estado natural (sin tratamiento térmico), probetas con tratamiento térmico de temple y probetas con tratamiento térmico de normalizado. Por consiguiente, se requerirá de 9 probetas para los ensayos de tracción y un total de 72 probetas para los ensayos a fatiga. Adicionalmente se tomará en cuenta un exceso de 3 probetas de fatiga por cada condición de ensayo y de esa manera prever cualquier eventualidad.

En la elaboración de las probetas para los ensayos de tracción, las dimensiones de las mismas se realizarán en base a lo establecido en la norma ASTM A370, la cual establece un diámetro de sección de ensayo de $8,75 \pm$

0,18 mm, una longitud total de 200 mm y una longitud en la sección de ensayo de 45 mm, tal como se muestra en la Figura 3.1.

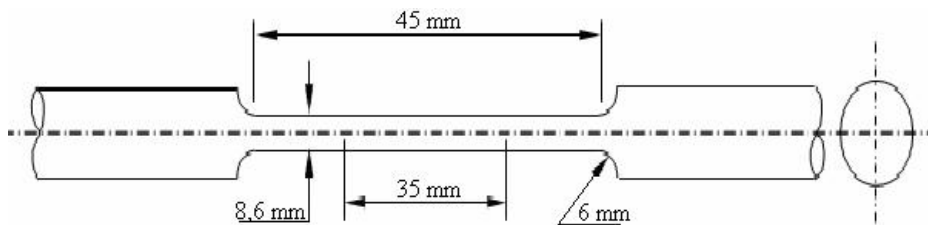


Figura 3.1. Probeta para ensayos de tracción según la norma ASTM A370.

Para la elaboración de las probetas para ensayos de fatiga las dimensiones se establecen de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM E606, la cual establece un diámetro de sección de ensayo de 6,35 mm y en base a las instrucciones que establece la máquina de ensayos de fatiga en concordancia a lo establecido en la norma. La probeta se muestra en la Figura 3.2.

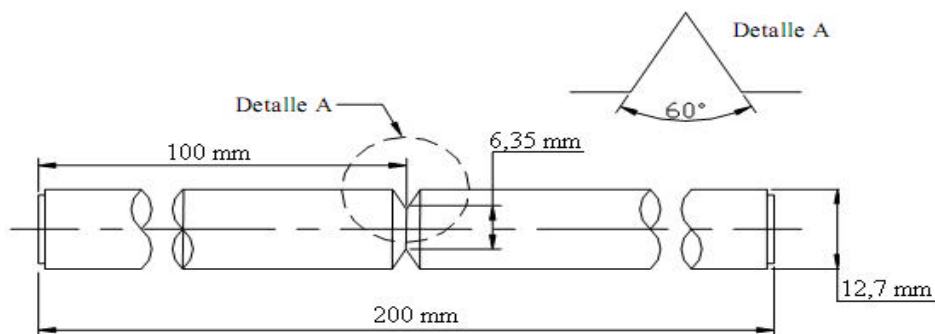


Figura 3.2. Probeta para ensayos a fatiga según la norma ASTM E606.

3.7.3 Tratamientos térmicos

Una vez elaboradas las probetas se procede a realizarle los respectivos tratamientos térmicos a cada una de ellas. Siguiendo lo establecido en el manual de la ASM (Metal Handbook) para este tipo de acero, para el temple, se procede a calentar las probetas hasta una temperatura superior a la de austenización (870 °C), para luego enfriarlas rápidamente en un medio acuoso, en este caso se utilizará aceite a temperatura ambiente. Para el normalizado se calientan igualmente las probetas (3 de tracción y 24 de fatiga) hasta llevarlas a su temperatura de austenización (940 °C), para posteriormente dejarlas enfriar lentamente al aire. Los tratamientos térmicos serán realizados en un horno eléctrico marca Termolyne, modelo 48000 Furnace, perteneciente al Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

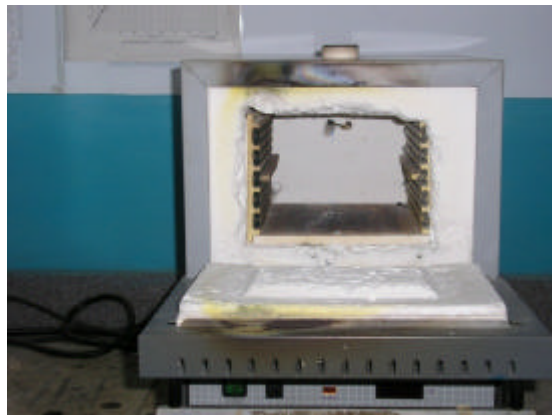


Figura 3.3. Horno Eléctrico.

3.7.4 Análisis microscópico

La metalografía se realiza a través del análisis microscópico de una muestra del material, para determinar las características estructurales del material, tales como, tamaño del grano, microconstituyentes del material y observar posibles imperfecciones del mismo. Para este análisis se prepara una muestra del mismo, en su condición original y con los dos tratamientos térmicos.

Para este análisis la muestra debe prepararse de la siguiente manera:

Antes de la preparación propia de la probeta, se le debe realizar un embutido, este consiste en sembrar la muestra en una resina termoendurecible llamada bakelita. Luego se selecciona una sección representativa del material, aproximadamente de 1 cm, a una distancia de 1 cm de la fractura de la probeta. Ahora se debe realizar el desbaste a la probeta, como se trata de un material duro, este se logra sometiendo la cara de la muestra seleccionada a la acción de un disco cortador abrasivo, el cual se hace girar a alta velocidad. Para el desbaste grueso se utiliza un papel esmeril 240, en este paso, se busca dejar la cara de la probeta plana y debe hacerse en un solo sentido, sin ejercer presión para no dejar rayas profundas en la misma. Seguidamente se continúa con el desbaste haciendo un desbaste intermedio, con papel esmeril 320 y 400, realizando el lijado en forma perpendicular al anterior, hasta eliminar las marcas anteriores. Se continúa el desbaste con papel esmeril 600 y 1200, en sentido perpendicular al anterior, buscando siempre desaparecer las marcas anteriores. Por último se realiza el pulido para eliminar las rayas finas producidas por el último desbaste, este se realiza en la pulidora metalográfica usando paños giratorios impregnados en suspensión acuosa (Alúmina). Seguidamente se realiza el

ataque químico, en donde se pasa un algodón impregnado con el reactivo sobre la cara pulida de la probeta, con este ataque se pretende hacer visibles las cavidades, estricciones, entre otros, presentes en la muestra. El reactivo utilizado fue Nital al 3% (3% de ácido nítrico diluido en un 97% de alcohol etílico).

El examen microscópico de las probetas de acero AISI 1018, en las tres condiciones estudiadas se hizo observando al microscopio muestras del acero para las condiciones de estudio y tomando las microfotografías correspondientes a aumentos de 100, 200, 400 y 1000X; en las cuales se observa el tipo de microestructura presente en cada condición y se determinó el tamaño de grano en su condición original (sin tratamiento térmico) a un aumento de 100x utilizando el método de comparación establecido en la norma ASTM E112, el cual consiste en encontrar un patrón que coincide con la muestra en estudio y entonces se designa el tamaño de grano del metal por el número correspondiente al número índice del patrón mixto; se tratan de manera semejante, en cuyo caso se acostumbra especificar el tamaño de granos en términos de dos números que denota el porcentaje aproximado de cada tamaño presente. El método de comparación es más conveniente y bastante preciso en muestras de granos de ejes iguales.

El número de tamaño de grano “n” puede obtenerse con la siguiente relación:

$$N = 2^{(n-1)} \qquad \text{Ec. (3.1)}$$

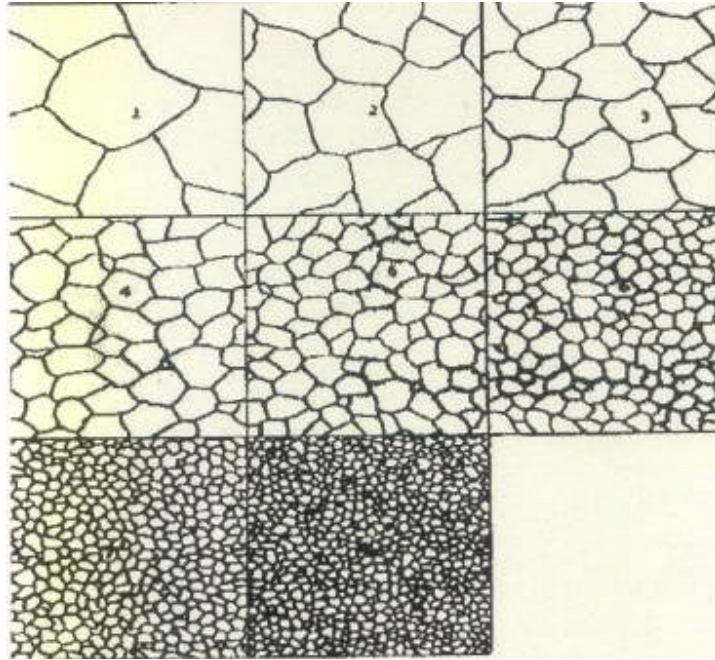


Figura 3.4. Tamaño de grano ordenado desde $n=1$ hasta 8



Figura 3.5. Microscópio Óptico.

3.7.5 Ensayo de dureza

Estos ensayos se realizan tomando una muestra de 3 probetas por cada condición a ensayar, para posteriormente realizar el promedio de cada condición y así determinar la dureza del acero en sus tres diferentes condiciones. Para determinar la dureza se debe preparar el material lijando ambas caras del mismo de manera que estas queden paralelas, una vez listas se debe colocar el penetrador y aplicar la carga correspondiente, para dureza Rockwell C, la carga debe ser de 150 kg y se utiliza un penetrador de punta de diamante. La prueba de dureza se realiza en una máquina de ensayos de dureza marca Buehler perteneciente al Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

3.7.6 Ensayo de tracción

Para la realización de este ensayo primero se deben establecer los parámetros para el ensayo, los cuales son la fuerza aplicada y velocidad de avance, estos se establecieron basándose en referencia a los estudios previos realizados y consultando la norma ASTM A370. Los resultados de la prueba son guardados por el equipo para posteriormente procesarlos y analizarlos. Este ensayo se realiza en la Máquina Universal de ensayos marca Gabaldini perteneciente al Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.



Figura 3.6. Máquina Universal de Ensayos.

Este consiste en aplicar cargas axiales a la probeta hasta que ocurra la falla del material, luego de ello se analizan los resultados para evaluar sus propiedades tales como: límite elástico, esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción, esfuerzo de ruptura y ductilidad.

3.7.7 Ensayo de fatiga

El ensayo a fatiga consiste en hacer girar las probetas sometiéndolas a esfuerzos cíclicos y realizando el conteo del número de ciclos que soporta la misma antes de fallar. La probeta es montada en la máquina y se sujeta por sus extremos mediante el uso de mordazas acopladas al motor y a un eje cónico posterior por medio del cual se le aplica el momento torsor a la probeta. El esfuerzo flector para una barra de sección circular se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$M \propto \frac{SD^3}{32} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

En donde M es el momento flector aplicado por el dispositivo de carga de la máquina en N.m, S es el esfuerzo flector aplicado a la sección transversal mínima de la probeta en N/m², y D es el diámetro de dicha sección en m.

Los resultados obtenidos de estos ensayos se tabulan para con los mismos construir la curva de Wohler para condición de estudio, y las tres juntas, para así establecer comparaciones, además de determinar la ecuación de Basquin y sus parámetros para cada condición de estudio.

La ecuación de la resistencia a la fatiga o ecuación de Basquin se expresa como:

$$S_f \propto AN_f^{-b} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Donde A es el coeficiente de resistencia a la fatiga y b es el exponente de resistencia a la fatiga.

Una vez conocido el esfuerzo máximo por medio del ensayo a tracción, se procede a determinar el límite de fatiga que se puede aplicar a las probetas, con el método de la escalera que es un método estadístico que se emplea para tal fin, según éste se debe ensayar 10 probetas, una a la vez. La primera probeta se ensaya con un nivel de esfuerzo igual al valor límite de fatiga estimado (0,5 S_{tracción}), si esta falla el siguiente nivel de esfuerzo debe disminuirse en un escalón.

Este procedimiento se realiza hasta que la probeta no falle, que es teóricamente un número de 10^6 ciclos, si la probeta llega a este ciclaje sin fallar, se debe aumentar el nivel de esfuerzo en un escalón para la próxima probeta a ensayar y de esta manera aumentar sucesivamente el esfuerzo cuando esta no falle o disminuirlo cuando falle, hasta ensayar todas las probetas.

El límite de fatiga se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$L = X_0 + d \left(\frac{A}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. (3.4)}$$

En donde X_0 es la longitud inicial en metros (m), d es el diámetro en metros (m), A es el coeficiente de resistencia a la fatiga y N es el número de ciclos. El signo (+) se utiliza cuando el análisis se basa en las probetas que no fallan y en caso contrario se utiliza el signo negativo (-).

