



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## Evaluación de la resistencia a la fatiga del acero AISI 1045, sometido a tratamientos térmicos de Temple en aceite y Normalizado.

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

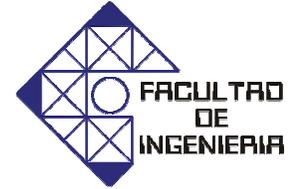
**Tutor académico:**  
Laura Sáenz. *Ing. MSc.*

**Autores:**  
Castellanos Carlos  
Rodríguez José

Naguanagua, Mayo de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## Evaluación de la resistencia a la fatiga del acero AISI 1045, sometido a tratamientos térmicos de Temple en aceite y Normalizado.

**Autores:**

Castellanos Carlos

Rodríguez José

Naguanagua, Mayo de 2009

# Agradecimientos

---

---

Quisiéramos expresar, sin tomar en consideración un orden específico, nuestros más sinceros agradecimientos al ser más importante en el mundo, Dios, ese ser divino que tuvo tanta fe en nosotros que nos dio el regalo más valioso del mundo: la vida, y con ella las experiencias y oportunidades que nos han ayudado a crecer y madurar y ser lo que somos en la actualidad, darle gracias no sería suficiente sino que con nuestras acciones sería la única manera de agradecerse. A todas aquellas personas que de una u otra forma dejaron su huella en nuestro pensamiento y corazón, las cuales no nombraremos, pues no solo serian insuficientes las páginas sino que sería injusto no nombrar aquellas que por olvido momentáneo no logremos recordar, solo podemos dar gracias a todos aquellos que han sido parte de nuestra vida:

- ✓ A quienes nos educaron, los profesores y maestros que de una u otra manera influyeron en nuestra formación académica.
- ✓ A quienes estuvieron a nuestro lado en momentos difíciles (académicos y personales) que con sus palabras de aliento, sentimos apoyo cuando necesitábamos consuelo para seguir adelante.

Nuestros más sinceros agradecimientos y reconocimiento especial a la Ingeniero Laura Sáenz por toda la colaboración, orientación y guiatra brindada para la realización de nuestra investigación. Y finalmente, a nuestros padres y hermanos, a quienes no solo hemos dedicado parte de este trabajo, sino a quienes les agradecemos todo su amor y apoyo incondicional durante toda esta etapa. Le damos las gracias por creer en que éramos capaces de enfrentar este nuevo reto. Sencillamente Gracias!!! Dios los bendiga!.... Lo Logramos!!!!

# Resumen

---

*En este trabajo se estudia la resistencia a la fatiga del acero AISI 1045, en su condición original y con tratamiento térmico de temple en aceite y normalizado. Los ensayos de fatiga se realizaron en condiciones de flexión rotativa. Se utilizaron barras calibradas de acero de media pulgada de diámetro ( $\frac{1}{2}$ " ) y las probetas fueron maquinadas de acuerdo a la norma ASTM E-606. Las muestras poseen entallas en V, y se dividieron en tres series utilizando 24 probetas para cada condición del acero estudiado. Se determinaron las propiedades mecánicas del material, resistencia a la tracción, ( $S_{m\acute{a}x}$ ) y el esfuerzo de fluencia, ( $S_y$ ) según la norma ASTM A- 370. De las curvas S-N se determinó la resistencia a la fatiga para cada condición del acero estudiado. Se realizó la caracterización de las microestructuras y se evaluaron las superficies de fractura de las probetas rotas de fatiga por la técnica de microscopía electrónica de barrido, obteniéndose como resultado que la resistencia a la tracción y la dureza aumentan con el tratamiento térmico de temple en aceite en un 15% y 93% respectivamente y la resistencia a la fatiga disminuye en un 11% con respecto a la condición original del acero, lo que ocurre de manera contraria con el tratamiento térmico de normalizado, debido a que la resistencia a la tracción y la dureza disminuyen en un 18% y 40% respectivamente y la resistencia a la fatiga aumenta en un 5%.*

**Palabras clave:** *Fatiga de aceros, curva S-N, aceros al carbono.*

# Índice general

---

---

<b>Índice general</b>	<b>i</b>	
<b>Índice de figuras</b>	<b>iii</b>	
<b>Índice de tablas</b>	<b>vii</b>	
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>Planteamiento del Problema</b>	<b>1</b>
1.1	Situación problemática	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo General	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Justificación	3
1.4	Alcance	3
1.5	Limitaciones	4
1.6	Antecedentes de la Investigación	4
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>11</b>
2.1	Aceros	11
2.1.1	Definición	11
2.1.2	Clasificación	12
2.1.3	Designación de los aceros según el sistema SAE-AISI	14
2.1.4	Tratamientos térmicos para los aceros	16
2.1.5	Ensayos mecánicos del acero	19
2.2	Caracterización del material a ensayar	20
2.2.1	Aceros para maquinarias	20
2.2.2	Especificación técnica del acero AISI 1045	21
2.3	Estudio Metalográfico	23

2.4	Ensayo de Tracción	25
2.5	Ensayo de Dureza	27
2.6	Ensayo de Fatiga	29
2.6.1	Factores que intervienen en la Fatiga	29
2.6.2	Influencia del medio sobre el comportamiento a fatiga	31
2.6.3	Fases de un fallo por fatiga	32
2.6.4	Curva S-N	33
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>Marco Metodológico</b>	<b>37</b>
3.1	Nivel de investigación	37
3.2	Diseño de la investigación	38
3.3	Población y muestra	38
3.4	Tipo de muestreo	38
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	38
3.6	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	39
3.7	Estudio del Acero	39
3.7.1	Material	39
3.7.2	Mecanizado y preparación de las probetas para tracción y fatiga	40
3.7.3	Tratamientos térmicos	41
3.7.4	Análisis microscópico (microscopia óptica)	42
3.7.5	Ensayo de Tracción	44
3.7.6	Ensayo de Dureza	45
3.7.7	Ensayo de Fatiga	46
3.7.8	Ecuación de Basquín	48
3.7.9	Estudio de la superficie de fractura	49
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Resultados y Análisis</b>	<b>51</b>
4.1	Ensayos de Tracción	51
4.2	Ensayos de Dureza	59
4.3	Ensayos de Fatiga	61
4.4	Metalografía	72
4.5	Fractografía	75
4.6	Comparación de las curvas del acero AISI 1045	88
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>97</b>
	<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>101</b>

# Índice de figuras

---

---

2.1 Diagrama de tensión - deformación típica de un acero de bajo límite de fluencia.	25
2.2 Durómetro	27
2.3 Representación esquemática de la falla por fatiga	33
2.4 Curva S-N Representativa	33
3.1 Dimensiones de la probeta de tracción	40
3.2 Dimensiones de la probeta de fatiga con entalla en V	41
3.3 Horno eléctrico	42
3.4 Microscopio metalográfico	43
3.5 Máquina de ensayo a tracción	44
3.6 Máquina de ensayo de dureza	45
3.7 Máquina de ensayo a Fatiga	46
3.8 Microscopio electrónico de barrido	50
4.1 Curva esfuerzo vs. deformación del acero AISI 1045 en su condición original	56
4.2 Curva esfuerzo vs. deformación del acero AISI 1045 en su condición normalizado	56
4.3 Curva esfuerzo vs. deformación del acero AISI 1045 en su condición temple	57
4.4 Curva comparativa de esfuerzo vs. deformación del acero AISI 1045 en su tres (3) condiciones de estudio	57
4.5 Dureza promedio de las condiciones del acero AISI 1045, en la escala Rockwell C	60
4.6 Curva S-N del acero AISI 1045, condición original	66
4.7 Curva S-N del acero AISI 1045, condición Temple.	66
4.8 Curva S-N del acero AISI 1045, condición Normalizado.	67
4.9 Curvas S-N del acero AISI 1045	67

4.10 Curva S-N linealizada del acero AISI 1045, condición original	70
4.11 Curva S-N linealizada del acero AISI 1045, condición normalizado	70
4.12 Curva S-N linealizada del acero AISI 1045, condición temple.	71
4.13 Curvas S-N linealizada del acero AISI 1045	71
4.14 Microestructura del Acero AISI 1045, Condición original 100X	73
4.15 Microestructura del Acero AISI 1045, condición original 400X	73
4.16 Microestructura del Acero AISI 1045, condición Normalizado 200X	74
4.17 Microestructura del Acero AISI 1045, condición Normalizado 1000X	74
4.18 Microestructura del Acero AISI 1045, Condición Temple 400X	74
4.19 Microestructura del Acero AISI 1045, Condición Temple 1000X	74
4.20 Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Original ( $\sigma = 360$ Mpa, $N = 13100$ )	75
4.21 Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 100X ( $\sigma = 360$ Mpa, $N = 13100$ )	75
4.22 Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 500X ( $\sigma = 360$ Mpa, $N = 13100$ )	76
4.23 Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Original ( $\sigma = 270$ Mpa, $N = 53000$ )	76
4.24 Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 100X ( $\sigma = 270$ Mpa, $N = 53000$ )	76
4.25 Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 500X ( $\sigma = 270$ Mpa, $N = 53000$ )	77
4.26 Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Original ( $\sigma = 180$ Mpa, $N = 421800$ )	77
4.27 Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 100X ( $\sigma = 180$ Mpa, $N = 421800$ )	77
4.28 Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 500X ( $\sigma = 180$ Mpa, $N = 421800$ )	78
4.29 Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Temple ( $\sigma = 360$ Mpa, $N = 7500$ )	80
4.30 Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Temple 100X ( $\sigma = 360$ Mpa, $N = 7500$ )	80
4.31 Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Temple 1000X ( $\sigma = 360$ Mpa, $N = 7500$ )	80
4.32 Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Temple ( $\sigma = 270$ Mpa, $N = 28700$ )	81
4.33 Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Temple 100X ( $\sigma = 270$ Mpa, $N = 28700$ )	81
4.34 Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Temple 1000X ( $\sigma = 270$ Mpa, $N = 28700$ )	81
4.35 Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Temple ( $\sigma = 180$ Mpa, $N = 232000$ )	82
4.36 Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Temple 100X ( $\sigma = 180$ Mpa, $N = 232000$ )	82

4.37 Microfotografía del Acero AISI 1045, Condición Temple 1000X ( $\sigma = 180$ Mpa, N = 232000)	82
4.38 Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado ( $\sigma = 360$ Mpa, N = 32900)	84
4.39 Microfotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado 100X ( $\sigma = 360$ Mpa, N = 32900)	84
4.40 Microfotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado 1000X ( $\sigma = 360$ Mpa, N = 32900)	84
4.41 Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado ( $\sigma = 270$ Mpa, N = 74500)	85
4.42 Microfotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado 100X ( $\sigma = 270$ Mpa, N = 74500)	85
4.43 Microfotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado 500X ( $\sigma = 270$ Mpa, N = 74500)	85
4.44 Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado ( $\sigma = 180$ Mpa, N = 510400)	86
4.45 Microfotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado 100X ( $\sigma = 180$ Mpa, N = 510400)	86
4.46 Microfotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado 1000X ( $\sigma = 180$ Mpa, N = 510400)	86
4.47 Resultados del ensayo de Fatiga usando recubrimientos de Ni-P	89
4.48 Curvas comparativas obtenidas por el trabajo de Contreras y nuestra investigación	90
4.49 Curvas de Fatiga cuando se realiza preparación superficial y recubrimientos.	91
4.50 Probeta de Fatiga utilizada en el trabajo de Ceballos	92
4.51 Curvas de Fatiga de los ensayos de Ceballos	92
4.52 Curvas comparativas de Fatiga de los ensayos de Ceballos	93
4.53 Curvas S-N comparativas de acero AISI 1045, obtenida del trabajo de Este y de nuestra investigación.	95

# Índice de tablas

---

---

2.1 Clasificación de los Aceros según su aplicación.	13
2.2 Designación de los aceros según el sistema SAE-AISI.	15
2.3 Intervalos de la composición química del acero AISI 1045.	23
2.4 Propiedades mecánicas del acero AISI 1045.	23
3.1 Intervalos de la composición química del acero AISI 1045.	39
4.1 Propiedades mecánicas mínimas estimadas del acero AISI 1045.	52
4.2. Dimensiones de las probetas de tracción de acero AISI 1045	52
4.3 Resultados de los ensayos de tracción para el acero AISI 1045 en las tres (3) condiciones estudiadas	53
4.4 Esfuerzos mecánicos del acero AISI 1045 en las tres (3) condiciones estudiadas	54
4.5 Propiedades Mecánicas Teóricas del acero AISI 1045	55
4.6 Cuadro comparativo de las propiedades mecánicas del acero AISI 1045, en las condiciones estudiadas.	55
4.7 Ensayos de dureza del acero AISI 1045, para las tres (3) condiciones de estudio.	59
4.8 Conversiones entre los momentos de flexión rotativa y los valores de esfuerzo de resistencia a la fatiga aplicados en los ensayos.	62
4.9 Resultados de los ensayos de fatiga para el acero AISI 1045 condición original	63
4.10 Resultados de los ensayos de fatiga para el acero AISI 1045 condición de Normalizado	64
4.11 Resultados de los ensayos de fatiga para el acero AISI 1045 condición de Temple.	65
4.12 Ecuación y Parámetros de la ecuación de Basquin para el acero AISI 1045 para las condiciones estudiadas	72
4.13 Relación entre el área de la zona de fractura y los esfuerzos	78

4.14 Resultados de los valores de resistencia a la fatiga de los trabajos de Ceballos y Coronado	94
4.15 Comparación de los resultados obtenidos del trabajo de Este y de nuestra investigación.	95

# CAPÍTULO 1

## *Planteamiento del Problema*

---

---

### **1.1 Situación problemática**

Actualmente la automatización de los procesos de fabricación en las industrias como en otros sectores (construcción, medicina, Etc.) ha tenido un crecimiento acelerado, lo que ha traído como consecuencia la implementación de maquinarias que realicen la producción de una manera más rápida y efectiva, desempeñada originalmente por operadores humanos.

Estas maquinas automáticas están sometidas a fatiga debido a las grandes cantidades de horas operando, lo que genera perdidas de producción y por ende pérdidas de dinero cuando ocurre una falla. Una manera de evitar que estas maquinas presenten este problema es seleccionar un material para su fabricación cuya propiedades mecánicas tengan un optimo desempeño, se ajuste a las condiciones de trabajo planteadas y su costo sea rentable para cualquier ente interesado en obtener dicho producto.

En el área de la ingeniería el material mas utilizado es el acero por su maquinabilidad y múltiples aplicaciones en el diseño. Más sin embargo, el comportamiento mecánico natural del acero no cumple en ciertas aplicaciones con los requerimientos deseados de resistencia a la rotura y esfuerzos

variables. Por tal razón, surge el interés de evaluar la resistencia a la fatiga del acero para maquinarias AISI 1045 tratado térmicamente con temple y normalizado, con el fin de mejorar su dureza y resistencia mecánica.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar la resistencia a la fatiga del acero AISI 1045, sometido a tratamientos térmicos de Temple en aceite y Normalizado.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar el acero AISI 1045, realizándole estudio metalográfico y propiedades mecánicas (Resistencia a la Fluencia, Resistencia a la Tensión, Ductilidad y Dureza).
- Determinar la resistencia a la fatiga del acero AISI 1045 sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico de temple (aceite) y normalizado.
- Determinar la ecuación de Basquin para cada condición del acero estudiado.
- Comparar las curvas obtenidas de fatiga del acero AISI 1045 tratado térmicamente con las curvas ya establecidas del mismo acero.
- Evaluar las superficies de fractura de las probetas de acero AISI 1045, sometidas a los ensayos de fatiga.

### **1.3 Justificación**

La realización de ensayos en un material que tiene un amplio rango de aplicaciones como es el acero AISI 1045 nos permite tener un mas profundo conocimiento del mismo mejorando sus propiedades para poder así darle nuevas aplicaciones.

Para empresas productoras de aceros como las que usan acero como materia prima, es de gran importancia el estudio del comportamiento mecánico de sus productos para poder garantizar la calidad de los mismos.

El estudio del comportamiento a fatiga del acero AISI 1045 con diferentes tratamientos térmicos no solo sirve para la evaluación del mismo, sino para adquirir conocimiento sobre el desarrollo de actividades de investigación.

### **1.4 Alcance**

Para fines de la presente investigación solo se trabajaran con probetas de acero AISI 1045 en su condición original y tratados térmicamente bajo las condiciones de temple en aceite totalmente sumergida la pieza y normalizado, ellas serán sometidas a ensayos a fatiga para observar su comportamiento mecánico, con el fin de predecir dicho comportamiento en el diseño de dispositivos mecánicos para su uso en maquinarias. Se realizarán ensayos de unas setenta y dos (72) probetas a diferentes niveles de esfuerzo.

## **1.5 Limitaciones**

- La complejidad de la máquina de ensayo de fatiga para realizar su calibración y la falta de técnico para asesorar al estudiante
- La disponibilidad de los equipos ya que en las instalaciones de la Universidad de Carabobo cuenta con una sola máquina para realizar los ensayos de fatiga, existen otros estudiantes con las mismas necesidades y las condiciones de horario de dicho laboratorio limitan el tiempo de disponibilidad del equipo

## **1.6 Antecedentes de la investigación.**

La investigación de Acosta, 2005. Titulada “Evaluar el comportamiento mecánico a la fatiga del acero AISI 4340, sometido a tratamiento térmico de temple y temple más revenido”. Se enfocó en aplicarle a las probetas de acero AISI 4340 un tratamiento térmico de temple a una temperatura de horno de 900° C, posteriormente a la mitad del número total de probetas se les aplicó un revenido, determinándose para cada condición las propiedades mecánicas de esfuerzo de fluencia y resistencia a la tracción acorde con la norma ASTM A-370. La relación entre el esfuerzo alternante y el número de ciclos de vida del material se determinaron con una expresión conocida como la ley de Basquin, se realizó la caracterización de las microestructuras y se evaluaron las superficies de fractura de las probetas rotas de fatiga por la técnica de microscopía electrónica de barrido, lo que arrojó como resultado que para la condición de temple, el acero aumentó su dureza pero su resistencia a la fatiga disminuyó y para la condición de temple más revenido, disminuyó su dureza y aumentó su resistencia debido a que ocurrió un alivio de tensiones dentro de la estructura de grano del material.

Los estudios que realizó Cañibano 2006 en la investigación titulada "Desarrollo de modelos de comportamiento a fatiga para los aceros de alto límite elástico", sirvió para determinar los modelos de plasticidad, daño y fatiga que existen en este momento implementados en los programas de elementos finitos y en caso de que el ajuste no sea bueno planteo formular nuevos modelos que a partir de ensayos sencillos podamos obtener el comportamiento general, obtuvo como resultado que los modelos de plasticidad son adecuados si se plantean modelos no lineales tipo Chaboche y en el caso de fatiga es necesario formular una ecuación que incluya términos de plasticidad.

La publicación hecha por Castro et al., 1998, denominada "Evaluación de las propiedades mecánicas de un acero microaleado al vanadio sometido a un tratamiento térmico de normalizado". Se baso en estudiar las propiedades mecánicas del acero microaleado al vanadio constituido por (Ferrita y Ferrita Widmanstatten, Perlita, Sulfuro de Manganeso y Silicio) y la forma de aumentar dichas propiedades a través de un tratamiento térmico de normalizado, las condiciones a las cuales fue sometido el material fueron a una temperatura de 1000° C por periodos de tiempo variables que oscilaban entre 2 y 10 minutos, lo que arrojó como resultado que para el tiempo de 3 minutos el acero presenta un mayor incremento en el límite elástico, resistencia a la fluencia, resistencia al impacto y la resistencia a la tracción con respecto a su condición inicial. Sin embargo, para todas las condiciones de normalizado se registró un incremento de la energía absorbida por impacto y una mayor tenacidad para las condiciones de 2 a 7 minutos. Tiempo después (Castro, 2002) en otra publicación llamada "Tenacidad a la fractura y resistencia a la fatiga de barras corrugadas de acero inoxidable", realizó una completa caracterización mecánica de armaduras de refuerzo fabricadas con tres tipos de acero inoxidable austenítico (1.4311, 1.4429 y 1.4571) y un tipo de acero inoxidable dúplex (1.4429), todas ellas obtenidas tanto por la

laminación en caliente como por deformación en frío (a excepción de las barras del tipo 1.4571, que sólo se fabrican por deformación en frío). Obtuvo las propiedades mecánicas convencionales, mediante ensayos de tracción, dureza y determinó la tenacidad a la fractura de estas barras. El trabajo experimental lo completó con el estudio del comportamiento a fatiga de alto número de ciclos de los diferentes aceros corrugados y un completo análisis microfractográfico, todos los resultados se han justificado en función del tipo de acero y método de fabricación empleado en cada caso.

La investigación realizada por ESTE, 2002. Denominada “Evaluación de la vida de fatiga de aceros de bajo y medio carbono tratados térmicamente”. Utilizó tres (3) tipos diferentes de aceros, (AISI 1020, AISI 1030 y el AISI 1045), cuyas condiciones iniciales de los materiales era su estado natural, sin tratamiento térmico ni recubrimiento. Estos aceros fueron sometidos a ensayos de fatiga en condiciones de flexión rotativa. Este estudio reflejó que mientras más porcentaje de carbono contenga el acero mayor es la resistencia a la fatiga. Es importante destacar que para evitar incertidumbre en la dispersión de los puntos de la curva S-N, se ensayaron un total de 32 probetas para cada acero.

La investigación de García 1989, titulada “Tenacidad a fractura y propagación de grietas por fatiga en aceros de alto carbono y fundiciones utilizadas en la fabricación de cilindros de laminación”, estudió los efectos de la variación de los parámetros estructurales de los aceros utilizados en la elaboración de los cilindros blooming (tamaño de grano austenítico, espaciado perlítico y acumulaciones de carburos libres) y de las funciones Ni-hard que constituyen las capas de los cilindros de trenes de bandas en caliente, en la tenacidad a fractura y en la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga, demostró que los ensayos de fractura son los que mejor caracterizan el comportamiento de estos materiales, la tesis supone una interesante

aportación de tipo práctico que permite una optimización de microestructura en orden a obtener una mayor duración de la vida del cilindro

Ortiz et al., 2003 en la investigación denominada "Comportamiento a la fatiga al aire y fatiga-corrosión en un acero 316L recubierto con  $\text{TiN}_x$  y  $\text{ZrN}_y$  obtenidos por bombardeo iónico". Obtuvieron que para el acero 316L bajo condiciones de recubrimiento por deposición física en fase de vapor por  $\text{TiN}_x$  y  $\text{ZrN}_y$ , hubo un aumento del espesor, el cual fue aplicado por un sistema de bombardeo iónico mediante un magnetrón desbalanceado de campo cerrado. Al realizar el estudio del comportamiento a la fatiga del acero recubierto determinaron que el aumento de este comportamiento estaba intrínsecamente relacionado con las propiedades mecánicas del recubrimiento con respecto al sustrato, esfuerzos residuales de compresión en los mismos y a la buena adhesión al sustrato. Posteriormente (Ortiz et al., 2005), en otra investigación titulada "Comportamiento a la fatiga de un acero al carbono AISI 1045 recubierto con depósitos autocatalíticos de Ni-P". Se encaminaron al estudio del comportamiento a la fatiga del acero AISI 1045 recocido, cuyas condiciones a las cuales estaba sometido el material era con un recubrimiento autocatalítico de Ni-P de diferentes microdureza, que aumentaron el espesor a 7 y  $37\mu\text{m}$ . Aplicó post-tratamientos térmicos a ambas condiciones de espesores. Los resultados obtenidos indican que el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo real a la carga máxima disminuyen levemente con respecto a la condición del acero recocido para cada espesor. Por otro lado, el esfuerzo real a la fractura disminuye significativamente a medida que aumenta el espesor de los depósitos, aunque dicho efecto se hace menos marcado al aumentar el espesor de los mismos.

Sáenz et al., 2004, en la publicación denominada "Evaluación de la resistencia a fatiga y límite de fatiga de aceros de medio y bajo carbono" se basa en el comportamiento a fatiga en condiciones de flexión rotativa de

aceros de medio y bajo carbono (AISI 1020, AISI 1030 y AISI 1045), determinaron las propiedades mecánicas del material resistencia a la tracción, el esfuerzo de fluencia, límite de fatiga y la resistencia a la fatiga para cada material, se realizó la caracterización de las microestructuras y se evaluaron las superficies de fractura de las probetas rotas de fatiga por la técnica de microscopía electrónica de barrido, ellos determinaron que tanto la resistencia a fatiga como el límite de fatiga incrementan a medida que aumenta el porcentaje de carbono y que el mecanismo de fractura es mixto por coalescencia de cavidades con presencia de hoyuelos y facetas de clivaje. Seguidamente en otra investigación (Sáenz et al., 2005) nombrada “Evaluación del comportamiento mecánico a la fatiga en aceros AISI 4340 y AISI 4140 tratados térmicamente con recocidos y normalizados”, determinaron las propiedades mecánicas de esfuerzo de fluencia y resistencia a la tracción acorde con la norma ASTM A-370. La relación entre el esfuerzo alternante y el número de ciclos de vida del material se determinaron con una expresión conocida como la ley de Basquin. Adicionalmente, llevó a cabo un análisis de algunas superficies de fractura de las muestras rotas, por la técnica de microscopia electrónica de barrido. Los resultados indican que los dos aceros aumentaron su resistencia a la fatiga con el tratamiento térmico normalizado al ser comparados con la condición original, sin embargo con el recocido se obtuvo una disminución de los valores de resistencia a la tracción, resistencia a la fatiga y dureza.