Este ensayo se lleva a cabo en la maquina de ensayos de fatiga rotativa marca Fatigue Dynamics perteneciente al Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.



Figura 3.7. Maquina para Ensayos de Fatiga.

3.7.8 Análisis fractográfico

Para realizar el análisis de las superficies de fractura, se toman muestras de las probetas ensayadas a altos ciclajes y bajo esfuerzo y las de bajo ciclaje y alto esfuerzo, tomando como criterio dos muestras por cada condición de ensayo, en total 12 muestras. Las muestras tomadas para la fractografía deben cortarse de 6 a 10 mm aproximadamente, por debajo de la zona de fractura, este corte se realiza con la cortadora metalográfica, para luego limpiarlas en el equipo de limpieza ultrasónica, perteneciente al Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Después se sacan de dicho equipo, se lavan con agua y se secan con un chorro de aire caliente.

Para llevar a cabo el estudio fractográfico, se utiliza el microscopio de barrido electrónico (MEB), en el cual se observan las superficies de fractura y se toman las microfotografías representativas del mecanismo de fractura, para así determinar el tipo de fractura. Adicionalmente se debe revisar toda la superficie de fractura para identificar posibles inclusiones y la composición

química de las mismas. Este microscopio marca Phillips se encuentra ubicado el Centro de Investigaciones Médicas y Biomédicas de la Universidad de Carabobo (CIMBUC).



Figura 3.8. Microscópio Electrónico de Barrido.

CAPÍTULO 4

Resultados y Análisis

4.1 Ensayos de dureza

A las probetas de acero AISI 1018 se les realizó ensayos de dureza para cada una de las condiciones estudiadas. El ensayo utilizado fue el de dureza Rockwell, en la escala Rockwell C, utilizando para ello un penetrador de punta de diamante con una carga aplicada de 150 kgf. Por cada condición de estudio se utilizó una muestra, es decir, tres en total, y a cada una de ellas se les realizaron un total de cinco penetraciones para determinar la dureza del acero estudiado. Los resultados obtenidos para cada condición estudiada se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resultados de los ensayos de dureza del acero AISI 1018 para las tres condiciones de estudio.

Condición	Dureza 1 (HRC)	Dureza 2 (HRC)	Dureza 3 (HRC)	Dureza 4 (HRC)	Dureza 5 (HRC)	Dureza Prom. (HRC)	Desviación Estándar
Original	16,80	16,20	17,00	17,50	18,20	17,14	0,75
Temple	53,80	54,30	52,60	55,00	54,20	53,98	0,88
Normalizado	20,50	23,00	23,10	21,60	23,30	22,30	1,21

En la tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de dureza y la dureza promedio para cada condición estudiada en la escala Rockwell C. En dicha tabla se observa que el temple es el que presenta la

mayor dureza en comparación a las demás condiciones, esto se debe a que la aplicación de éste tratamiento térmico endurece el material, aumentando la fragilidad del mismo. Por otra parte, la dureza promedio con tratamiento térmico de normalizado es mayor respecto a la de estado original, ya que se logra un refinamiento del grano del 100% aproximadamente, permitiendo el endurecimiento del material.

4.2 Ensayo de tracción

A partir de la realización del ensayo mecánico de tracción a las probetas de acero AISI 1018 para cada una de las condiciones estudiadas, es posible determinar las propiedades mecánicas del material en los puntos máximos y de ruptura, dichas propiedades y sus variables son respectivamente: esfuerzo máximo, esfuerzo de ruptura, fuerza máxima y fuerza de ruptura, así como el porcentaje de reducción de área y el porcentaje de alargamiento.

En la tabla 4.2 se muestran las dimensiones de las probetas antes y después del ensayo de tracción, así como las propiedades mecánicas obtenidas como porcentaje de alargamiento, porcentaje de reducción de área, para cada probeta ensayada por cada condición.

Tabla 4.2. Dimensiones de las probetas AISI 1018 ensayadas a tracción.

Condición	Probeta	Diámetro Inicial D_i (mm)	Diámetro Final D_f (mm)	Reducción de Área %R.A	Longitud Inicial L_i (mm)	Longitud Final L_f (mm)	Alargamiento % Al
Original	1	8,55	5,05	65,11	35,00	46,10	31,71
	2	8,75	7,20	32,29	35,00	35,40	1,14
	3	8,55	4,95	66,48	35,00	44,20	26,29
Temple	1	8,70	6,90	37,10	35,00	37,50	7,14
	2	8,65	6,75	39,11	35,00	40,30	15,14
	3	8,65	6,80	38,20	35,00	37,15	6,14
Normalizado	1	8,60	5,10	64,83	35,00	47,80	36,57
	2	8,70	5,00	66,97	35,00	47,45	35,57
	3	8,60	5,00	66,20	35,00	48,55	38,71

A continuación se muestran los gráficos de Esfuerzo-Deformación del acero AISI 1018 para cada probeta ensayada en cada una de las condiciones de estudio. La figura 4.1 corresponde a los ensayos en condición original, la 4.2 a los ensayos en condición de temple y la 4.3 a los ensayos en condición de normalizado.

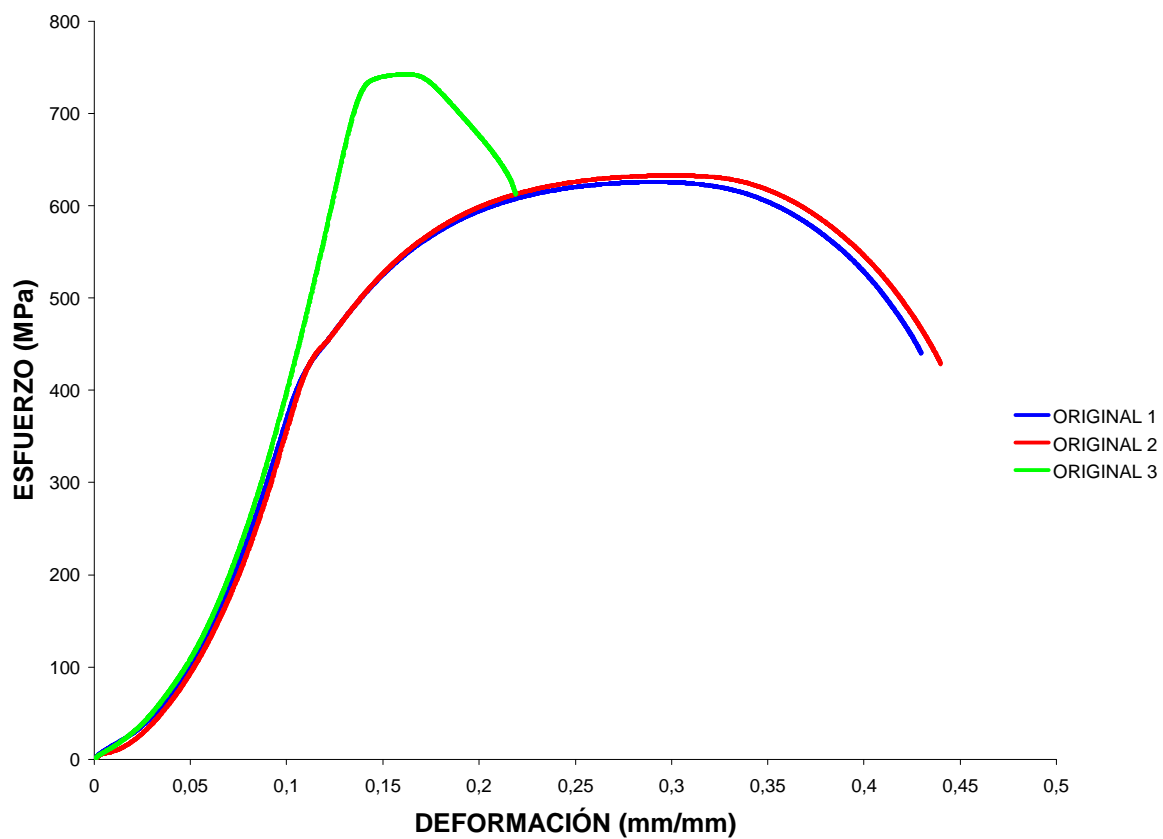


Figura 4.1. Curvas Esfuerzo-Deformación, condición original de entrega.

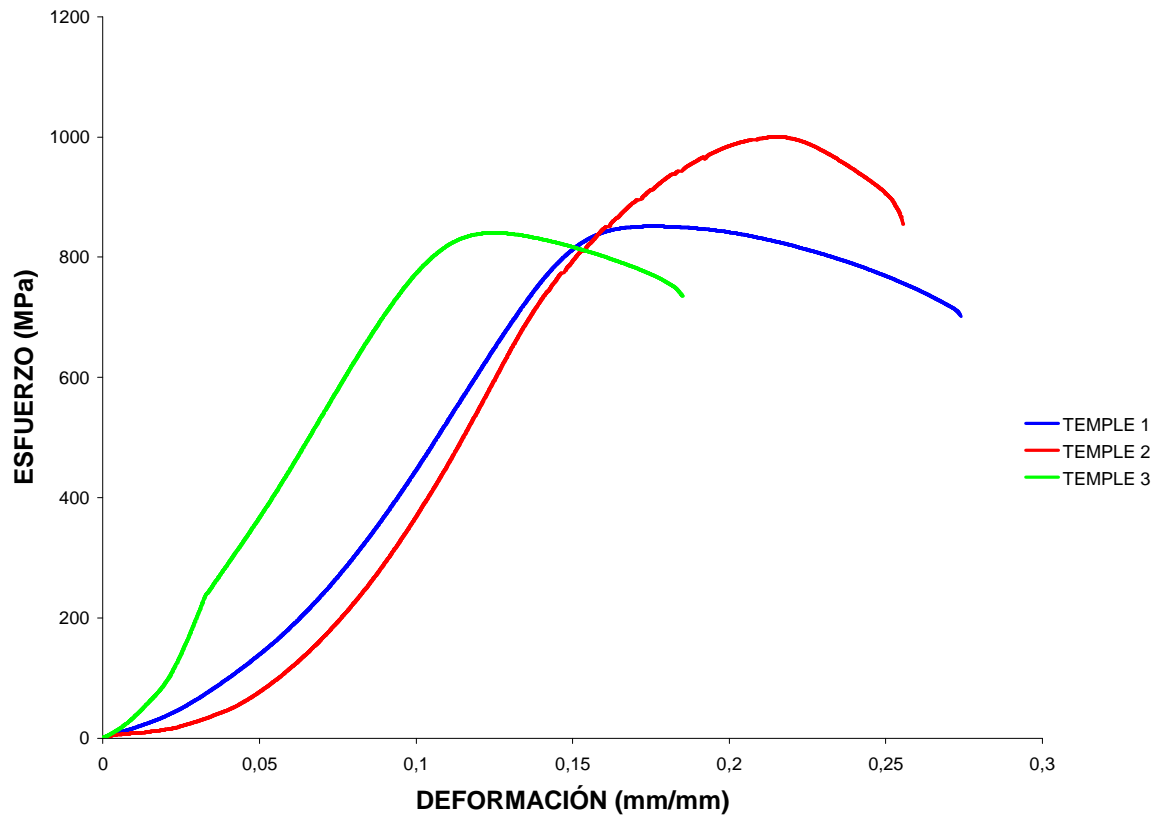


Figura 4.2. Curva Esfuerzo-Deformación, condición de Temple.

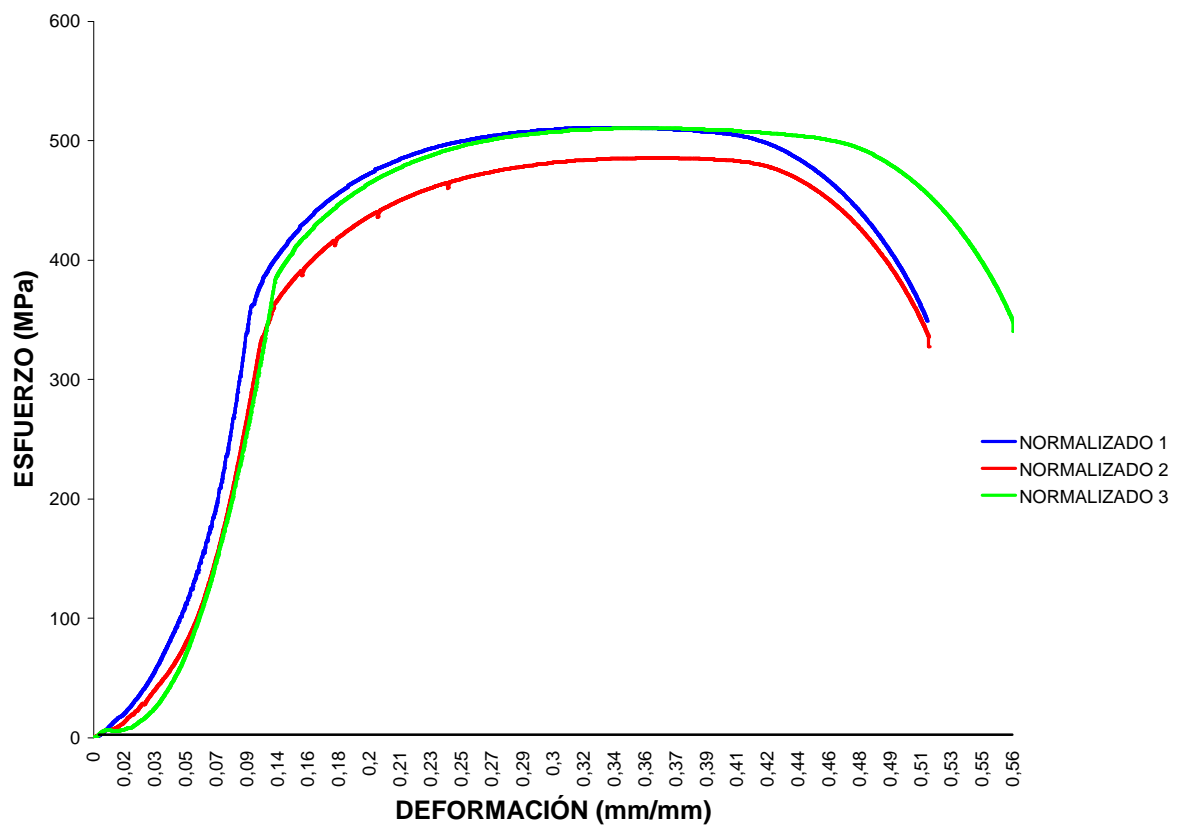


Figura 4.3. Curva Esfuerzo-Deformación, condición de Normalizado.

En la tabla 4.3, 4.4 y 4.5 se detalla de manera resumida los datos obtenidos de las curvas mostradas anteriormente, las cuales se obtienen de los ensayos a tracción para cada una de las probetas ensayadas.

Tabla 4.3. Resultados de los ensayos a tracción para la condición original.

Condición	Variables	1	2	3	Promedio	Desviación Estándar
Original	Fuerza Máxima $F_{m\acute{a}x}$ (N)	35.923	36.337	43.637	38.632,33	4339,11
	Esfuerzo Máximo $S_{m\acute{a}x}$ (MPa)	625,68	632,89	742,56	667,04	65,50
	Fuerza de Ruptura F_{rup} (N)	25.181	24.525	31.530	27.078,67	3868,90
	Esfuerzo de Ruptura S_{rup} (MPa)	438,58	427,16	536,54	467,43	60,12

Tabla 4.4. Resultados de los ensayos a tracción para la condición de temple.

Condición	Variables	1	2	3	Promedio	Desviación Estándar
Temple	Fuerza Máxima $F_{m\acute{a}x}$ (N)	50.057	60.131	49.963	53.383,67	5843,55
	Esfuerzo Máximo $S_{m\acute{a}x}$ (MPa)	851,81	999,98	840,47	897,42	89,00
	Fuerza de Ruptura F_{rup} (N)	41.219	50.905	42.613	44.912,33	5236,40
	Esfuerzo de Ruptura S_{rup} (MPa)	701,415	846,553	716,826	754,93	79,72

Tabla 4.5. Resultados de los ensayos a tracción para la condición de normalizado.

Condición	Variabes	1	2	3	Promedio	Desviación Estándar
Normalizado	Fuerza Máxima $F_{\text{máx}}$ (N)	29.681	28.859	29.644	29.394,67	464,27
	Esfuerzo Máximo $S_{\text{máx}}$ (MPa)	510,97	485,46	510,33	502,25	14,55
	Fuerza de Ruptura F_{rup} (N)	20.248	20.017	20.185	20.150	119,41
	Esfuerzo de Ruptura S_{rup} (MPa)	348,57	336,72	347,49	344,26	6,55

De las tablas anteriores y de las curvas a tracción mostradas anteriormente, se observa que las probetas con tratamiento térmico de temple son las que presentan mayor resistencia a la tracción, coincidiendo con los resultados de dureza, ya que con el temple se aumenta tanto la dureza del material como la resistencia mecánica del mismo, mientras que para el normalizado la resistencia mecánica disminuye debido probablemente al refinamiento provocado en el grano.

4.3 Microscopía óptica

El estudio microscópico de las probetas de acero AISI 1018, para las tres condiciones estudiadas, se realizó observando en el microscopio electrónico las muestras del material preparadas metalográficamente y posteriormente tomando microfotografías a aumentos de 100, 200, 400 y 1000X, para determinar la microestructura y el tamaño del grano presente en el material en cada condición.

A las muestras de acero AISI 1018, se les preparó metalográficamente y luego se observaron dichas muestras al microscopio; la muestra de acero AISI 1018 en condiciones originales de entrega se comparó con los patrones de la norma ASTM E112 para determinar el tamaño de grano; como resultado de

esta comparación tenemos un tamaño de grano $n=5$, y para conocer el número de granos por pulgada cuadrada, se utilizó la relación:

$$N = 2^{n-1} \quad \text{Ec. 4.1}$$

De la aplicación de la ecuación anterior, se obtiene como resultado, $N = 16$ granos/pulg².

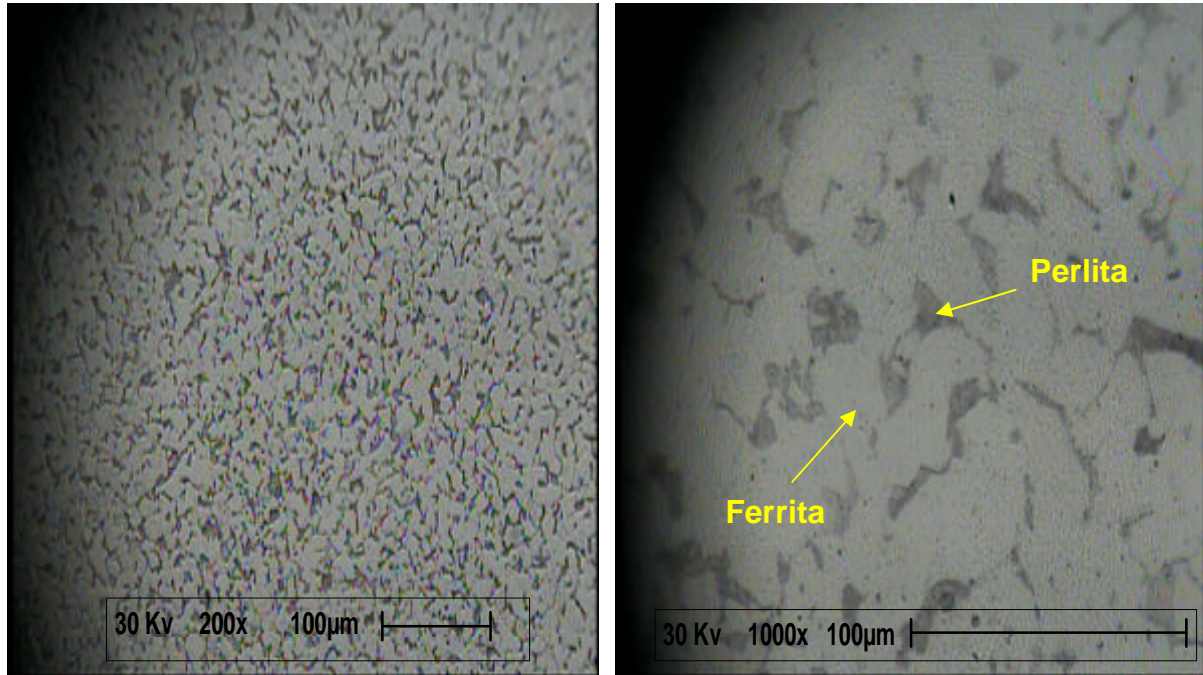
Tabla 4.6. Tamaño del grano en condición de original y normalizado

Condición	Tamaño del Grano (n)	Número de granos por pulg. cuadrada (N)
Original	5	16
Normalizado	6	32

El tamaño del grano para la condición de temple no se determinó debido a la presencia de Martensita en la microestructura del material, ya que la norma ASTM E112 sólo determina tamaños de grano austeníticos.

La microestructura observada en las muestras se observan en las figuras 4.4, 4.5 y 4.6, para cada condición respectivamente.

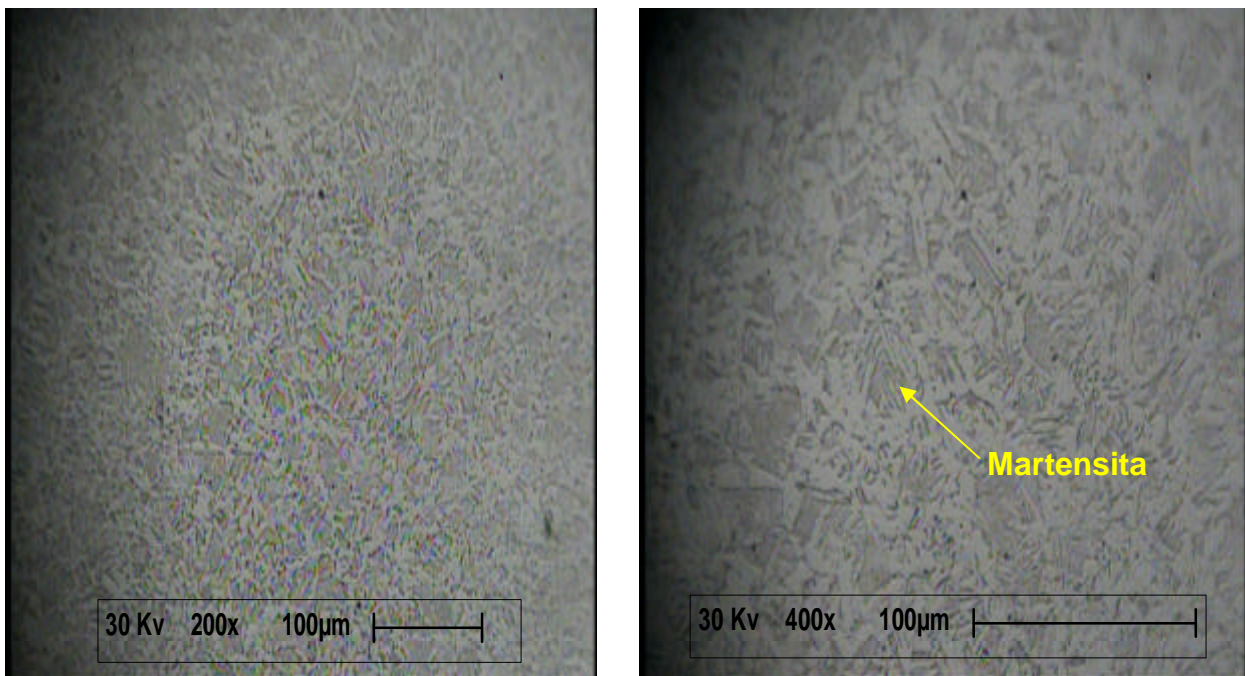
La microestructura observada en la figura 4.4 corresponde a la condición encontrada del material sin tratamiento térmico (original), en donde se puede apreciar una microestructura compuesta de ferrita y perlita. La ferrita es la de color claro mientras que la perlita se muestra de color oscuro.



(a) Ampliación a 200X

(b) Ampliación a 1000X

Figura 4.4. Microestructura del acero AISI 1018 en condición original de entrega.



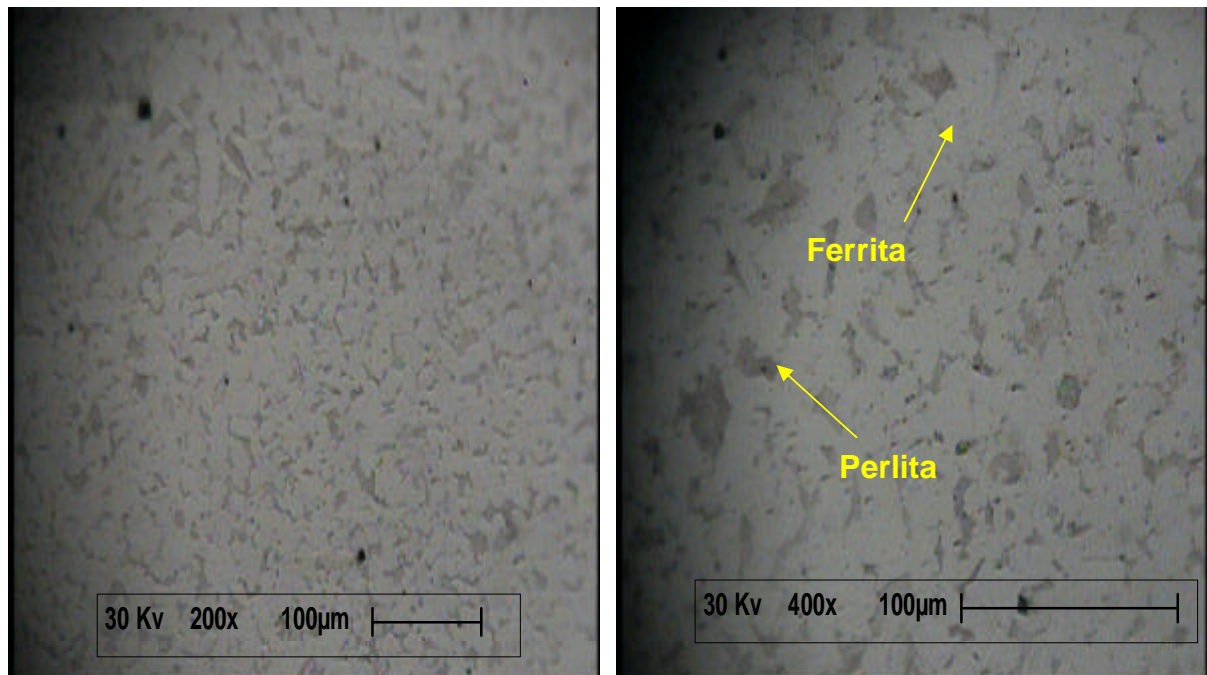
(a) Ampliación a 200X

(b) Ampliación a 400X

Figura 4.5. Microestructura del acero AISI 1018 en condición de Temple.