Toledano 1998, en la investigación titulada “Fatiga y fractura de aceros perlíticos con distinto grado de trefilado” estudió el comportamiento de alambres fisurados de acero perlítico hipoeutectoide con distinto grado de trefilado en procesos de fatiga y fractura, aseguró que la resistencia a la fisuración por fatiga de los aceros mejora con el trefilado, relacionó los distintos modos microscópicos de fractura por fatiga analizados

fractográficamente mediante el microscopio electrónico de barrido y midió la tenacidad de fractura de aceros perlíticos con distinto grado de trefilado

# CAPÍTULO 2

## *Marco Teórico*

---

---

### **2.1 Aceros**

#### **2.1.1 Definición**

Los aceros son aleaciones de hierro y carbono, con contenido de carbono máximo de 2,11%C. Generalmente se consideran aceros al carbono aquellos aceros con un contenido máximo de carbono de 1.7%C. La mayoría de los aceros contienen pequeñas cantidades de manganeso (hasta 0,90%) y de silicio (hasta 0,30%) y la función de estos elementos es actuar como desoxidantes, combinándose con el oxígeno y el azufre reduciendo los efectos perjudiciales de estos. (Iriza, 2004)

Por la variedad y la disponibilidad de sus dos elementos primordiales que abundan en la naturaleza, facilitando su producción en cantidades industriales, los aceros son las aleaciones más utilizadas en la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, habiendo contribuido al alto nivel de desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas. Sin embargo, en ciertos sectores, como la construcción aeronáutica, el acero apenas se usa debido a que es un material muy pesado. El acero es casi tres

veces más pesado que el aluminio (7,85/2,7). (Enciclopedia de Ciencia y Técnica, 1984).

### **2.1.2 Clasificación**

Cuando otros elementos de aleación se incorporan normalmente en el proceso y se hallan en una proporción que no afectan mayormente las propiedades introducidas por el carbono, decimos que el acero es al carbono. Cuando dichos elementos se agregan deliberadamente para introducir determinadas propiedades, decimos que el acero es aleado. (SUMINDU, 2008)

Los aceros al carbono constituyen casi el 85% de todos los aceros utilizados por la industria. Se clasifican como de bajo carbono (0,35 a 0,50% de carbono), mediano carbono (0,35 a 0,50% de carbono) y alto carbono (más de 0,50% de carbono). El contenido de este elemento tiene una función de máxima importancia para determinar las propiedades del acero al carbono.

Los aceros aleados se producen con elementos específicos de aleación, tales como: Cromo, Níquel, Molibdeno, Vanadio, Tungsteno, etc. Las propiedades de estos aceros dependen además del carbono, del contenido y número de elementos de aleación. (SUMINDU, 2008). Desde el punto de vista de sus aplicaciones, los aceros se pueden clasificar en cuatro grandes grupos como se muestra en la tabla 2.1

**Tabla 2.1** Clasificación de los Aceros según su aplicación. (SUMINDU, 2008)

<b>Aceros Estructurales</b>	<b>Aceros de Construcción</b>	<b>Aceros para Herramientas</b>	<b>Aceros Inoxidables</b>
Al carbono (bajo carbono) Baja aleación	De cementación (<0,25% C) (al carbono y aleados) De bonificación (al carbono y aleados)	Al carbono Aleados (Baja, Mediana y Alta Aleación)	Alta aleación (Martensíticos, Ferríticos y Austeníticos)

Los aceros estructurales se suelen usar en bruto de forja o laminación, sin tratamiento térmico, en los siguientes casos. Los aceros al carbono (Bajo carbono) se utilizan para construcciones metálicas, en la forma de vigas, cabillas, ángulos, láminas, etc. Aceros de baja aleación de alto límite elástico para grandes construcciones metálicas, puentes, torres, etc.

Los aceros de construcción son generalmente los que se emplean en la fabricación de piezas o elementos de máquinas tales como: ejes, engranajes, levas, donde son fundamentales ciertas propiedades mecánicas, como resistencia a la tracción, tenacidad, resistencia a la fatiga, etc.

Los aceros para herramientas como su nombre lo indica, son los que generalmente se utilizan para fabricar herramientas destinadas a transformar, modificar o dar forma adecuada a los materiales. Esos trabajos se verifican por arranque, por corte o por deformación plástica del material. Los aceros de herramientas requieren como propiedad fundamental alta resistencia al desgaste (alta dureza).

Los aceros inoxidables Son los que se utilizan para resistir la influencia de atmósferas húmedas, agentes corrosivos, ácidos, etc., y los que son capaces de resistir durante largo tiempo elevadas temperaturas. Los Aceros Inoxidables se clasifican en tres grupos: a) Martensíticos o series 400 y 500 con contenidos de 11,50 a 18% de cromo; b) Ferríticos o series 400 con contenido de 17 % de cromo; c) Austeníticos o series 200 y 300 con contenido de cromo, Níquel básicamente. (SUMINDU, 2008)

### **2.1.3 Designación de los aceros según sistema SAE-AISI**

La S.A.E (Society of Automotive Engineers) ha establecido un sistema de clasificación de aceros, el cual ha sido adoptado por el (American Iron and Steel Institute) A.I.S.I y la (American Society For Testing And Materials) A.S.T.M. La designación A.I.S.I. De aceros al carbono y de baja aleación se realiza por medio de 4 ó 5 números y se basa en la composición química. Los dos primeros dígitos indican el tipo de acero y los últimos expresan el contenido de carbono multiplicado por 100. Por ejemplo la designación S.A.E – A.I.S.I corresponde a un acero al carbono con 0,45% en peso de carbono. En la tabla 2.2 se presenta el sistema S.A.E. - A.I.S.I aplicado a algunas familias de estos aceros

Tabla 2.2 Designación de los aceros según el sistema SAE-AISI. (SUMINDU, 2008)

SERIES DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN
<b>Aceros al Carbono</b>	
10xx	No resulturizado, 1.00% Manganeso (máx.)
11xx	Resulturizado
12xx	Resulturizado y refosforizado
15xx	No resulturizado, sobre 1.00% manganeso
<b>Aceros de Baja Aleación</b>	
13xx	1.75 Manganeso
23xx	3.50 Níquel
25xx	5.00 Níquel
31xx	1.25 Níquel y 0.65 Cromo
32xx	1.75 Níquel y 1.00 Cromo
33xx	3.50 Níquel y 1.50 Cromo
40xx	0.25 Molibdeno
41xx	1.00 Cromo y 0.20 Molibdeno
43xx	1.80 Níquel; 0.50 a 0.80 Cromo; 0.25 Molibdeno
46xx	1.80 Níquel y 0.25 Molibdeno
47xx	1.05 Níquel; 0.45 Cromo; 0.30 Molibdeno
48xx	3.50 Níquel; 0.25 Molibdeno
51xx	0.80 Cromo
52xx	1.50 Cromo
61xx	0.60 ó 0.95 Cromo y 0.14 Vanadio
86xx	0.55 Níquel; 0.50 Cromo; 0.20 Molibdeno
87xx	0.55 Níquel; 0.50 Cromo; 0.25 Molibdeno
88xx	0.55 níquel; 0.50 Cromo; 0.35 Molibdeno
92xx	2.00 Silicio; 0.85 Manganeso
93xx	1.00 Níquel; 1.20 Cromo; 0.12 Molibdeno
98xx	1.00 Níquel; 0.80 Cromo; 0.25 Molibdeno
51xxx	1.00 Cromo
52xxx	1.45 Cromo
51Bxx *	0.80 Cromo
86Bxx *	0.55 Níquel; 0.50 Cromo; 0.20 Molibdeno, Boro
94Bxx *	0.45 Níquel; 0.40 Cromo; 0.12 Molibdeno, Boro

\* Denota Acero al Boro

### 2.1.4 Tratamientos térmicos para los aceros

Un proceso de tratamiento térmico adecuado permite aumentar significativamente las propiedades mecánicas de dureza, tenacidad y resistencia mecánica del acero. Los tratamientos térmicos cambian la microestructura del material, con lo que las propiedades macroscópicas del acero también son alteradas. (Gómez, 2006). Los tratamientos térmicos que pueden aplicarse al acero son:

- **Temple.**

El temple es un tratamiento térmico al que se somete al acero, concretamente a piezas o masas metálicas ya conformadas en el mecanizado, para aumentar su dureza, resistencia a esfuerzos y tenacidad. El proceso se lleva a cabo calentando el acero a una temperatura aproximada de 915 °C en el cual la ferrita se convierte en austenita, después la masa metálica es enfriada rápidamente, sumergiéndola o rociándola en agua, en aceite o en otros fluidos o sales controlando el tiempo de calentamiento y de enfriamiento. Después del temple siempre se suele hacer un revenido. Es uno de los principales tratamientos térmicos que se realizan y lo que hace es disminuir y afinar el tamaño del grano de la alineación de acero correspondiente. Se pretende la obtención de una estructura totalmente martensítica

#### ***Tipos de temple***

Hay dos tipos de temples, uno de ellos es el que se templea la totalidad de la pieza, incluyendo su núcleo, y otro es el que sólo se templea su superficie externa, dejando el núcleo menos duro, para que sea más flexible. A este segundo temple se le llama "temple superficial" y existen dos tipos de éste

según la manera de calentar: "a la llama" (en desuso) y el temple por inducción.

También la dureza superficial se obtiene por medio del cementado, sin endurecer el núcleo, aplicado en engranajes y otros elementos que requieran similares características.

### ***Factores que influyen en el temple***

- La composición química del acero a temprar, especialmente la concentración de carbono. También es muy importante la presencia de aleantes ya que amplían la franja temporal de enfriamiento en la que se puede obtener martensita.
- La temperatura de calentamiento y el tiempo de calentamiento de acuerdo con las características de la pieza.
- La velocidad de enfriamiento y los líquidos donde se enfría la pieza para evitar tensiones internas y agrietamiento.
- Las tensiones internas son producidas por las variaciones exageradas que se le hace sufrir al acero, primero elevándola a una temperatura muy alta y luego enfriándola. Estas tensiones y grietas son consecuencia del cambio de volumen que se produce en el interior del acero debido a que el núcleo enfría a menor velocidad. A las piezas templadas hay que darles un tratamiento posterior llamado revenido para eliminar las tensiones internas.

### **Características generales del temple**

- Hace el acero se vuelve más duro y resistente pero a la vez más frágil
- La temperatura de calentamiento puede variar de acuerdo a las características de la pieza y resistencia que se desea obtener.
- La velocidad de enfriamiento es rápida, casi instantánea.
- Si el temple es muy enérgico las piezas se pueden agrietar.

- **Normalizado**

El normalizado es un tratamiento térmico que se emplea para dar al acero una estructura granular mas refinada y una microestructura mas homogeneizada. Se hace como preparación de la pieza para el temple. (Gómez, 2006)

El procedimiento consiste en calentar la pieza entre 55 y 85 grados centígrados por encima de de la temperatura crítica superior, y mantener esa temperatura el tiempo suficiente para conseguir la transformación completa en austenita. A continuación se deja enfriar en aire tranquilo. Con esto se consigue una estructura perlítica con el grano más fino y más uniforme que la estructura previa al tratamiento, consiguiendo un acero más tenaz. Es lo que llamamos perlita fina

### **Factores que influyen**

- La temperatura de cristalización no debe sobrepasar en 100°C la temperatura crítica.
- El tiempo de permanencia de las probetas dentro del horno a esta temperatura deberá ser lo más corto posible.

- El ambiente en donde se enfriarán las probetas debe estar tranquilo, es decir, el aire no debe estar agitado por ventiladores y no debe existir gradientes de temperatura por encima o por debajo de la temperatura ambiente durante el enfriamiento.

### **2.1.5 Ensayos mecánicos del acero**

Cuando un técnico proyecta una estructura metálica, diseña una herramienta o una máquina y define las calidades y prestaciones que tienen que tener los materiales constituyentes. Como hay muchos tipos de aceros diferentes y, además, se pueden variar sus prestaciones con tratamientos térmicos, se establecen una serie de ensayos mecánicos para verificar principalmente la dureza superficial, la resistencia a los diferentes esfuerzos que pueda estar sometido, el grado de acabado del mecanizado o la presencia de grietas internas en el material. (Gómez, 2006)

Hay dos tipos de ensayos, unos que pueden ser destructivos y otros no destructivos.

#### **a) Ensayos no destructivos:**

- Ensayo microscópico y rugosidad superficial. Microscopios y rugosímetros.
- Ensayos por ultrasonidos.
- Ensayos por líquidos penetrantes.

#### **b) Ensayos destructivos:**

- Ensayo de tracción con probeta normalizada.
- Ensayo de resiliencia.
- Ensayo de compresión con probeta normalizada.

- Ensayo de cizallamiento.
- Ensayo de flexión.
- Ensayo de torsión.
- Ensayo de plegado.
- Ensayo de fatiga.
- Ensayo de dureza (Brinell, Rockwell, Vickers). Mediante durómetros.

Todos los aceros tienen estandarizados los valores de referencia de cada tipo de ensayo al que se le somete

## **2.2 Caracterización del material a evaluar**

### **2.2.1 Aceros para maquinarias**

Este grupo de aceros para maquinarias, está integrado por una gama muy extensa de aceros de construcción que se emplean en la fabricación de piezas o elementos de máquinas, tales como: ejes, engranajes, levas, cigüeñales donde son fundamentales ciertas propiedades mecánicas, como resistencia a la tracción, tenacidad, resistencia a la fatiga por flexión, torsión, etc. (SUMINDU, 2008)

Los aceros para maquinarias se pueden clasificar en dos grupos:

Aceros de Cementación (<0.25%) (al carbono y aleados)

Aceros de Bonificación (Al carbono y aleados)

Existe sin embargo un grupo constituido por aceros que se suelen utilizar sin tratamiento térmico propiamente dicho, es decir en estado natural, en partes y piezas poco exigidas mecánicamente. La Norma que utilizaremos para la identificación de los aceros para maquinarias es la AISI (American Iron and Steel Institute la cual asigna en este caso 4 o 5 dígitos). A continuación se indican algunos ejemplos de clasificación:

Aceros de Cementación: (AISI) 16NC6 8620 3115

Aceros Bonificados: (AISI) 4140 4340 4130

Especial Para Tornos Automáticos: (AISI) 12L14 1213

Estado Natural: (AISI) 1040 1045 1060 Tubo Mecánico

### **2.2.2 Especificación técnica del acero AISI 1045**

El acero AISI-1045 es considerado en la práctica industrial como un material de buena calidad que combina elevada tenacidad – ductilidad con una gran capacidad de endurecimiento por deformación y una elevada resistencia al desgaste a pesar de su relativa baja dureza. (Herrera et al., 1986)

El acero AISI -1045 puede logra unificar las propiedades de resistencia al desgaste, en consecuencia constituye el material idóneo para garantizar la asignación de servicio de estas piezas ya que es un material con facilidad de conformar, su costo de producción es bajo y ofrece buenas condiciones de trabajo al desgaste teniendo en cuenta su tendencia al endurecimiento por deformación plástica, no obstante en las condiciones en que se ofertan en el mercado dichos elementos fabricados de este material, no se garantiza la dureza requerida antes de su puesta en explotación. (Herrera et al., 1986)

Es un acero además utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarias en condición de suministro. Este acero de medio carbono puede ser forjado con martillo. Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado. Cuando se hacen prácticas de soldadura adecuadas, presenta soldabilidad adecuada y no es necesario aplicar métodos especiales para la soldadura. Por su dureza y tenacidad es adecuado para la fabricación de componentes de maquinaria. (SUMITEC, 2008)

### **Características Generales**

- Es un acero de construcción de medio carbono utilizado ampliamente en elementos de maquinarias que requieran mediana resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo.
- Responde fácilmente al tratamiento térmico de endurecimiento mediante temple, especialmente en medios severos como el agua.
- Buena maquinabilidad
- Es comúnmente usado en piezas endurecidas superficialmente por inducción o llama oxiacetilénica.

### **Aplicaciones**

- Elementos de maquinarias que requieran de medianas propiedades mecánicas a bajo costo
- Para la construcción de ejes, engranajes, cigüeñales, espárragos, perno, abrazaderas, piezas agrícolas, cadenas, piñones, cuñas, tornillos, partes de maquinaria, herramientas agrícolas, remaches, armaduras, vigas, pasadores, etc.

### **Propiedades**

A continuación se presenta de manera tabulada la composición química (ver tabla 2.3) y las propiedades mecánicas (ver tabla 2.4) del acero AISI 1045, suministrada por el fabricante SUMINDU.

**Tabla 2.3** Intervalos de la composición química del acero AISI 1045. (SUMINDU, 2008)

<b>Carbono (C)</b>	<b>Azufre (S)</b>	<b>Fósforo (P)</b>	<b>Silicio (Si)</b>	<b>Manganeso (Mn)</b>
0.43-0.50	0.04 (Máx.)	0.04 (Máx.)	0.15-0.35	0.60-0.90

**Tabla 2.4** Propiedades mecánicas del acero AISI 1045. (SUMINDU, 2008)

<b>Dureza</b>	<b>Esfuerzo de Fluencia</b>	<b>Esfuerzo Máximo</b>	<b>Elongación</b>
163 HB 84 HRb	310 MPa 45000 PSI	565 MPa 81900 PSI	16 % En 50 mm
<b>Reducción de Área</b>	<b>Módulo de Elasticidad)</b>	<b>Maquinabilidad</b>	
40 %	200 GPa 29000 KSI	57%	

Los valores expresados en las propiedades mecánicas, corresponden a los valores promedio que se espera que cumpla 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.

### 2.3 Estudio metalográfico.

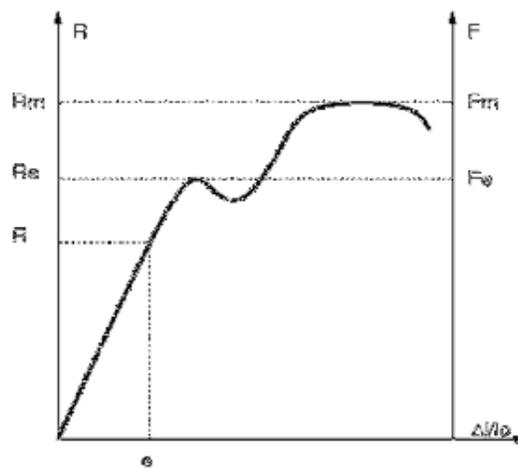
La metalografía se basa en el estudio de la estructura cristalina de los metales y las aleaciones, y de las relaciones entre estas estructuras y las propiedades físicas de los metales. (Biblioteca de Consulta Microsoft Encarta, 2005).

Las herramientas más importantes de los metalógrafos son el microscopio y los rayos X. El examen microscópico de especímenes permite la determinación del tamaño, la estructura y la orientación de los cristales del metal. Mediante este tipo de exámenes, los metalógrafos pueden identificar un metal o una aleación, descubrir posibles impurezas y comprobar la eficacia de los tratamientos térmicos para su endurecimiento o templeado. Los especímenes empleados para el examen metalográfico suelen pulirse con gran cuidado y después tratarse con ácidos diluidos; esto pone de relieve la estructura del grano, al atacar las delimitaciones entre los cristales o uno de los componentes de una aleación. Cuando los metales han de ser examinados al microscopio electrónico, puede hacerse una réplica o molde delgado, transparente a los electrones, de la superficie atacada por el ácido, ya que el metal en bruto no transmite los rayos catódicos. Como alternativa, puede prepararse un espécimen muy fino; la microestructura observada es una proyección de la existente en el mismo.

Cuando se hace pasar un haz de rayos X a través de un espécimen de una sustancia cristalina, se obtienen patrones de difracción que pueden interpretarse para determinar la estructura interna de los cristales. La investigación metalográfica ha mostrado que al estirar o deformar un metal, se producen diminutos deslizamientos entre las capas de átomos que componen el cristal, lo que permite al metal adoptar una nueva forma e incrementar su dureza y fortaleza. Si el metal se calienta tras la deformación, vuelve a cristalizarse; es decir, sus átomos se reorganizan formando nuevos cristales no sometidos a tensión alguna. Esto explica por qué los metales se vuelven quebradizos cuando son doblados en frío y por qué vuelven a reblandecerse cuando son recalentados. (Biblioteca de Consulta Microsoft Encarta, 2005).

## 2.4 Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada realizada con dicho material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. En la figura 2.1 se presenta un diagrama tensión – deformación de un acero de bajo límite de fluencia. (Gómez, 2006)



**Figura 2.1** Diagrama de tensión - deformación típico de un acero de bajo límite de fluencia.  
(Gómez, 2006)

En un ensayo de tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos:

- Módulo de elasticidad o Módulo de Young, el cual es una constante de proporcionalidad cuyo valor es diferente para cada material y es la pendiente del comportamiento lineal de la zona elástica de cada material.
- Coeficiente de Poisson, que cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento de las longitudes transversales a la dirección de la fuerza.

- Límite de proporcionalidad valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.
- Límite de fluencia o límite elástico aparente: valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.
- Límite elástico (límite elástico convencional o práctico): valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.).
- Carga de rotura o resistencia a la tracción: carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.
- Alargamiento de rotura: incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.
- Estricción: es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura.

Normalmente, el límite de proporcionalidad, el alargamiento de rotura y la estricción, no suele determinarse ya que carece de interés para los cálculos.

## 2.5 Ensayo de Dureza

### ***Definición***

La dureza es una propiedad mecánica de los materiales consistente en la dificultad que existe para rayar o crear marcas en la superficie mediante micropenetración de una punta. Gómez, 2006

### ***Escalas de uso industrial***

En metalurgia la dureza se mide utilizando un durómetro (ver figura 2.2) para el ensayo de penetración. Dependiendo del tipo de punta empleada y del rango de cargas aplicadas, existen diferentes escalas, adecuadas para distintos rangos de dureza.

El interés de la determinación de la dureza en los aceros estriba en la correlación existente entre la dureza y la resistencia mecánica, siendo un método de ensayo más económico y rápido que el ensayo de tracción, por lo que su uso está muy extendido.



**Figura 2.2** Durómetro (Enciclopedia de Ciencia y Técnica)

Las escalas de uso industrial actuales son las siguientes:

- Dureza Brinell: Emplea como punta una bola de acero templado o carburo de W. Para materiales duros, es poco exacta pero fácil de aplicar. Poco precisa con chapas de menos de 6mm de espesor. Estima resistencia a tracción.
- Dureza Knoop: Mide la dureza en valores de escala absolutas, y se valoran con la profundidad de señales grabadas sobre un mineral mediante un utensilio con una punta de diamante al que se le ejerce una fuerza standard.
- Dureza Rockwell: Se utiliza como punta un cono de diamante (en algunos casos bola de acero). Es la más extendida, ya que la dureza se obtiene por medición directa y es apto para todo tipo de materiales. Se suele considerar un ensayo no destructivo por el pequeño tamaño de la huella.
- Rockwell superficial: Existe una variante del ensayo, llamada Rockwell superficial, para la caracterización de piezas muy delgadas, como cuchillas de afeitar o capas de materiales que han recibido algún tratamiento de endurecimiento superficial.
- Dureza Rosiwal: Mide en escalas absoluta de durezas, se expresa como la resistencia a la abrasión medias en pruebas de laboratorio y tomando como base el corindón con un valor de 1000.
- Dureza Shore: Emplea un escleroscopio. Se deja caer un indentador en la superficie del material y se ve el rebote. Es adimensional, pero consta de varias escalas. A mayor rebote mayor dureza. Aplicable para control de calidad superficial. Es un método elástico, no de penetración como los otros.

- Dureza Vickers: Emplea como penetrador un diamante con forma de pirámide cuadrangular. Para materiales blandos, los valores Vickers coinciden con los de la escala Brinell. Mejora del ensayo Brinell para efectuar ensayos de dureza con chapas de hasta 2mm de espesor.
- Dureza Webster: Emplea máquinas manuales en la medición, siendo apto para piezas de difícil manejo como perfiles largos extruidos. El valor obtenido se suele convertir a valores Rockwell.

## 2.6 Fatiga

La fatiga puede definirse como una fractura progresiva. Se produce cuando una pieza mecánica está sometida a un esfuerzo repetido o cíclico, por ejemplo una vibración. Aunque el esfuerzo máximo nunca supere el límite elástico, el material puede romperse incluso después de poco tiempo. En algunos metales, como las aleaciones de titanio, puede evitarse la fatiga manteniendo la fuerza cíclica por debajo de un nivel determinado. En la fatiga no se observa ninguna deformación aparente, pero se desarrollan pequeñas grietas localizadas que se propagan por el material hasta que la superficie eficaz que queda no puede aguantar el esfuerzo máximo de la fuerza cíclica. El conocimiento del esfuerzo de tensión, los límites elásticos y la resistencia de los materiales a la plastodeformación y la fatiga son extremadamente importantes en ingeniería. (Enciclopedia de Ciencia y Técnica, 1984).

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).

### **2.6.1 Factores que intervienen en la fatiga**

Son diversos los factores que intervienen en un proceso de rotura por fatiga a parte de las tensiones aplicadas. Así pues, el diseño, tratamiento superficial y endurecimiento superficial pueden tener una importancia relativa.

#### ***Diseño***

El diseño tiene una influencia grande en la rotura de fatiga. Cualquier discontinuidad geométrica actúa como concentradora de tensiones y es por donde puede nuclear la grieta de fatiga. Cuanto más aguda es la discontinuidad, más severa es la concentración de tensiones.

La probabilidad de rotura por fatiga puede ser reducida evitando estas irregularidades estructurales, o sea, realizando modificaciones en el diseño, eliminando cambios bruscos en el contorno que conduzcan a cantos vivos, por ejemplo, exigiendo superficies redondeadas con radios de curvatura grandes.

#### ***Mecanizado de las probetas.***

En las operaciones de mecanizado, se producen pequeñas rayas y surcos en la superficie de la pieza por acción del corte. Estas marcas limitan la vida a fatiga pues son pequeñas grietas las cuales son mucho más fáciles de aumentar. Mejorando el acabado superficial mediante pulido aumenta la vida a fatiga. (Gómez, 2006)

Uno de los métodos más efectivos de aumentar el rendimiento es mediante esfuerzos residuales de compresión dentro de una capa delgada superficial. Cualquier tensión externa de tracción es parcialmente

contrarrestada y reducida en magnitud por el esfuerzo residual de compresión. El efecto neto es que la probabilidad de rotura por fatiga se reduce.

### ***Endurecimiento superficial***

Es una técnica por la cual se aumenta tanto la dureza superficial como la vida a fatiga de los aceros aleados. Esto se lleva a cabo mediante procesos de carburación y nitruración, en los cuales un componente es expuesto a una atmósfera rica en carbono o en nitrógeno a temperaturas elevadas. Una capa superficial rica en carbono o en nitrógeno es introducida por difusión atómica a partir de la fase gaseosa. Esta capa es normalmente de 1mm de profundidad y es más dura que el material del núcleo. La mejora en las propiedades de fatiga proviene del aumento de dureza dentro de la capa, así como de las tensiones residuales de compresión que se originan en el proceso de cementación y nitruración.