(Temp. = 870°C, Tiempo = 18 min.).

Para la condición de temple en aceite la microestructura presente es martensita, típica en un acero templado, la misma se observa de forma acicular o de agujas, ya que el acero tiene muy poca templabilidad deja de endurecerse y la martensita no se forma completamente tal como se muestra en la figura 4.5.



(a) Ampliación a 200X

(b) Ampliación a 400X

Figura 4.6. Microestructura del acero AISI 1018 en condición de Normalizado.

(Temp = 940°C, Tiempo = 18 min.).

En la figura 4.6 se observa la microestructura presente en las probetas con tratamiento térmico de normalizado, la cual está compuesta de ferrita y perlita. Las áreas claras son ferrita proeutectoide, mientras que las oscuras son perlita y algunos puntos oscuros (poros) correspondientes a defectos en el proceso de fabricación del material. Se puede observar que en esta microestructura la ferrita se encuentra más refinada en comparación a la condición original de entrega debido al tratamiento aplicado.

4.4 Ensayos de fatiga

Para obtener los resultados de los ensayos a fatiga del acero AISI 1018 en cada una de las condiciones de estudio, se estudiaron un total de veinticuatro probetas (24) por cada condición, es decir, seis (6) probetas por nivel de esfuerzo y utilizando cuatro (4) niveles de esfuerzo. Las probetas fueron ensayadas a una velocidad de giro aproximadamente constante e igual a 3000 rpm.

Los valores de momento flector, resistencia a la fatiga y la cantidad de ciclos para obtenidos para esos valores de esfuerzo, se muestran en las tablas 4.7, 4.8 y 4.9, para las condiciones original, con tratamiento térmico de temple y tratamiento térmico de normalizado, respectivamente.

Tabla 4.7. Resultados de los ensayos a fatiga del acero AISI 1018 en condición Original.

Nº Probeta	Sf (MPa)	Mf (lb.in)	Nº Ciclos	Ciclos Prom.	Desviación Estándar
1	450	100	9.100	9.967	1555,64
2	450	100	10.000		
3	450	100	8.600		
4	450	100	9.400		
5	450	100	11.400		
6	450	100	11.300		
7	360	80	17.000	19.017	1909,19
8	360	80	17.600		
9	360	80	22.500		
10	360	80	17.500		
11	360	80	19.800		
12	360	80	19.700		
13	270	60	54.700	56.467	6010,41
14	270	60	58.800		
15	270	60	57.200		
16	270	60	51.300		
17	270	60	53.600		
18	270	60	63.200		
19	180	40	977.700	976.573	82.014,55
20	180	40	963.000		
21	180	40	918.500		
22	180	40	> 1.000.000		
23	180	40	> 1.000.000		
24	180	40	> 1.000.000		

Tabla 4.8. Resultados de los ensayos a fatiga del acero AISI 1018 en condición de Temple.

Nº Probeta	Sf (MPa)	Mf (lb.in)	Nº Ciclos	Ciclos Prom.	Desviación Estándar
1	450	100	4.600	4.200	141,42
2	450	100	4.100		
3	450	100	3.800		
4	450	100	3.400		
5	450	100	4.500		
6	450	100	4.800		
7	360	80	14.900	16.117	1.767,77
8	360	80	14.600		
9	360	80	15.800		
10	360	80	15.000		
11	360	80	19.000		
12	360	80	17.400		
13	270	60	48.100	50.467	5.798,28
14	270	60	53.200		
15	270	60	51.600		
16	270	60	47.500		
17	270	60	52.900		
18	270	60	49.500		
19	180	40	650.000	626.050	44.689,15
20	180	40	674.500		
21	180	40	562.300		
22	180	40	615.100		
23	180	40	667.600		
24	180	40	586.800		

Tabla 4.9. Resultados de los ensayos a fatiga del acero AISI 1018 en condición de Normalizado.

Nº Probeta	Sf (MPa)	Mf (lb.in)	Nº Ciclos	Ciclos Prom.	Desviación Estándar
1	450	100	10.700	10.250	1.697,06
2	450	100	12.100		
3	450	100	9.700		
4	450	100	12.000		
5	450	100	8.700		
6	450	100	8.300		
7	360	80	29.800	32.100	5.586,14
8	360	80	35.100		
9	360	80	28.500		
10	360	80	30.300		
11	360	80	31.200		
12	360	80	37.700		
13	270	60	116.200	124.850	14.142,14
14	270	60	124.300		
15	270	60	131.600		
16	270	60	112.500		
17	270	60	128.300		
18	270	60	136.200		
19	180	40	982.000	1.039.667	104.239
20	180	40	975.600		
21	180	40	1.125.400		
22	180	40	> 1.000.000		
23	180	40	> 1.000.000		
24	180	40	> 1.000.000		

A continuación se presentan las gráficas Esfuerzo-Número de Ciclos obtenidas para cada una de las condiciones estudiadas para el acero en cuestión.

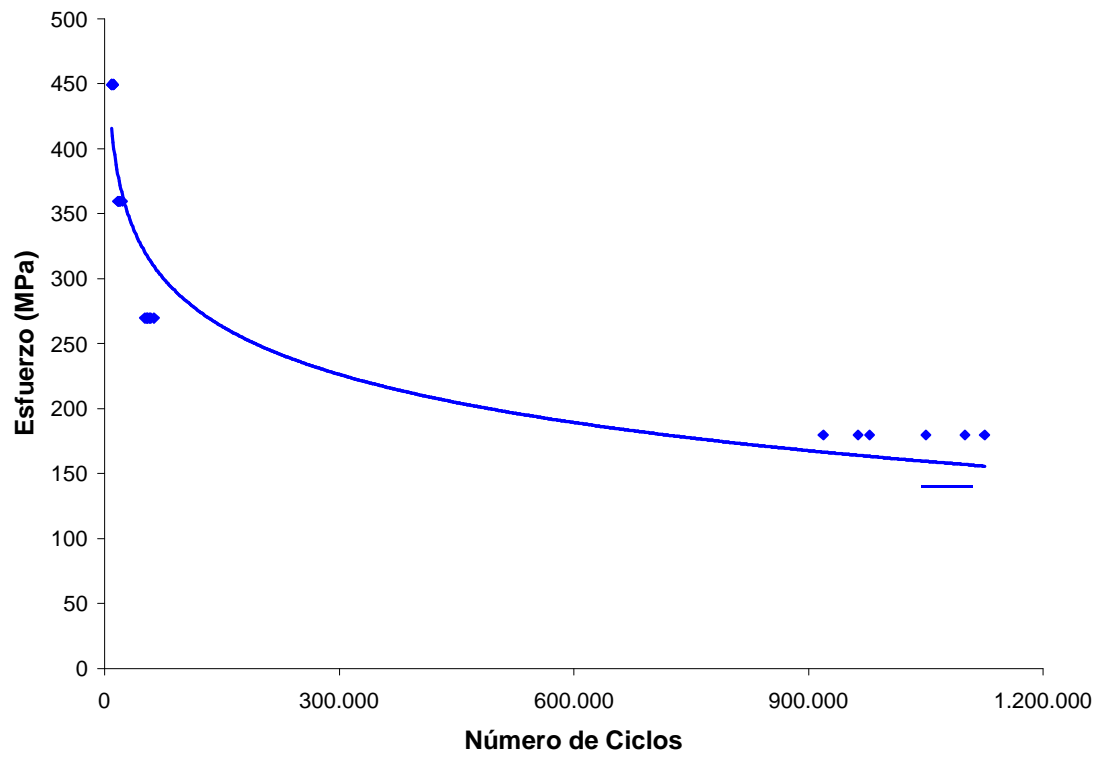


Figura 4.7. Curva Esfuerzo-Número de ciclos en condición original de entrega.

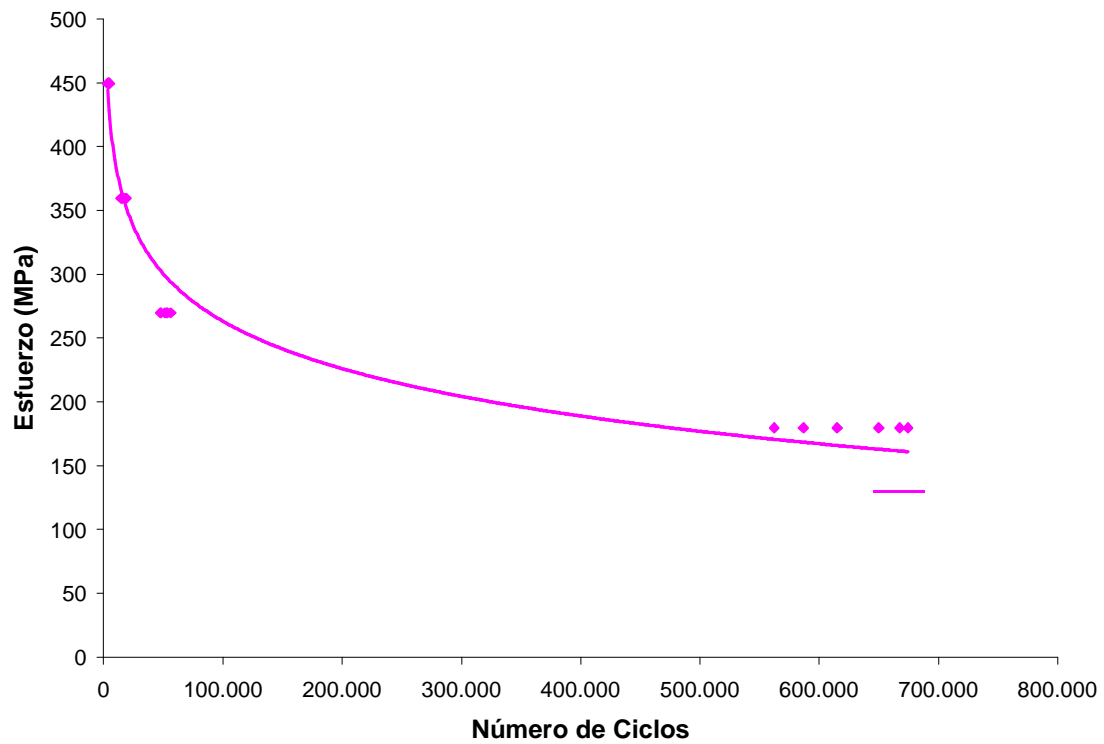


Figura 4.8. Curva Esfuerzo-Número de ciclos, condición de Temple.

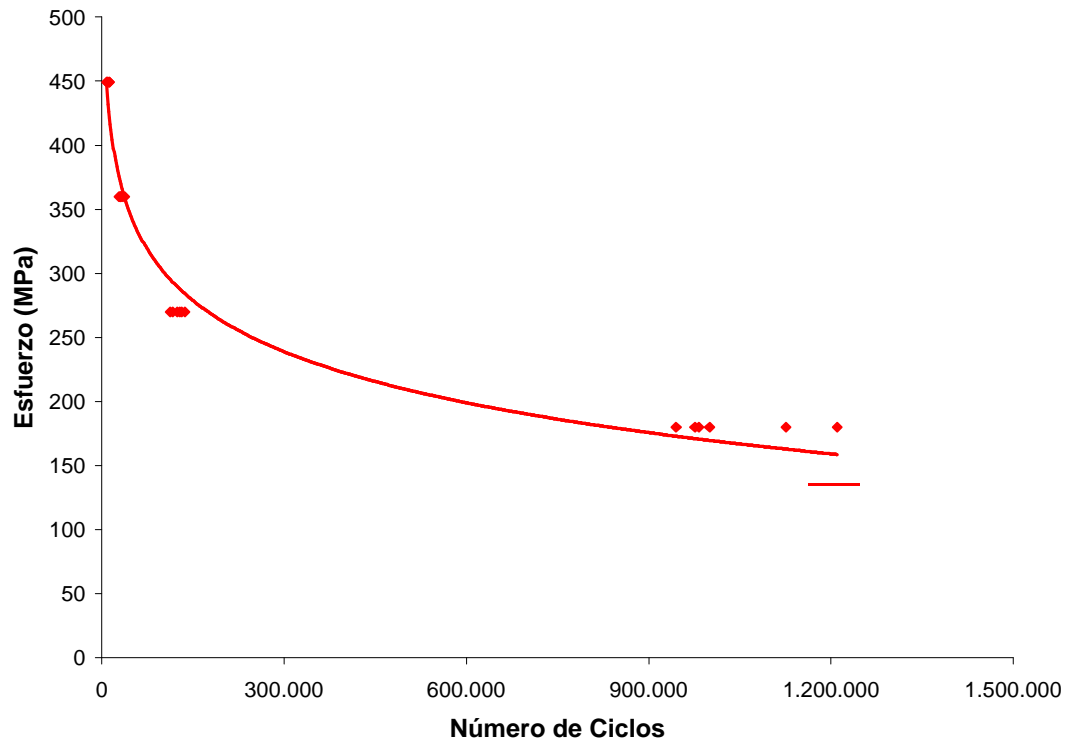


Figura 4.9. Curva Esfuerzo-Número de ciclos, condición Normalizado.

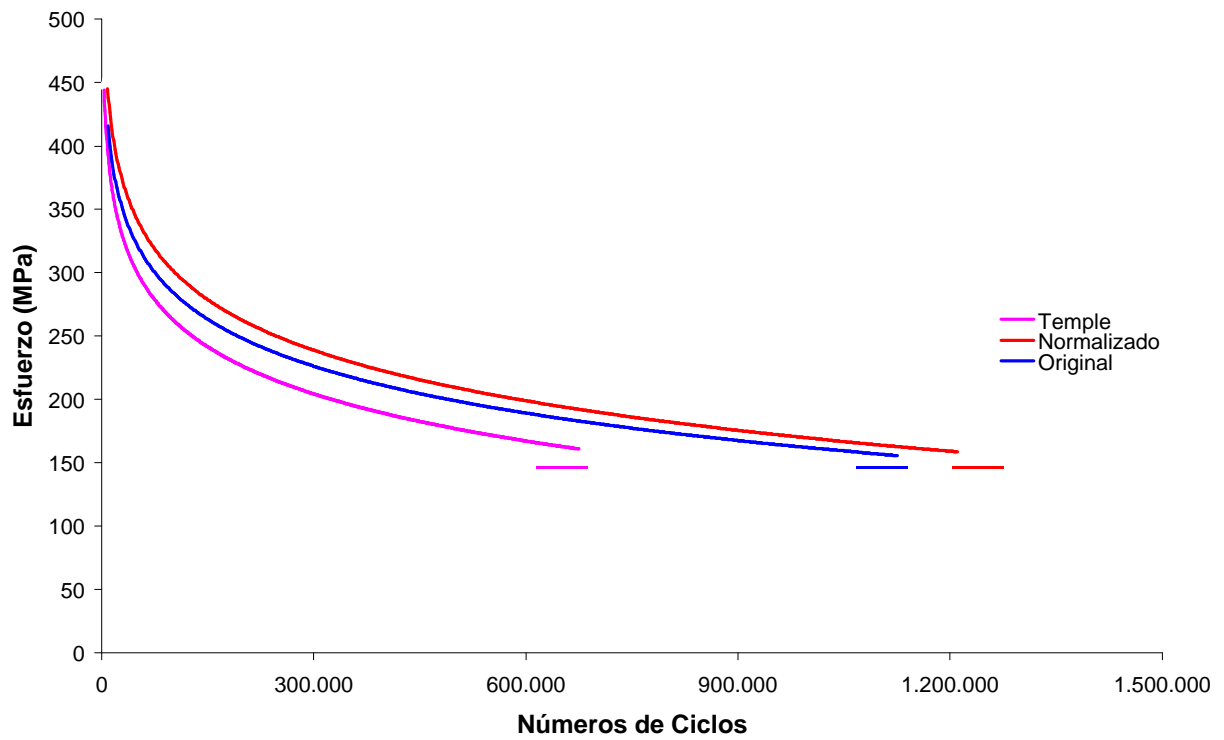


Figura 4.10. Comparación de las Curvas Esfuerzo-Números de ciclos para las tres condiciones estudiadas.

Las curvas anteriores muestran el comportamiento a fatiga en función del esfuerzo alternante, denominadas curvas S-N, para cada una de las condiciones estudiadas, sin tratamiento térmico, con tratamiento de temple y con tratamiento de normalizado, respectivamente. Los resultados de dichas curvas indican que la vida a fatiga del acero AISI 1018 en condición de normalizado aumenta en relación con la condición original de entrega, resultado coincidente con la prueba de dureza ya que con el normalizado se logra un refinamiento considerable de grano y un alivio de tensiones en el material, aunque el aumento de la vida a fatiga no es muy significativo, menor al 5%. En las probetas templadas se observa que la vida a la fatiga es menor que la condición original (por el orden de los 600.000 ciclos), esto se debe a que con el temple hubo formación de martensita, volviendo al material más duro y frágil a la vez, resultados comparables con las pruebas de dureza y tracción, lo que disminuye significativamente la vida a fatiga del material respecto con su condición original.

Los valores de obtenidos para la resistencia a la fatiga del acero en sus tres condiciones estudiadas son: 776 MPa (Aprox.) para la condición original, 756 MPa (Aprox.) para la condición de temple, mientras que para la condición de normalizado es de 831 MPa (Aprox.). De estos valores se obtiene que la resistencia a la fatiga para la condición de temple disminuye en un 2,56% respecto a la condición original, mientras que para la condición de normalizado aumenta en un 7,15%.

De las mismas curvas se puede obtener el límite de fatiga para cada una de las condiciones estudiadas. Los valores obtenidos de límite de fatiga son: para la condición de original 173 MPa (Aprox.), para la condición de temple 163 MPa (Aprox.) y para la condición de normalizado se obtuvo 180 MPa (Aprox.), representando una disminución del límite de fatiga en la condición de temple del 6,20% respecto a la condición original y un aumento del 4,1% en la condición de normalizado, también respecto a la condición original.

Utilizando las curvas de Wöhler, es posible determinar los parámetros necesarios para obtener la ecuación de Basquin, de manera de ser utilizada para determinar la vida a fatiga del acero AISI 1018 en cada condición estudiada. En las diferentes ecuaciones de Basquin obtenidas se puede apreciar el coeficiente de resistencia a la fatiga, el exponente de resistencia a la fatiga y el factor estadístico de confiabilidad R^2 . A continuación se presentan las curvas de Wöhler para cada condición de estudio.

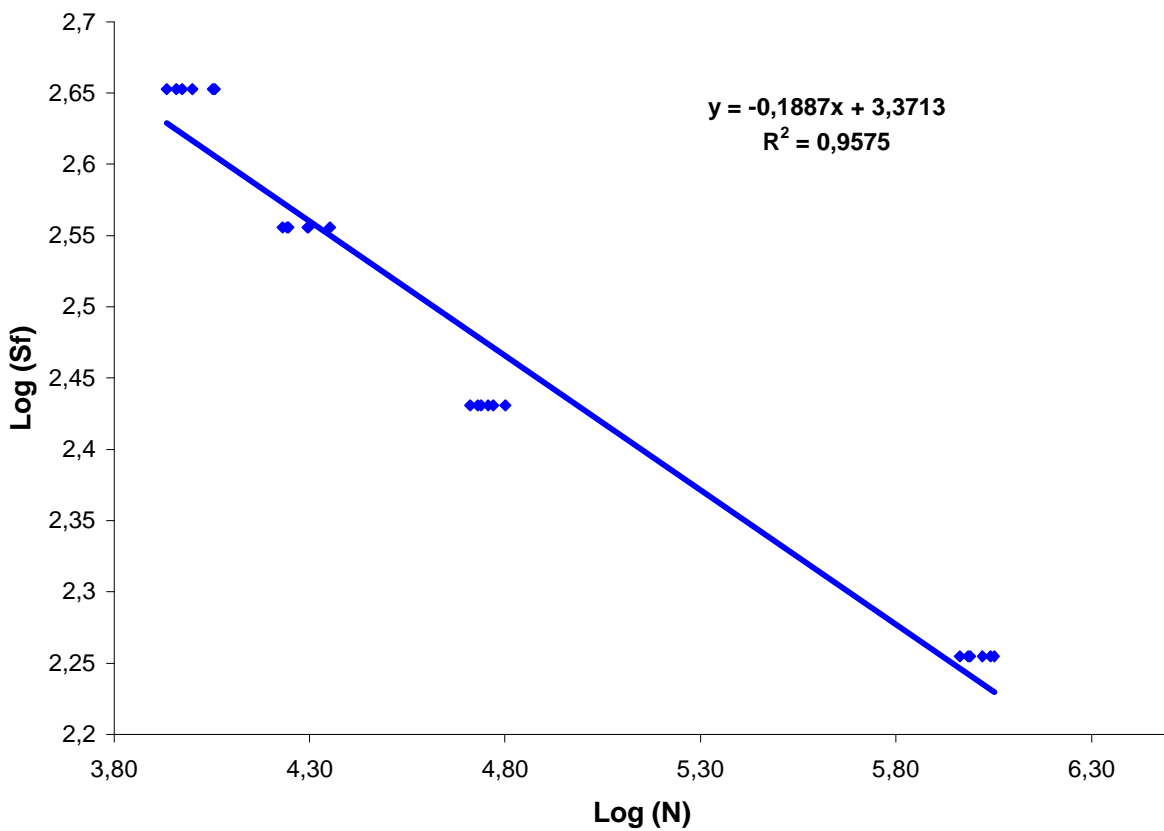


Figura 4.11. Curva de Wöhler del Acero AISI 1018 en condición original de entrega.

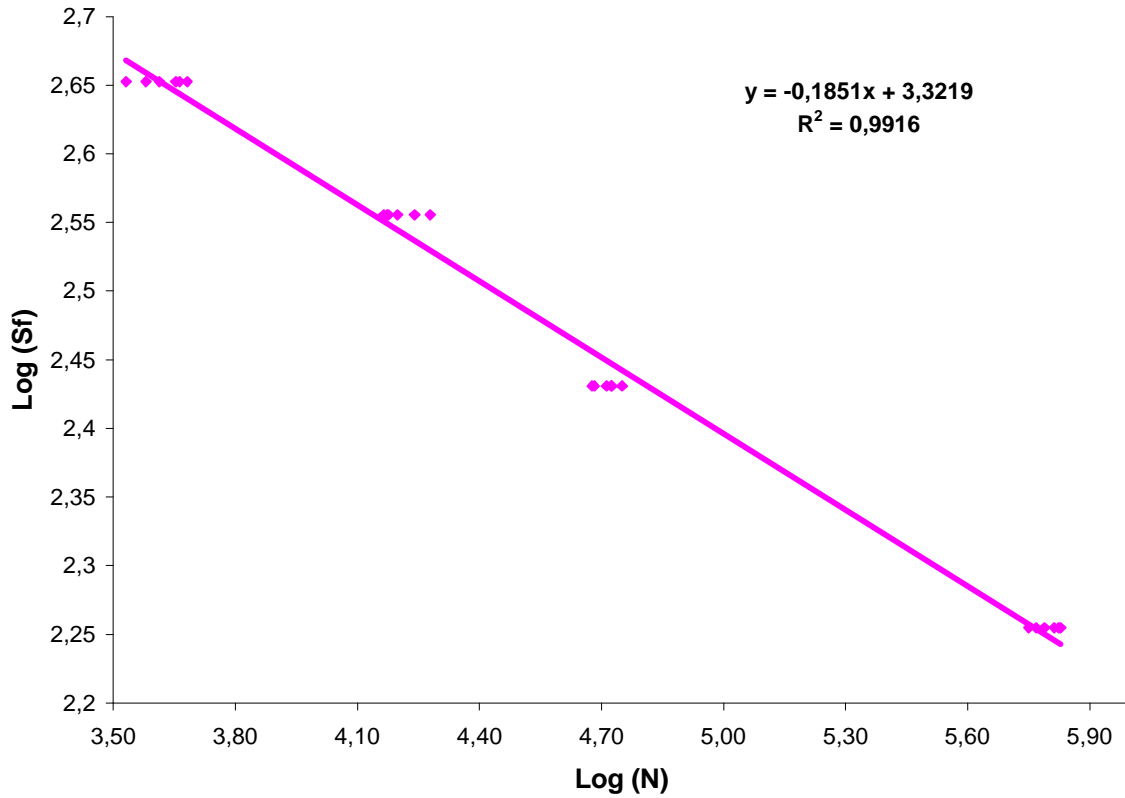


Figura 4.12. Curva de Wöhler del Acero AISI 1018 en condición de Temple.