### **2.6.2 Influencia del medio sobre el comportamiento a fatiga**

El medio puede afectar el comportamiento a fatiga de los materiales. Hay un tipo de fatiga que afecta al material la cual es la fatiga térmica.

#### ***Fatiga térmica***

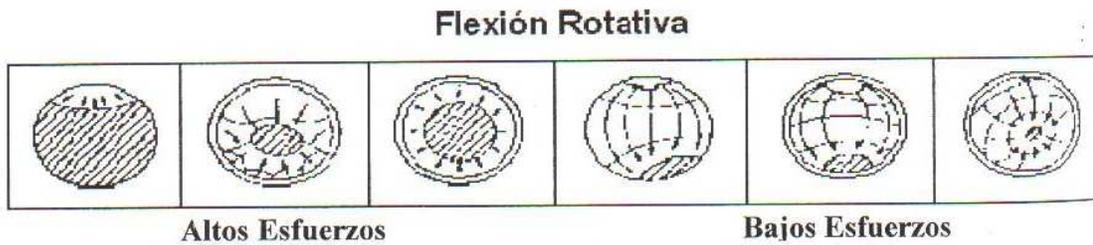
- La fatiga térmica se induce normalmente a temperaturas elevadas debido a tensiones térmicas fluctuantes. La causa de estas tensiones térmicas es la restricción a la dilatación y/o contracción que normalmente ocurren en piezas estructurales sometidas a variaciones de temperatura. La magnitud de la tensión térmica resultante debido a un cambio de temperatura depende del coeficiente de dilatación térmica y del módulo de elasticidad.

### 2.6.3 Fases de un fallo por 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 tensión 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, arañazos, muescas y entallas causados por las herramientas 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, aun cuando se encuentren próximas a producir la rotura de la pieza.
- **Fase 3 (Rotura):** La pieza continúa 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.

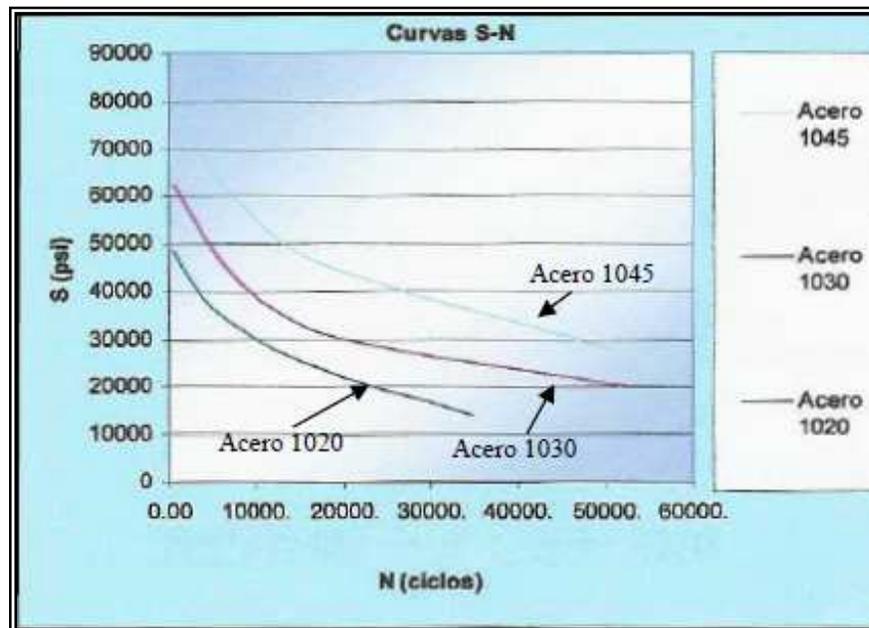
La superficie de fractura producida por flexión rotativa, generalmente tiene una apariencia en forma de arcos alrededor de un punto de la superficie; la fisura progresa según una serie de arcos elípticos que tienen como punto de partida una pequeña elipse, cuyo centro es el inicio de la falla por fatiga. (Avilés, 2005). En la figura 2.3, podemos observar una representación de esta falla.



**Figura 2.3** Representación esquemática de la falla por fatiga. (Avilés, 2005).

### 2.6.4 Curva S-N

Estas curvas se obtienen a través de una serie de ensayos donde una probeta del material se somete a tensiones cíclicas con una amplitud máxima relativamente grande (aproximadamente 2/3 de la resistencia estática a tracción). Se cuentan los ciclos hasta rotura. Este procedimiento se repite en otras probetas a amplitudes máximas decrecientes. En la figura 2.4 se muestra la representación grafica de una curva S-N.



**Figura 2.4** Curva S-N representativa. (Este, 2004)

Los resultados se representan en un diagrama de tensión,  $S$ , frente al logaritmo del número  $N$  de ciclos hasta la rotura para cada una de las probetas. Los valores de  $S$  se toman normalmente como amplitudes de la tensión  $\sigma_a$ .

Se pueden obtener dos tipos de curvas S-N. A mayor tensión, menor número de ciclos hasta rotura. En algunas aleaciones férreas y en aleaciones de titanio, la curva S-N se hace horizontal para valores grandes de  $N$ , es decir, existe una tensión límite, denominada límite de fatiga, por debajo del cual la rotura por fatiga no ocurrirá.

Muchas de las aleaciones no férreas (aluminio, cobre, magnesio, etc.) no tienen un límite de fatiga, dado que la curva S-N continúa decreciendo al aumentar  $N$ . Por consiguiente, la rotura por fatiga ocurrirá independientemente de la magnitud de la tensión máxima aplicada. Para estos materiales, la respuesta a fatiga se especifica mediante la resistencia a la fatiga que se define como el nivel de tensión que produce la rotura después de un determinado número de ciclos. Otro parámetro importante que caracteriza el comportamiento a fatiga de un material es la vida a fatiga  $N_f$ . Es el número de ciclos para producir una rotura a un nivel especificado de tensiones.

Desafortunadamente, existe una diferencia notable entre la teoría y la realidad. Esto conduce a incertidumbres significativas en el diseño cuando la vida a fatiga o el límite de fatiga son considerados. La dispersión en los resultados es una consecuencia de la sensibilidad de la fatiga a varios parámetros del ensayo y del material que son imposibles de controlar de forma precisa. Estos parámetros incluyen la fabricación de las probetas y la preparación de las superficies, variables metalúrgicas, alineamiento de la probeta en el equipo de ensayos, tensión media y frecuencia del ensayo.

Aproximadamente la mitad de las probetas ensayadas se rompen a niveles de tensión que están cerca del 25% por debajo de la curva.

Se han desarrollado técnicas estadísticas y se han utilizado para manejar este fallo en términos de probabilidades. Una manera adecuada de presentar los resultados tratados de esta manera es con una serie de curvas de probabilidad constante.

Fatiga de bajo número de ciclos (oligofatiga)  $< 10^4 - 10^5$  ciclos.

Fatiga de alto número de ciclos  $> 10^4 - 10^5$  ciclos.

# CAPÍTULO 3

## *Marco Metodológico*

---

---

### **3.1 Nivel de investigación**

Para llevar a cabo este proyecto se debe establecer los niveles de investigación del mismo, para así definir el grado de profundidad necesario que permita dar una solución que se pueda abordar para responder el problema planteado.

La investigación a realizar es de tipo descriptivo y tipo explicativo. Descriptivo, debido a que basándose en las características y propiedades del material a investigar se establecerá su comportamiento a la fatiga tratado térmicamente mediante temple y normalizado; razón por la cual se hace obligatorio, describir como se manifiesta el fenómeno de la fatiga en dicho material, así como también, describir las características tanto de la estructura metalográfica del acero en estudio, como de la superficie a través de la cual se propaga la grieta durante el proceso de falla por fatiga. Es de tipo explicativo, porque luego de realizado el análisis del fenómeno de la fatiga en el material (Acero AISI 1045, temple y normalizado), se determinará la relación entre los tratamientos térmicos referidos y el fenómeno de fatiga.

### **3.2 Diseño de la investigación**

Para cumplir con los objetivos planteados se aplicarán dos (2) tipos de investigaciones, las cuales se clasifican en: investigación documental, basada en la información Web, trabajos de investigación y consultas bibliográficas como estrategias para dar respuesta al planteamiento del problema e investigación experimental, basada en los datos que se obtendrán en el laboratorio mediante observaciones microscópicas, ensayos de dureza, tracción y fatiga con muestras y/o probetas adecuadas.

### **3.3 Población y muestra**

Las probetas a ensayar serán consideradas como los elementos de la población; en tanto que para que una probeta sea tomada como parte de la muestra, se requiere que la fractura de la misma ocurra en una zona definida y establecida por parámetros y especificaciones del investigador.

### **3.4 Tipo de muestreo**

Para la presente investigación el muestreo es del tipo no probabilística, ya que la selección de los elementos de la muestra depende del criterio del investigador y de las características de la misma, más no depende de la probabilidad que estos tengan para integrar la muestra.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Las técnicas utilizadas serán la observación directa y análisis documental. Observación directa debida a que se realizarán observaciones a través del microscopio, toma de fotografías y se obtendrán datos directamente de los ensayos de tracción, dureza y fatiga. Análisis documental proveniente de la bibliografía recopilada. Los instrumentos utilizados para la recolección de

datos son las tablas, gráficas y fotografías que resulten de los diferentes ensayos de laboratorio.

### 3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

A los datos recolectados se le aplicará el análisis teórico mediante ecuaciones y condiciones que permitan obtener los valores, para compararlos con parámetros establecidos. Se realizará la evaluación de las tablas que resulten de los ensayos de laboratorio, así como de las gráficas o curvas resultantes que permitan una relación importante entre las diferentes variables.

### 3.7 Estudio del acero.

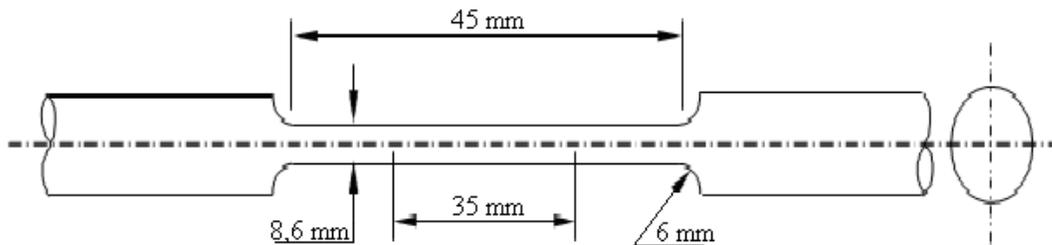
**3.7.1 Material:** El material utilizado en la investigación es un acero de medio carbono AISI 1045, el cual fue suministrado en barras de 6 metros de longitud y 12,7 mm de diámetro. Este acero es utilizado ampliamente en elementos de maquinarias que requieran mediana resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo. La composición química de dicho acero según información obtenida del fabricante de los aceros (SUMINDU) es la siguiente:

**Tabla 3.1** Intervalos de la composición química del acero AISI 1045. (SUMINDU, 2008)

<b>Carbono (C)</b>	<b>Azufre (S)</b>	<b>Fósforo (P)</b>	<b>Silicio (Si)</b>	<b>Manganeso (Mn)</b>
0.48%	0.016%	0.03%	0.15%	0.60%

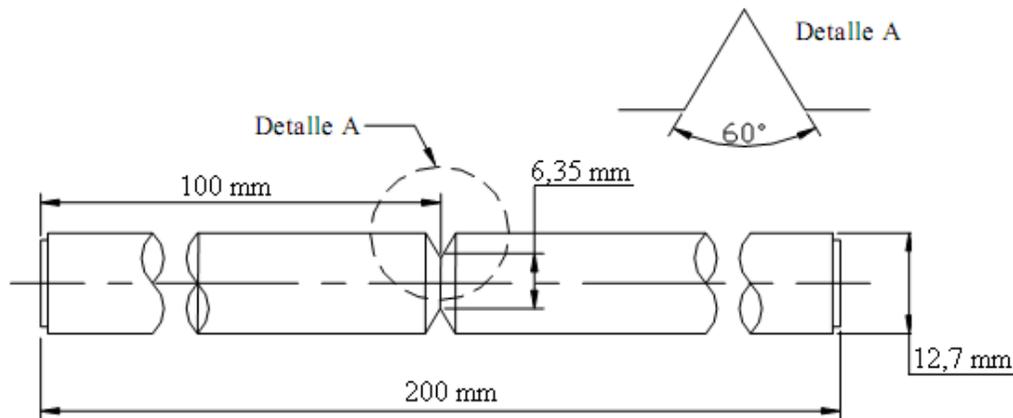
**3.7.2 Mecanizado y preparación de probetas para tracción y fatiga:** luego de adquirido el material en barras cilíndricas calibradas de 12,7 mm de diámetro, se procederá a cortarlos en barras de 220 mm de longitud (considerando condiciones de maquinado como el refrentado) para luego ser mecanizadas en un torno convencional marca Gamet-England, modelo CMZ-T-500, ubicado en el laboratorio de procesos metalmecánico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

Para la preparación de las probetas de los ensayos de tracción, se utilizará la norma ASTM A-370, manteniendo un cuidado especial en obtener una superficie libre de rayas transversales que pudiera alterar los resultados de los ensayos, en la figura 3.1 presentada a continuación, se puede observar la forma y dimensiones de dicha probeta.



**Figura 3.1** Dimensiones de la probeta de tracción

Para la elaboración de las probetas para los ensayos de fatiga, se utilizará la norma ASTM E-606 y el manual de instrucciones de la máquina para ensayos de fatiga, así como recomendaciones recibidas de parte de los estudiantes que realizaron ensayos de fatiga con anterioridad. La figura 3.2 muestra la forma de las probetas para los ensayos de fatiga. En la elaboración de las mismas, se dedicó especial cuidado al acabado, sobre todo en el ángulo, nivel de rugosidad y diámetro del cuello del entalle.



**Figura 3.2** Dimensiones de la probeta de fatiga con entalla en V

Después del dimensionamiento de las probetas de tracción y fatiga, se procede a lijar cada probeta en el torno paralelo ya antes mencionado, este se hace con papeles de lijar en serie de número 250, 400, y 600, en seco y en dirección longitudinal o axial al eje de la probeta (realizándose principalmente en la zona de ensayo), con una velocidad de giro de la probeta de 300 rpm, esto produce un lijado diagonal libre de entallas circunferenciales generadas durante el maquinado, que pudieran ser fuente de inicio de grietas durante los ensayos de fatiga.

**3.7.3 Tratamientos térmicos:** una vez realizadas las probetas en las cantidades necesarias según la cantidad de ensayos a ser realizados, se procederá a tratar térmicamente con temple y normalizado al acero AISI 1045 que va a ser ensayado y analizado. Los tratamientos térmicos se realizan en un horno eléctrico marca Termolyne, modelo 48000 Furnace. El tratamiento de temple se realiza calentado las probetas hasta la temperatura de austenización que es 850 °C y enfriándolas rápidamente con aceite a temperatura ambiente; el tratamiento de normalizado se efectúa calentando las probetas a una temperatura de austenización de 850 °C, la cual se determina con el porcentaje de carbono que es 0,48% C, el tiempo de

permanencia en el horno depende del espesor de la probeta, estableciéndose en 2 min/mm de espesor, por lo cual se establece un tiempo de permanencia en el horno de 30 min. aproximadamente, siendo el diámetro de las probetas de  $12,7 \pm 0,3$  mm, posteriormente se saca del horno y se deja enfriar al aire tranquilo. En la figura 3.3 se observa el horno utilizado.

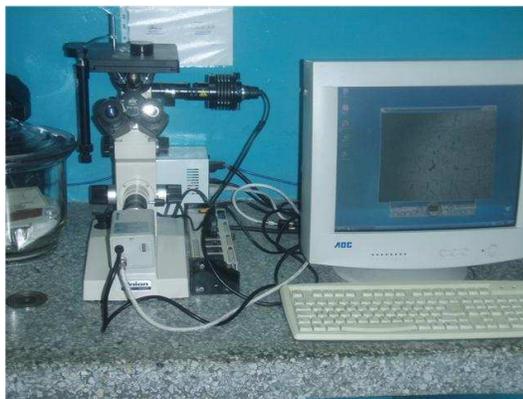


**Figura 3.3** Horno eléctrico

**3.7.4 Análisis microscópico (microscopia óptica):** para este análisis, se preparan tres (3) muestras del acero tanto en su condición original, como en los dos tratamientos térmicos, en total nueve (9) muestras. Con el análisis microscópico y la toma de fotografías, se determinarán las características estructurales, se identificarán las diferentes fases y las posibles imperfecciones. Para este análisis la preparación de la muestra es la siguiente:

Como se trata de un material duro, se debe obtener una sección circular de un tamaño cómodamente manipulable, utilizando un disco cortador abrasivo que gire a alta velocidad manteniendo la muestra fría durante la operación de corte, luego la muestra será esmerilada burdamente sobre una

lija de banda rotatoria, manteniéndola fría, refrigerándola frecuentemente con agua durante esta operación. En todas las operaciones de esmerilado y pulido, la muestra deberá moverse en sentido perpendicular a las rayas existentes. El esmerilado continuará hasta que la superficie quede plana, libre de mellas, rebabas y todas las rayas debido al corte, que no sean visibles. Se continuará el desbaste con papel de lija 180 o 240, pasando sucesivamente a un papel de lija más fino hasta 1600; la última aproximación de una superficie plana libre de ralladuras tipo espejo, se obtendrá mediante el uso de paños giratorios impregnados con un abrasivo en suspensión acuosa (Alúmina). Seguidamente, se someterá la cara pulida de la muestra a la acción de un reactivo químico con el propósito de que queden claramente diferenciadas las partes de la microestructura. El reactivo químico a ser utilizado es Nital al 3% (3% de ácido nítrico diluido en 97% de alcohol etílico). Este estudio se realizará con un microscopio óptico de pletina invertida, marca UNION, modelo MC – 86267, cuyos lentes de aumentos son de 100X, 200X, 400X y 1000X (ver figura 3.4) conectado a un computador Pentium 3, con el cual se realizará la toma de las microfotografías con un software especializado.



**Figura 3.4** Microscopio metalográfico

**3.7.5 Ensayos de tracción:** este se realizará en la máquina para ensayos de tracción marca Galdabini, modelo CTM 20, dicha máquina se encuentra ubicada en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo, controlando todas las variables involucradas mediante un software diseñado para tal fin, el software inclusive construye la gráfica Esfuerzo vs. deformación. Los parámetros que se establecerán para este ensayo son la fuerza de 150.000 N y velocidad de 3 mm/min, dichos parámetros fueron establecidos por referencia de ensayos anteriores. Se determinarán las siguientes propiedades:

- Ductilidad (% RA y %e)
- Esfuerzo máximo o resistencia a la tracción
- Esfuerzo de ruptura
- Esfuerzo de fluencia

Para los ensayos de tracción, se ensayará el acero en sus tres diferentes condiciones (original, recocido y normalizado), se utilizaran tres probetas para cada condición, en total nueve probetas, tomando como valores de tracción, los valores promedio de cada grupo. En la figura 3.5 se presenta la máquina de ensayo a tracción



**Figura 3.5** Máquina de ensayo a tracción

**3.7.6 Ensayos de dureza:** para este ensayo se tomará una muestra del material de las tres (3) diferentes condiciones de estudio, como se trata de un material duro, se debe obtener una sección circular de un tamaño cómodamente manipulable 1 cm. de altura, utilizando un disco cortador abrasivo que gire a alta velocidad manteniendo la muestra fría durante la operación de corte, luego la muestra será esmerilada burdamente sobre una lija de banda rotatoria, manteniéndola fría, refrigerándola frecuentemente con agua durante esta operación y se lijarán ambas caras de manera que las mismas queden paralelas, se debe colocar el penetrador y la carga correspondiente según la escala a utilizar en el ensayo. Se utilizará el probador normal para secciones relativamente gruesas y el penetrador de punta de diamante de  $120^\circ$  con 150 Kg de carga y en la escala Rockwell C. Posteriormente se colocarán las muestras una por una en el durómetro y para determinar la dureza de cada acero en sus tres diferentes condiciones, se tomará el promedio de cinco (5) pruebas para cada condición. Las muestras serán preparadas en forma similar a lo expuesto en el punto de análisis microscópico, excepto de que no se realizará ataque químico. En la figura 3.6 se presenta la Máquina de Ensayo de Dureza.



**Figura 3.6** Máquina de ensayo de dureza

**3.7.7 Ensayos de fatiga:** este se realizará en la máquina para ensayos a fatiga de flexión rotativa, marca Fatigue Dynamics Inc, modelo RBF-200 MT, esta máquina esta diseñada para aplicar cargas totalmente invertidas en voladizo sobre probetas de forma cilíndrica, dicha máquina se encuentra ubicada en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo. Dicha máquina aplica cargas alternantes sobre la probeta y posee un contador de rpm (ciclos) con su respectivo regulador de velocidad la cual puede variar en un rango de 500 a 10.000 rpm (ver figura 3.7)



**Figura 3.7** Máquina de ensayo de fatiga

Los ensayos a fatiga consisten en hacer girar las probetas (a 3000 rpm según referencias de trabajos anteriores), aplicando un momento flector determinado para cada ensayo mediante el dispositivo de carga calibrada que tiene la máquina de viga rotatoria, el momento flector se determina en función del nivel de esfuerzo flector que se requiere aplicar a la probeta en la sección del cuello (concentrador de esfuerzos). El esfuerzo flector para una barra de sección circular, viene dado por:

$$M = \frac{\pi}{32} * S_f * D^3 * 0,112985 \quad (\text{N*m.}) \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde:

$M$  = Momento flector aplicado por el dispositivo de carga a la máquina

$S_f$  = Esfuerzo flector aplicado en la sección del cuello de la probeta

$D$  = Diámetro de dicho cuello

Como se conoce el valor de ( $S_{\text{máx}}$ ) de los ensayos de tracción, se procede a determinar el momento máximo que se podría aplicar a las probetas, utilizando un esfuerzo igual o cercano al esfuerzo máximo de fatiga que puede soportar el material estimado en ( $0,5 \cdot S_{\text{tracción}}$ ) y el diámetro de la zona de entalladura, calculamos dicho momento con la ecuación (3.1), posteriormente el valor obtenido es ensayado en la máquina de fatiga (ver figura 3.7), lo que nos arroja por ensayo y error, el momento máximo que se le puede aplicar a las probetas, fijando el esfuerzo máximo como un nivel y utilizando el método de la escalera el cual es un método estadístico, se realizarán los ensayos con esfuerzos que van disminuyendo en un escalón predeterminado, los valores de los escalones depende del rango de carga que aplica la máquina de fatiga, el cual oscila entre 2,2597 a 22,597 N\*m.. Este procedimiento se repiten hasta ubicar un esfuerzo donde las probetas no rompan en un número de ciclos mayores a  $1 \times 10^6$ , de esta manera se obtienen los diferentes valores de esfuerzos ( $S$ ) y ciclos de vida ( $N$ ) que permiten construir las curvas S-N para el acero en estudio. Se utilizarán 4 niveles de esfuerzo y para cada uno de ellos se realizarán 6 ensayos de fatiga. Los resultados de los ensayos se reportarán en una tabla, con la finalidad de usar esta data para la construcción de la correspondiente curva de Wöhler para cada condición de estudio, presentándose también una gráfica comparativa de las tres curvas reportadas y determinando para cada una de las condiciones la ecuación de Basquin y sus parámetros.

Consideramos importante referir el procedimiento de montaje de las probetas en la máquina de viga rotatoria, el cual se resume a continuación:

- Asegurarse de que la máquina y la bomba estén apagadas.
- Colocar en cero la pesa de la barra con la cual se aplica momento.
- Colocar la mordaza derecha en uno de los extremos de la probeta e introducirla en el husillo que se conectan con la barra de carga la cual aplica el momento y asegurar levemente (no apretar) con la rosca.
- Colocar la segunda rosca y la mordaza izquierda, y enroscar asegurándola levemente.
- Asegurarse que la distancia entre el entalle y ambos extremos (mordazas) sean iguales y apretar las tuercas de tal manera de evitar deslizamiento axial o circular de la probeta
- Deslizar la pesa en la barra calibrada hasta colocarla en el valor del momento deseado, asegurarla con el tornillo prisionero y verificar que la barra no descansa en ningún punto diferente al husillo donde esté instalada la probeta
- Asegurarse que tanto el regulador de velocidad como el contador de rpm estén en cero.
- Encender la bomba y seguidamente la máquina.
- Llevar gradualmente el regulador de velocidad hasta las rpm deseadas y hasta que la maquina se estabilice, esto debe ocurrir en aproximadamente 5 seg., la probeta no debe vibrar, de ser así, con el regulador de velocidad lleve a cero las rpm, verifique la instalación e inicie nuevamente el arranque.

**3.7.8 Determinación de la ecuación de Basquin:** para verificar que el comportamiento a la fatiga de los aceros en estudio cumple con la ley de Basquin, representadas por la ecuación:

$$S_f = C * N^{-k} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Donde:

$S_f$  = Esfuerzo flector aplicado

$N$  = El número de ciclos

$C$  y  $k$  = Son constantes

Se procederá a tabular los valores de Log  $N$  y Log  $S_f$  para linealizar la curva del acero para cada condición; una vez conseguidas las rectas, se calculará la pendiente que representa la constante  $k$  y el corte con el eje  $X$  que representa la constante  $C$ . luego se determinará la ecuación para el acero y para cada una de las condiciones (original, templado y normalizado).

**3.7.9 Estudio de la superficie de fractura:** consiste en evaluar los efectos que se producen en las superficies de fractura de las probetas ensayadas, teniendo en cuenta que se deben seleccionar muestras fracturadas sometidas a altos y bajos esfuerzos. Para detallar la zona de fractura, se aplicará aumentos progresivos en la microscopia electrónica de barrido (MEB) para poder así explorar la zona de origen y propagación de las grietas, además de verificar la existencia de otra causa que acelere la fractura del material, estos estudios se realizarán con un microscopio electrónico de barrido marca Phillips XL30, modelo XL-30-EDX-4 para análisis químico por espectroscopia de Rayos X, se encuentra ubicado en el Centro de Investigaciones Médicas y Biomédicas de la Universidad de Carabobo (CIMBUC).