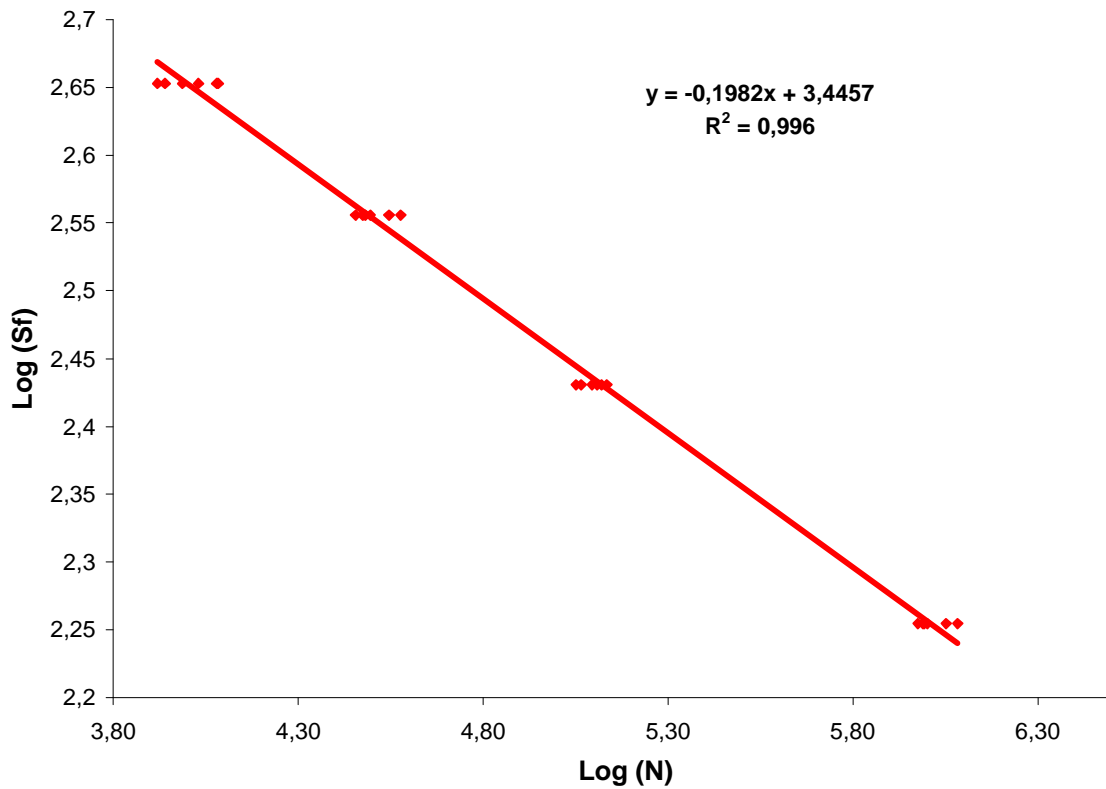


Gráfico 4.13. Curva de Wöhler del Acero AISI 1018 en condición de Normalizado.

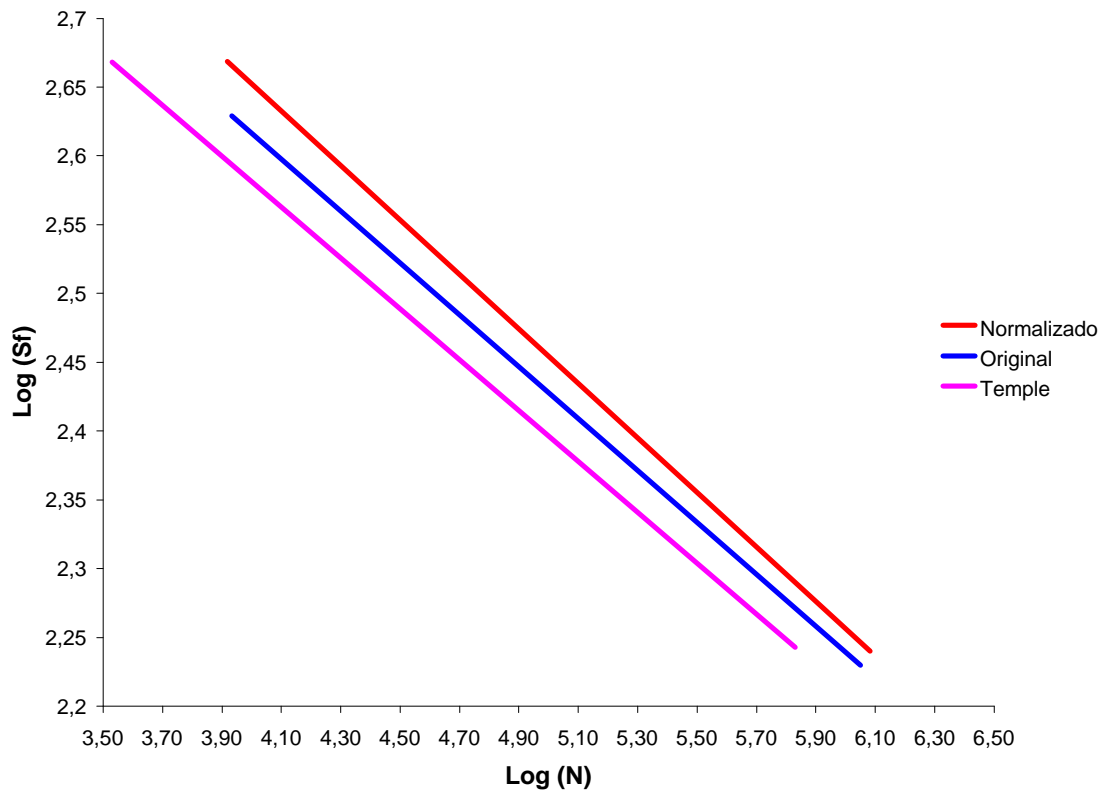


Gráfico 4.14. Comparación de las Curvas Wöhler del acero AISI 1018 para las tres condiciones estudiadas.

Con la obtención de la curva de Wöhler se obtiene los parámetros de la ecuación de Basquin para cada una de las condiciones de estudio. De la ecuación 3.2 se tiene que:

$$S_f \propto AN_f^{-b}$$

Aplicando logaritmo a ambos lados de la igualdad se tiene:

$$\text{Log } S_f = -b\text{Log}N + \text{Log } A$$

Y comparando la expresión anterior con la ecuación punto-pendiente de la recta:

$$Y = mX + c$$

Se obtiene:

$$\text{Log } S_f = Y, m = -b, \text{Log} N = X, \text{Log } A = c.$$

Tabla 4.10. Ecuación y Parámetros de la Ecuación de Basquin del acero AISI 1018 para las tres condiciones de estudio.

Condición	Ecuación de Basquin $Y = -mX + b$	Parámetros de la Ecuación de Basquin		
		A	b	R ²
Original	$Y = -0,1887X + 3,3713$	2351,256	-0,1887	0,9575
Temple	$Y = -0,1851X + 3,3219$	2098,456	-0,1851	0,9916
Normalizado	$Y = -0,1982X + 3,4457$	2790,615	-0,1982	0,996

Como se observa en la tabla anterior los valores de las pendientes de las curvas para las tres condiciones no tienen mucha diferencia, no mayor al 5%, debido a que el tratamiento térmico no influye de manera significativa en el valor del coeficiente de resistencia a la fatiga. Las curvas tienen una tendencia proporcional para bajos valores de esfuerzos y altos valores de ciclaje, mientras que para los valores más altos de esfuerzo y menor número de ciclaje se nota mayor dispersión.

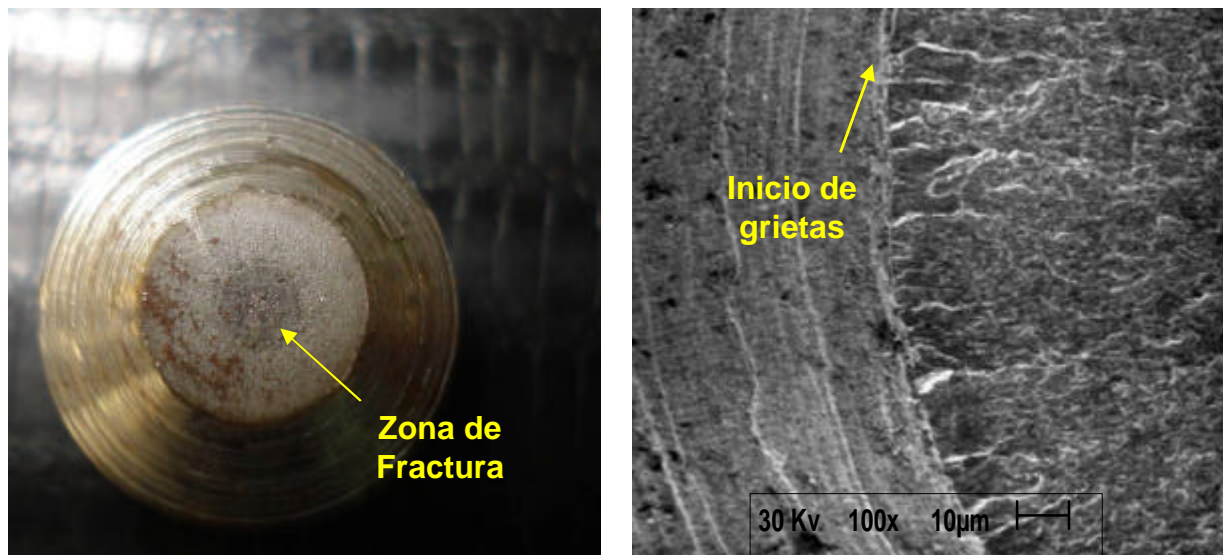
4.5 Análisis fractográfico

Se realizó un análisis de fractografía a algunas de las probetas del material en sus diferentes condiciones de estudio, por microscopía electrónica de barrido (MEB), para determinar el mecanismo de fractura por fatiga y observar posibles imperfecciones del material.

Las superficies de fractura de las probetas del material se presentan a continuación, por medio de microfotografías tomadas en el microscopio de

barrido electrónico, las cuales corresponden a los diferentes niveles de esfuerzo utilizados. Se estableció como altos esfuerzos a 450 MPa, esfuerzos medios 360 y 270 MPa y bajos esfuerzos a 180 MPa.

En la figura 4.15 (a) se observa la superficie de fractura y la zona de fractura, la zona más oscura en el centro, de una probeta en condición de sin tratamiento térmico (original) sometida a valores de altos esfuerzos (360 MPa), mientras que en la figura (b) se observa el inicio de estas grietas las cuales van de la periferia de la probeta hacia el centro de la misma, es decir, en sentido radial. En la figura 4.16 (a) se tiene la superficie de fractura a un aumento de 500X y la misma presenta un mecanismo de fractura frágil con la presencia de grietas pronunciadas y microhoyuelos, mientras que en la figura (b) en la misma probeta a un aumento de 1000X, se aprecia un mecanismo de fractura mixto con presencia de grietas.

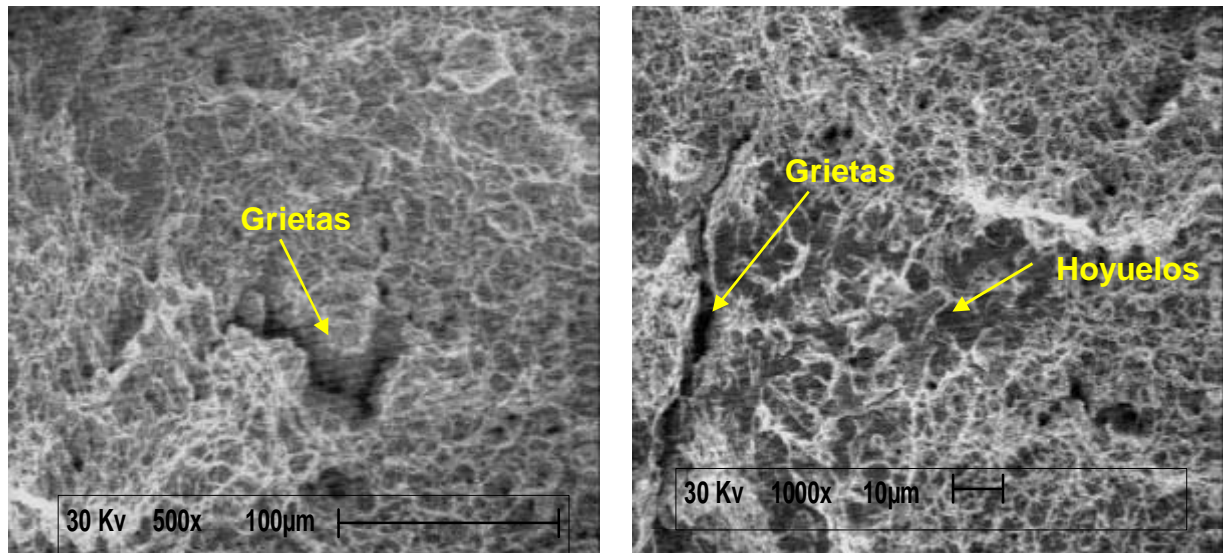


(a) Macrofotografía de zona de fractura

(b) Ampliación a 100X

Figura 4.15. Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de Original.