Para llevar a cabo el estudio fractográfico, primeramente se seleccionarán las probetas a ser estudiadas, tomando como criterio las más representativas (las que fallaron en un número de ciclos mas próximos al promedio en su nivel de esfuerzo respectivo) de las zonas de más alto esfuerzo (ciclos bajos) y de las zonas de más bajo esfuerzo (ciclos altos), se

seleccionarán dos muestras por cada condición de trabajo (original, templado y normalizado), en total 6 muestras. Para colocar las muestras en la base para ser observadas mediante el barrido con el microscopio, las mismas deben ser cortadas aproximadamente a 10 mm de la superficie de fractura, este corte se realizará con una cortadora metalográfica, a fin de asegurarse de observar una superficie libre de excesos de oxido y sucio, luego las muestras deben ser sometidas a un proceso de limpieza, el cual debe realizarse sumergiendo las muestras en un envase de vidrio con acetona y colocarlas en el equipo de limpieza ultrasónica durante unos 15 minutos aproximadamente, esto es con la finalidad de eliminar cualquier agente contaminante que este presente en la muestra, luego de efectuada la limpieza se lavarán las probetas con agua y se secarán con aire caliente, las superficies de fractura deben ser protegidas de la humedad ambiental y el polvo, cubriéndolas bien con algodón o con papel suave completamente seco para evitar la oxidación. En la figura 3.8 se presenta el microscopio electrónico de barrido.



**Figura 3.8** Microscopio electrónico de barrido

# CAPÍTULO 4

## *Resultados y Análisis*

---

---

En el presente capítulo se muestran los resultados de los ensayos de tracción, ensayos de dureza, ensayos de fatiga, determinación de la ecuación de basquin, microscopía óptica de cada acero y microfotografía de la superficie de fractura, además se realiza el respectivo estudio de cada uno de estos aspectos.

### **4.1 Ensayos de tracción**

Al llevar a cabo los ensayos de tracción a las probetas de acero AISI 1045 (en las condiciones estudiadas) en la máquina universal de tracción, se obtuvieron los datos para evaluar las propiedades mecánicas de esfuerzo de fluencia correspondiente a una deformación del 0,2% y ductilidad, las propiedades mecánicas en los puntos máximos y de ruptura; también se lograron obtener las propiedades de esfuerzo y deformación de ingeniería.

En la tabla 4.2 se presentan las dimensiones de las probetas de acero AISI 1045 sin tratamiento térmico (S/TT), con tratamiento térmico de temple (TT/T) y con tratamiento térmico de normalizado (TT/N), antes y después de cada ensayo de tracción.

Es de señalar que el acero AISI 1045 en su condición original sin tratamiento térmico (S/TT), presenta un porcentaje de carbono de 0,48%C. y fue entregado por el fabricante SUMINDU con las siguientes propiedades mecánicas mínimas estimadas. Ver tabla 4.1

**Tabla 4.1** Propiedades mecánicas mínimas estimadas del acero AISI 1045. (SUMINDU, 2008)

Tipo de proceso y acabado	Resistencia a la tracción		Limite de fluencia		Alargamiento en 2" %	Reducción de área %	Dureza brinell
	Mpa	ksi	Mpa	Ksi			
Estirado en frío	630	91	530	77	12	35	179

**Tabla 4.2** Dimensiones de las probetas de tracción de acero AISI 1045

Probetas	Condición de ensayo	Diámetro Inicial $D_i$ (mm)	Diámetro Final $D_f$ (mm)	Área Inicial $A_i$ (mm <sup>2</sup> )	Área Final $A_f$ (mm <sup>2</sup> )	Alargamiento $\Delta l$ (mm)
1O 2O 3O	(S/TT)	8,60 8,60 8,60	6,40 6,60 6,70	58,09 58,09 58,09	32,17 34,21 35,26	3,30 5,70 4,80
1T 2T 3T	(TT/T)	8,60 8,60 8,60	6,60 6,75 6,75	58,09 58,09 58,09	34,21 35,78 35,78	7,05 5,60 4,20
1N 2N 3N	(TT/N)	8,60 8,60 8,60	6,30 6,45 6,45	58,09 58,09 58,09	31,17 32,67 32,67	8,30 9,00 9,10

Los resultados de los ensayos de tracción de las probetas de acero AISI 1045 en las tres (3) condiciones estudiadas y de las tres (3) probetas sometidas al ensayo por cada acero, se presentan en la tabla 4.3 y en la tabla

4.4 se presentan los esfuerzos mecánicos del acero obtenidos de los ensayos de tracción.

**Tabla 4.3.** Resultados de los ensayos de tracción para el acero AISI 1045 en las tres (3) condiciones estudiadas.

Probetas	Condición de ensayo	Fuerza de Fluencia $F_y$ 0,2% (N)	Fuerza Máxima $F_{m\acute{a}x}$ (N)	Fuerza de Ruptura $F_{Rup}$ (N)	% de Alargamiento (%e)	% de Reducción de Área (%RA)
1O 2O 3O	(S/TT)	45.687,00 45.265,00 45.428,00	51.008,00 51.979,00 48.402,00	41.861,00 42.554,00 40.788,00	9,43 16,29 13,71	44,62 41,11 39,30
<b>Promedio</b>		<b>45.460,00</b>	<b>50.463,00</b>	<b>41.734,33</b>	<b>13,14</b>	<b>41,68</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>212,81</b>	<b>1849,73</b>	<b>889,79</b>	<b>3,46</b>	<b>2,70</b>
1T 2T 3T	(TT/T)	56.371,00 58.751,00 59.225,00	56.371,00 58.751,00 59.225,00	49.116,00 49.514,00 51.492,00	20,14 16,00 12,00	41,11 38,41 38,41
<b>Promedio</b>		<b>58.115,67</b>	<b>58.115,67</b>	<b>50.040,67</b>	<b>16,05</b>	<b>39,31</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>1.529,40</b>	<b>1.529,40</b>	<b>1.272,55</b>	<b>4,07</b>	<b>1,56</b>
1N 2N 3N	(TT/N)	25.612,00 26.265,00 24.469,00	40.863,00 41.994,00 42.026,00	34.369,00 36.240,00 35.852,00	23,71 25,71 26,00	46,34 43,76 43,76
<b>Promedio</b>		<b>25.448,67</b>	<b>41.627,67</b>	<b>35.487,00</b>	<b>25,14</b>	<b>44,62</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>909,07</b>	<b>662,41</b>	<b>987,46</b>	<b>1,25</b>	<b>1,49</b>

**Tabla 4.4** Esfuerzos mecánicos del acero AISI 1045 en las tres (3) condiciones estudiadas.

Probetas	Condición de ensayo	Esfuerzo de Fluencia $S_y$ 0,2% (Mpa)	Esfuerzo Máximo $S_{m\acute{a}x}$ (Mpa)	Esfuerzo de Ruptura $S_{rup}$ (Mpa)
1O 2O 3O	(S/TT)	786,49 779,22 782,03	878,09 894,80 833,22	720,62 732,55 702,15
<b>Promedio</b>		<b>782,58</b>	<b>868,70</b>	<b>718,44</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>3,67</b>	<b>31,85</b>	<b>15,32</b>
1T 2T 3T	(TT/T)	970,41 1011,38 1019,54	970,41 1011,38 1019,54	845,52 852,37 886,42
<b>Promedio</b>		<b>1000,44</b>	<b>1000,44</b>	<b>861,43</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>26,33</b>	<b>26,33</b>	<b>21,91</b>
1N 2N 3N	(TT/N)	440,90 452,14 421,23	703,44 722,91 723,46	591,65 623,86 617,18
<b>Promedio</b>		<b>438,09</b>	<b>716,60</b>	<b>610,90</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>15,65</b>	<b>11,40</b>	<b>17,00</b>

Los valores teóricos de las propiedades mecánicas del acero AISI 1045, se presentan en la tabla 4.5; y los valores promedios de las propiedades mecánicas de ductilidad, esfuerzo de fluencia al 0,2% de deformación, esfuerzo máximo y esfuerzo de ruptura del acero estudiado, se presentan en la tabla 4.6; con la cual se pueden comparar dichos valores para las tres (3) condiciones estudiadas.

**Tabla 4.5** Propiedades Mecánicas Teóricas del acero AISI 1045 con un proceso de calentado y maquinado. (SUMITEC, 2008)

Esfuerzo Máximo (Mpa)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Ductilidad	
		% de Alargamiento	% de reducción de área
565	310	16	40

**Tabla 4.6** Cuadro comparativo de las propiedades mecánicas del acero AISI 1045, en las condiciones estudiadas.

Condición de ensayo	$S_y$ 0,2% (Mpa)	$S_{m\acute{a}x}$ (Mpa)	$S_{rup}$ (Mpa)	Ductilidad	
				% e	% RA
(S/TT)	782,58	868,70	718,44	13,14	41,68
(TT/T)	1000,44	1000,44	861,43	16,05	39,31
(TT/N)	438,09	716,60	610,90	25,14	44,62

A continuación se presentan los gráficos Fuerza alargamiento, obtenidos de los ensayos de tracción realizados a las probetas de acero AISI 1045 para cada una de las condiciones estudiadas. De la figura 4.1 a la 4.4 corresponden a cada una de las condiciones estudiadas.

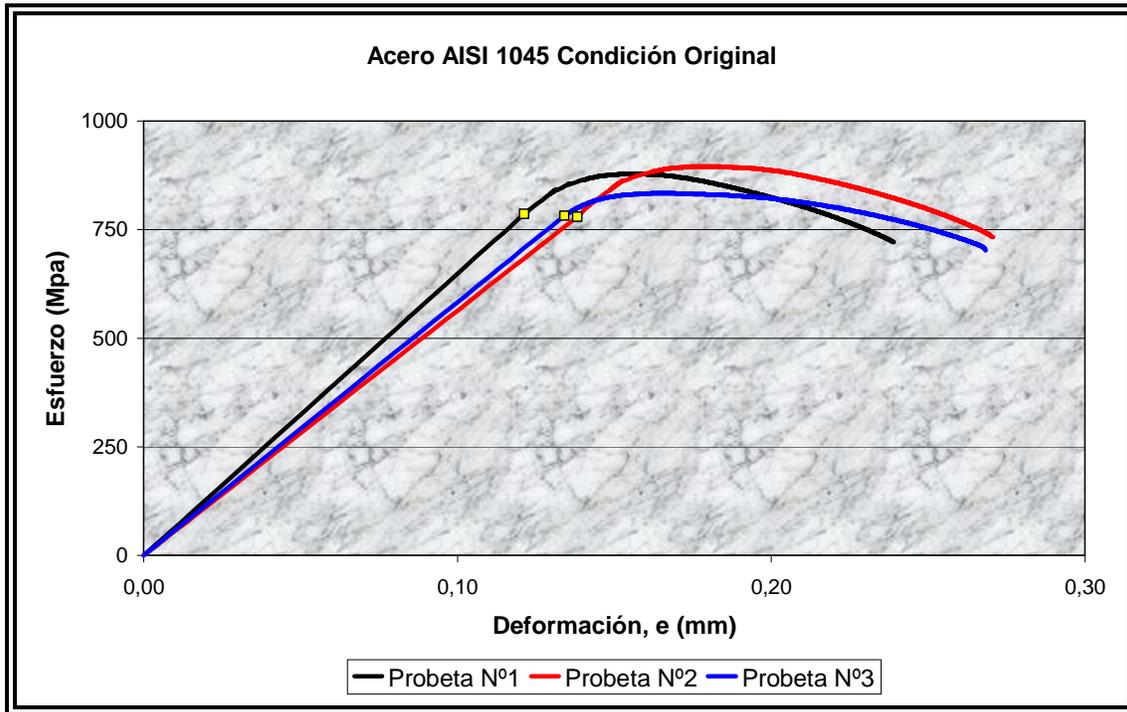


Figura 4.1 Curva Esfuerzo vs. Deformación del acero AISI 1045 en su condición original.

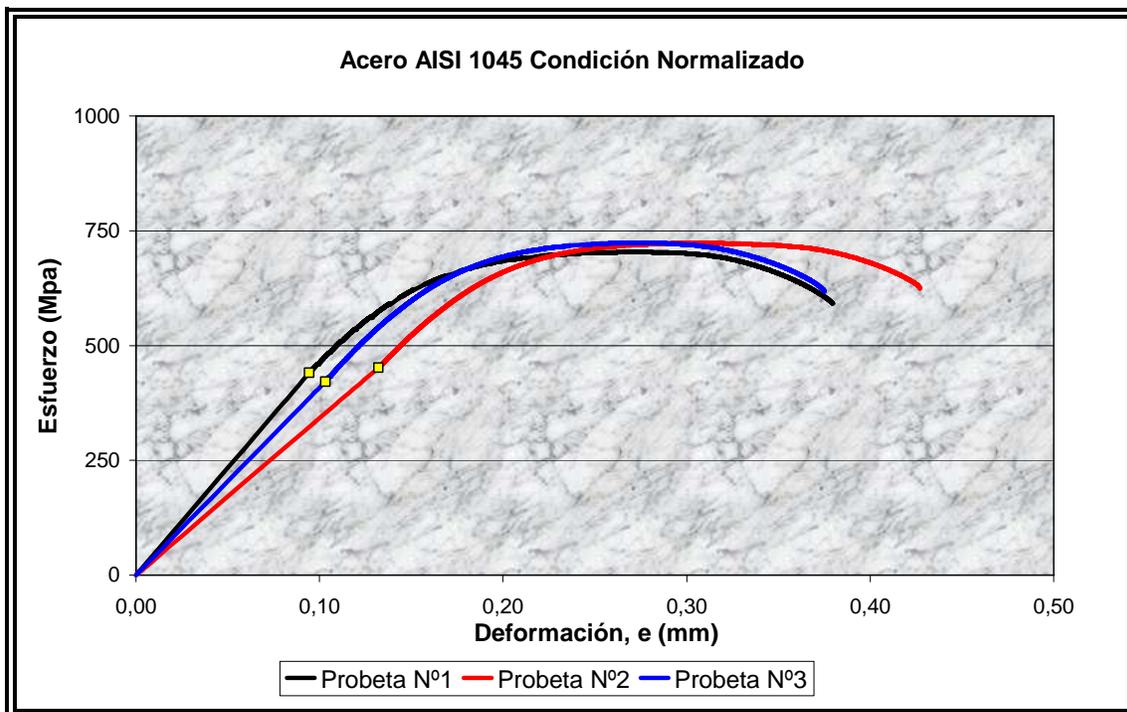


Figura 4.2 Curva Esfuerzo vs. Deformación del acero AISI 1045 en su condición normalizado.

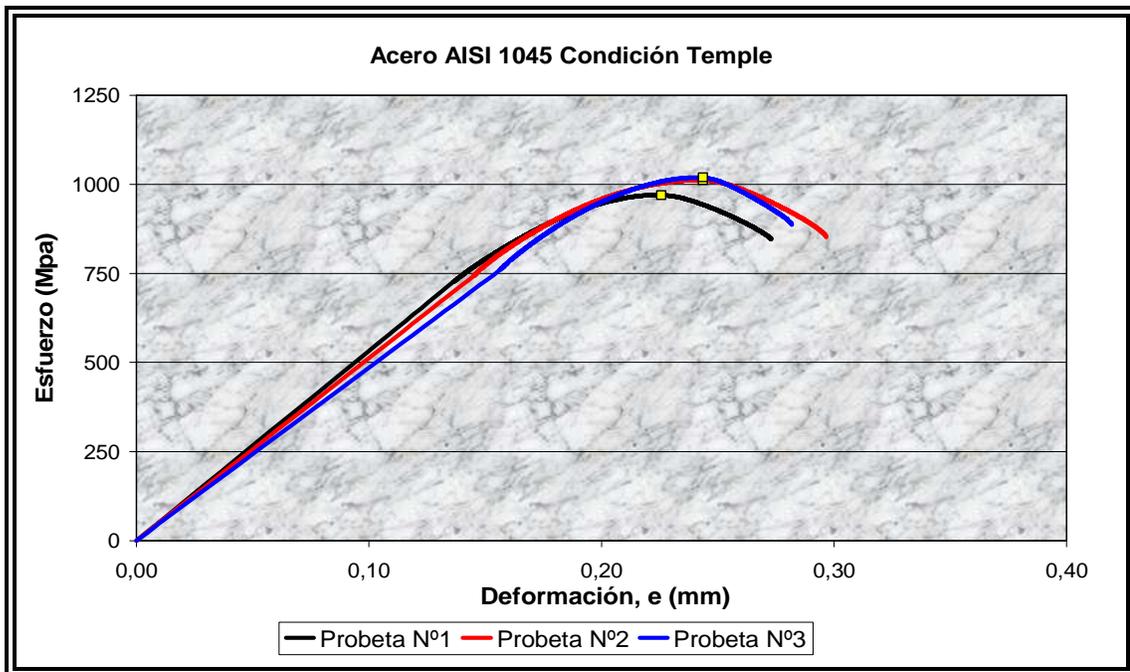


Figura 4.3 Curva Esfuerzo vs. Deformación del acero AISI 1045 en su condición temple.

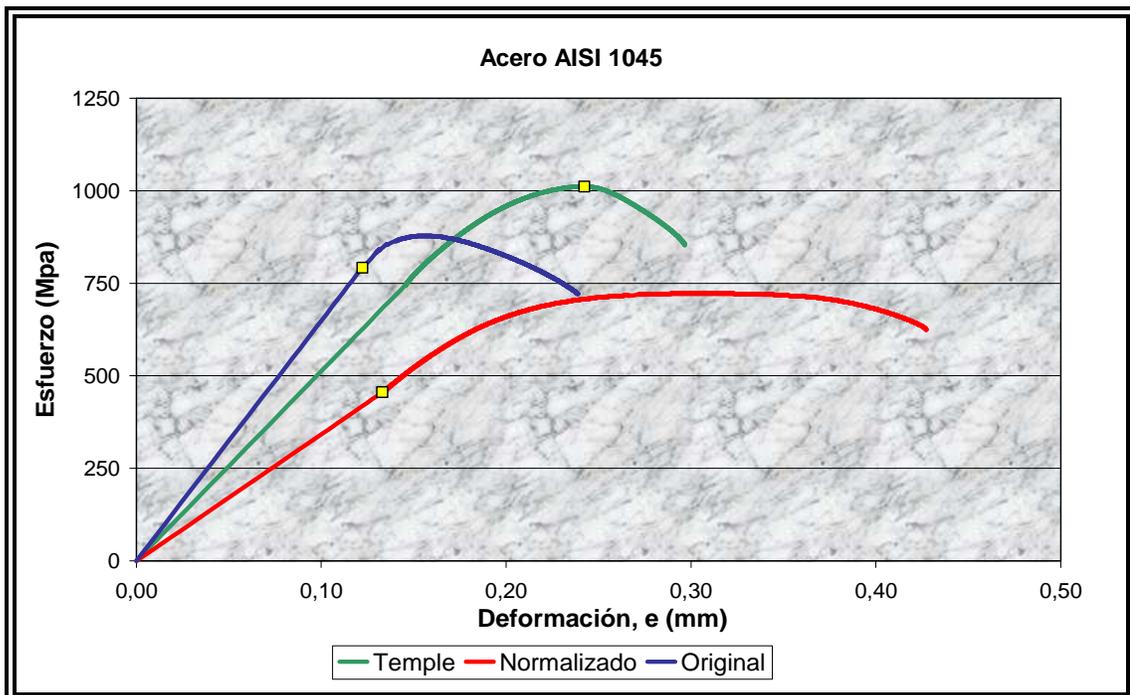


Figura 4.4 Curva comparativa de esfuerzo vs. deformación del acero AISI 1045 en su tres (3) condiciones de estudio.

Al realizar los ensayos de tracción del acero AISI 1045 en su condición original sin tratamiento térmico y al comparar los resultados obtenidos con los datos suministrados por el fabricante SUMINDU, se puede observar que las propiedades del acero como el límite de fluencia, resistencia a la tracción y el porcentaje de reducción de área son en un 38%, 48% y 4% respectivamente mayor que las aportadas por el fabricante, cumpliendo el acero con las propiedades mecánicas mínimas que debe poseer estimada por la AISI. Realizando la comparación de la resistencia a la tracción del acero AISI 1045 para cada condición de estudio, se tiene que:

La mayor resistencia a la tracción la presentan las probetas con tratamiento térmico de temple en aceite, cuyo porcentaje de aumento fue de un 15% respecto a las probetas en su condición original, fenómeno que ocurre debido a que el acero es más duro por el tratamiento térmico y ofrece mayor resistencia, lo que aplica también para el esfuerzo de ruptura; el cual es mucho mayor que en las probetas con tratamiento térmico de normalizado en un 20% y en su condición original en un 42% aproximadamente, como consecuencia de que el acero sea más duro, el esfuerzo de fluencia es el mismo esfuerzo máximo, por la aplicación del tratamiento térmico que lo fragiliza.

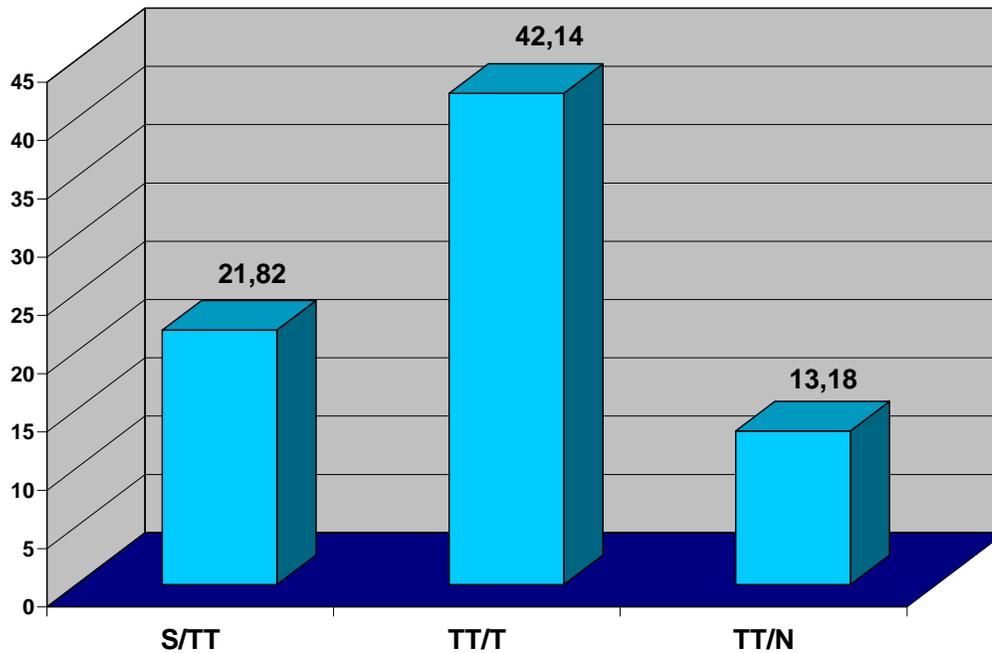
La menor resistencia a la tracción se reporta en las probetas con tratamiento térmico de normalizado, cuyo porcentaje de disminución fue de un 18% respecto a las probetas en su condición original, producto del tratamiento, el cual hizo que el material sea más dúctil y su esfuerzo de ruptura sea el menor de todas las condiciones estudiadas, en relación al esfuerzo de fluencia, hay una disminución en un 79% respecto a las probetas en su condición original, lo que indica que aumentó la capacidad del material para deformarse plásticamente antes de fracturarse.

## 4.2 Ensayos de dureza

A las probetas de acero AISI 1045 se les realizaron ensayos de dureza Rockwell, en la escala Rockwell C, utilizando un penetrador de diamante con una carga de 150 Kg. Se utilizaron tres muestras, una por cada condición de estudio y a cada una de ellas se les realizaron cinco penetraciones. Los resultados de dichos ensayos se presentan en la tabla 4.7 y en la figura 4.5 Se muestra una comparación de la dureza del acero para las condiciones estudiadas.

**Tabla 4.7** Ensayos de dureza del acero AISI 1045, para las tres (3) condiciones de estudio.

Condición de ensayo	Dureza Rockwell C						
	1	2	3	4	5	Prom.	Desviación estándar
(S/TT)	21,10	21,10	22,10	22,40	22,40	21,82	0,67
(TT/T)	41,50	42,70	41,90	42,90	41,70	42,14	0,62
(TT/N)	12,90	13,00	13,40	13,80	12,80	13,18	0,41



**Figura 4.5** Dureza promedio de las condiciones del acero AISI 1045, en la escala Rockwell C

La aplicación de los tratamientos térmicos influye significativamente en la resistencia a la tracción del material, así como también en su dureza, cuando se le aplica el tratamiento térmico de temple, la dureza aumenta debido a la martensita en cinta, la cual es formada por la transformación de la austenita en una estructura cristalina BCC (cúbico centrada en el cuerpo), la cual se distorsiona hacia la tetragonalidad, dicha distorsión contribuye al aumento de la dureza. El tratamiento térmico de normalizado crea un alivio de tensiones y una homogenización de la microestructura, sin embargo se presume que hubo un crecimiento del grano elevado, debido a la falta de níquel en el material, haciendo que la dureza disminuya al igual que la resistencia a la tracción.

La dureza influye en la resistencia a la tracción del material; observándose que en las probetas que presentaron mayor resistencia a la

tracción, son las que presentaron mayor dureza, siendo estas las que presentaban un tratamiento térmico de temple, cuyo porcentaje de aumento fue de un 93% respecto a las probetas en su condición original sin tratamiento térmico y las probetas que presentaron menor resistencia a la tracción, son las que presentaron menor dureza siendo estas las que presentaban un tratamiento térmico de normalizado, con un porcentaje de disminución de 40%.

### 4.3 Ensayos de fatiga

Se obtuvieron los valores de resistencia a la fatiga ( $S_f$ ) para el acero AISI 1045 en su condición original y tratado térmicamente. Los ensayos de fatiga se realizaron con una velocidad de giro de 3000 rpm. Para la construcción de cada curva de fatiga se ensayaron en promedio un total de veinticuatro (24) probetas por cada condición, ensayándose un promedio de seis (6) probetas por cada nivel de esfuerzo. En la tabla 4.8 se representan las conversiones entre los momentos de flexión rotativa aplicados y los valores de esfuerzo de resistencia a la fatiga, dichos valores dependen de la geometría de las probetas y del rango de trabajo de la máquina de fatiga, el cual oscila entre (20 y 200 lbf\*pulg.) lo que equivale en el sistema internacional a (2,2597 a 22,597 N\*m).

En las tablas 4.9; 4.10 y 4.11 se muestran el número de probetas ensayadas a fatiga para cada acero, en condición original y tratados térmicamente, el valor de carga aplicada, el correspondiente valor de esfuerzo a dicha carga, y el número de ciclos obtenidos para dichos valores de esfuerzo. Se definieron niveles de esfuerzos en: Altos (360 Mpa), medios (270, 180 Mpa) y bajos (90 Mpa)

**Tabla 4.8** Conversiones entre los momentos de flexión rotativa y los valores de esfuerzo de resistencia a la fatiga aplicados en los ensayos.

<b>Momento Flector (Lbf*pulg.)</b>	<b>Momento Flector (N*m)</b>	<b>Esfuerzo de Resistencia a la Fatiga (Mpa)</b>
200	22,59	899
190	21,47	854
180	20,34	809
170	19,21	764
160	18,08	719
150	16,95	674
140	15,82	629
130	14,69	584
120	13,56	539
110	12,43	494
100	11,29	449
90	10,17	405
80	9,03	360
70	7,91	315
60	6,78	270
50	5,65	225
40	4,52	180
30	3,39	135
20	2,26	90

**Tabla 4.9** Resultados de los ensayos de fatiga para el acero AISI 1045 condición original

Nº Probetas	Carga Aplicada $M_t$ (Lbf*pulg.)	Esfuerzo de Resistencia a la Fatiga $S_f$ (Mpa)	Número de ciclos	Promedio	Desviación Estándar
1	80	360	11.300	12.700	1.173
2	80	360	14.100		
3	80	360	13.100		
4	80	360	11.700		
5	80	360	12.100		
6	80	360	13.900		
7	60	270	59.500	52.833	3.867
8	60	270	48.100		
9	60	270	53.000		
10	60	270	51.700		
11	60	270	54.100		
12	60	270	50.600		
13	40	180	337.600	496.117	150.134
14	40	180	373.800		
15	40	180	580.600		
16	40	180	298.000		
17	40	180	680.900		
18	40	180	421.800		
19	20	90	>1.200.000	No Rompió	—
20	20	90	>1.200.000		
21	20	90	>1.200.000		
22	20	90	>1.200.000		
23	20	90	>1.200.000		
24	20	90	>1.200.000		

**Tabla 4.10** Resultados de los ensayos de fatiga para el acero AISI 1045 condición de Normalizado.

Nº Probetas	Carga Aplicada $M_t$ (Lbf*pulg.)	Esfuerzo de Resistencia a la Fatiga $S_f$ (Mpa)	Número de ciclos	Promedio	Desviación Estándar
1	80	360	27.800	31.267	3.577
2	80	360	33.600		
3	80	360	36.500		
4	80	360	32.900		
5	80	360	28.500		
6	80	360	28.300		
7	60	270	74.500	74.117	4.512
8	60	270	79.800		
9	60	270	70.200		
10	60	270	71.500		
11	60	270	79.200		
12	60	270	69.500		
13	40	180	418.600	590.983	196.878
14	40	180	473.300		
15	40	180	464.000		
16	40	180	883.400		
17	40	180	510.400		
18	40	180	796.200		
19	20	90	>1.400.000	No Rompió	—
20	20	90	>1.400.000		
21	20	90	>1.400.000		
22	20	90	>1.400.000		
23	20	90	>1.400.000		
24	20	90	>1.400.000		

**Tabla 4.11** Resultados de los ensayos de fatiga para el acero AISI 1045 condición de Temple.

Nº Probetas	Carga Aplicada $M_t$ (Lbf*pulg.)	Esfuerzo de Resistencia a la Fatiga $S_f$ (Mpa)	Número de ciclos	Promedio	Desviación Estándar
1	80	360	6.200	7.417	1.109
2	80	360	8.600		
3	80	360	8.800		
4	80	360	6.300		
5	80	360	7.100		
6	80	360	7.500		
7	60	270	26.300	27.700	2.783
8	60	270	28.700		
9	60	270	25.100		
10	60	270	31.700		
11	60	270	29.700		
12	60	270	24.700		
13	40	180	204.000	238.900	48.601
14	40	180	232.000		
15	40	180	183.300		
16	40	180	201.400		
17	40	180	263.900		
18	40	180	313.900		
19	20	90	>1.000.000	No Rompió	—
20	20	90	>1.000.000		
21	20	90	>1.000.000		
22	20	90	>1.000.000		
23	20	90	>1.000.000		
24	20	90	>1.000.000		

A continuación se representan gráficamente las curvas S-N (Esfuerzo en función del número de ciclos) que resultaron de los ensayos del acero en estudio:

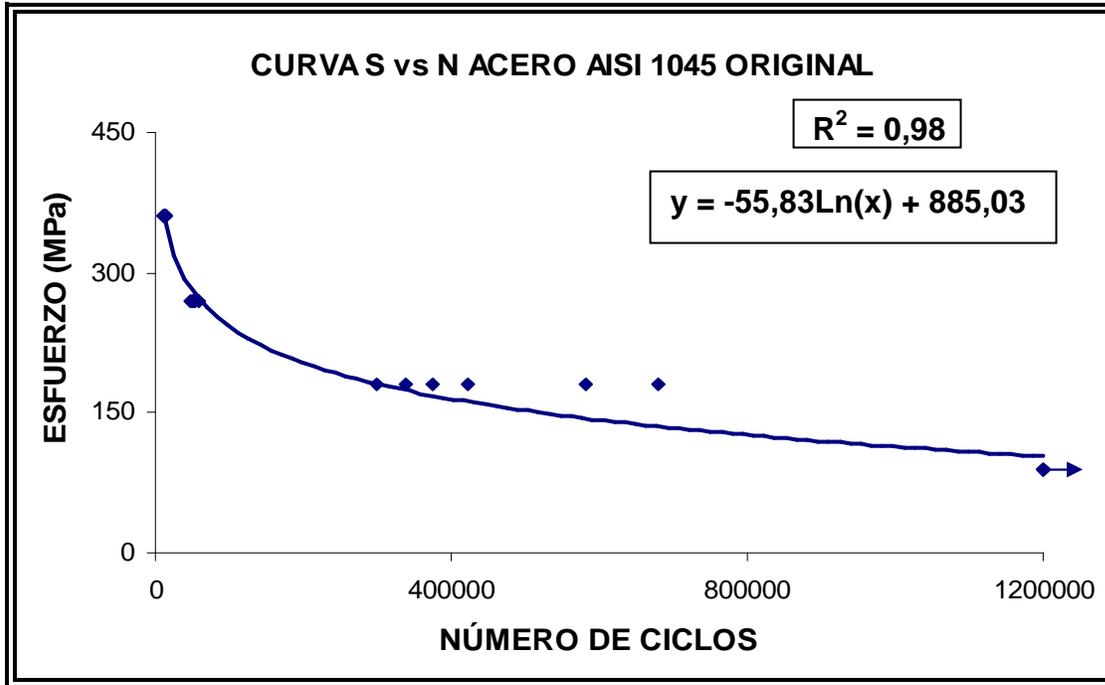


Figura 4.6 Curva S-N del acero AISI 1045, condición original.

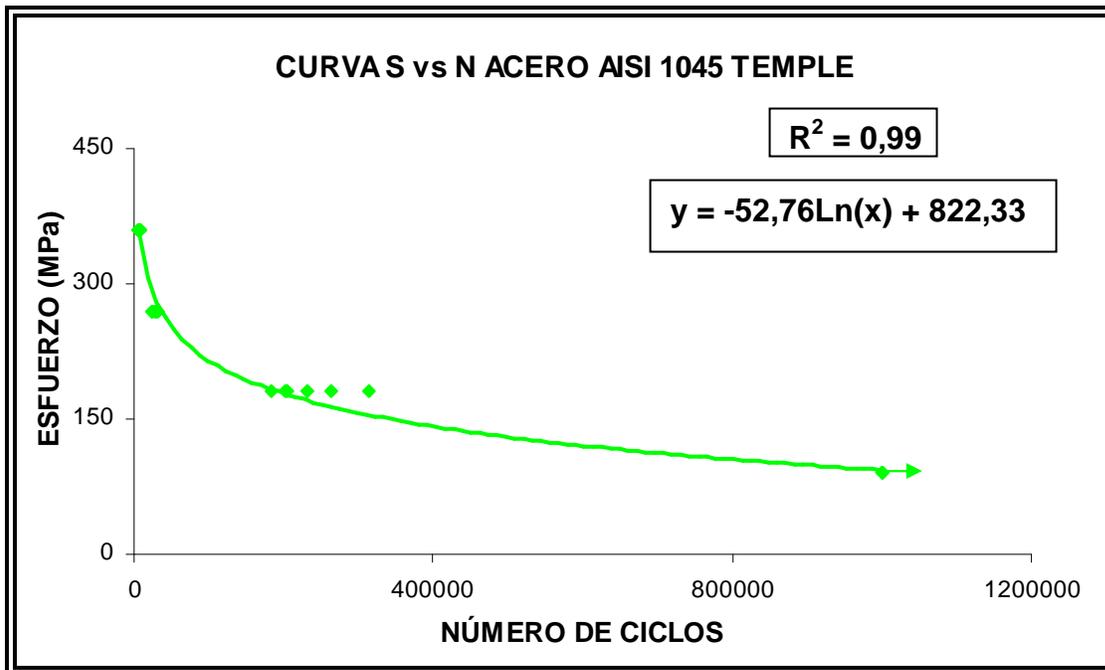


Figura 4.7 Curva S-N del acero AISI 1045, condición Temple.

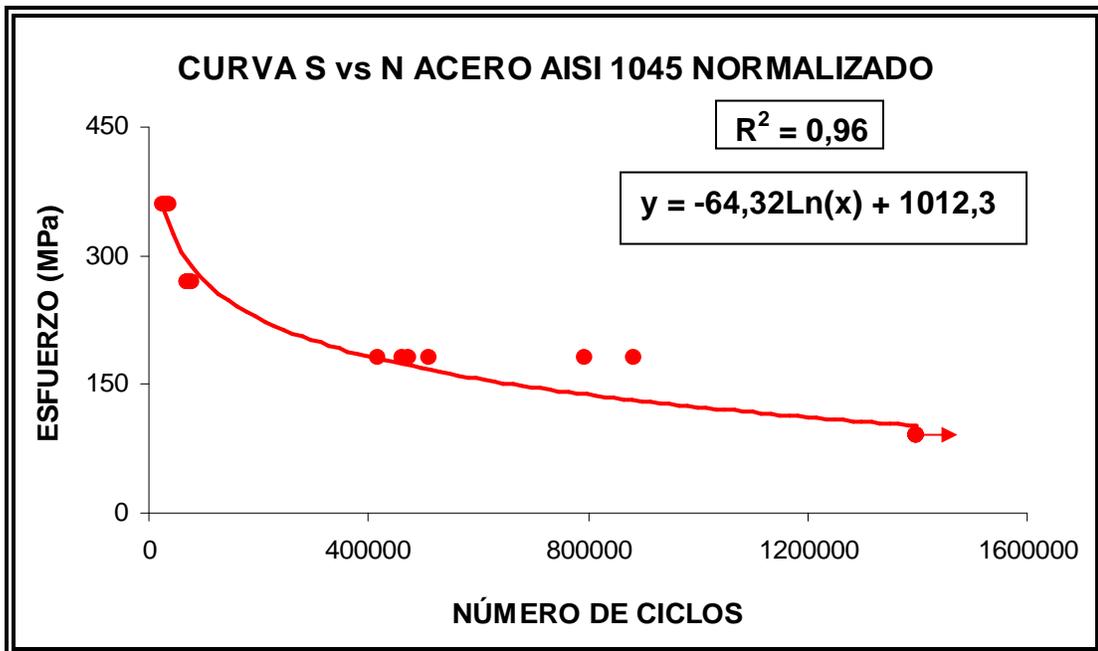


Figura 4.8 Curva S-N del acero AISI 1045, condición Normalizado.

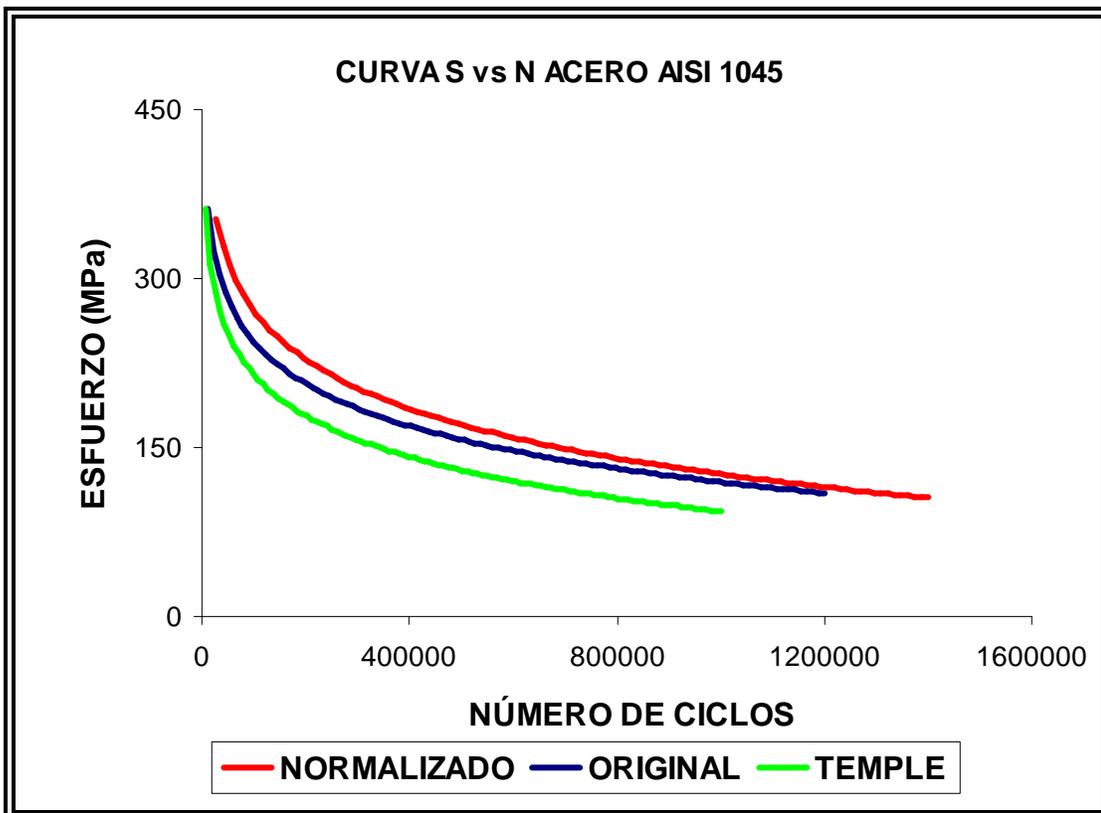


Figura 4.9 Curvas S-N del acero AISI 1045

Las probetas que presentaron mayor resistencia a la fatiga fueron a las que se les aplicó tratamiento térmico de normalizado, contrario a la resistencia a la tracción y a la dureza que disminuyeron con el normalizado, fenómeno que ocurre debido a que el material es más dúctil y puede soportar más esfuerzos alternantes que la condición original del acero. En la gráfica 4.9, observamos que la curva de Wöhler para dicho tratamiento esta por encima de la curva de la condición de temple y de la curva de la condición original del material; observándose además que las que tienen tratamiento térmico de temple presentaron la menor resistencia a la fatiga; relación inversa que tiene con los resultados obtenidos en cuanto a tracción y dureza, debido a que éstas dos últimas propiedades aumentaron al estar presente la martensita, sin embargo la ductilidad del material disminuyó lo que impidió que el acero pueda soportar una mayor cantidad de esfuerzos alternantes.

Un rasgo característico del comportamiento a la fatiga, es la dispersión en los resultados de los ensayos, podría decirse que es una propiedad del fenómeno físico, lo cual obliga a realizar un gran número de ensayos de probetas a fin de determinar la banda de fractura con suficiente precisión. Partiendo de esto, se procede a analizar los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga para las tres (3) condiciones de estudio, los cuales arrojaron mayor dispersión para los niveles de esfuerzos más bajos (90 Mpa), es decir, cuando se disminuían los esfuerzos el tiempo para que se produjera la fractura aumentaba y se hacia impredecible determinar el tiempo de fractura, lo que aumentaba la dispersión. Se adjudica que la fuente principal de esta dispersión son las inhomogeneidades del acero, recordemos que la fractura de los materiales depende de una distribución aleatoria de imperfecciones o puntos débiles, así como también se le puede atribuir la sensibilidad de la fatiga al número de ensayos y parámetros del material imposibles de controlar en forma precisa.

De la ecuación 4.1, igualando el número de ciclos a  $10^6$  (límite empleado para vida finita) se obtiene el límite de la resistencia a la fatiga. Los valores que se encontraron para el acero AISI 1045 en su condición original son de 114,26 Mpa (Aprox.), para el normalizado 119,37 Mpa (Aprox.) y para el temple 102,14 Mpa (Aprox.). Esto representa un incremento del 4,3% de la resistencia límite a la fatiga del acero AISI 1045 normalizado respecto a su condición original, mientras que con el temple, dicha resistencia disminuye en un 10,5%.

Con la obtención de la curva de Wöhler, se obtuvieron los parámetros de la ecuación de Basquin con el propósito de ser utilizada para determinar la vida a la fatiga del acero para cada condición en estudio, a continuación se muestran tabuladas las ecuaciones y los factores constantes para cada condición, así como la aproximación de los diferentes valores obtenidos utilizando el método estadístico del factor de confiabilidad  $R^2$ .

De la ecuación

$$S_f = C \times N^{-k} \quad \text{Ec. 4.1}$$

C: Coeficiente de resistencia a la fatiga

N: Número de ciclos

k: Exponente de la resistencia a la fatiga

Al multiplicar por Log en ambos lados se obtiene:

$$\text{Lg}S_f = -K\text{Lg}N + \text{Lg}C$$

Que comparada con la ecuación punto pendiente de la recta

$$Y = mX + b$$

Tenemos:

$$\text{Lg}S_f = Y, \quad m = -K, \quad \text{Lg}N = X, \quad \text{Lg}C = b$$

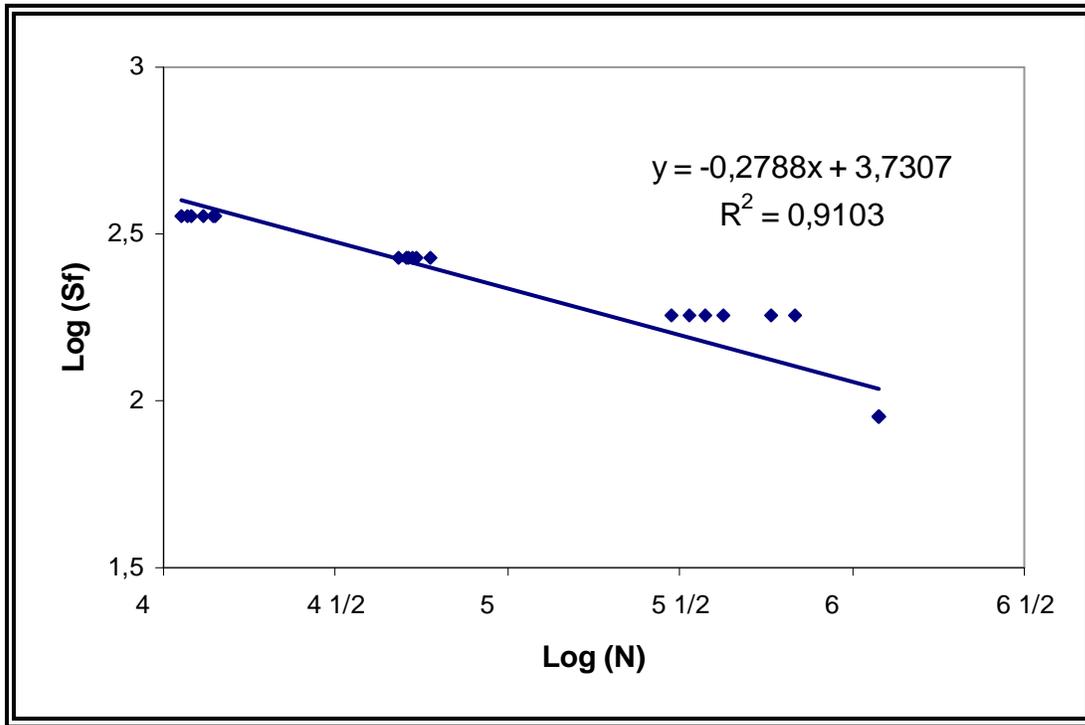


Figura 4.10 Curva S-N linealizada del acero AISI 1045, condición original

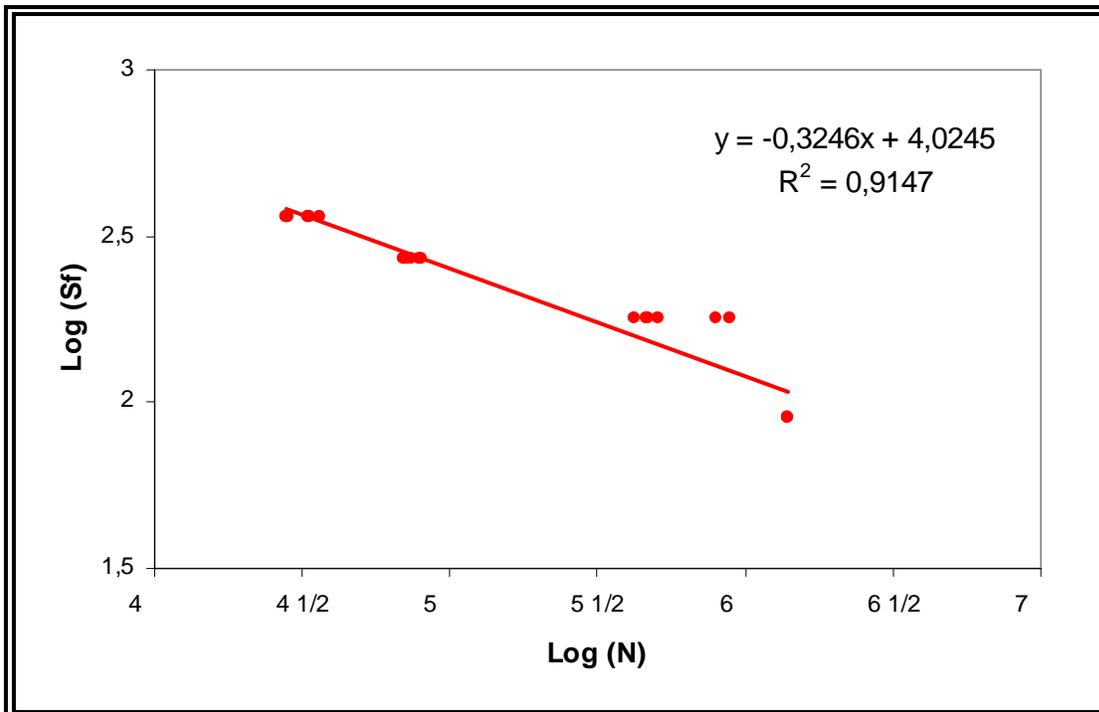


Figura 4.11 Curva S-N linealizada del acero AISI 1045, condición normalizado

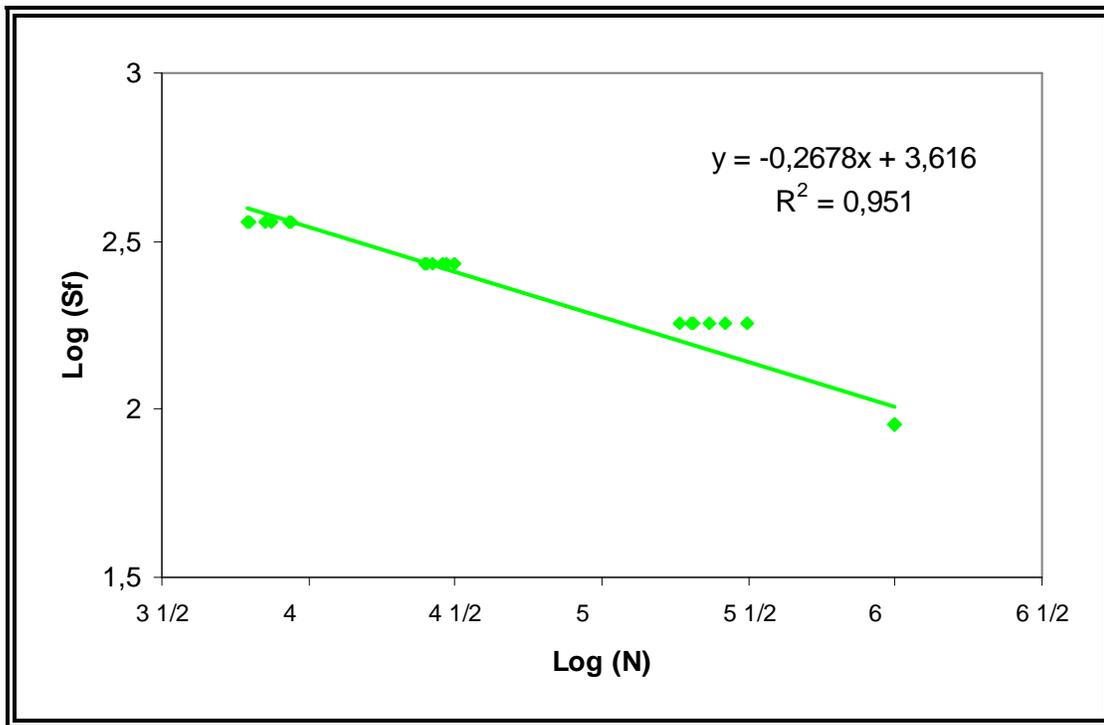


Figura 4.12 Curva S-N linealizada del acero AISI 1045, condición temple.