($S_f = 360$ MPa, $N = 19.700$ ciclos).



(a) Ampliación a 500X

(b) Ampliación a 1000X

Figura 4.16. Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de Original.

($S_f = 360$ MPa, $N = 19.700$ ciclos).

En la figura 4.17 se observa la macrografía de una probeta en condición de sin tratamiento térmico (original), donde se detalla claramente la superficie de fractura de la probeta y la zona de entalla de la misma. Mientras que en la figura 4.18 se observa la misma superficie de fractura a una ampliación de 500X en donde se detalla un mecanismo de fractura frágil con la presencia de hoyuelos y facetas de clivajes.

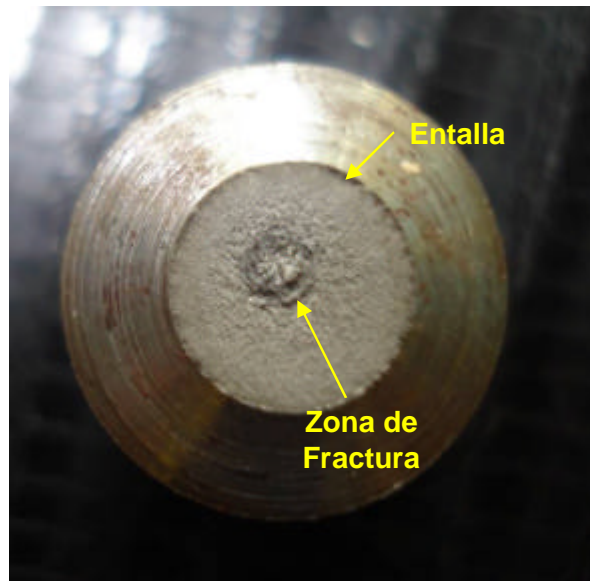
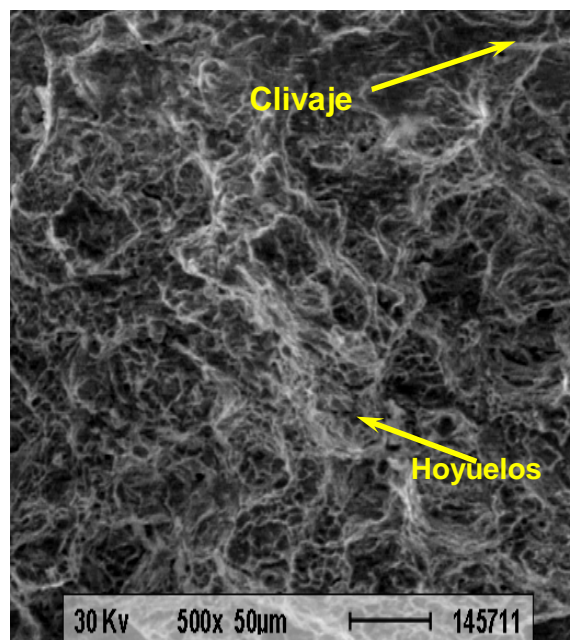


Figura 4.17. Macrofotografía de la Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de Original. ($S_f = 270$ MPa, $N = 57.200$ ciclos).



Ampliación a 500X

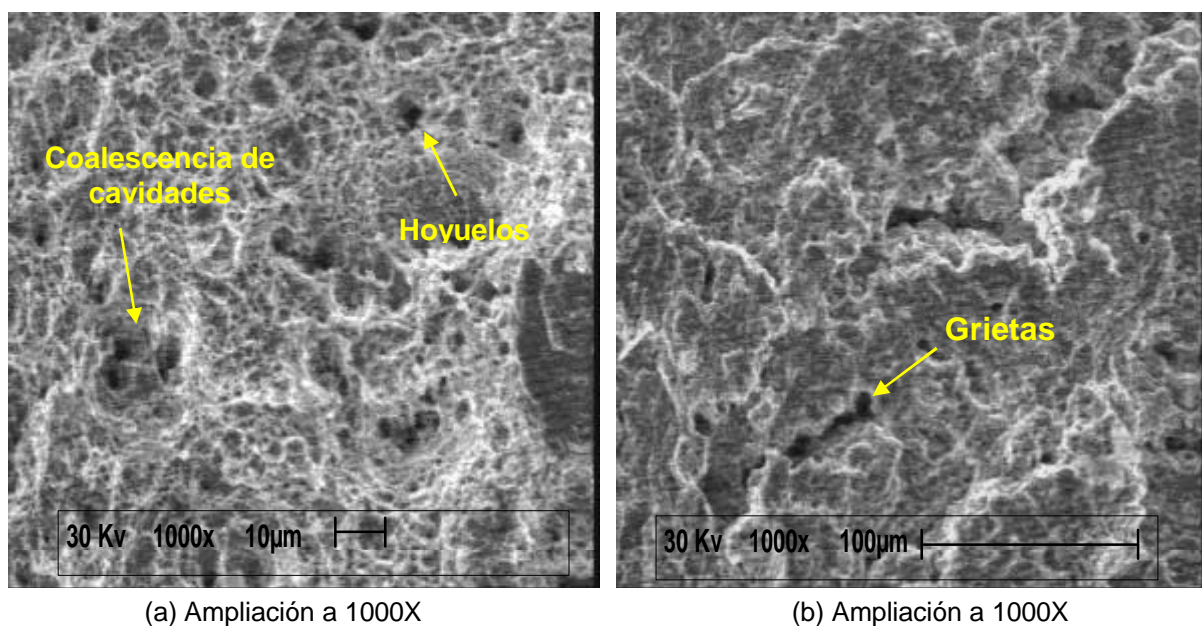
Figura 4.18. Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de Original. ($S_f = 270$ MPa, $N = 57.200$ ciclos).

La figura 4.19 corresponde a una probeta en condición de temple sometida a valores altos de esfuerzos (450 MPa) donde se detalla la superficie

de fractura de la probeta (zona más oscura). En la figura 4.20 (a) se tiene una imagen a 1000X de la zona de fractura, en donde se puede apreciar el mecanismo de fractura dúctil que se presentó en la misma, además de la presencia de hoyuelos y coalescencia de cavidades, mientras que para la (b) se muestra la zona de fractura frágil de la misma probeta con la presencia de grietas pronunciadas debido al tipo de tratamiento aplicado, también con un aumento de 1000X.



Figura 4.19. Macrofotografía de la Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de Temple. ($S_f = 450$ MPa, $N = 4.100$ ciclos).



(a) Ampliación a 1000X

(b) Ampliación a 1000X

Figura 4.20. Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de Temple. ($S_f = 450$ MPa, $N = 4.100$ ciclos).

La microfotografía de la figura 4.21, corresponde a una probeta con tratamiento térmico de temple en donde se observa el inicio de las grietas en la periferia de la probeta con una zona de fractura amplia, característica típica debido al tipo de tratamiento aplicado.

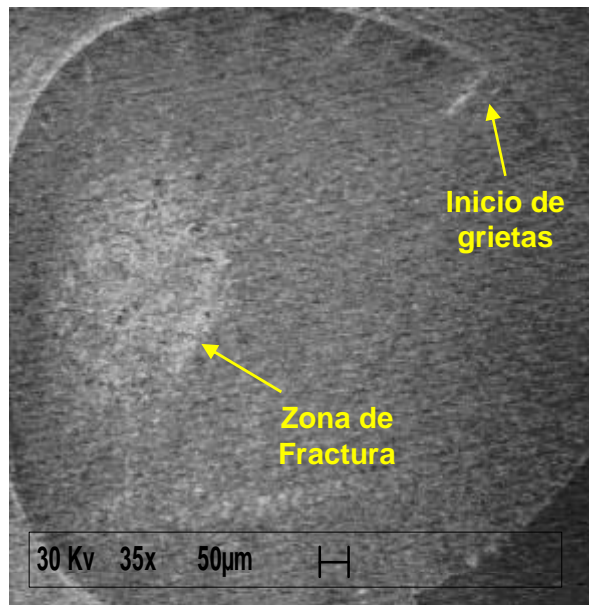


Figura 4.21. Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de Temple. (Ampliación 35X). ($S_f = 270$ MPa, $N = 49.500$ ciclos).

En la figura 4.22 se observa la imagen de una probeta a la cual se le aplicó tratamiento de normalizado y un valor de esfuerzo de 450 MPa, se nota claramente hacia el centro de la probeta la zona de fractura de la misma, la cual se observa de color más oscuro y brillante. En la figura 4.23 se tiene la superficie y el mecanismo de fractura de la misma probeta, en la figura (a) se observa una imagen ampliada a 400X donde aparece una grieta pronunciada en la zona frágil y para la figura (b) se puede apreciar en la misma probeta clivajes como mecanismo de fractura frágil, esta imagen fue tomada con una ampliación de 1000X.



Figura 4.22. Macrofotografía de la Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de Normalizado. ($S_f = 450$ MPa, $N = 10.700$ ciclos).

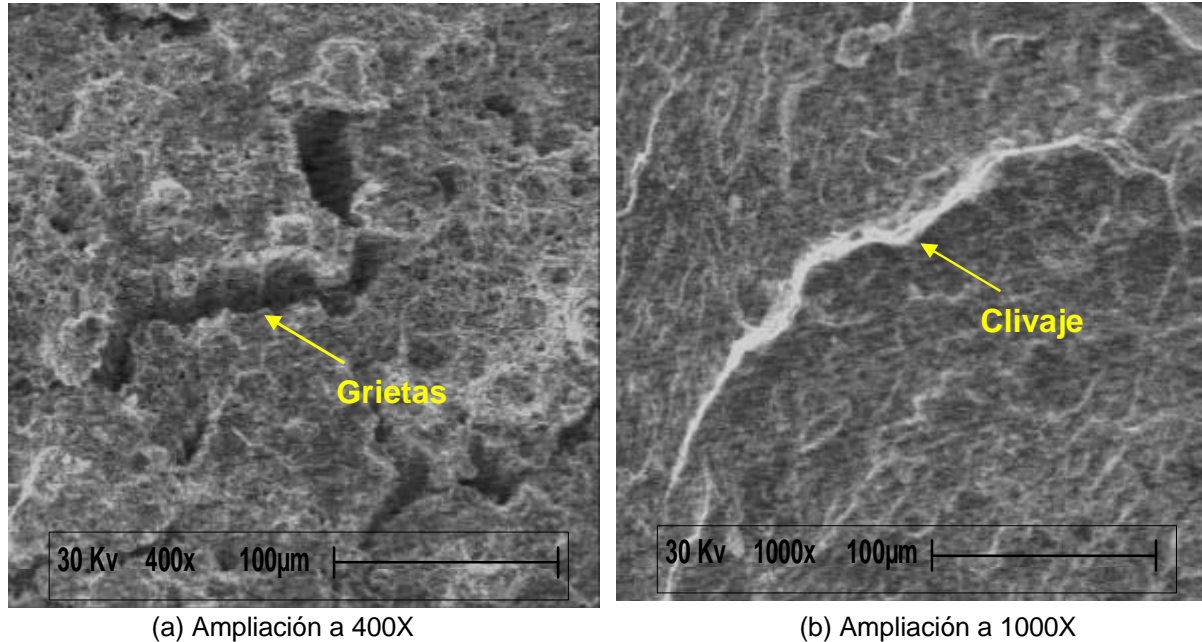
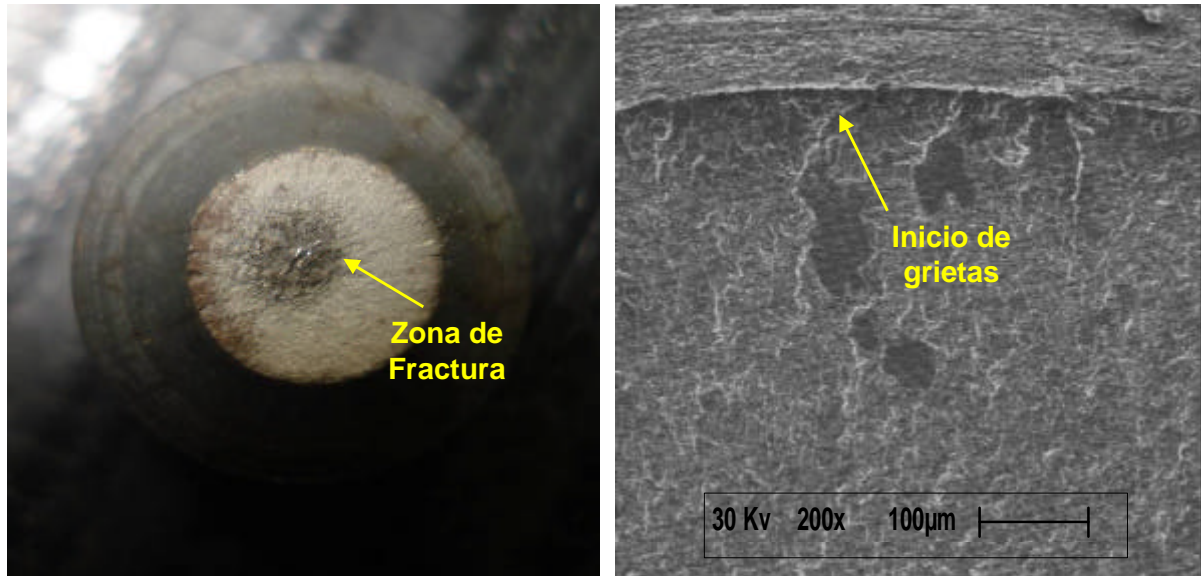


Figura 4.23. Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de Normalizado. ($S_f = 450$ MPa, $N = 10.700$ ciclos).