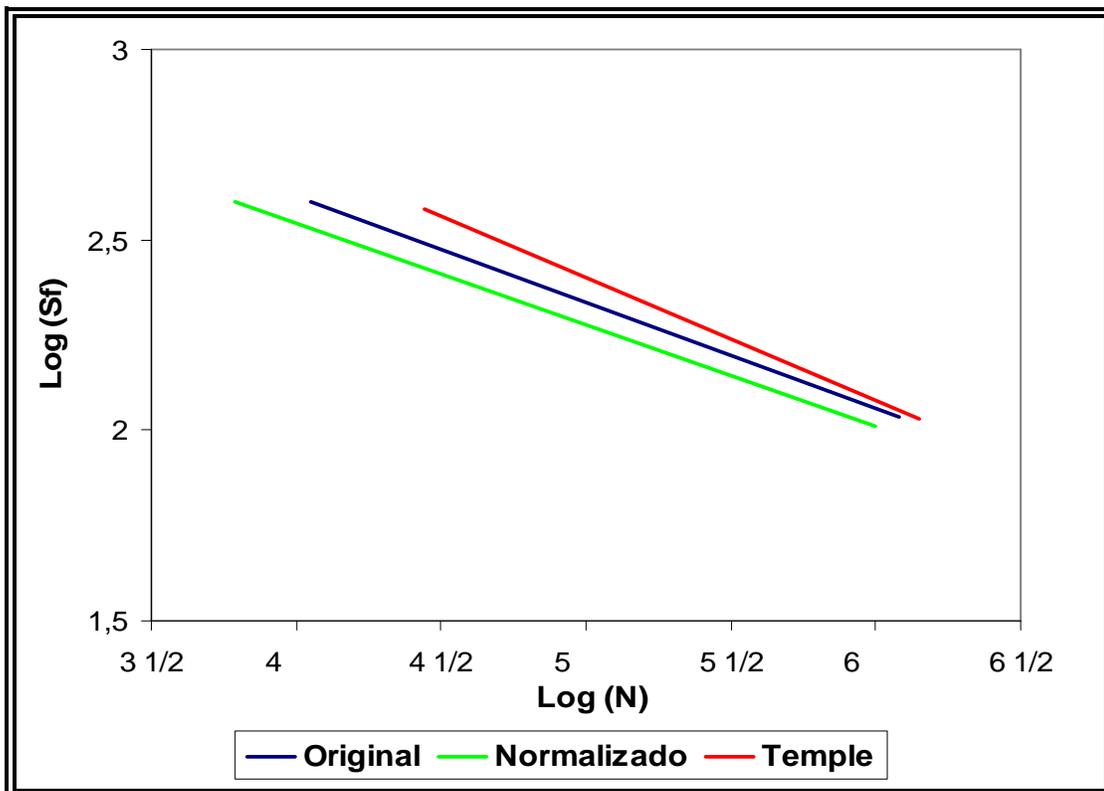


Figura 4.13 Curvas S-N linealizada del acero AISI 1045

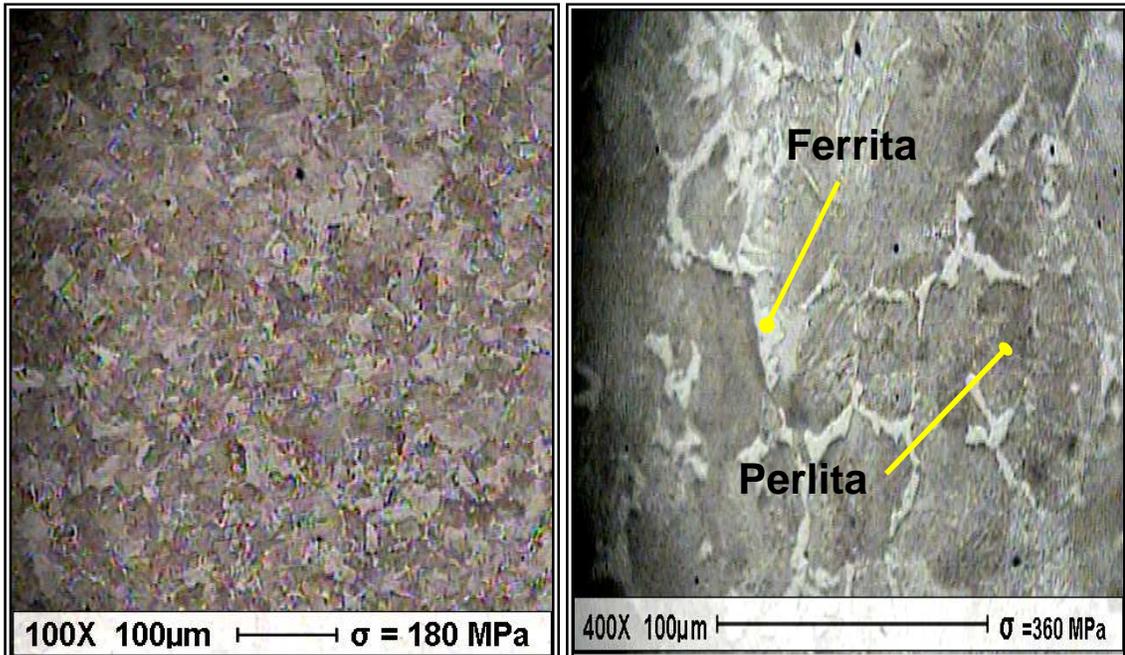
**Tabla 4.12** Ecuación y Parámetros de la ecuación de Basquin para el acero AISI 1045 para las condiciones estudiadas

Condición del Acero AISI 1045	Ec. De Basquin	Parámetros de la Ec. De Basquin			
		b	C = 10 <sup>b</sup>	K	R <sup>2</sup>
<b>Original</b>	$Y = -0,2788X + 3,7307$	3,73	5.378,98	-0,28	0,91
<b>Normalizado</b>	$Y = -0,3246X + 4,0245$	4,02	10.580,35	-0,32	0,91
<b>Temple</b>	$Y = -0,2678X + 3,616$	3,62	4.130,47	-0,27	0,95

#### 4.4 Metalografía.

El examen microscópico de las probetas de acero AISI 1045, en las tres condiciones estudiadas se realizó observando al microscopio muestras del acero para las condiciones de estudio tomando las microfotografías correspondientes a aumentos de 100X, 200X, 400X y 1000X; en las cuales se observa el tipo de microestructura presente en cada condición.

A las muestras de acero AISI 1045, se les preparo metalográficamente y luego se observaron dichas muestras al microscopio. A continuación se presenta la microestructura de las muestras de acero AISI 1045 en su condición original y tratado térmicamente:

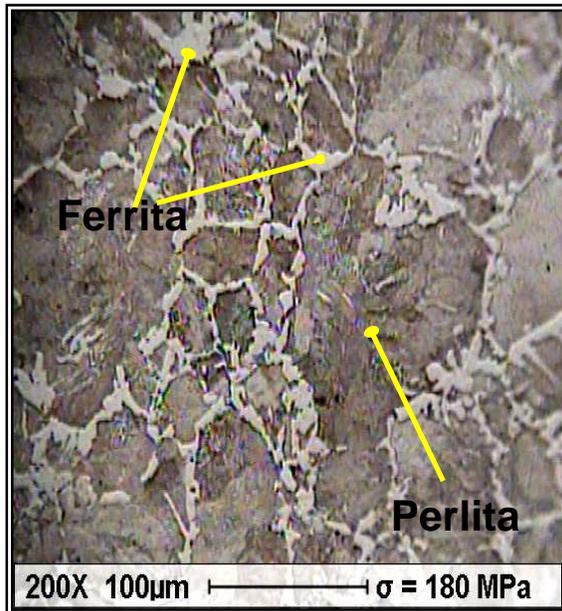


**Figura 4.14** Microestructura del Acero AISI 1045, Condición original 100X. (N = 421.800)

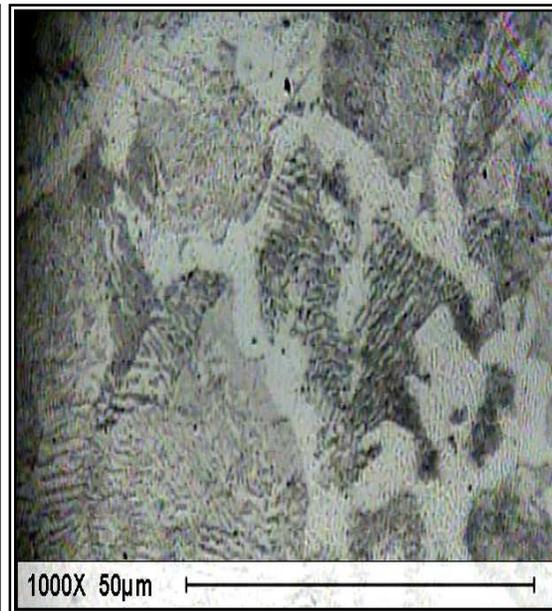
**Figura 4.15** Microestructura del Acero AISI 1045, condición original 400X (N = 13.100)

En las figuras 4.14 y 4.15, se observa la microestructura del acero AISI 1045 en su condición original, a diferentes niveles de aumento, la cual presenta zonas claras que corresponde a la ferrita y zonas oscuras que corresponde a la perlita donde además se observan puntos negros que corresponden a poros en el material, causados por el proceso defectuoso de fabricación por el cual pasaron los aceros.

En las figuras 4.16 y 4.17, se observa la microestructura del acero AISI 1045 en su condición normalizado. El efecto del normalizado produjo una estructura perlítica más fina y un incremento de un 45% aproximadamente de la ferrita más que en la estructura previa al tratamiento, lo que coincide con los resultados obtenidos de resistencia a la tracción, dureza y resistencia a la fatiga, debido a que el material es mas dúctil por el aumento de la ferrita.



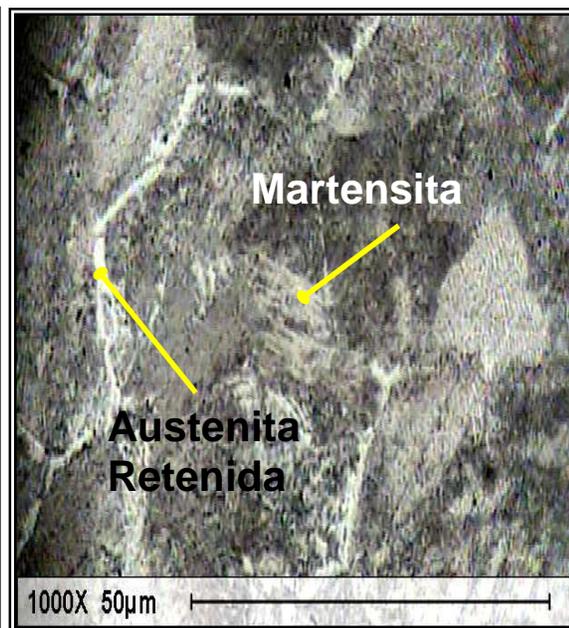
**Figura 4.16** Microestructura del Acero AISI 1045, Condición Normalizado 200X (N = 510.400)



**Figura 4.17** Microestructura del Acero AISI 1045, condición Normalizado 1.000X ( $\sigma = 180$  Mpa, N = 510.400)



**Figura 4.18** Microestructura del Acero AISI 1045, Condición Temple 400X (N = 28.700)

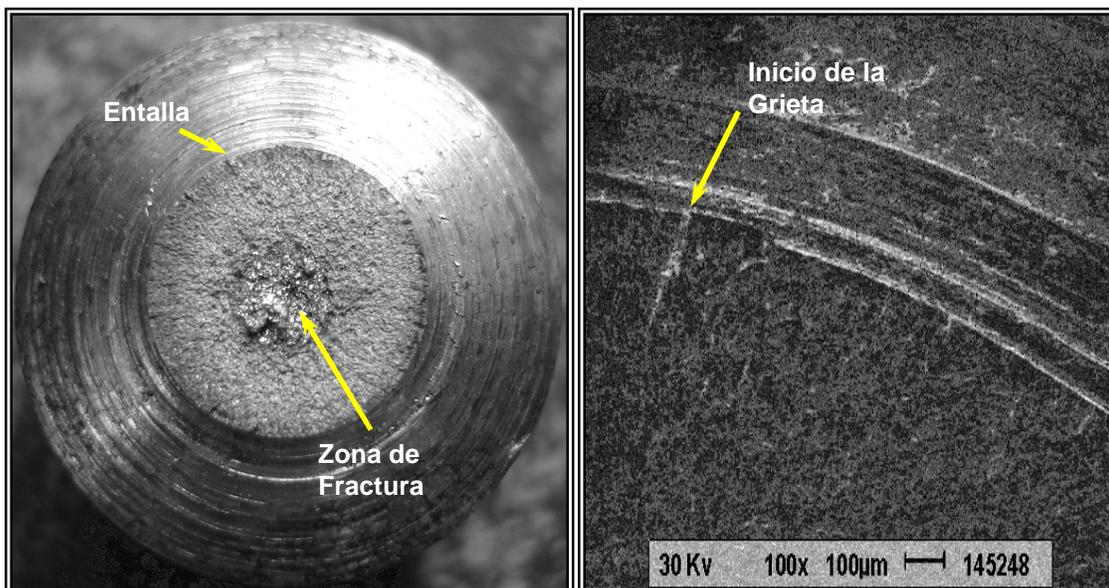


**Figura 4.19** Microestructura del Acero AISI 1045, condición Temple 1.000X ( $\sigma = 360$  Mpa, N = 8.600)

En las figuras 4.18 y 4.19, se observa la microestructura del acero AISI 1045 en su condición de temple en aceite, como el acero contiene menos de aproximadamente un 0,6%C, la martensita que se forma presenta dominios de cintas y agujas en orientaciones diferentes aunque limitadas, la estructura en el interior de las cintas esta altamente distorsionada y presenta altas densidades de dislocaciones confusas rodeadas por austenita sin transformar. Lo que indica que el acero aumenta su dureza al aplicarle el tratamiento térmico de temple en aceite.

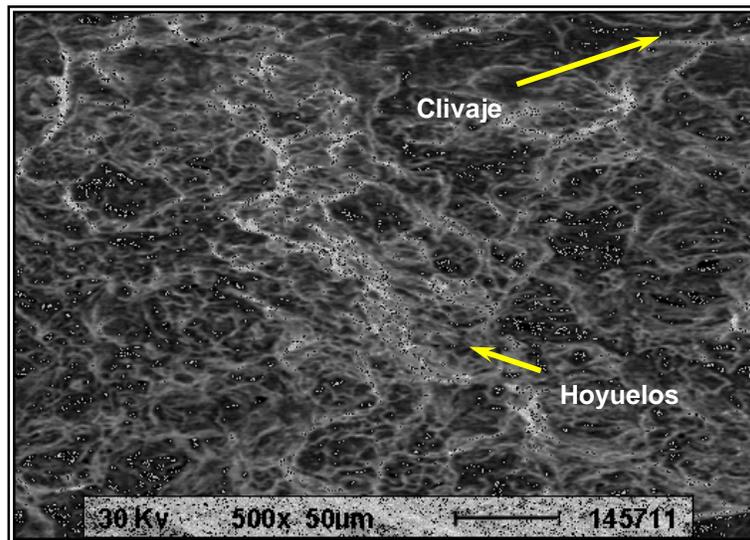
## 4.5 Fractografía

Con el fin de evaluar las superficies de fractura generadas en las diferentes muestras ensayadas a fatiga utilizando el microscopio electrónico de barrido, a continuación se presentan las microfotografías tomadas para su análisis:

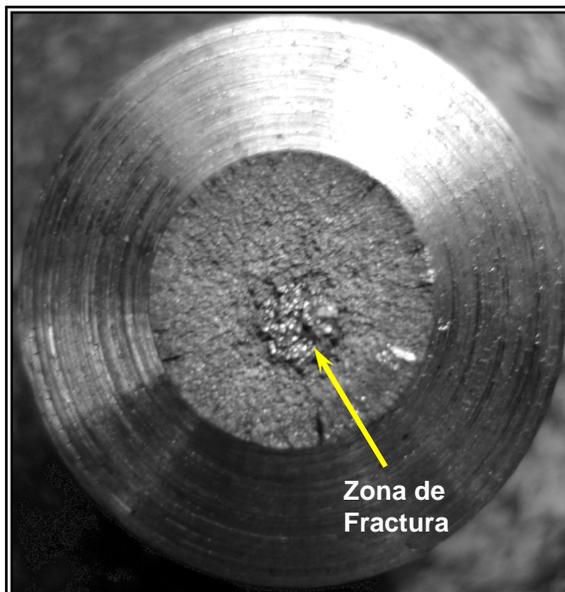


**Figura 4.20** Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Original ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 13.100$ )

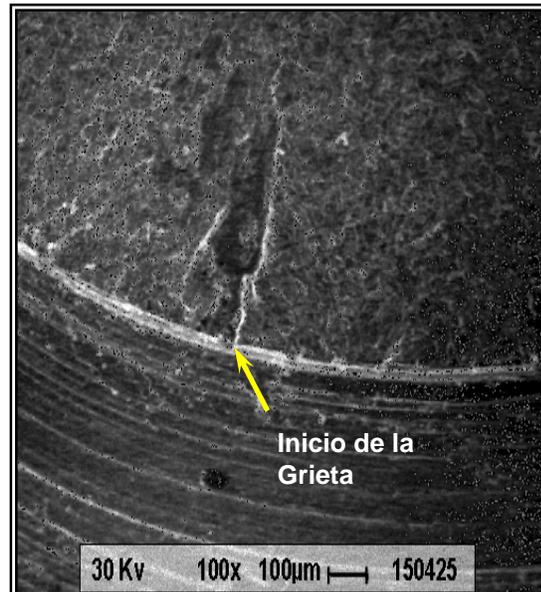
**Figura 4.21** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 100X ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 13.100$ )



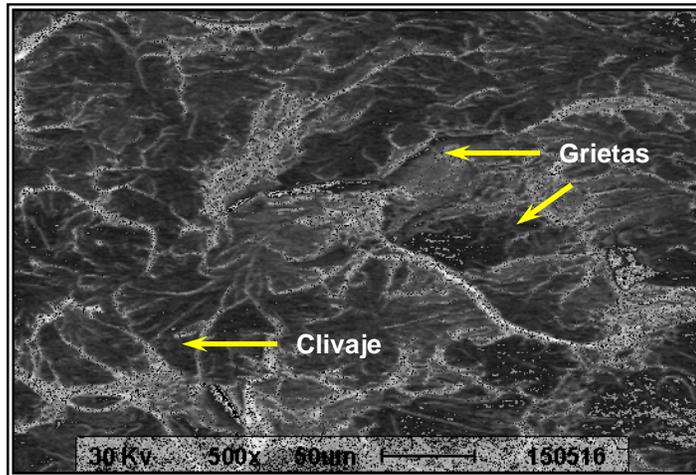
**Figura 4.22** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 500X ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 13.100$ )



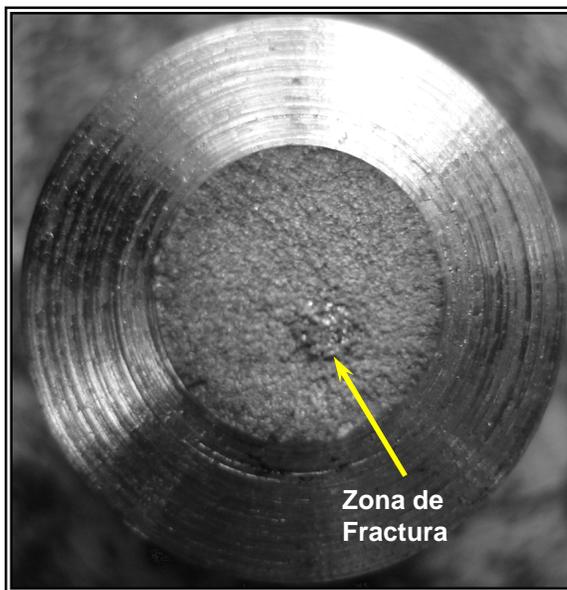
**Figura 4.23** Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Original ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 53.000$ )



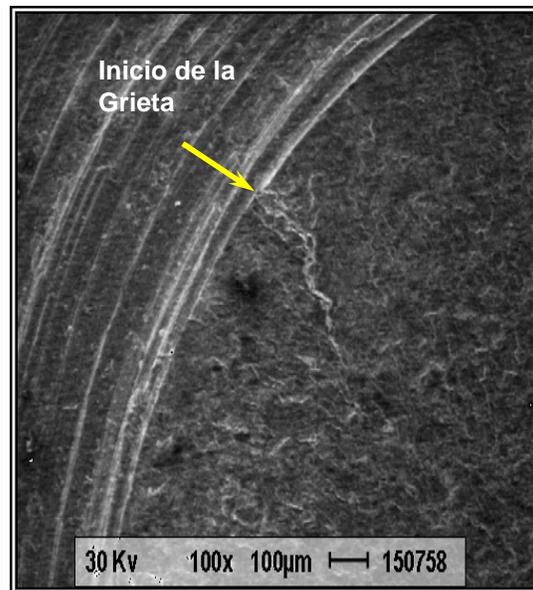
**Figura 4.24** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 100X ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 53.000$ )



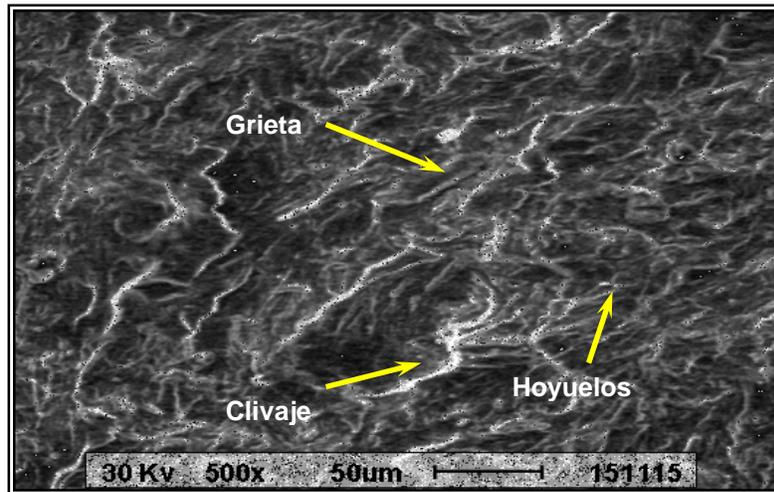
**Figura 4.25** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 500X ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 53.000$ )



**Figura 4.26** Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Original ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 421.800$ )



**Figura 4.27** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 100X ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 421.800$ )



**Figura 4.28** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Original 500X ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 421.800$ )

Para determinar si el tamaño del área de fractura está relacionado a los esfuerzos, calculamos el área de la zona de entalladura y el área de la fractura de todas las probetas para los diferentes niveles de esfuerzos, posteriormente establecimos porcentajes de áreas para cada nivel de esfuerzo, los cuales se muestran en la tabla 4.13. Llegando a la conclusión de que a mayor esfuerzo, mayor es el porcentaje de área que ocupa.

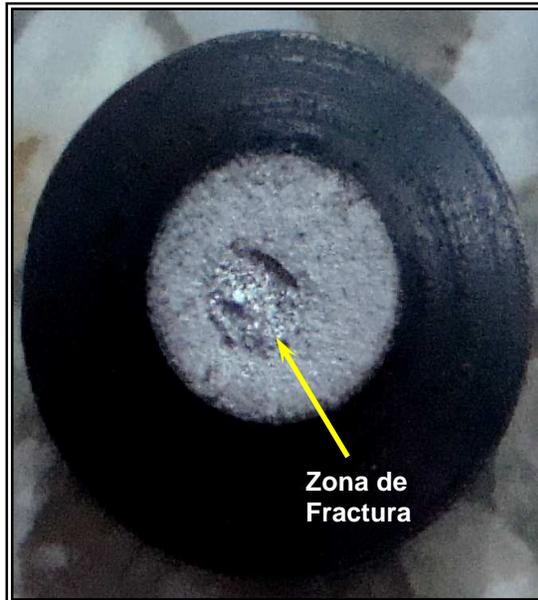
**Tabla 4.13** Relación entre el área de la zona de fractura y los esfuerzos

Esfuerzos (Mpa)	Intervalo en % de Área Ocupado por la zona de fractura
360	12 - 18%
270	7 - 11%
180	3 - 7%

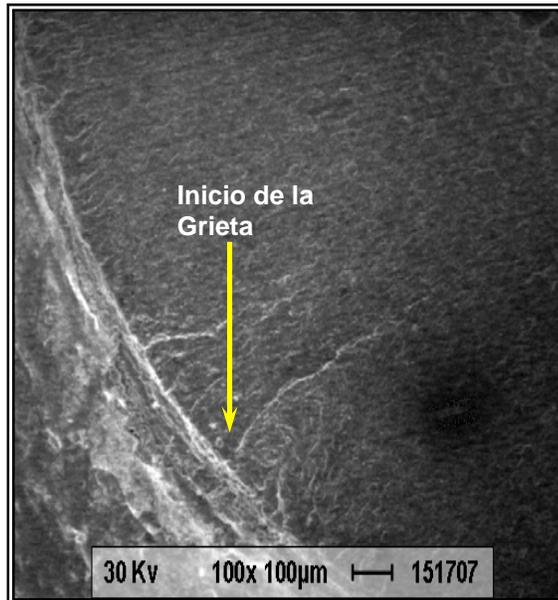
En la figura 4.20, se observa el área de la superficie de fractura de la probeta de acero AISI 1045 en su condición original, en la misma se puede observar una zona brillante en el centro cuyo área ocupa un 15% del área total de la probeta, que vendría a ser la zona de fractura, lo que indica que la probeta estuvo sometida a altos esfuerzos ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 13.100$ ). En la figura 4.21 se muestra la propagación de la grieta la cual se presenta en forma radial y partiendo de la entalla. Para la figura 4.22, se observa hoyuelos o dimples y algunas facetas de clivaje, lo que indica que el mecanismo de fractura es mixto.

En la figura 4.23, se observa el área de la superficie de fractura de la probeta de acero AISI 1045 en su condición original, en la misma se puede observar la zona de fractura un poco mas desplazada del centro de la probeta ocupando un área 11%, lo que indica que la probeta estuvo sometida a esfuerzos medios ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 53.000$ ). En la figura 4.24 se muestra la propagación de la grieta la cual se presenta en forma radial y partiendo de la entalla con pequeñas ramificaciones y mayor propagación que para esfuerzos mayores. Para la figura 4.25, se observa una zona completamente frágil, una gran grieta que atraviesa el centro de la zona y gran cantidad de clivaje.