(a) Macrofotografía de zona de fractura

(b) Ampliación a 200X

Figura 4.24. Superficie de fractura del acero AISI 1018 en condición de Normalizado.

($S_f = 270$ MPa, $N = 124.300$ ciclos).

En la figura 4.24, en la imagen (a) se muestra la macrofotografía de la superficie de fractura de una probeta con tratamiento de normalizado, sometida a valores medios de esfuerzo (270 MPa), y la zona de fractura de la misma la cual se nota mas brillante debido al alto número de ciclajes al que la misma estuvo expuesta, en la figura (b) se muestra el inicio de la grieta en la periferia de la probeta y su propagación hacia el centro de la misma, la cual es amplia debido al alto ciclaje al cual estuvo expuesta.

Como se observó en las macrofotografías de las probetas, para todas las condiciones de estudio, se presentó que para altos niveles de esfuerzo la zona de fractura se encuentra hacia el centro de la superficie de fractura de la probeta, y que se va desplazando hacia los bordes o periferia de la superficie de fractura a medida que se disminuyó los valores de esfuerzo nominal. Resultados coincidentes con lo expuesto en el manual de la ASM Failure Analysis and Prevention.

4.6 Comparación de las curvas de fatiga obtenidas con trabajos previos

Para comparar las curvas establecidas del material en investigaciones anteriores con las nuestras, se procedió a consultar en revistas electrónicas y trabajos de grado.

Este, 2002, realizó una investigación titulada “Evaluación de la Vida de Fatiga de Aceros de Bajo y Medio Carbono Tratados Térmicamente”. En su trabajo estudió el comportamiento a fatiga de aceros de medio y bajo carbono (AISI 1020, 1030 Y 1045, en condiciones originales), y en condición de flexión rotativa, obteniendo como resultados que a medida que aumenta el porcentaje de carbono en el acero, aumentan también tanto la resistencia como el límite de fatiga.

Los resultados que Este determinó en su investigación de límite y resistencia a la fatiga son los siguientes:

Tabla 4.11. Límites de Fatiga y Resistencias de Fatiga de los aceros AISI 1020,1030 y 1045. (Este, 2002)

Material	Límite de Fatiga (psi)	Límite de Fatiga (MPa)	Resistencia a la Fatiga (psi)	Resistencia a la Fatiga (MPa)
1020	15.000	103,421	59.000	406,791
1030	21.000	144,790	83.000	572,265
1045	28.000	193,053	100.000	689,476

Ahora bien, comparando los resultados obtenidos por Este con el acero AISI 1020, debido a que el porcentaje de carbono en los dos aceros es muy cercano y las dimensiones de las probetas utilizadas son similares, se puede notar que los valores para la resistencia a la fatiga y límite de fatiga son distantes, pudiendo resaltar que el valor de los esfuerzos utilizados por Este

son mayores en comparación a los obtenidos en ésta investigación, lo que reduce la cantidad de ciclos obtenidos en su trabajo y los valores de resistencia y límite a la fatiga. A continuación se muestra la curva Esfuerzo-Número de ciclos obtenida por Este en su investigación con el acero AISI 1020.

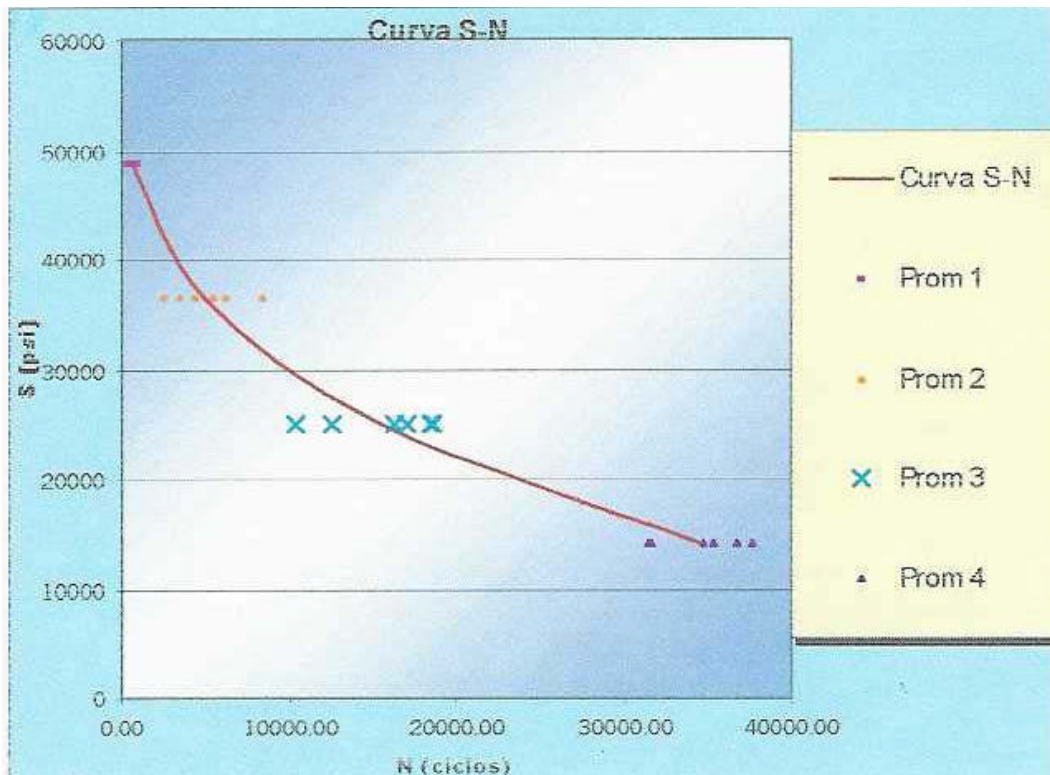


Figura 4.25. Curva Esfuerzo-Número de ciclos (S-N) del acero AISI 1020 en condición original. (Este, 2002).

CAPÍTULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- ? Al aplicar los tratamientos térmicos de temple y normalizado al acero AISI 1018, se afecta el comportamiento a fatiga del material, al compararse con la condición original del mismo, produciéndose un leve aumento de la vida a fatiga (< 5%) de dicho acero para el caso de normalizado y una considerable disminución de la vida a fatiga (30% aprox.) de este acero para el caso de temple. De igual manera ocurre con el caso de la resistencia a la fatiga, en condición de normalizado aumenta su resistencia a la fatiga respecto a la condición original de entrega en un 7,15%, mientras que en condición de temple disminuye en un 2,56%, respecto a la misma condición.

- ? El acero AISI 1018 presenta mayor el mayor límite a la fatiga en condición de normalizado que para las otras dos condiciones. Presentando un aumento del 4,1% para el normalizado respecto a la condición original de entrega y una disminución del 6,20% para el temple también respecto a la misma condición.

- ? El valor de la pendiente en la curva de Wöhler no varía significativamente (<5%) al aplicársele tratamientos térmicos al acero AISI 1018. Esto se debe a que estos tratamientos térmicos no influyen de manera considerable en el valor del coeficiente de resistencia a la fatiga. Por otro

lado en las ecuaciones de Basquin obtenidas se aprecia que los exponentes de resistencia a la fatiga no tienen grandes dispersiones entre sí, 1,91% entre la condición de temple y la original, y 5,03% entre la condición de normalizado y la original.

- ? Las probetas que presentaron mayor dureza fue a las que se les aplicó tratamiento térmico de temple, teniendo una dureza promedio de 53,98 HRC, mientras que para las otras condiciones correspondió un valor 17,14 HRC para la condición original de entrega y de 22,30 HRC para la condición de normalizado, en donde se deduce que los tratamientos térmicos influyen significativamente en la dureza del material. Sin embargo El acero AISI 1018 en la condición de temple es la que presenta mayor resistencia a la tracción de las tres condiciones estudiadas. Para la condición de temple se obtuvo un esfuerzo máximo promedio de 897,42 MPa, en la condición de original de entrega es de 667,04 MPa y de 502,25 MPa para la condición de normalizado.
- ? Las microestructuras presente en el acero AISI 1018 son las siguientes: ferrita y perlita para la condición original, martensita para la condición de temple y perlita y ferrita (más refinada que la condición original de entrega) para la condición de normalizado.
- ? Para las condiciones originales y con tratamiento térmico de normalizado la superficie de fractura presenta un tipo de fractura mixta para valores de esfuerzos intermedios y una fractura frágil para altos valores de esfuerzos, con presencia de hoyuelos, grietas y facetas de clivajes. Para la condición de tratamiento térmico de temple se presentaron fracturas de tipo frágil con grietas muy pronunciadas debido al tipo de tratamiento.

5.2 Recomendaciones

- ? Realizar ensayos de fatiga al material AISI 1018 utilizando valores de carga menores para determinar la vida a fatiga del material.
- ? Realizar ensayos a fatiga al material variando la temperatura y tiempo de aplicación de los tratamientos térmicos, para determinar cómo afectan la resistencia y límite de fatiga del material.
- ? Realizar un estudio similar utilizando diseños y diámetros de probetas diferentes, basados en la norma ASTM E606, para determinar como influye el factor de diseño en la resistencia y límite de fatiga.
- ? Ejecutar programas de mantenimiento preventivo a la máquina de fatiga del Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo de manera que pueda ser utilizada en futuras investigaciones.
- ? Incluir prácticas de ensayos a fatiga en el programa académico de la asignatura de Laboratorio de Materiales perteneciente al pensum de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

Referencias Bibliográficas

- ? Acosta, Marta (2005). Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.
- ? Aparicio, Gennifer; D´ Armas, Heber. (2005). Influencia del tratamiento térmico y del trabajo en frío en el comportamiento mecánico de laminas de acero ASTM A-569. *Revista Ingeniería UC*, 13 (1), 43-52.
- ? ASTM. Designation: A 370 – 96. “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”.
- ? ASTM. Designation: E 606 – 92. “Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing”.
- ? ASTM. Designation: E 739 – 91. “Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-life (S-N) and Strain-Life (E-N) Fatigue Data”.
- ? Coronado, J. (2007). Efecto de la preparación superficial y aplicación de recubrimientos en la resistencia a la fatiga del acero SAE 1045. *Scientia Et Technica*, 13 (34), 213-218.
- ? Echeverría, R. (1972). Fractura de Materiales. Universidad Nacional de Comahue. (p.p. 14-21).
- ? Este, Pedro; Sáenz, Laura. (2004). Evaluación de la resistencia a fatiga y límite de fatiga de aceros de medio y bajo carbono. *Revista Ingeniería UC*, 11 (1), 69-75.
- ? Haduch, Z; Guajardo, J. (2007). Aceros de Construcción de Propiedades Especiales. VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. (p.p. 2).

- ? Iberisa, (2006). Introducción al Análisis de Fatiga o Durabilidad. <http://www.iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm>.
- ? Iriza, M. (2003). Guía Laboratorio de Materiales. Universidad de Carabobo.
- ? Moreno, Félix; Salazar, Wilman (2005). Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.
- ? Real, E; Rodríguez, C; Canteli, A; Belzunce, F; Aenlle, M. (2005). Efecto de la Tensión Media en el comportamiento a Fatiga de barras corrugadas de acero inoxidable Dúplex. Anales de Mecánica de la Fractura: vol. 22. (p.p. 353-358).
- ? Salvande, J; Dommarco, R. (2000). Estudio de la Resistencia a la Fatiga de Contacto de Fundición Nodular. Jornadas SAM 2000 – IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga. (p.p. 421-427).
- ? Shigley, Joseph E. y Mischke, Charles R. (1999). Diseño en Ingeniería de Materiales. (4^{ta} Ed. Esp.). McGraw-Hill.
- ? Smith, William F. (1993). Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. (2^{da} Ed.) McGraw-Hill.
- ? Sumindu, (2005). Catálogo de Productos. <http://www.sumindu.com>.