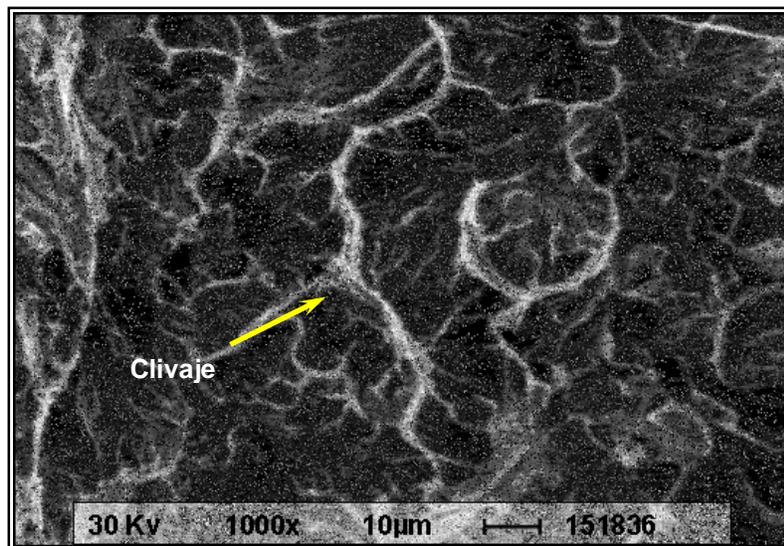
En la figura 4.26, se observa el área de la superficie de fractura de la probeta de acero AISI 1045 en su condición original, en la misma se puede observar la zona de fractura completamente desplazada del centro de la probeta hacia la zona de entalla ocupando un área de 4%, lo que indica que la probeta estuvo sometida a esfuerzos medios ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 421.800$ ). En la figura 4.27 se muestra la propagación de la grieta la cual se presenta en forma radial y partiendo de la entalla con ramificaciones más pronunciadas y mayor propagación que para esfuerzos mayores. Para la figura 4.28, se observa hoyuelos o dimples y facetas de clivaje, lo que indica que el mecanismo de fractura es mixto y una pequeña grieta en el centro de la misma.



**Figura 4.29** Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Temple ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 7.500$ )



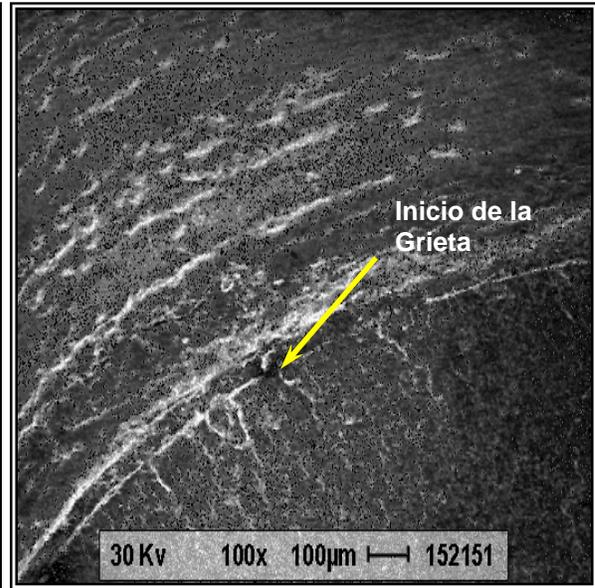
**Figura 4.30** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Temple 100X ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 7.500$ )



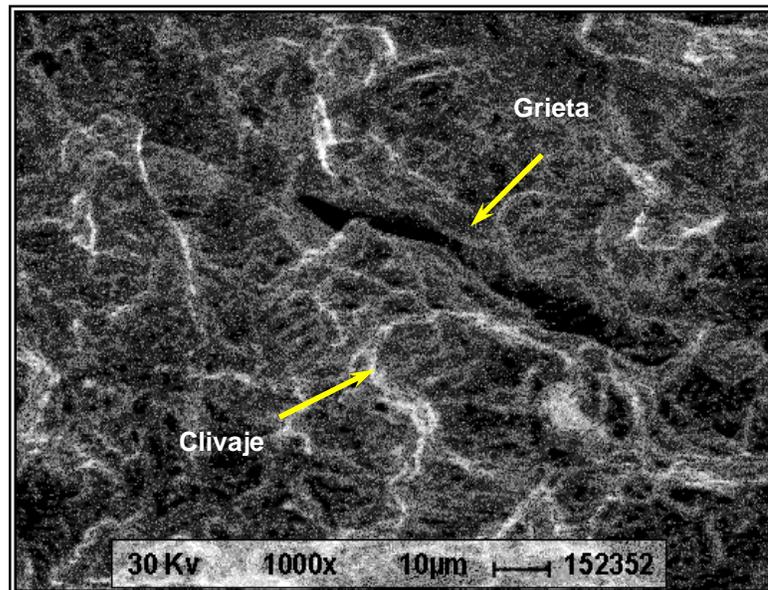
**Figura 4.31** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Temple 1000X ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 7.500$ )



**Figura 4.32** Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Temple ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 28.700$ )



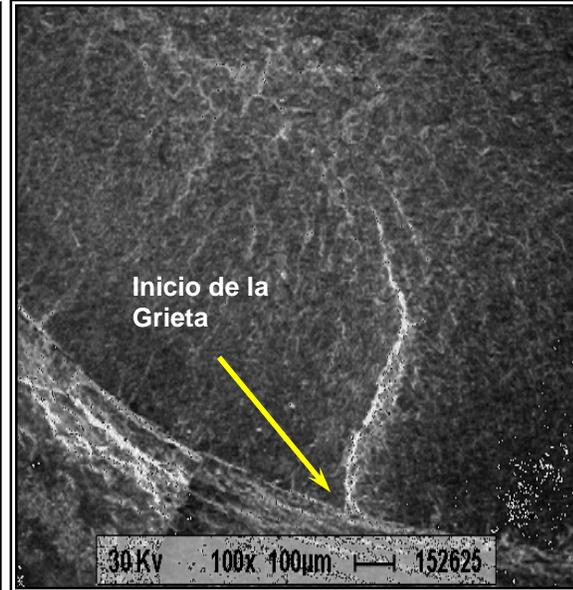
**Figura 4.33** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Temple 100X ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 28.700$ )



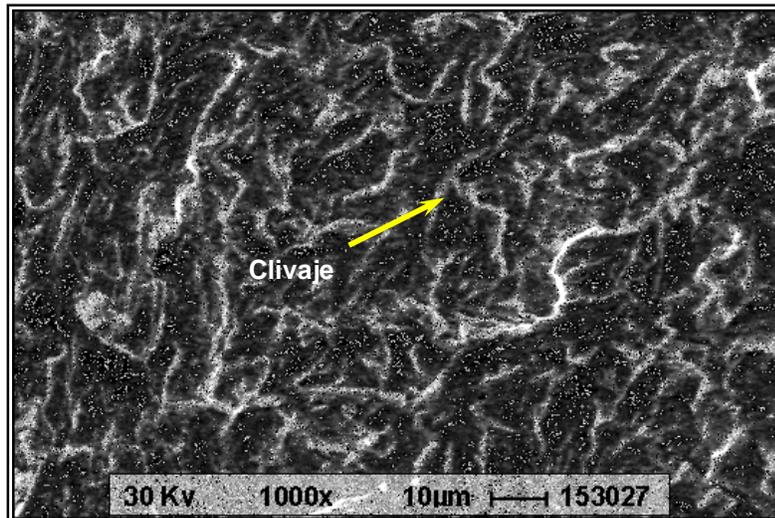
**Figura 4.34** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Temple 1000X ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 28.700$ )



**Figura 4.35** Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Temple ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 232.000$ )



**Figura 4.36** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Temple 100X ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 232.000$ )

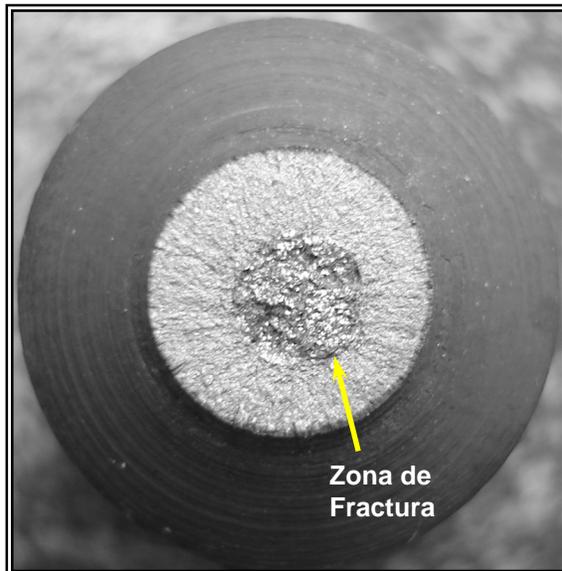


**Figura 4.37** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Temple 1000X ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 232.000$ )

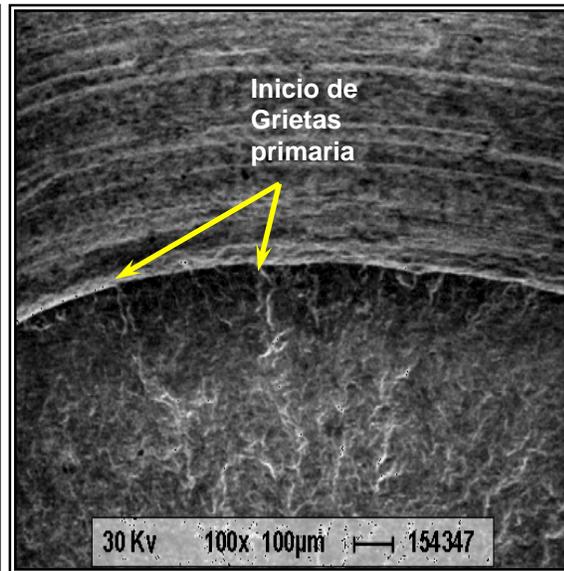
En la figura 4.29, se observa el área de la superficie de fractura de la probeta de acero AISI 1045 en la condición de temple en aceite, en la misma se puede observar la zona de fractura cercana al centro de la probeta, ocupando un área de 14% respecto al área de la probeta, lo que indica que la misma estuvo sometida a grandes esfuerzos ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 7.500$ ), y que la fractura se produjo casi inmediatamente debido al número de ciclos. En la figura 4.30 se muestra una propagación muy pequeña de la grieta la cual se presenta en forma radial y partiendo de la entalla. Para la figura 4.31, se observa grandes facetas de clivaje, lo que indica que el mecanismo de fractura es frágil, la zona se muestra completamente frágil.

En la figura 4.32, se observa el área de la superficie de fractura de la probeta de acero AISI 1045 en la condición de temple en aceite, en la misma se puede observar la zona de fractura un poco mas alejada del centro de la probeta, ocupando un área de 8%, lo que indica que la probeta estuvo sometida a esfuerzos medios ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 28.700$ ). En la figura 4.33 se muestra pequeñas propagaciones de grietas la cual se presenta en forma radial y partiendo de la entalla. Para la figura 4.34, se observa grandes facetas de clivaje, lo que indica que el mecanismo de fractura es frágil, la zona se muestra completamente frágil producto del templado y además se muestra una gran grieta que atraviesa casi toda la zona.

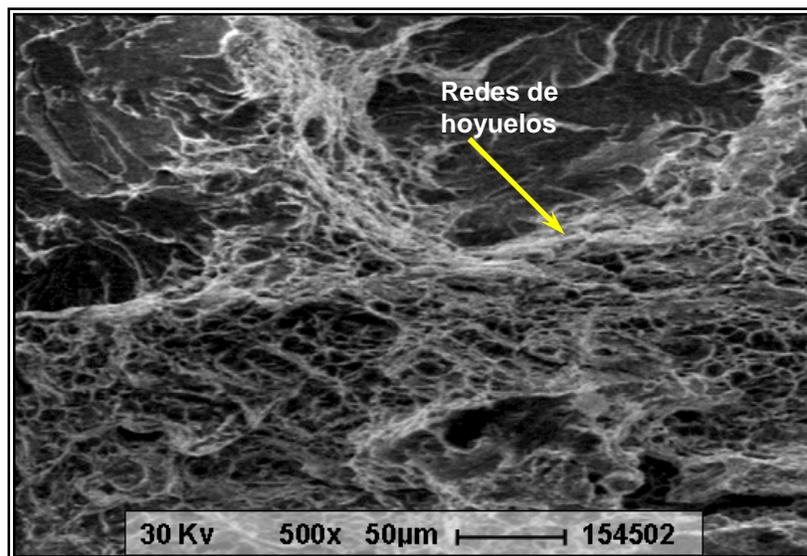
En la figura 4.35, se observa el área de la superficie de fractura de la probeta de acero AISI 1045 en la condición de temple en aceite, en la misma se muestra la zona de fractura más cercana a la entalla, ocupando un área de 6% respecto al área de la probeta, indicando que la misma estuvo sometida a esfuerzos medios ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 232.000$ ). En la figura 4.36 se muestra una mayor propagación de grietas, la cual se presenta en forma radial, característica de ser mas dúctil y partiendo de la entalla. Para la figura 4.37, se observa grandes facetas de clivaje, lo que indica que el mecanismo de fractura es frágil, la zona se muestra completamente frágil.



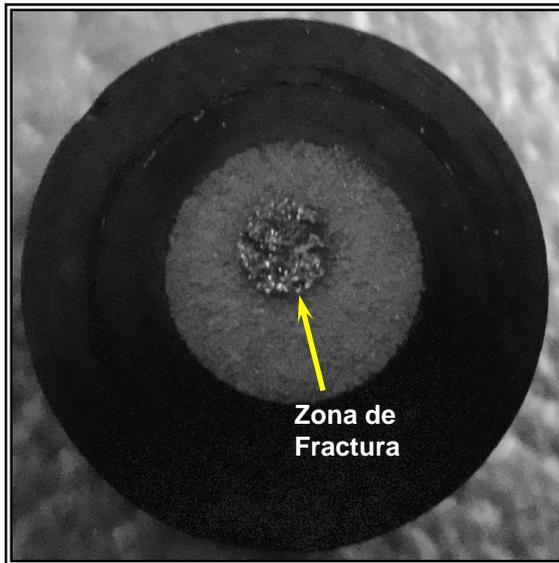
**Figura 4.38** Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 32.900$ )



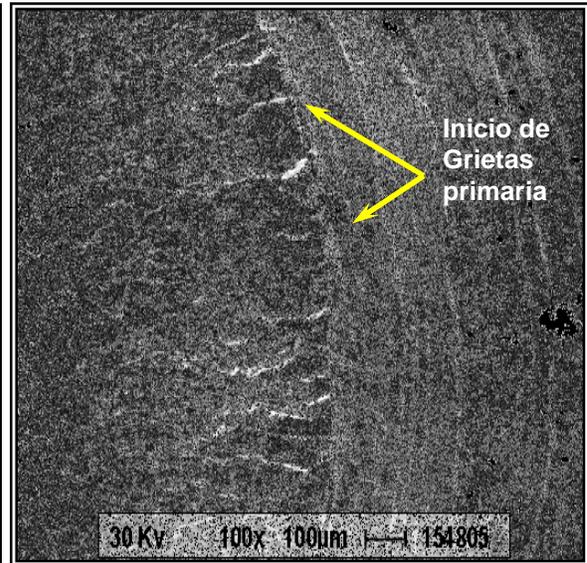
**Figura 4.39** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Normalizado 100X ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 32.900$ )



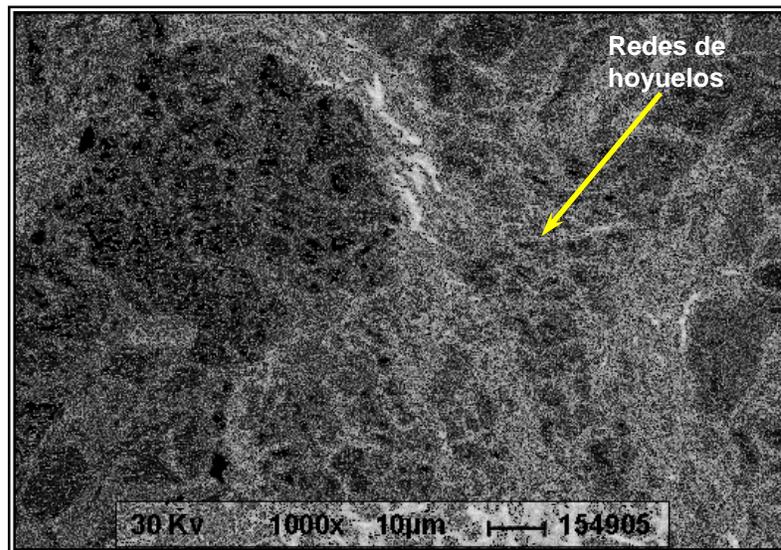
**Figura 4.40** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Normalizado 500X ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 32.900$ )



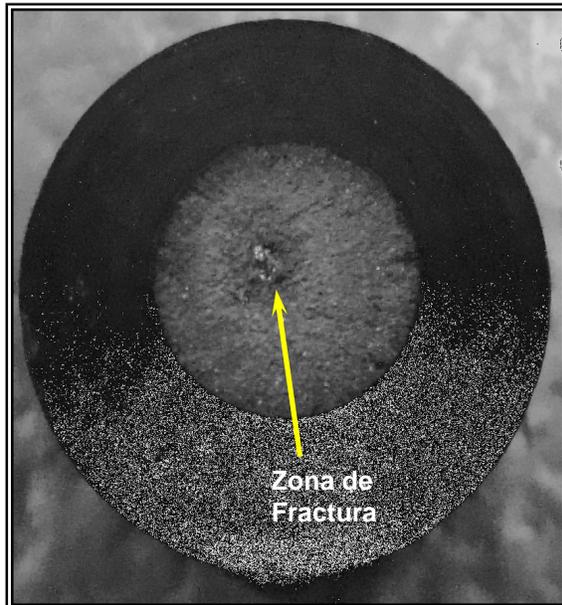
**Figura 4.41** Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 74.500$ )



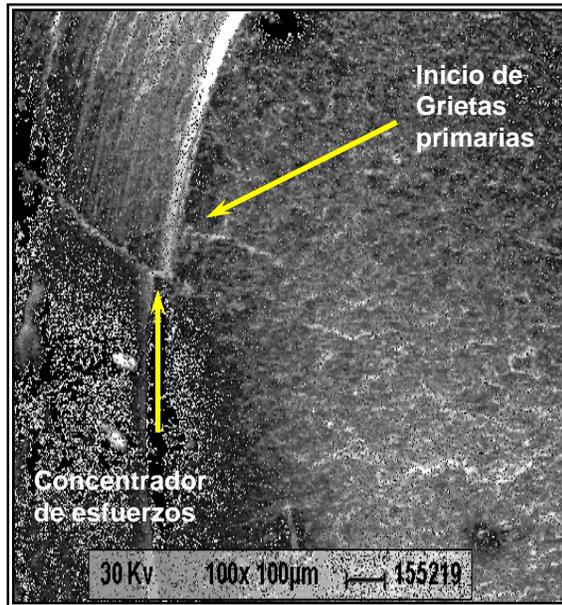
**Figura 4.42** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Normalizado 100X ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 74.500$ )



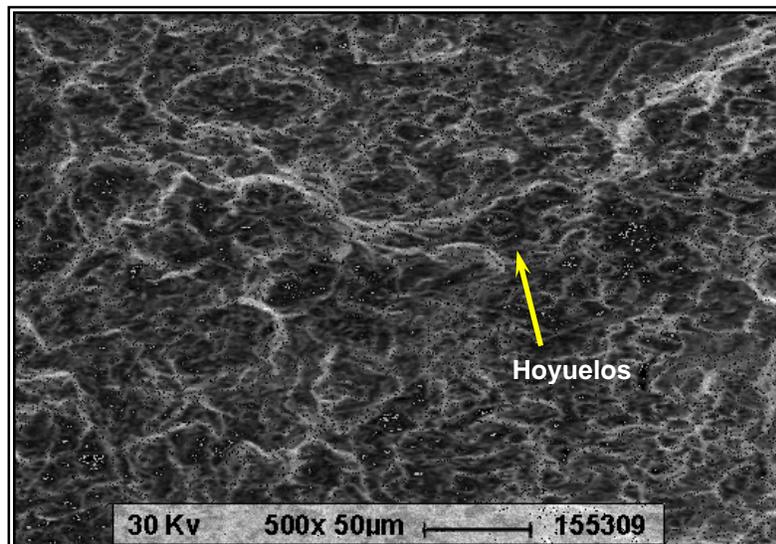
**Figura 4.43** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Normalizado 1000X ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 74.500$ )



**Figura 4.44** Macrofotografía del Acero AISI 1045, Condición Normalizado ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 510.400$ )



**Figura 4.45** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Normalizado 100X ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 510.400$ )



**Figura 4.46** Microfotografía del Acero AISI 1045, condición Normalizado 500X ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 510.400$ )

En la figura 4.38, se observa el área de la superficie de fractura de la probeta de acero AISI 1045 en la condición de normalizado, en la misma se puede observar la zona de fractura justo en el centro de la probeta, ocupando un área de 18%, lo que indica que la probeta estuvo sometida a grandes esfuerzos ( $\sigma = 360$  Mpa,  $N = 32.900$ ). En la figura 4.39 se muestra el inicio de grietas primarias en el entalle con muy poca propagación o desarrollo debido a altos esfuerzos. Para la figura 4.40, se observa una superficie de fractura con hoyuelos o dimples, lo que indica que el mecanismo de fractura es dúctil, la zona se muestra completamente dúctil producto del normalizado.

En la figura 4.41, se observa el área de la superficie de fractura de la probeta de acero AISI 1045 en la condición de normalizado, en la misma se muestra la zona de fractura cerca del centro de la probeta, ocupando un área de 11%, lo que indica que la probeta estuvo sometida a esfuerzos medios ( $\sigma = 270$  Mpa,  $N = 74.500$ ). En la figura 4.42 se muestra el inicio de grietas primarias en el entalle con mayor propagación o desarrollo. Para la figura 4.43, se observa una superficie de fractura con hoyuelos o dimples, lo que indica que el mecanismo de fractura es dúctil, la zona se muestra completamente dúctil producto del normalizado y aparece una zona no identificada con apariencia de ser frágil en el lado inferior izquierdo.

En la figura 4.44, se observa el área de la superficie de fractura de la probeta de acero AISI 1045 en la condición de normalizado, en la misma se muestra la zona de fractura cerca del centro de la probeta, ocupando un área de 5%, lo que indica que la probeta estuvo sometida a esfuerzos medios ( $\sigma = 180$  Mpa,  $N = 510.400$ ), presentando una fractura dúctil. En la figura 4.45 se muestra el inicio de grietas primarias, la misma se inicia claramente justo en un concentrador de esfuerzo generado por defecto del maquinado. Para la figura 4.46, se observa una superficie de fractura con hoyuelos o dimples, lo que indica que el mecanismo de fractura es dúctil.

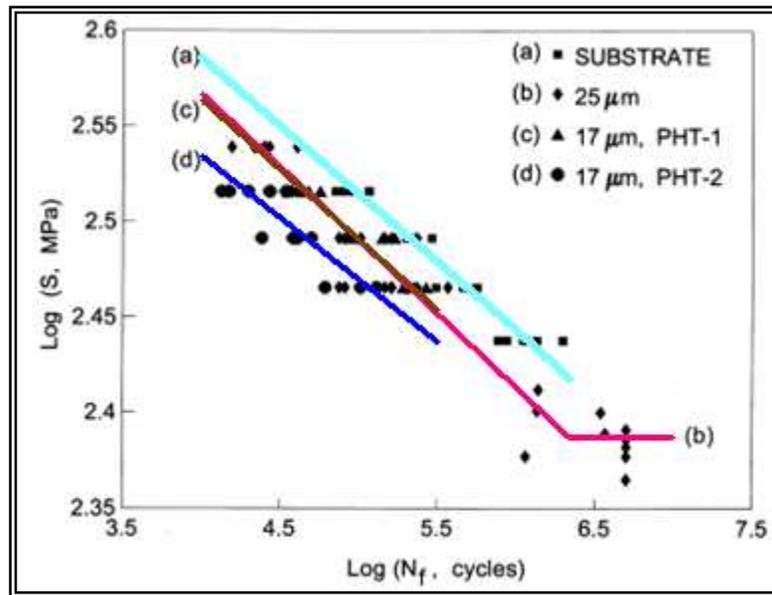
## 4.6 COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DEL ACERO AISI 1045

De las curvas ya establecidas del acero estudiado se realizaron comparaciones con los resultados obtenidos, dichas curvas se consultaron de revistas electrónicas.

Contreras et al., 1999, en la investigación denominada "Fatigue properties of an AISI 1045 steel coated with an electroless Ni-P deposit", realizaron ensayos de fatiga al acero AISI 1045 en cuatro diferentes condiciones y la dimensiones de las probetas que utilizaron fueron diferentes a las establecidas en nuestra investigación, estas tenían una longitud de 120mm, con 12,7mm de diámetro y 6,35mm de diámetro la zona de fractura, con un diámetro de hombro de 12,7mm según la norma ASTM E-606. Las cuatros condiciones en las que se ensayo el material fueron las siguientes:

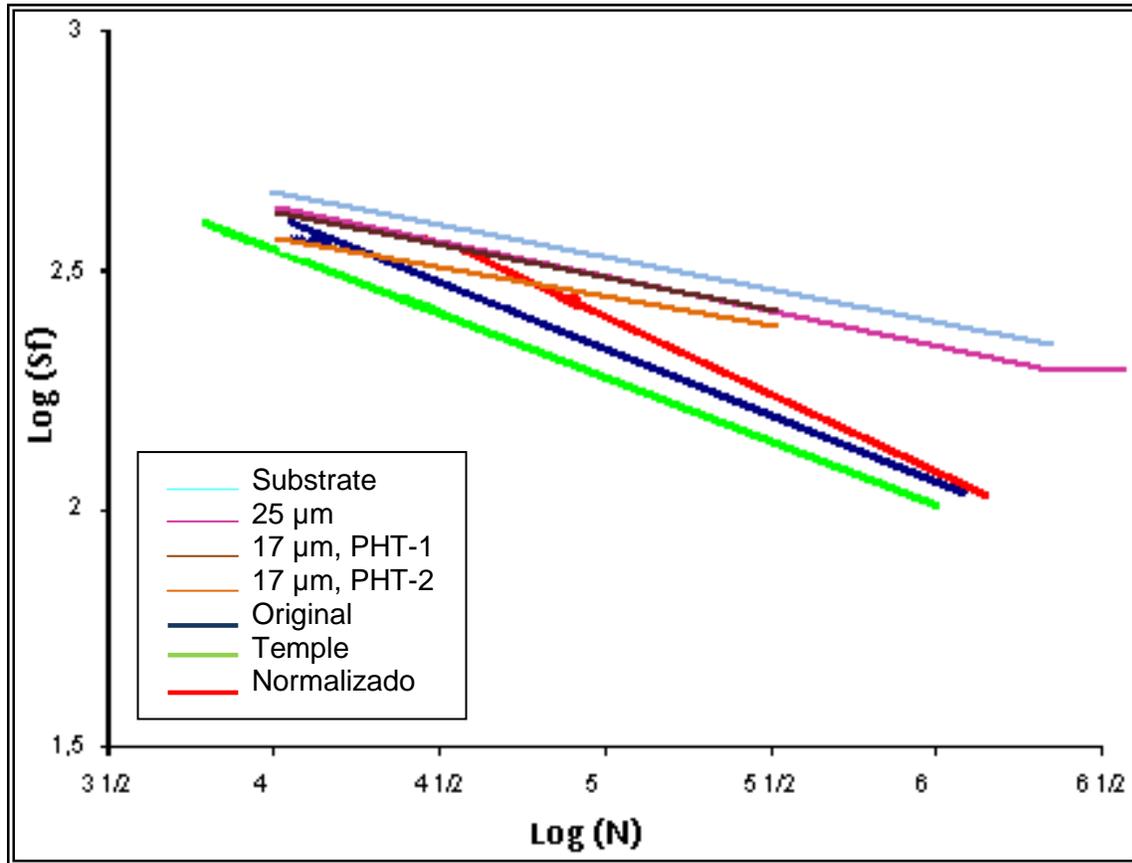
- a- Sustrato
- b- Se realizó un baño de acido, cuyas capas eran de 25 $\mu$ m de espesor y con un contenido de P que estaba en el rango de 10.4 $\pm$ 11.3 de peso %, luego era calentado a 673 k por una hora
- c- Una solución alcalina con capas de 17 $\mu$ m de espesor con un contenido de P que estaba en el rango de 8.4 $\pm$ 9.4 de peso % y luego era calentado hasta 473 K por una hora
- d- Una solución alcalina con capas de 17 $\mu$ m de espesor con un contenido de P que estaba en el rango de 8.4 $\pm$ 9.4 de peso %, luego era calentado hasta 473 K por una hora seguido a un aumento de temperatura de 673 K por otra hora mas

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.47, donde las curvas linealizadas reflejan el comportamiento de acero a la fatiga en sus diferentes condiciones.



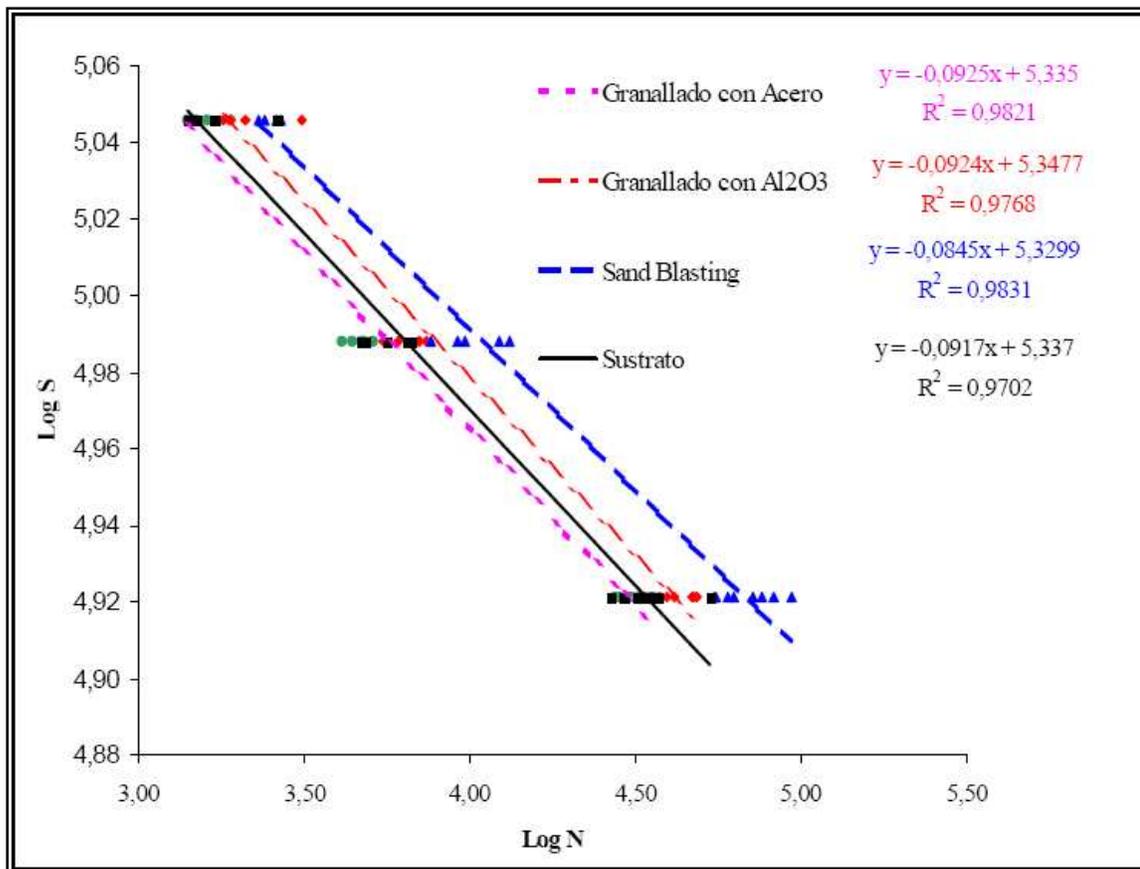
**Figura 4.47** Resultados del ensayo de Fatiga usando recubrimientos de Ni-P.  
(Contreras, 1999)

En la figura 4.48, se compara estos resultados con los obtenidos en nuestros ensayos, se puede ver claramente los cambios de pendientes que presentan las curvas cuando se utilizan sustancias químicas junto a un aumento de la resistencia a la fatiga y el número de ciclaje para esfuerzos medios y bajos



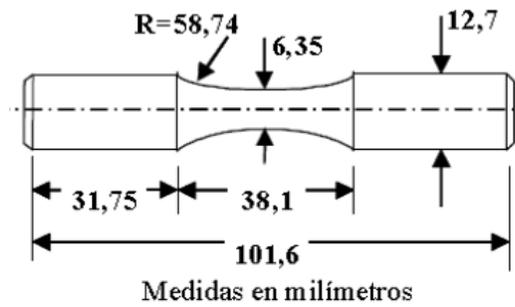
**Figura 4.48** Curvas comparativas obtenidas por el trabajo de Contreras y nuestra investigación.

Coronado, 2006. En su publicación titulada “Efecto de la preparación superficial y aplicación de recubrimientos en la resistencia a la fatiga del acero SAE 1045”, realizó ensayos de fatiga en cuatro condiciones diferentes las cuales son: con una superficie pulida y aplicando chorros con partículas de arena, alúmina y acero. Las probetas después de ser mecanizadas fueron pulidas hasta tener una superficie espejo, los ensayos se realizaron en una máquina de flexión rotativa utilizando la norma ASTM E-606. En la figura 4.49 se pueden ver los resultados que obtuvo cuando se realiza una preparación superficial y recubrimientos.



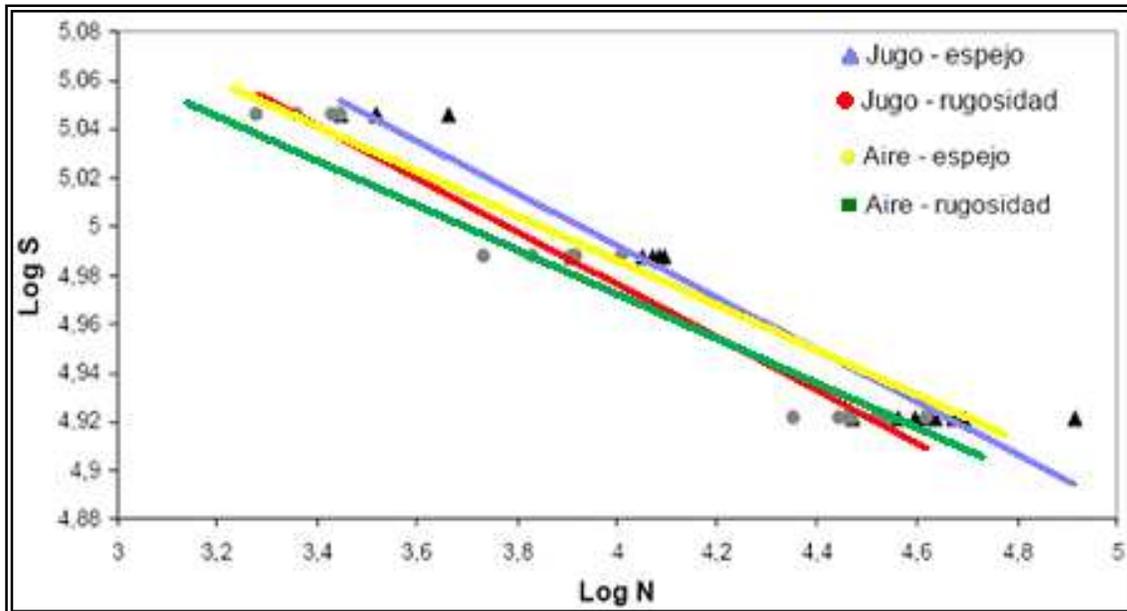
**Figura 4.49** Curvas de Fatiga cuando se realiza preparación superficial y recubrimientos.  
(Coronado, 2006)

Ceballos, 2008. En el trabajo titulado “Sinergia Entre Alta Rugosidad Superficial Y Ambiente Corrosivo En El Comportamiento A La Fatiga Del Acero SAE 1045” evaluó la resistencia a la fatiga del acero en un ambiente corrosivo como lo es el jugo de caña, utilizó cuatro diferentes condiciones, probetas en su condición original (con rugosidad superficial y con acabado superficial espejo) y probetas rodeada con jugo de caña (con rugosidad superficial y con acabado superficial espejo). Las pruebas de fatiga se realizaron en una maquina de flexión rotatoria bajo la norma ASTM E-606. Las probetas empleadas son cilíndricas con una reducción de diámetro en la zona central, dicha probeta se muestra en la figura 4.50



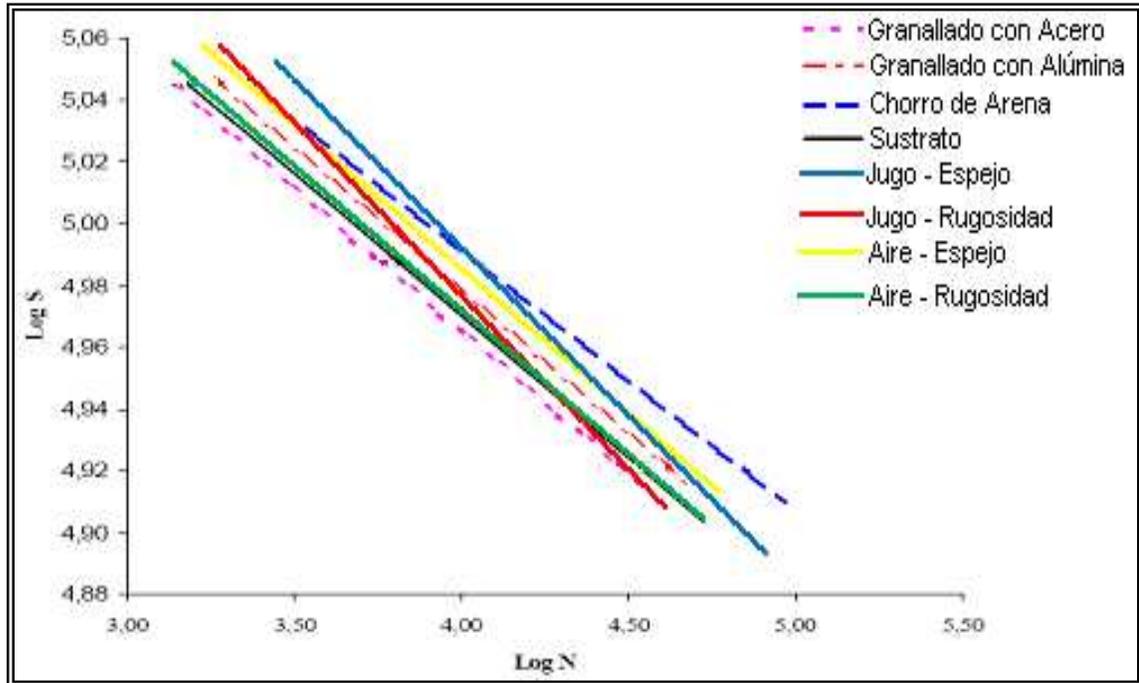
**Figura 4.50** Probeta de Fatiga utilizada en el trabajo de Ceballos

Los resultados que obtuvo en sus ensayos se pueden ver en la figura 4.51 donde se muestran los resultados de las cuatro condiciones estudiadas.



**Figura 4.51** Curvas de Fatiga de los ensayos de Ceballos

En la figura 4.52 se puede ver la comparación de los resultados de Ceballos con los de Coronado, se compararon estos dos trabajos ya que en ambos se utilizaron probetas semejantes.



**Figura 4.52** Curvas comparativas de Fatiga de los ensayos de Ceballos

Debido a que la probeta utilizada en nuestra investigación difiere totalmente de las probetas utilizadas en las investigaciones de Ceballos y Coronado, los resultados obtenidos de la resistencia a la fatiga no pueden ser comparados, debido a que los valores de resistencia están muy por encima de los obtenidos en nuestra investigación, dichos valores se muestran en la tabla 4.14 Sin embargo, al comparar ambos trabajos, podemos deducir que se obtiene una mayor resistencia a la fatiga del acero AISI 1045 cuando se le aplica un chorro de arena.

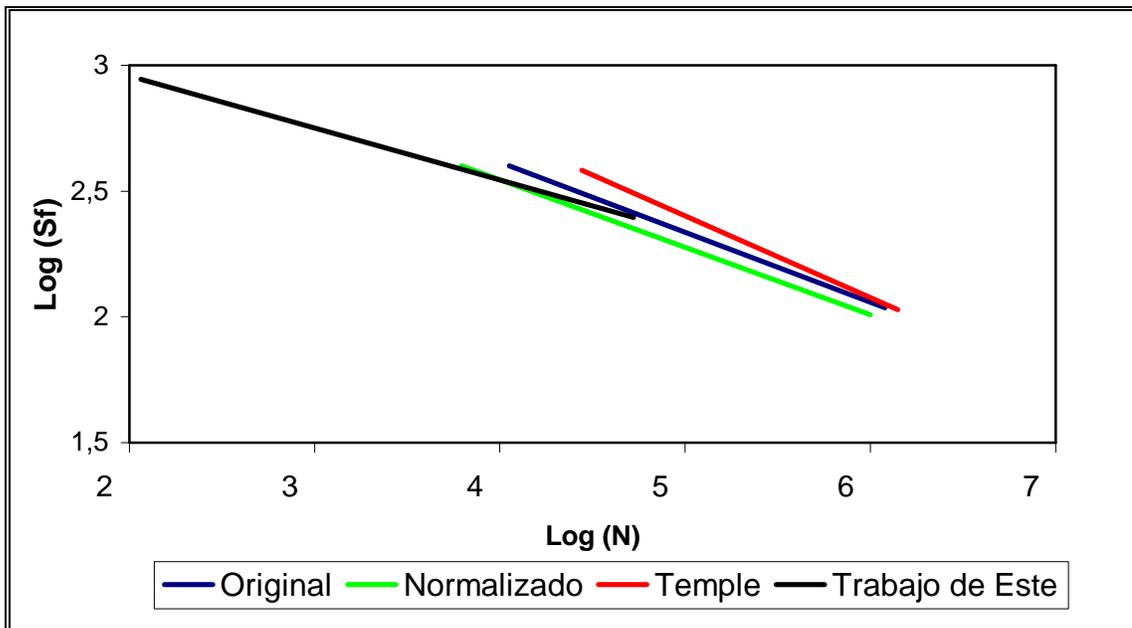
**Tabla 4.14** Resultados de los valores de resistencia a la fatiga de los trabajos de Ceballos y Coronado.

Condición Superficial	Resistencia a la fatiga (MPa)	Autor
Ambiente aire – acabado espejo	433,53	Ceballos
Ambiente aire – acabado rugoso	421,13	
Ambiente jugo – acabado espejo	413,45	
Ambiente jugo – acabado rugoso	395,84	
Acabado espejo	422,00	Coronado
Chorroado con arena	458,58	
Chorroado con alúmina	428,36	
Chorroado con acero	415,44	

La investigación realizada por ESTE, 2002. Denominada “Evaluación de la Vida de Fatiga de Aceros de Bajo y Medio Carbono Tratados Térmicamente”. Utilizó tres (3) tipos diferentes de aceros, (AISI 1020, AISI 1030 y el AISI 1045), cuyas condiciones iniciales de los materiales era su estado natural, sin tratamiento térmico ni recubrimiento. Estos aceros fueron sometidos a ensayos de fatiga en condiciones de flexión rotativa. Este estudio reflejó que mientras más porcentaje de carbono contenga el acero mayor es la resistencia a la fatiga. Es importante destacar que para evitar incertidumbre en la dispersión de los puntos de la curva S-N, se ensayaron un total de 32 probetas para cada acero.

**Tabla 4.15** Comparación de los resultados obtenidos del trabajo de Este y de nuestra investigación.

Condición de ensayo	$S_{m\acute{a}x}$ (Mpa)	Sf (Mpa)	% RA	$R^2$
(S/TT)	868,70	114,26	41,68	0,91
(TT/T)	1000,44	119,37	39,31	0,95
(TT/N)	716,60	102,14	44,62	0,91
Trabajo de Este	540,59	135,08	35	0,77



**Figura 4.53** Curvas S-N comparativas de acero AISI 1045, obtenida del trabajo de Este y de nuestra investigación.

Al comparar los resultados obtenidos por Este del acero AISI 1045, con los obtenidos en nuestra investigación, podemos resaltar que existen diferencias en cuanto a la resistencia máxima a la tracción, al porcentaje de reducción de área y a la resistencia a la fatiga, en donde cabe mencionar que los esfuerzos utilizados por Este para la fatiga, fueron bastante elevados y por ende el número de ciclos obtenido fueron muy bajos, lo que originó al realizar la curva de S-N un factor de confiabilidad ( $R^2$ ) 15% menor que el obtenido en nuestras curvas S-N. En la tabla 4.15 se mostró tales diferencias y en la figura 4.53 se pudo observar las curvas del acero AISI 1045.

# CAPÍTULO 5

## *Conclusiones y Recomendaciones*

---

---

### 5.1 CONCLUSIONES

- La aplicación de los tratamientos térmicos, tales como, temple y normalizado al acero AISI 1045, afectan al comportamiento a la fatiga del material; produciendo un desplazamiento de la curva S-N, positivo en el caso del normalizado presentando una mayor resistencia con un aumento del 4,3% aproximadamente respecto a la condición original del acero y negativo en el caso del temple presentando una menor resistencia con una disminución del 10,5% aproximadamente respecto a la condición original del acero.

- El acero AISI 1045 con tratamiento térmico de temple presenta la mayor resistencia a la tracción con un aumento del 15% respecto a la condición original del acero; siendo las probetas con tratamiento térmico de normalizado las que presentaron menor resistencia a la tracción con una disminución del 18% respecto a la condición original del acero.

- La dispersión de los resultados de los ensayos de fatiga es mayor para los niveles de esfuerzos más bajos (90 Mpa) y mayor para el tratamiento térmico de normalizado, esto se puede atribuir a la inhomogeneidades del

acero que con cargas bajas se van enfatizando, a los parámetros del material como: fabricación de la pieza, superficie de la probeta, alineación de las probetas en el equipo de ensayo, frecuencia de ensayo y también a la cantidad de ensayos que se realizaron.

- Las probetas que presentaron mayor dureza son las que tienen el tratamiento térmico de temple y las probetas con tratamiento térmico de normalizado fueron las que presentaron menor dureza, es decir, respecto a la condición original de la probeta el templado aumenta la dureza en un 93% y el normalizado la disminuye 40%.

- Las microestructuras que presentan las muestras del acero AISI 1045, se corresponde con las condiciones del material; perlita y ferrita en la condición sin tratamiento térmico, martensita con dominio de cintas de orientaciones diferentes cuya estructura en el interior de las cintas esta altamente distorsionada y confusa para la condición con tratamiento térmico de temple y perlita más refinada junto a un incremento de un 45% aproximadamente de la ferrita para la condición de tratamiento térmico de normalizado

- En las probetas de acero AISI 1045 para las condiciones sin tratamiento térmico se presenta una fractura tipo mixta para altos y medios esfuerzos y dúctil para bajos esfuerzos. Con tratamiento térmico de temple se presenta una fractura de la probeta tipo frágil, con propagación de grietas en forma radial sin ramificaciones y con facetas de clivaje para altos y medios esfuerzos y mixta para bajos esfuerzos. Para la condición con tratamiento térmico de normalizado para altos, medios y bajos esfuerzos, la fractura es del tipo dúctil debido a la presencia de hoyuelos y una propagación de grietas radial con ramificaciones.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Mejorando el acabado superficial por pulido de las probetas podría alcanzarse un incremento significativo en la vida a la fatiga.
- Para la realización del tratamiento térmico de temple en aceite, es importante reemplazar el aceite ya utilizado o contaminado por uno nuevo, evitando así cualquier ruptura de la probeta durante el enfriamiento.
- Elaboración de una guía para la puesta en marcha de la máquina de fatiga, que le permita a los estudiantes el fácil manejo de dicho equipo.
- En vista de lo extenso de los ensayos de fatiga, se recomienda la planificación dentro del laboratorio para crear un cronograma de horarios especiales bajo supervisión que le facilite a los estudiantes la continuidad en el proceso de toma de datos.
- Para un mismo acero se recomienda la realización de los ensayos de fatiga con variaciones de RPM.
- Incorporar al Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo un microscopio electrónico de barrido para así no depender de otras instituciones.

# *Referencias Bibliográficas*

---

- Acosta M. (2005). Evaluar el comportamiento mecánico a la Fatiga del Acero AISI 4340, sometido a tratamiento de Temple y Revenido. Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo
- Avilés, R. (2005). Análisis de Fatiga en Máquinas. Revista de metalurgia. Editorial Thomson.
- Berrios, O., Puchi, J. y Teer, D. (1998). Comportamiento a la Fatiga al Aire y Fatiga-Corrosión en un Acero 316L Recubierto con  $Tin_x$  y  $Zrn_x$  obtenidos por Bombardeo Iónico. Revista Facultad de Ingeniería UCV, p.p. 115-124, Vol. 13, N° 2
- Berrios, J., Staia, M. y Puchi, E. (2005). Comportamiento a la Fatiga de un Acero al Carbono AISI 1045 Recubierto con Depósitos Autocatalíticos De Ni-P. Revista Facultad Ingeniería UCV, p.p. 5-16, Vol. 20, N° 1
- Biblioteca de Consulta Microsoft Encarta (2005). Microsoft Corporation
- Castro, C., Gota, J. y Sáenz, L. (2003). Evaluación de las Propiedades Mecánicas de un Acero Microaleado al Vanadio sometido a un Tratamiento Térmico de Normalizado. Revista Facultad de Ingeniería UCV, p.p. 7-15, Vol. 18, N° 2,
- Catálogos de productos de SUMINDU. (2008). Valencia - Venezuela

- Catálogos de productos de SUMITEC. (2008). Mérida - Venezuela
- Ceballos, W., Gómez, A., Coronado, J., (2008). Sinergia Entre Alta Rugosidad Superficial Y Ambiente Corrosivo En El Comportamiento A La Fatiga Del Acero SAE 1045. Revista Dyna. Medellín, p.p. 91-100. N°. 154
- Contreras, G., Fajardo, C., Berríos, J., Pertuz, A., Chitty, J., Hintermann, H., Puchi, E. (1999). Fatigue properties of an AISI 1045 steel coated with an electroless Ni-P deposit. Revista Thin Solid Film publicado por Elsevier Science Ltd. p. p. 480 – 485.
- Coronado, J. (2007). Efecto de la preparación superficial y aplicación de recubrimientos en la resistencia a la fatiga del acero SAE 1045. Revista Scientia Et Técnica. Colombia. p.p. 213-218, Vol. 8 N° 34
- *Enciclopedia de Ciencia y Técnica* (1984). Tomo 1 Acero, Salvat Editores S.A.”
- Este P. (2002). Evaluación de la vida de Fatiga de Aceros de Bajo y Medio Carbono tratados térmicamente. Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo
- Este, P. y Sáenz, L. (2004). Evaluación de la Resistencia a la Fatiga y Límite a Fatiga de Aceros de Medio y Bajo Carbono. Revista INGENIERÍA UC, p.p. 69-75, Vol. 11 N° 1
- Gómez, Simón (2006), Procedimientos de Mecanizado, Madrid, Editorial Paraninfo
- Herrera, E. y J. Gallardo. (1986). Algunos casos prácticos de fallos metálicos relacionados con el desgaste. Revista de metalurgia. Madrid, Vol. 22, No 4: 261-263
- H.O. Fuchs; R.I. Stephens; (1980). Metal Fatigue in Engineering; Wiley.
- Iriza M. (2004). Manual de prácticas del laboratorio de materiales. práctica 6, página 2.
- Moreno, F., Salazar, W. y Sáenz, L. (2005). Evaluación del comportamiento mecánico a la Fatiga en Aceros AISI 4340 y AISI 4140 Tratados Térmicamente con Recocidos y Normalizados. Revista INGENIERÍA UC, p.p. 40-45, Vol. 12 N° 3

- Moreno, F., Salazar, F. (2005). Evaluar el comportamiento mecánico a la Fatiga en Aceros AISI 4340 y AISI 4140 Recocidos y Normalizados. Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo