



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



Determinación de la curva S-N-P a través del método Maennig en el ensayo de fatiga para el acero AISI 1045 sometido a un tratamiento térmico de normalizado.

**AUTORA:** Marín, Marirey

**TUTOR:** Prof. Argel Porrello.



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



Determinación de la curva S-N-P a través del método Maennig en el ensayo de fatiga para el acero AISI 1045 sometido a un tratamiento térmico de normalizado.

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

**AUTORA:** Marín, Marirey

**TUTOR:** Prof. Argel Porrello.

Valencia, Noviembre, 2012



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



### CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros de Jurado designado para evaluar el Trabajo especial de grado titulado “*Determinación de la curva S-N-P a través del método Maennig en el ensayo de fatiga para el acero AISI 1045 sometido a un tratamiento térmico de normalizado*”, realizado por la bachiller: **Marirey Marín Obispo**, cedula de identidad: **15991770**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

---

**Prof. Argel Porrello**  
Tutor

---

**Prof. Sandra Cabello**  
Jurado

---

**Prof. Franklin Camejo**  
Jurado

Valencia, Noviembre, 2012

## **Dedicatoria**

Quiero dedicar mi trabajo de grado en primer lugar a Dios por darme la fuerza y la constancia para realizarlo, a mis hermanos espirituales por darme sabiduría y claridad, a mis padres Rosa de Marín y Antonio Marín porque siempre me dieron su apoyo, su confianza, su comprensión y paciencia, a mi abuela Carmen de Marín Rojas, a mis hermanas Maite Marín y Rossanna Marín, a mis hermosos sobrinos Fabiola y Nehomar Antonio, a mis amigos Ediberto Coronel, Gabriela Saavedra, Yoraima Quintero, Andreina Castillo y Luis Gerardo Jiménez porque siempre estuvieron a mi lado en especial a Rebeca Sandoval por ser mi mayor apoyo y compañía, a Cachita y a mis abuelos que desde el cielo siempre estuvieron a mi lado cuidándome y ayudándome a seguir adelante en cada tropiezo y a la Sra. Dulce por se una gran consejera.

También quiero dedicar este trabajo a mis tutores Argel Porrello, Carlos Alfonzo por ser mis personas especiales, más que mis profesores mis amigos y consejeros en este trabajo, a la prof. Sandra Cabello por su gran ayuda en la obtención de este título.

## **Agradecimientos**

En primer lugar agradecer a Dios todopoderoso por siempre llevarme de la mano en este camino, a mis hermanos espirituales por darme sabiduría y claridad. A mis amadísimos padres Rosa de Marín y Antonio Marín por tener siempre esa confianza en mí y darme su apoyo incondicional, a mis hermanas por su apoyo, a mis bellos sobrinos Fabiola y Nehomar Antonio, a mis amigos Ediberto Coronel, Gabriela Saavedra, Yoraima Quintero, Andreina Castillo, Luis Gerardo Jiménez y en especial a Rebeca Sandoval por el apoyo en los momentos que lo necesite. A la Sra. Dulce Maria por sus sabios consejos.

A mis tutores Argel Porrello, Carlos Alfonso y Sandra Cabello por siempre mostrarme el camino a seguir, a los técnicos Yosmary Pérez, René Padrón y Néstor Díaz por darme la ayuda necesaria en los diferentes ensayos que se realizaron en este trabajo.

A los diferentes profesores y secretarias que de alguna manera u otra estuvieron al pendiente de este proyecto.

A todos, Muchísimas Gracias...

# DETERMINACIÓN DE LA CURVA S-N-P A TRAVÉS DEL MÉTODO MAENNIG EN EL ENSAYO DE FATIGA PARA EL ACERO AISI 1045 SOMETIDO A UN TRATAMIENTO TÉRMICO DE NORMALIZADO.

*Marirey Marín O, Argel Porrello*

Ingeniería Mecánica, Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo, Carabobo, Venezuela.

*E-mail: [mmarin1@uc.edu.ve](mailto:mmarin1@uc.edu.ve), [mmarirey@gmail.com](mailto:mmarirey@gmail.com)*

---

**Resumen.** El presente trabajo se realizó con el propósito de determinar las curvas S-N-P a través del método Maennig en el ensayo de fatiga para el acero AISI 1045 sometido a un tratamiento térmico de normalizado. Los ensayos de tracción se llevaron a cabo en la Máquina Universal GALBADINI, los ensayos de fatiga se realizaron en condición de flexión rotativa. Se utilizaron barras calibradas de acero de media pulgada de diámetro ( $\frac{1}{2}$ ""). Se determinaron las propiedades mecánicas del material, resistencia a la tracción  $S_{max}$  y el esfuerzo de fluencia,  $S_y$  según la norma ASTM E 8M-04. La determinación de las curvas S-N-P se ha realizado a través del método de Maennig, Se utilizó fatiga rotatoria, por ser esta técnica de fatiga, la que produce mayores esfuerzos en la periferia de la probeta, que es donde interesa realizar la evaluación de la resistencia a fatiga. Se determinó tanto el intervalo de transición como el de vida finita, calculándose en cada caso las probabilidades de fractura de 1, 50 y 99%. Se concluye que la utilización de la metodología de Maennig, permite evaluar de forma relativamente rápida y efectiva, la vida útil a fatiga en los materiales estudiados. Se realizó la caracterización de las microestructuras y se evaluaron las superficies de fractura de las probetas en fallo por fatiga por la técnica de microscopia electrónica de barrido. Por otro lado, los tratamientos térmicos producen en general un aumento en la vida útil a fatiga del acero.

**Palabras claves:** Acero al Carbono, Normalizado, Fatiga, Microscopia, Tracción, Esfuerzo.

<b>NOMENCLATURA</b>	
$\Delta KI$	Intervalo de oscilación del factor de intensidad de esfuerzos
$\Delta K_{th}$	Umbral de fatiga
$\Delta \sigma_l$	Intervalo de esfuerzos locales en el lugar de nucleación de la grieta
F	Fatiga
KC	Tenacidad de fractura del material
$M_f$	Momento flector
$N_i$	Número de ciclos de la iniciación de la grieta
$N_g$	Numero de ciclos
$N_t$	Vida total de servicio
$N_p$	Número de ciclos de propagación o crecimiento
$P_f$	Probabilidad de fractura
R	Relación de esfuerzo o razón de carga
$\sigma$	Esfuerzo
$\sigma_a$	Amplitud de esfuerzo
$\sigma_c$	Esfuerzo crítico de fractura
$\sigma_i$	Esfuerzo en el fondo de entalla antes de iniciarse la grieta de fatiga
$\sigma_m$	Esfuerzo medio
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Esfuerzo máximo
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Esfuerzo mínimo
$\sigma_p$	Esfuerzo en el fondo de entalla después de iniciarse la grieta de fatiga
$\sigma_r$	Intervalo de esfuerzo
$\sigma_{ys}$	Límite elástico
$\varphi$	Transformada de la probabilidad de fractura
$k_t$	Factor de concentración de esfuerzos
$n$	Número total de probetas de cada nivel de esfuerzo
$r$	Número de probetas en fallo

## Índice general

<b>CERTIFICADO DE APROBACIÓN .....</b>	<b>iii</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>iv</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>v</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>vi</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice general .....</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de tablas.....</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>xii</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>CAPITULO I.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Título del trabajo .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 Planteamiento del problema .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Objetivo general.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4 Objetivos específicos .....</b>	<b>19</b>
<b>1.5 Limitaciones.....</b>	<b>19</b>
<b>1.6 Alcance .....</b>	<b>19</b>
<b>1.7 Justificación.....</b>	<b>20</b>
<b>1.8 Antecedentes preliminares .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPITULO II .....</b>	<b>25</b>
<b>Bases Teóricas.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Normalizado .....</b>	<b>26</b>
<b>Factores que influyen .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2 Fractura por fatiga .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3 Descripción de los esfuerzos cíclicos.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4 Cinética de la fatiga .....</b>	<b>32</b>
<b>2.5 Criterio de fractura total.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6 Etapas en el crecimiento de las grietas de fatiga.....</b>	<b>35</b>
<b>2.7 Resistencia y límite de fatiga.....</b>	<b>38</b>

2.8	Influencia del estado superficial y del ambiente .....	39
2.9	Caracterización de la velocidad de crecimiento de grieta según la mecánica de la fractura elástico-lineal (MFEL).....	40
2.10	Fractografía de la fractura por fatiga.....	41
2.11	Curvas S-N-P.....	43
2.12	Proceso analítico de la metodología de <i>Maennig</i> .....	45
2.13	Intervalo de transición.....	46
2.14	Intervalo de vida finita .....	48
2.15	Ajuste de la curva S-N-P .....	50
<b>CAPITULO III.....</b>		<b>52</b>
3.1	Nivel de investigación .....	52
3.2	Diseño de la investigación.....	52
3.3	Población y muestra.....	53
3.4	Tipo de muestreo.....	53
3.4.1	Muestreo probabilístico .....	53
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	53
3.6	Estudio del acero .....	54
3.8	Tratamiento térmico .....	56
3.9	Ensayo de tracción.....	57
3.10	Ensayo de fatiga .....	57
3.10.4	Ajuste de curva S-N.....	63
3.11	Análisis microscópico.....	65
<b>CAPITULO IV .....</b>		<b>68</b>
<b>Resultados y análisis de resultados .....</b>		<b>68</b>
4.1	Acabado superficial.....	68
4.2	Ensayos a tracción .....	69
4.3	Ensayo de Fatiga.....	71
Régimen de transición.....		73
Vida Finita.....		76
4.4	Ajuste de la curva S-N.....	84

<b>4.5 Metalografía.....</b>	<b>87</b>
<b>4.6 Fractografía .....</b>	<b>91</b>
<b>CAPITULO V.....</b>	<b>95</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>95</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>96</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>98</b>

## Índice de tablas

Tabla 2. 1 Propiedades mecánicas típicas de los aceros al carbono.....	26
Tabla 2. 2 Valores de R para distintas condiciones de carga .....	32
Tabla 3. 1 Composición química del acero AISI 1045 .....	55
Tabla 3. 2 Valores d y m para el uso de la técnica de bordes .....	62
Tabla 3. 3 Valores de Sa2/Sa1 variando con K y $\phi$ .....	63
Tabla 4. 1 Resultados de la medición de rugosidad en las probetas de acero AISI 1045 después de pulidas .....	68
Tabla 4. 2 Esfuerzos mecánicos del acero AISI 1045 en condición original.....	69
Tabla 4. 3 Dimensiones de las probetas de tracción AISI 1045.....	69
Tabla 4. 4 Resultados obtenidos en el ensayo de tracción .....	70
Tabla 4. 5 Promedios y desviación estándar de los esfuerzo de ultimo y máximo.....	70
Tabla 4. 6 Cálculo del momento flector.....	72
Tabla 4. 7 Pruebas para obtener el esfuerzo a utilizar en el régimen de transición. ....	72
Tabla 4. 8 Datos del régimen de transición en el nivel de carga.....	73
Tabla 4. 9 Datos del régimen de transición en el 2do nivel de carga.....	75
Tabla 4. 10 Datos de vida finita en el 1er nivel de carga .....	77
Tabla 4. 11 Datos de vida finita en el 2do nivel de carga .....	77
Tabla 4. 12 Datos de vida finita en el 3er nivel de carga .....	78
Tabla 4. 13 Probabilidad de fractura y la transformada de la probabilidad evaluada en 296,80 MPa.....	79
Tabla 4. 14 Probabilidad de fractura y la transformada de la probabilidad evaluada en 337,33 MPa.....	80
Tabla 4. 15 Probabilidad de fractura y la transformada de la probabilidad evaluada en 383,27 MPa.....	81
Tabla 4. 16 Limites de fatiga obtenidos de las curvas S-N-P .....	83
Tabla 4. 17 Valores obtenidos usando SciDavis para realizar ajuste hiperbólico .....	84

## Índice de figuras

Figura 2. 1 zona de temperatura ara tratamientos térmicos .....	28
Figura 2. 2 Forma de la carga cíclica o periódica .....	30
Figura 2. 3 diagrama de crecimiento de grieta en cada ciclo Ramírez (2010).....	41
Figura 2. 4 Ejemplo de dispersión de resultados para el ensayo de fatiga.....	44
Figura 2. 5 Diagrama S-N-P.....	44
Figura 2. 6 Grafica Pf - S(MPa).....	47
Figura 2. 7 Ajuste lineal de los datos experimentales .....	47
Figura 2. 8 Ajuste de los puntos para obtener la recta .....	49
Figura 2. 9 Ejemplo de las curvas obtenidas de la probabilidad de fractura del material .....	50
Figura 2. 10 Ajuste de puntos a las probabilidades de rotura Pf.....	50
Figura 3. 1 Rugosímetro.....	55
Figura 3. 2 Ejemplo de la muestra siendo medida en el rugosímetro .....	56
Figura 3. 3 Horno para realizar el tratamiento térmico .....	57
Figura 3. 4 Probabilidad de fractura vs. Esfuerzo aplicado. Tomado de Anales de mecánica de la fractura A. Monsalve, N. Valencia, M. Páez, Y. Sepúlveda, 2003 .....	63
Figura 3. 5 Equipo utilizado para el ensayo de fatiga en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.....	64
Figura 3. 6 Microscopio Óptico .....	66
Figura 3. 7 Microscopio electrónico de barrido .....	67
Figura 4. 1 probabilidad de fractura vs. Esfuerzo aplicado.....	75
Figura 4. 2 Ajuste lineal de datos experimentales para el cálculo de N1%, N50% y N99% evaluado en 296,80 Mpa.....	79
Figura 4. 3 Ajuste lineal de datos experimentales para el caculo de N1%, N50% y N99% evaluado en 337,33 Mpa.....	81
Figura 4. 4 Ajuste lineal de datos experimentales para el calculo de N1%, N50% y N99% evaluado en 383,27 Mpa.....	82
Figura 4. 5 Curva S-N-P del acero AISI 1045 en condiciones de normalizado .....	83
Figura 4. 6 Ajuste hiperbólico de las curvas S-N-P .....	85
Figura 4. 7 Curva S-N del acero AISI 1045. Condicion original. Castellanos y Rodriguez. (2009) .....	86
Figura 4. 9 Microestructura de acero AISI 1045. Condición original 400X.....	87
Figura 4. 10 Microestructura del acero AISI 1045. Condición original 1000X .....	88

Figura 4. 11 Microestructura del acero AISI 1045. Condición normalizado fatigada a alto ciclaje 400X (S=271,63 Mpa) .....	89
Figura 4. 12 Microestructura del acero AISI 1045. Condición normalizado fatigada a alto ciclaje 1000X (S=233,64 Mpa) .....	89
Figura 4. 13 Microestructura del acero AISI 1045. Condición normalizado fatigada a bajo ciclaje 400X (S=383,55 Mpa) .....	90
Figura 4. 14 Microestructura del acero AISI 1045. Condición normalizado fatigada a bajo ciclaje 1000X (S=383,55 Mpa) .....	90
Figura 4. 15 Macrofotografía de Acero AISI 1045. Condición normalizado fatigadas en alto ciclaje (S=233,64 Mpa) .....	92
Figura 4. 16 Microfotografía del Acero AISI 1045. Condición normalizado fatigada en alto ciclaje 500X (S= 233,64 Mpa).....	93
Figura 4. 17 Macrografía del Acero AISI 1045. Condición normalizado a bajo ciclaje (S= 383,55 Mpa) .....	93
Figura 4. 18 Microfotografía del Acero AISI 1045. Condición normalizado a bajo ciclaje 500X (S=383,55 Mpa) .....	94

## INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la fatiga en los metales se viene estudiando desde mediados del siglo XIX al observar que un metal sometido a esfuerzos fluctuantes podía fallar aún al aplicársele un esfuerzo mucho menor al requerido para su fractura, falla que generalmente se produce luego de un período considerable de servicio del material. Motivado al gran avance tecnológico, así como también a las exigencias cada vez mayores en cuanto a la eficiencia de las máquinas, es que este fenómeno ha adquirido gran importancia en estos últimos años ya que se encuentra presente en: automóviles, aviones, barcos, compresores, bombas, turbinas, puentes, etc.

El estudio de la fatiga normalmente se lleva a cabo bajo la aplicación de cargas o niveles de esfuerzo constante. Sin embargo, en la vida real las condiciones de servicio sobre los componentes o piezas consisten de historiales de esfuerzo en donde las cargas no poseen una amplitud constante, es decir el daño progresivo en el material se produce a diferentes niveles de esfuerzos cíclicos cada uno de los cuales produce un daño sobre el componente.

Uno de los enfoques clásicos en el estudio de fatiga lo constituye el trazado de la curvas S-N, es decir, esfuerzo-número de ciclos. Esta metodología fue propuesta por A. Wohler, en el siglo XIX. Desde entonces, ha sido uno de los procedimientos más consagrados en el estudio de fatiga, debido a la facilidad en el trazado de las curvas S-N y a la simplicidad de su interpretación. Sin embargo, presentan el inconveniente de que usualmente en ingeniería es preciso trabajar en condiciones de servicio tales que aseguren una probabilidad de fractura por fatiga inferior al 1%. Por esta razón, es preciso incorporar a la metodología de Wohler un tratamiento estadístico que haga posible el trazado de las curvas S-N-P (esfuerzo-número de ciclos-probabilidad de fractura). Lo referente a la determinación de la curva de

probabilidad de fractura, tiene su origen en la alta dispersión que poseen los ensayos de fatiga.

A continuación como están estructurados los capítulos de la investigación:

En la primer capítulo se presenta un título con un planteamiento del problema seguido de el objetivo general, los objetivos específicos, limitaciones, alcance, justificación y por ultimo los antecedentes preliminares.

En el segundo capítulo se presentan las bases teóricas del acero, normalizado, proceso de fractura por fatiga, etapas del crecimiento de la grieta, fractografía de la fractura por fatiga, análisis estadístico de la fatiga, proceso analítico e la metodología de Maennig.

En el tercer capítulo se explica cómo se realiza la investigación, identificando el nivel de la investigación, diseño de la investigación, población y muestra, el tipo de muestreo, estudio del material, acabado superficial, tratamiento térmico, ensayo de fatiga, análisis microscópico y estudio de la superficie de fractura.

El cuarto capítulo está destinado a la presentación de resultados y análisis de resultados.

El quinto capítulo se dedica a las conclusiones y recomendaciones.

# CAPITULO I

## 1.1 Título del trabajo

Determinación de la curva S-N-P a través del método Maennig en el ensayo de fatiga para el acero AISI 1045 sometido a tratamiento térmico de normalizado

## 1.2 Planteamiento del problema

Desde hace varias décadas el acero al carbono es el más común, económico y aplicable de los metales que se emplean en la industria. Tienen una ductilidad excelente, lo que permite que se utilicen en la fabricación de diversos objetos desde el más corriente hasta el instrumento más sofisticado.

Gracias a sus excelentes propiedades mecánicas, tienen una gran gama de aplicaciones por lo tanto con estos se pueden fabricar carrocerías de automóviles, plataformas petroleras, cámaras catalíticas, clips de las oficinas, soportes de los circuitos integrados, estructuras de construcción, máquinas y la mayoría de los componentes móviles que en ellas coexisten y que se utilizan en toda la industria y sin ellos, no sería posible el arranque de cualquier empresa o la puesta en marcha de una línea de producción, ya que son estos, los ejes, árboles de transmisión, ruedas, bielas, los que tienen el importante trabajo de mantener en movimiento las industrias, trabajando turnos completos y sometidos a esfuerzos variable que se repiten cada cierto tiempo, lo que conduce a la reducción de su vida útil, por efectos de la fatiga.

Las industrias, se preocupan por el mantenimiento predictivo, este tiene como objetivo disminuir las paradas por mantenimiento, y de esta manera minimizar los costos por mantenimiento y de no producción. Cuando se hace necesario se recurre al

mantenimiento preventivo, el cual tiene lugar antes de que ocurra una falla o avería. Se realiza por la experiencia del personal a cargo, los cuales son los comisionados de determinar el momento necesario para llevar a cabo dicho procedimiento. Pero este tipo de mantenimiento no tiene instaurado un cronograma confiable para implementarlo y puede en algunos casos, llegar a ocurrir fallas inevitables por diferentes causas. Una de las causas más comunes y que ha tenido un lugar muy importante en estudios, es la fatiga, ya que ocasiona rotura en los materiales metálicos y esto ha motivado una gran preocupación pues ésta ocurre de repente y en todos los casos suele ser catastrófica.

Por éstas dos últimas razones a través de la historia el hombre ha tratado de mejorar las materias primas realizando aleaciones y sometiénolos a ciertos tratamientos térmicos con el fin de que reúnan una serie de propiedades que los hagan aptos para adoptar sus formas futuras y ser capaces de soportar los esfuerzos a los que van a estar sometidos, para obtener los resultados ideales en los diversos usos, como mejores propiedades de resistencia a la corrosión; aceros más soldables más resistentes, etc.

Pero la mayoría de las veces y dependiendo del manejo que se le vaya a dar, aún con todas estas precauciones para que el material sea mejor, los diseñadores incurren en sobrediseño de las piezas para garantizar el buen funcionamiento de éstas, pero esta medida de cautela tiene un costo muy elevado y como en el transcurrir del tiempo, lo que se desea es optimizar procesos de fabricación, se hace indispensable contar con una metodología más confiable de predecir el momento de falla de los materiales, que las técnica hasta ahora utilizadas, una de las cuales consiste en colocar uno de los extremos de una probeta cilíndrica maquinada, sujeta al eje de un motor, en el extremo opuesto se suspende un peso, el efecto que ocurre con esto es la superficie superior está sometida a un esfuerzo máximo, y la superficie inferior a compresión máxima luego al girar 90° las superficies mencionadas quedan libres de cualquier tensión, al girar nuevamente 90°, la superficie que estaba a sometida a

esfuerzo ahora está a compresión y la de compresión ahora está a esfuerzo y así mientras la probeta va dando vueltas se produce este ciclo de máxima tracción, cae hasta máxima compresión, luego de un número considerable de ciclos, la probeta puede fallar. Generalmente, se prueba una serie de muestras a diferentes esfuerzos. Los resultados de este ensayo se presentan graficando el esfuerzo en función del número de ciclos para la falla, pero ésta forma de realizar el ensayo permite conocer solamente en un 50% si la probeta fallará o no.

Por lo tanto aunque este tipo de enfoque todavía es válido y se utiliza, esto nos impulsa a conocer de manera confiable la probabilidad de falla de un material, lo cual se localiza en el método Maennig, el cual evalúa de forma independiente el intervalo de transición y el intervalo de vida infinita, lo principal de esta evaluación es que puede ser modelada, por una distribución de tipo normal logarítmica, de manejo bastante sencillo; la evaluación del rango de transición exige que se fije un número de ciclos y se estudie cómo varía la probabilidad de falla con respecto a la carga aplicada. Con respecto a la evaluación del intervalo de vida infinita, es más sencillo, ya que esta vez la variable independiente es la carga y la dependiente el número de ciclos. Luego de una serie de transformaciones se obtiene una tabla con 3 curvas de 10%, 50% y 90% de probabilidad de falla, con respecto a la carga y al número de ciclos.

Por lo descrito anteriormente, se ratifica la necesidad de conocer de manera muy confiable y con un número pequeño de probetas, la probabilidad de falla de un material como es el acero, en este caso el AISI 1045 sometido a un tratamiento térmico de normalizado.

### **1.3 Objetivo general**

Determinar la curva S-N-P a través del método Maennig en el ensayo de fatiga para el acero AISI 1045 sometido a un tratamiento térmico de normalizado.

#### **1.4 Objetivos específicos**

1. Obtener datos mas confiables sobre el comportamiento a fatiga para este tipo de acero sometido a tratamiento térmico de normalizado
2. Determinar las propiedades mecánicas del acero AISI 1045 en condición original y con tratamiento térmico de normalizado.
3. Estudiar la superficie de fractura del material sometido a fatiga con ayuda de microscopia electrónica de barrido (MEB).
4. Comparar los resultados obtenidos de los ensayos por el método tradicional de otros autores con los obtenidos en el método Maennig.

#### **1.5 Limitaciones**

- La poca disponibilidad del equipo, ya que en las instalaciones de la Universidad de Carabobo sólo existe una máquina, unido a esto existen las dificultades de horario ya que hay otras personas que también la necesitan.
- Para que los ensayos se realicen de la manera correcta, es necesario que las probetas sean maquinadas a través de un torno CNC, para que no posean una alta rugosidad en la superficie, que pueda formar grietas y ruptura prematura.
- Los altos costos que acarrea un maquinado por CNC

#### **1.6 Alcance**

Para este estudio se trabajará únicamente con acero AISI 1045 en condición de normalizado, las probetas a utilizar serán sometidas a ensayo de fatiga mediante el

método Maennig; con el cual se observará su comportamiento, y se obtendrán las curvas S-N-P, las cuales podrán ser utilizados para futuros estudios. Y se realizará una comparación de los resultados obtenidos por otros autores, por el método tradicional. En esta ocasión serán usadas 60 probetas.

## **1.7 Justificación**

Es indispensable conocer el comportamiento a fatiga del acero AISI 1045, ya que es uno de los materiales más utilizados para la fabricación de elementos móviles (como ejes) para las maquinarias y están sometidos a altos ciclos de operación.

Pero el método tradicional de obtención del comportamiento a la fatiga no es muy confiable, ya que arroja resultados que bajo determinada cantidad de ciclos, tiene una probabilidad del 50% de fallar. (Monsalve, et al. 2003)<sup>b</sup>

En cambio por el método Maennig, se obtienen resultados de probabilidad de falla entre un 20% y 10%, lo cual en comparación con el método tradicional es mucho menor, por lo tanto realizar los ensayos por este método tiene más ventajas, con respecto a la información que se puede manejar a la hora de diseñar cualquier elemento.

## **1.8 Antecedentes preliminares**

Monsalve et al., (2003)<sup>a</sup> analizan la vida útil a fatiga en probetas de la aleación de aluminio aeronáutico 7075 T7351, sometidas a distintos tratamientos superficiales, utilizando para ello la modalidad de fatiga rotatoria. Los tratamientos superficiales analizados son aquellos destinados a la protección contra la corrosión en este tipo de aleaciones, de acuerdo a la práctica industrial utilizada normalmente. Teniendo en cuenta que el tratamiento superficial modifica la superficie del metal, se optó por la modalidad de fatiga rotatoria por ser ésta la que genera los máximos esfuerzos en la

periferia de las muestras. Los resultados de la evaluación de la respuesta a fatiga rotatoria en probetas sometidas a estos tratamientos superficiales, se comparó con los resultados correspondientes a la aleación sin tratar. El análisis estadístico de las curvas S-N-P (esfuerzo, número de ciclos, probabilidad de fractura) se realizó empleando el método de Maening, lo que permitió generar cada curva a partir de un total aproximado de 50 probetas. Los fenómenos de fatiga presentan una componente significativa de dispersión, razón por la cual debe recurrirse a un análisis estadístico de los datos. El anodizado crómico produce sólo una disminución leve en la vida útil a fatiga, manifestándose en una disminución promedio de 10 MPa. El anodizado sulfúrico no afecta la vida a fatiga, como ha quedado de manifiesto al examinar los resultados experimentales del presente estudio. Esto hace que el anodizado sulfúrico es una de las mejores alternativas si lo que se pretende es remplazar el anodizado crómico.

Monsalve, et al., (2003)<sup>b</sup> ilustran las curvas S-N-P en fatiga rotatoria de las aleaciones de aluminio 2024-T3 y 7075-T7351, refleja de manera clara cómo es y cómo deben ser realizados paso a paso los estudios de fatiga con el método de Maennig. Igualmente que es posible a través del empleo del método de Maennig, la determinación de las curvas S-N-P utilizando un número reducido de probetas. Concluye que: el efecto del tratamiento superficial sobre las aleaciones de aluminio es posible de investigar a través de la determinación de las curvas S-N-P. la morfología de las superficies de fractura muestran un micromecanismo dúctil-frágil para las dos aleaciones. En efecto, es posible advertir la presencia de partículas que dan origen a cavidades, es decir, zonas de microductilidad. Por otra parte, es posible observar la presencia de zonas de microfragilidad, lo cual queda de manifiesto por la presencia de facetas típicas de fractura frágil.

Monsalve, et al., (2003)<sup>c</sup> evalúan nuevamente las aleaciones de aluminio aeronáutico, a través del método de Maennig, poniendo énfasis en el análisis estadístico necesario para la determinación del límite de fatiga. Se estudió el efecto

del tratamiento superficial de desengrase, que se utiliza en la industria aeronáutica, sobre la respuesta a fatiga de este tipo de material. Este tratamiento de desengrase es el previo a los tratamientos de decapado y anodizado, los que se usan para aumentar la resistencia a la corrosión en este tipo de aleación. Se efectuaron para esto, ensayos sobre viga rotatoria, determinándose las curvas de isoprobabilidad de falla de acuerdo al método ya especificado. Explica nuevamente y con detalle el método de Maennig, y concluye que: la respuesta a fatiga de la aleación de aluminio 2024-T3 de amplio uso en aeronaves, a través del método propuesto por W. Maennig, que permite construir las curvas de isoprobabilidad de fractura con un buen nivel de exactitud y relativamente bajo número de probetas. Los resultados obtenidos se encuentran de acuerdo a los resultados publicados por otros autores y permiten iniciar la siguiente etapa de esta investigación que consiste en evaluar el impacto de distintos tipos de anodizado sobre la vida útil a fatiga de distintas aleaciones de aluminios aeronáuticos.

Este y Sáenz (2004) estudiaron el comportamiento a fatiga de aceros de medio y bajo carbono (AISI 1020, AISI 1030, AISI 1045). Los ensayos de fatiga se realizaron en condiciones de flexión rotativa. Se utilizaron barras calibradas de acero de media pulgada de diámetro (1/2") y las probetas fueron maquinadas de acuerdo a la norma ASTM E-606. Se determinó que tanto la resistencia a la fatiga como el límite de fatiga incrementan a medida que aumenta el porcentaje de carbono. Al observar las superficies de fractura de las probetas rotas de fatiga, por la técnica de microscopía electrónica de barrido, se determinó que el mecanismo de fractura es mixto por coalescencia de cavidades con presencia de hoyuelos y facetas de clivaje, con presencia de grietas primarias y secundarias. Además, se observó una alta cantidad de porosidades producto del deficiente proceso de desgasificación mediante el cual fue producido el material, lo cual indujo a que las propiedades mecánicas experimentales estén por debajo de las establecidas por el fabricante.

Moreno, et al., (2005) evalúan el efecto de los tratamientos térmicos de recocido y normalizado sobre los aceros AISI 4340 y AISI 4140, a través de ensayos

de fatiga, ensayos de tracción y evaluación de las superficies de fractura, de estos ensayos se concluyó que: a) el tratamiento de normalizado aumento la resistencia a la fatiga de los dos aceros, b) el tratamiento de recocido utilizado fue de alivio de tensiones lo cual disminuyó notablemente la resistencia a la fatiga, c) se determinaron los coeficientes A y n de la ecuación de Basquin y por último que el mecanismo de fractura de los dos aceros recocidos fue frágil denotado por clivaje, en cambio el de los dos aceros normalizados fue mixto formado por hoyuelos y clivaje.

Coronado et al., (2007) estudiaron el comportamiento a fatiga del acero SAE 1045 usando cuatro condiciones superficiales diferentes: pulido, limpieza por chorro con partículas de arena, de alúmina y de acero. Además se aplicaron recubrimientos usando rociado térmico por combustión a probetas limpiadas con chorro de partículas de arena. Se realizaron pruebas de fatiga en flexión rotatoria y la caracterización de la superficie de fractura usando lupa estereoscópica y microscopio electrónico de barrido. En conclusión, el límite de resistencia a la fatiga de las muestras preparadas con arena fue de 458,58 MPa y de las muestras preparadas con alúmina fue de 428,36 MPa, valores superiores a los presentados por las probetas pulidas y sin preparación superficial (422,00 MPa), debido a la inducción de esfuerzos residuales de compresión en la superficie de las probetas. De las muestras preparadas con partículas de acero disminuyeron el límite de resistencia a fatiga (415,44 MPa) comparada con las probetas pulidas, debido a la excesiva deformación plástica causada por grandes partículas con esquinas agudas que dejaron marcas que actuaron como concentradores de esfuerzos y originaron la propagación simultánea de múltiples grietas por fatiga. Este efecto se sobrepuso a la generación de esfuerzos residuales y compresión. De las probetas revestidas presentaron falla por laminación en la interfaz de la capa base con el sustrato, además fallaron por concentración de esfuerzos causados por partículas de arena en la superficie que nuclearon múltiples grietas por fatiga. En los procesos de preparación superficial no se deben reciclar las partículas abrasivas especialmente los perdigones de acero, ya que al fracturarse generan

esquinas agudas produciendo severos concentradores de esfuerzos disminuyendo la resistencia a fatiga de los componentes mecánicos.

## CAPITULO II

### **Bases Teóricas**

Existen diferentes clases de aceros que se pueden producir en función de los elementos que constituyan la aleación, se ha impuesto, en cada país, en cada fabricante de acero, y en muchos casos en los mayores consumidores de aceros, unas normas que regulan su composición y aplicaciones de los mismos. Existen otras normas reguladoras del acero, como la clasificación de AISI (desde hace 70 años, y de uso mucho más extenso internacionalmente), ASTM, 22 DIN, o la ISO 3506.

El acero AISI 1045 es un acero de medio carbono ampliamente utilizado en construcción de elementos de maquinarias, en general que requieran mediana resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo. Responde fácilmente a los tratamientos térmicos de endurecimiento. Posee muy buena maquinabilidad.

Para identificar los aceros: a través de su composición química, se puede utilizar la norma AISI. La Tabla 2.1 relaciona la nomenclatura AISI-SAE con los valores de resistencia, ductilidad, etc. Sirve para relacionar la composición química y las propiedades mecánicas de los aceros.

La dispersión de los resultados es una consecuencia de la sensibilidad de la fatiga a varios parámetros de ensayo y del material que son imposibles de controlar en forma precisa. Estos parámetros incluyen la fabricación de las probetas y la preparación de las superficies, alineamiento de la probeta en el equipo de ensayos, etc.

El estudio de las propiedades mecánicas se utiliza como base para decidir el uso de un material, con tal fin de realizar una aplicación en concreto. En la tabla 2.1 se puede observar propiedades mecánicas de algunos aceros.

**Tabla 2. 1 Propiedades mecánicas típicas de los aceros al carbono**

N° SAE o AISI	Tratamiento	Resistencia a la Tracción $R_m$		Resistencia a la fluencia $R_e$		Elongación %
		Kgf / mm <sup>2</sup>	MPa	Kgf/ mm <sup>2</sup>	MPa	
1010	Laminación en caliente	40-60	276-414	26-45	179-310	28-47
	Laminado en frio	42-58	200-400	23-38	159-262	30-45
1020	Recién laminado	65	448	48	331	36
	Recocido	57	393	43	297	36
1040	Recién laminado	90	621	60	414	25
	Recocido	75	517	51	352	30
	Revenido	116	800	86	593	20
1060	Recién laminado	118	814	70	483	17
	Recocido	91	628	54	483	22
	Revenido	160	110	113	780	13
1080	Recién laminado	140	967	85	586	12
	Recocido	89	614	54	373	25
	Revenido	189	1304	142	980	12

Fuente: Smith 1998

## 2.1 Normalizado

El normalizado es un tratamiento térmico que se emplea para dar al acero una estructura y unas características tecnológicas que se consideran el estado natural o inicial del material que fue sometido a trabajos de forja, laminación, etc. Se hace

como preparación de la pieza para el temple. Por eso la normalización corresponde a un recocido supercrítico con enfriamiento al aire.

El procedimiento consiste en calentar la pieza entre 30 y 50 grados centígrados por encima de la temperatura crítica superior, que en este caso esta alrededor de 900°C y mantener esa temperatura el tiempo suficiente para conseguir la transformación completa en austenita. A continuación se deja enfriar en aire tranquilo, obteniéndose una estructura uniforme.

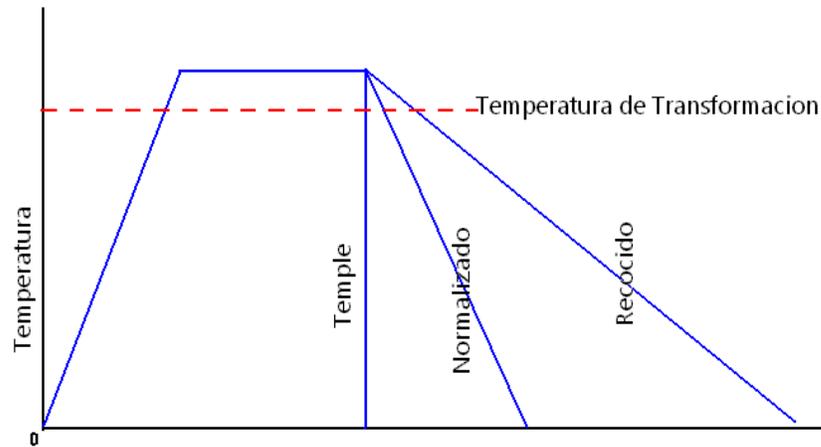
Con lo anterior planteado se puede conseguir una estructura perlítica con el grano más fino y más uniforme que la estructura previa al tratamiento, consiguiendo un acero más tenaz.

Es lo que se llama perlita fina (observar un diagrama TTT, de la fase austenita y posteriormente realizar una isoterma a una temperatura determinada).

### **Factores que influyen**

- \* La temperatura de cristalización no debe sobrepasar mucho la temperatura crítica.
- \* El tiempo al que se debe tener la pieza a esta temperatura deberá ser lo más corto posible.
- \* El calentamiento será lo más rápido posible.
- \* La clase y velocidad de enfriamiento deberán ser adecuados a las características del material que se trate.

Por estos factores, el acero normalizado tiene resistencia y tenacidad un poco más alta y una maquinabilidad más baja que el acero recocido. En la figura 2.1 se muestra un gráfico en el que se destacan las zonas de temperatura utilizadas más comúnmente para la realización de los diferentes tratamientos térmicos.



**Figura. 2. 1 zona de temperatura ara tratamientos térmicos**

## 2.2 Fractura por fatiga

Un material o componente en servicio está sometido a fatiga cuando está solicitado por cargas variables en el tiempo. Desde el punto de vista matemático, la sollicitación se describe mediante la condición, de la ecuación 2.1:

$$\frac{dF}{dt} \neq 0 \quad (2.1)$$

Donde:

dF: variación de la carga

dt: variación en el tiempo

Bajo estas circunstancias, es posible que la fractura ocurra a un nivel de esfuerzo sensiblemente menor que la resistencia a la tracción o el límite elástico correspondiente a una carga estática. Este tipo de roturas de fatiga se produce además súbitamente y sin previo aviso, prácticamente sin deformaciones plásticas aparentes, a diferencia de lo que ocurre con las roturas de piezas o componentes sometidos a carga estáticas, donde siempre existen grandes deformaciones, y es posible remplazar el componente antes de que se produzca la rotura. En cambio, si se estudia la fatiga considerando este fenómeno como un proceso donde sucede daño acumulativo y que se manifiesta por la propagación de grietas, no es posible entender la fatiga sin la presencia de deformaciones plásticas en el extremo de la grieta. Es preciso tener en cuenta que, aunque sea muy pequeño el volumen donde se ejercen los esfuerzos, si estas son suficientemente altas se generará deformación plástica. Si el campo de esfuerzo en el extremo de la grieta fuera de índole elástica, la grieta no podría avanzar, no tendría sentido hablar de propagación estable de la grieta (Sanford, 2003).

La mayoría de los componentes utilizados en estructuras de ingeniería civil y aeronáutica (puentes, aviones y componentes de máquinas) están sometidos a cargas cíclicas o fluctuantes a niveles inferiores de los esfuerzos en los límites elásticos del material utilizado. Sin embargo, a pesar de los bajos niveles de carga utilizados, el daño puede acumularse y producirse la fractura por fatiga. Se estima que alrededor de un 85% de las fracturas frágiles que se producen tienen asociadas un periodo de crecimiento de grietas de fatiga (Sanford, 2003).

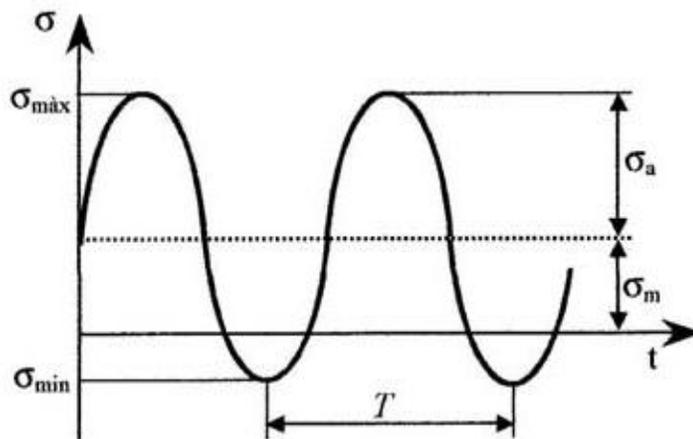
### **2.3 Descripción de los esfuerzos cíclicos**

Dentro de la definición de fatiga se pueden encontrar varias configuraciones de sollicitación dinámica, sin embargo, dentro de las posibles, éste trabajo de investigación se centra en las cargas cíclicas o periódicas. Para definir el esfuerzo cíclico se necesitan varios parámetros: esfuerzo máximo, esfuerzo mínimo, frecuencia y forma de la evolución temporal. Mientras que algunos de ellos afectan mucho al

comportamiento a fatiga del material, otros influyen de manera inapreciable. Así, comúnmente se admite que los valores de esfuerzo máximo y mínimo son parámetros importantes y en cambio, la frecuencia o la forma de la evolución temporal tienen una influencia más bien escasa.

La forma más elemental de representar las cargas periódicas es según una ley senoidal como se muestra en la ecuación 2.2 y su representación gráfica en la figura 2.2:

$$\sigma(t) = A \sin(Ct) + B \quad (2.2)$$



**Figura. 2. 2 Forma de la carga cíclica o periódica**

Donde A, C y B son constantes que dependen del tipo de sollicitación. Los esfuerzos fundamentales que definen las cargas cíclicas son:

Esfuerzo máximo:  $\sigma_{\text{máx}}$  Esfuerzo mínimo:  $\sigma_{\text{mín}}$

En función de las anteriores se pueden definir los siguientes esfuerzos y magnitudes:

Esfuerzo medio ( $\sigma_m$ ): Es el promedio del esfuerzo máximo y mínimo en el ciclo.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.3)$$

Intervalo de esfuerzo ( $\sigma_r$ ): Es la diferencia entre el esfuerzo máximo y mínimo.

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.4)$$

Amplitud de esfuerzo ( $\sigma_a$ ): Se define como la mitad del intervalo de esfuerzo.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.5)$$

Relación de esfuerzo o razón de carga:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.6)$$

De estas relaciones se deduce que:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2} (1 - R) \quad (2.7)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2} (1 + R) \quad (2.8)$$

Conforme a los distintos valores que puede adoptar el parámetro R, se definen varios ensayos de fatiga, según queda recogido en la tabla 2.2. Cuando en las condiciones de fatiga se cumple  $R = -1$ , el esfuerzo medio es nulo y las condiciones de carga se pueden expresar en función de la  $\sigma_a$  ó de  $\sigma_{\max}$ . En el caso de que el esfuerzo medio no sea nulo se necesitan dos variables independientes para especificar el nivel de carga. Algunas combinaciones son  $\sigma_a - \sigma_m$ ,  $\sigma_{\max} - R$  ó  $\Delta\sigma - R$ .

**Tabla 2. 2 Valores de R para distintas condiciones de carga**

<b>R</b>	<b>Condiciones de carga</b>
$0 < R < 1$	Tracción – Tracción $\sigma_{\text{máx}} > 0 \quad \sigma_{\text{min}} > 0 \Rightarrow \sigma_m > 0$
$R = -1$	Tracción – Compresión oscilante (ciclos de inversión completa) $\sigma_{\text{máx}} = - \sigma_{\text{min}} \Rightarrow \sigma_m = 0$

## **2.4 Cinética de la fatiga**

Dependiendo del nivel de amplitud de esfuerzo aplicado al material, se distinguen dos tipos de fatiga: fatiga de bajo número de ciclos (oligofatiga) y fatiga de alto número de ciclos. La fatiga de bajo número de ciclos se caracteriza por los niveles altos de esfuerzo, que provocan una deformación plástica significativa en lugares como entallas, u otros concentradores de esfuerzos, a pesar de que en el conjunto total del componente las deformaciones sean elásticas. Como consecuencia, la fractura por fatiga se produce después de un número relativamente pequeño de ciclos, del orden de unos cientos hasta los  $10^3$  ciclos. Muchas veces para el intervalo bajo de fatiga, muchos diseñadores emplean sólo consideraciones estáticas, ignorando por completo la fatiga del material y empleando únicamente coeficientes de seguridad y esfuerzos permisibles. En el caso de la fatiga de alto número de ciclos, los niveles de carga son muy inferiores a los del límite elástico y la vida total del componente es mayor, superando los  $10^3$ - $10^5$  ciclos.

## 2.5 Criterio de fractura total

La fatiga de alto número de ciclos está caracterizada por tres etapas distintas: a) iniciación de la grieta, b) propagación y c) un periodo inestable de crecimiento rápido hasta la fractura. De este modo, la vida total de servicio de un componente,  $N_t$ , no sólo está determinada por la aparición de la grieta, puesto que esto no significa la inutilidad de la pieza. Un mayor nivel de optimización en ingeniería se consigue considerando la vida de fatiga como la suma del número de ciclos de la iniciación de la grieta,  $N_i$ , y los de su propagación o crecimiento,  $N_p$  (la contribución de la etapa de fractura final es insignificante ya que se produce muy rápidamente) como se muestra en la ecuación 2.9. Es decir:

$$N_t = N_i + N_p \quad (2.9)$$

Las proporciones relativas a la vida total de  $N_i$  y  $N_p$  dependen del material y de las condiciones de ensayo. A niveles bajos de esfuerzo (fatiga de alto número de ciclos), una gran fracción de la vida a fatiga corresponde a la etapa de inicio de la grieta. Cuando se incrementan los niveles de esfuerzo, ni disminuye y las grietas se forman más rápidamente. Así, para fatiga de bajos ciclos (alto nivel de esfuerzos), la etapa de propagación es predominante.

El análisis separado de los ciclos requeridos para la iniciación y el crecimiento de la grieta se justifica por el diferente nivel de la esfuerzo en el fondo de entalla antes y después de iniciarse la grieta de fatiga,  $\sigma_i$ ,  $\sigma_p$ , respectivamente. En 1990 Dowling, N. Determinó que para la relación entre estas esfuerzos y la esfuerzos remotos  $\sigma$ , puede utilizarse el modelo utilizado en resistencia de materiales, considerando que la grieta es una entalla con un determinado radio de curvatura. Dowling N.E. (1990)

De esta forma, antes de iniciarse la grieta de fatiga, el esfuerzo en el extremo A del concentrador de esfuerzos de longitud “a” y radio de curvatura “ρ”, esta conformada por la formulación de la ecuación 2.10:

$$\sigma_i = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (2.10)$$

En el caso de que la grieta esté iniciada el esfuerzo requerido para proseguir la grieta,  $\sigma_p$  se evalúa por la expresión:

$$\sigma_p = 2\sigma \sqrt{\frac{a_p}{\rho_p}} \quad (2.11)$$

Donde  $a_p$  y  $\rho_p$  son la longitud y el radio de curvatura de la grieta. En el supuesto de que se cumpla la relación  $a_i \approx a_p$ , entonces se obtiene:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_i} = \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho_p}} \quad (2.12)$$

Puesto que  $\rho_p$  corresponde a una grieta de fatiga, es del orden de la distancia interatómica, con valores de  $10^{-9}$ m, los esfuerzos en el fondo de la entalla alcanzarán fácilmente los esfuerzos de plastificación, lo que también justifica el mecanismo de crecimiento de las grietas de fatiga con una velocidad mayor que la requerida para su inicio (Ferrer, C. 2003).

## 2.6 Etapas en el crecimiento de las grietas de fatiga

### - Etapa de inicio de la grieta (etapa I):

En la mayoría de los casos, las grietas de fatiga se inician en la superficie donde existen concentradores de esfuerzos como pueden ser rayas superficiales, cantos vivos, ranuras de chaveta, roscas, mellas y otros similares. Además, las cargas cíclicas pueden producir discontinuidades superficiales microscópicas resultado del deslizamiento de dislocaciones (por procesos de deformaciones plásticas locales) (Callister, W.D 2002), las cuales también pueden actuar como concentradores de esfuerzos, y ser lugares de nucleación de grietas. También pueden iniciarse en defectos subsuperficiales tales como defectos de fundición, inclusiones o huecos, grietas de temple, etc. Aunque, independientemente del lugar de nucleación, es importante tener en cuenta que las grietas de fatiga siempre se inician en un defecto estructural o del material.

Según los estudios de Rice (1967), el intervalo de esfuerzos locales en el lugar de nucleación de la grieta,  $\Delta\sigma_l$ , está relacionada con el intervalo de oscilación del factor de intensidad de esfuerzos,  $\Delta KI$ , por la ecuación 2.13.  $\Delta KI$  es un parámetro que representa la fuerza motriz mecánica, e incorpora el efecto del cambio de longitud de fisura y la magnitud de la carga cíclica.

$$\Delta\sigma_l = \Delta\sigma k_t = \left(\frac{2}{\pi^{1/2}}\right) \left(\frac{2\Delta k_l}{r^{1/2}}\right) \quad (2.13)$$

Donde  $r$ , es el radio en el borde de la entalla o grieta inicial,  $\Delta\sigma$  es el intervalo de tensión remota y  $k_t$  es el factor de concentración de esfuerzos.

La experiencia demuestra que la ecuación 2.14:

$$\left(\frac{\Delta k_I}{r^{1/2}}\right) \quad (2.14)$$

Es el principal parámetro que gobierna la etapa de iniciación de la grieta de fatiga. Si el intervalo del factor de intensidad de esfuerzos es muy pequeño, la grieta no crece. A este valor, para el que la grieta no crece, se le denomina “umbral de fatiga”  $\Delta K_{th}$ , que dependerá del material, medio ambiente y de la relación de cargas R. Los valores del umbral para el acero AISI 1045 serán calculados.

Para valores de  $\Delta K$  ligeramente superiores a  $\Delta K_{th}$  la zona plástica todavía es muy pequeña y queda contenida dentro de los granos cristalinos del material, por este motivo la etapa I está fuertemente influida por la microestructura.

En las aleaciones metálicas, la etapa I tiene una extensión muy corta, la grieta se propaga a través de unos pocos granos, en particular, a lo largo de los planos cristalinos de deslizamiento en los que se dan condiciones de altos esfuerzos a cortante. En el caso de materiales dúctiles con superficies muy lisas y/o sometidas a cargas bajas, esta etapa puede suponer aproximadamente el 90% de la vida a fatiga, mientras que en el caso de componentes sometidos a altos esfuerzos y/o con entallas, esta etapa puede despreciarse completamente.

#### **- Etapa de propagación de grieta (Etapa II):**

El comportamiento de la mayoría de los componentes y estructuras bajo cargas de fatiga depende en gran medida de la resistencia a la propagación de la grieta más que del proceso de nucleación. Estos hechos dieron lugar a un enfoque de diseño que requiere el análisis de tolerancia al daño, que consiste en asumir que los materiales no son perfectos, es decir, es necesario asumir que en el interior del material existen grietas que pueden estar localizados con la peor orientación y en el lugar menos deseable. Este tipo de análisis permite garantizar que las estructuras

están diseñadas para asumir la propagación lenta de las grietas hasta que estas alcancen una longitud crítica que pueda ser detectada mediante métodos fiables de ensayos no destructivos. En esta segunda etapa, la propagación de la grieta es en un plano perpendicular a la dirección de aplicación de la carga de tracción, y se propaga como resultado de deformaciones plásticas locales en el fondo de grieta (Callister, 2002, Paris, 1961, Rice 1967), ocurriendo esto durante cada periodo de carga de extensión (cuando el esfuerzo es de compresión la grieta no puede crecer). El tamaño de la zona plástica en el borde de la grieta, en estado de esfuerzo plano, está dado por la expresión de la ecuación 2.15:

$$r_y = \left(\frac{1}{\pi}\right) \left(\frac{\Delta K}{2\sigma_{ys}}\right)^2 \quad (2.15)$$

Donde K es el factor de intensidad de esfuerzos y  $\sigma_{ys}$  es el límite elástico. En el caso de los metales la propagación de las grietas se produce porque en el proceso de tracción se produce deformación plástica en la punta de la grieta a 45° relativos al plano de la grieta y la grieta avanza por un proceso de deformación a cortante, tomando una forma redondeada. En el caso de las aleaciones que contienen inclusiones el flujo plástico genera cavidades o huecos alargados en el entorno de las inclusiones y en estos casos la grieta avanza un poco más rápidamente que antes porque los huecos se unen unos a otros y con la punta de la grieta.

**- Etapa de crecimiento inestable (Etapa III):**

Se caracteriza por un rápido crecimiento de la grieta, con las peculiaridades de la fractura frágil. Según la mecánica de la fractura, la condición de programación inestable de la grieta, que conduce a la fractura frágil, se produce cuando:

$$K = K_c \quad (2.16)$$

El factor de intensidad de esfuerzos (K) en la etapa II alcanza el valor de la tenacidad de fractura del material ( $K_c$ ). En este momento la dimensión de la grieta, a tiene el valor crítico  $a_c$  determinado por la ecuación 2.17:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_c}{Y\sigma_c} \right)^2 \quad (2.17)$$

Donde Y es un factor adimensional y  $\sigma_c$  es la esfuerzo crítica de fractura.

## 2.7 Resistencia y límite de fatiga

### Diagramas de Wöhler

El método más extendido para analizar y predecir el comportamiento a fatiga en el intervalo de la fatiga de alto número de ciclos, es el estudio de la amplitud o del intervalo de la esfuerzo frente al logaritmo del número de ciclos totales a fractura,  $\log N$ . Esta aproximación se denomina análisis de la curva S-N o diagramas de Wöhler (1860), donde S representa en el esfuerzo nominal, calculado a partir de la fuerza o del momento sobre el cuerpo (Wöhler, A.1860). El diagrama S-N puede modelizarse en dos partes; la primera asociada a una relación lineal entre los dos parámetros, (S- $\log N$ ), y la segunda parte en la que se observa un comportamiento asintótico hacia un esfuerzo límite, denominada límite de fatiga,  $\sigma_e$ , esto es, un esfuerzo por debajo de la cual no se produce la fractura por fatiga. En los aceros de construcción, la curva de Wöhler (1860) adopta un curso casi horizontal para  $10^6$  ciclos aproximadamente. A pesar de que ésta ha sido la teoría con la que se ha trabajado en el último siglo, y con la que se sigue trabajando desde el punto de vista del análisis del comportamiento a fatiga de los materiales en ingeniería, estudios recientes realizados por Bathias (1999), han puesto de manifiesto que por encima de los  $10^7$  ó  $10^9$  ciclos es posible que se produzca un nuevo descenso en la pendiente de la curva S-N, debido a que entren en juego en el proceso de fatiga los defectos internos producidos por inclusiones no metálicas.

En la mayoría de los materiales es posible definir una relación entre el límite de fatiga y la resistencia a tracción, que recibe el nombre de coeficiente de fatiga. En el caso de aleaciones férreas (aceros aleados y al carbono), el límite de fatiga representa entre el 35% y el 60% de la resistencia a tracción del material.

Otros parámetros importantes que caracterizan el comportamiento a fatiga de un material en la curva S-N, son la *vida a fatiga*  $N_f$ , que se define como el número de ciclos necesarios para producir una rotura a un nivel determinado de esfuerzos, y el término *resistencia a fatiga*,  $S_f$ , que se utiliza para especificar la amplitud de esfuerzo para un determinado número de ciclos.

## **2.8 Influencia del estado superficial y del ambiente**

Para muchas situaciones de carga, los máximos esfuerzos en un componente o estructura se producen en su superficie. Consecuentemente, la mayoría de las grietas que provocan la fractura por fatiga se originan en defectos en la superficie, que actúan como concentradores de esfuerzos, y hacen descender, con ello, la resistencia a la fatiga del componente. Por este motivo, es muy común que aquellas partes que están sometidos a cargas cíclicas reciban algún tipo de tratamiento superficial, como por ejemplo de pulido, o bien debilitar el efecto de estos concentradores de esfuerzos generando esfuerzos internos de compresión mediante tratamientos de granallado. Con estas técnicas es posible mejorar las características superficiales y en consecuencia el comportamiento a fatiga. Los factores ambientales tanto térmicos como corrosivos también pueden afectar al comportamiento a fatiga de los materiales metálicos, y en particular cuando éstos están sometidos a cargas oscilatorias. Los ambientes corrosivos pueden generar en la superficie pequeñas picaduras que actuarán como concentradores de esfuerzos y serán puntos de nucleación de grietas. En el caso de que en el medio esté presente el hidrógeno, éste favorecerá la velocidad de propagación de las grietas.

## 2.9 Caracterización de la velocidad de crecimiento de grieta según la mecánica de la fractura elástico-lineal (MFEL)

Según se comentó en la sección 2.8, desde el punto de vista del diseño en ingeniería se puede considerar que las grandes estructuras siempre tienen grietas. Lo que se debe asegurar es que la longitud inicial de esas grietas sea inferior a un determinado tamaño que puede detectarse de forma razonable cuando se examina la estructura. Para asegurar la vida estable y/o segura de la estructura se necesita conocer cuánto tiempo (ciclos) aguantará la estructura antes de que una de las grietas alcance una longitud tal que conduzca a un crecimiento rápido.

La propagación de grietas de fatiga se puede medir experimentalmente mediante ensayos de carga cíclica sobre probetas con grietas agudas (ASTM E647-00.2004). Y se define la fluctuación del factor de intensidad de esfuerzos en un ciclo la expresada por la ecuación 2.18:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.18)$$

Según esta expresión la fluctuación del factor de intensidad de esfuerzos aumenta con el tiempo (fijando el intervalo de carga) debido a que la longitud de la grieta crece cuando la carga es de tracción. Experimentalmente se encuentra que el crecimiento de la grieta en cada ciclo,  $da/dN$ , aumenta con  $\Delta K$ , como se muestra en la figura 2.3.

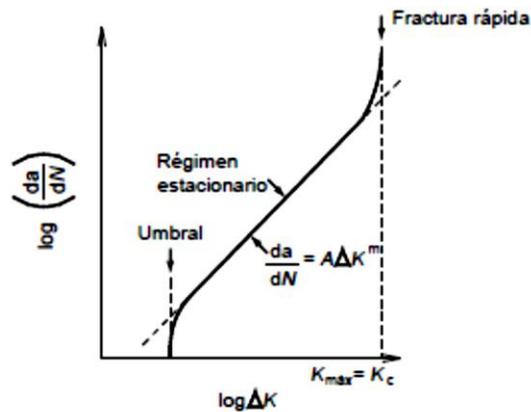


Figura. 2. 3 diagrama de crecimiento de grieta en cada ciclo Ram3rez (2010)

En r3gimen estacionario el crecimiento de la grieta puede modelarse mediante una ecuaci3n exponencial, conocida como Ley de Paris (Paris, P.C. 1960; Paris, P.C. 1961) representada en la ecuaci3n 2.19:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^n \quad (2.19)$$

Donde C y n son valores experimentales que dependen del tipo de material y de las condiciones ambientales.

## 2.10 Fractograf3a de la fractura por fatiga

El aspecto macrosc3pico global de la rotura por fatiga, incluso en metales, puede ser catalogado como un tipo particular de fractura fr3gil, en el sentido de que no hay deformaci3n pl3stica importante asociada con la rotura. Si observamos con detalle esta superficie, es posible encontrar detalles que nos revelan la forma en que se ha producido el avance de la grieta.

Seg3n se ha visto anteriormente, la fractura por fatiga ocurre como resultado de una grieta, que por lo general empieza en alguna discontinuidad en el material o en cualquier lugar que act3a como concentrador de esfuerzos. Seg3n crece la grieta, los

esfuerzos en la sección transversal a la aplicación de carga crecen hasta alcanzar el nivel suficiente para provocar la fractura catastrófica del material. Esta secuencia queda reflejada en la superficie de fractura, y por lo general se encuentran unas regiones con aspecto granulado liso y fino que corresponden al crecimiento estable de la grieta, y otras áreas rugosas asociadas que corresponden a la etapa de fractura catastrófica.

La grieta inicial que se forma es intergranular siguiendo la dirección de los máximos esfuerzos cortantes; es decir, a  $45^\circ$  de los esfuerzos axiales. Por este motivo, la superficie de fatiga que se forma en esta etapa tiene una apariencia plana y sin características.

La etapa de crecimiento de grieta o etapa II, es la zona de fatiga sobre la superficie de fractura y se caracteriza por dos tipos de marcas, denominadas marcas de playa y estrías de fatiga. Las marcas de playa son de dimensiones macroscópicas, visibles en la superficie de fractura a simple vista, y aparecen cuando se producen cambios en la velocidad de propagación de la grieta debido a cambios en la amplitud de esfuerzo. Las estrías de fatiga son de tamaño microscópico y sólo pueden observarse por MEB (microscopio electrónico de barrido) y representan la progresión del frente de grieta en cada ciclo (Callister, W.D. 2002), su ancho depende y se incrementa con el aumento del intervalo de esfuerzos. La presencia de marcas de playa y/o estrías sobre la superficie de fractura confirma que la causa ha sido por fatiga, no obstante, la ausencia de una o de ambas marcas no excluye a la fatiga como causa de la fractura.

La etapa III de la fractura de fatiga tiene lugar cuando la grieta de fatiga alcanza una determinada longitud crítica. En esta etapa, la grieta avanza rápidamente durante un ciclo de carga. Como resultado, después de haber cargado el componente con esfuerzos relativamente bajas, se produce de manera imprevista la fractura, sin ningún tipo de cambio en el aspecto exterior de la pieza. La fractura puede ser dúctil

o frágil; cuando hay evidencias de deformación plástica se tomará como dúctil y en su ausencia como fractura frágil.

El tamaño relativo entre la zona de fractura final en comparación con la zona de fatiga está relacionado con la intensidad de las cargas aplicadas a la estructura. Si el nivel de esfuerzos aplicados ha sido muy elevado, el área de la zona de fatiga es muy pequeña en comparación con la zona de fractura final, y en cambio, cuando se aplican niveles de esfuerzo bajos, se observa que en la superficie de fractura la extensión de la zona de rotura final es muy pequeña.

## **Análisis estadístico de la fatiga**

### **2.11 Curvas S-N-P**

Las curvas de Wöhler o curvas S-N estudian la relación entre el intervalo de esfuerzo (o amplitud de esfuerzo) y el número de ciclos hasta la rotura, de elementos estructurales sometidos a cargas cíclicas que oscilan entre un mínimo  $\sigma_{\min}$  y un máximo  $\sigma_{\max}$ .

Una de las características más importantes de estas curvas es la elevada dispersión de los resultados, como se muestra en el ejemplo de la figura 2.4, donde además se observa que cuando decrece el intervalo de esfuerzo aumenta la dispersión del tiempo de vida a fatiga.

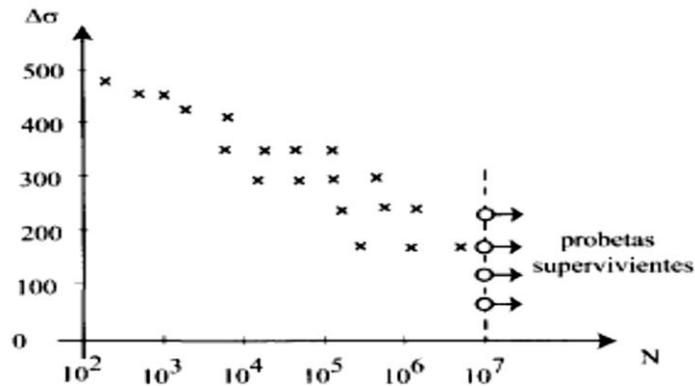


Figura 2. 4 Ejemplo de dispersión de resultados para el ensayo de fatiga

De esta manera se puede decir que el tiempo de vida a fatiga es una variable aleatoria, y por ello, en vez de una única curva media S-N, es más apropiado considerar una familia de curvas percentiles S-N o curvas isoprobables S-N-P, que dividen el mapa S-N en tres regiones, según se presenta en la figura 2.5, y se describen a continuación.

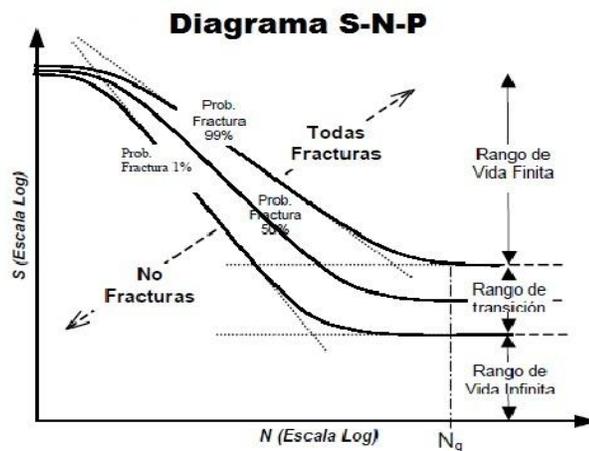


Figura 2. 5 Diagrama S-N-P

### **- Intervalo de vida finita.**

Región definida por encima de la curva del 99% de probabilidad de fractura. Los niveles de esfuerzo asociados a esta zona corresponden a valores para los que siempre se produce la rotura de las probetas.

### **- Intervalo de vida infinita.**

La curva de 1% de probabilidad de fractura determina el llamado intervalo de vida infinita, ya que las probetas con niveles de esfuerzo por debajo de éste valor no se rompen.

### **- Intervalo de Transición.**

Es la región entre los intervalos de vida finita e infinita. En esta región se calcula el límite de fatiga, que se define como el valor de la esfuerzo que conduce a un tiempo de vida a fatiga de  $N_g$  ciclos (número de ciclos tecnológico), para la curva percentil mediana  $P_f = 0,5$ .

## **2.12 Proceso analítico de la metodología de *Maennig***

Para este análisis se ha seguido el método de Maennig, aceptado internacionalmente y respaldado por distintos autores. En particular cabe destacar la tesis doctoral de Segovia (2010) en la cual se explica exhaustivamente la aplicación del método de Maennig, que el autor utilizó en ensayos de fatiga rotatoria de aleaciones de aluminio. Mediante esta metodología probabilística se obtienen curvas S-N-P, incluyendo la probabilidad de fractura como un tercer parámetro y se evalúa en forma independiente el intervalo de transición y el intervalo de vida finita.

### 2.13 Intervalo de transición

La evaluación del intervalo de transición exige que se fije el número de ciclos  $N_g$  y se estudie cómo varía la probabilidad de fractura con respecto a la carga aplicada. En la práctica, se trata de evaluar de forma independiente SFL1 y SFL99, que representan los límites de fatiga del 1% y del 99%. Estos valores delimitan los denominados intervalos de vida infinita y los intervalos de vida finita.

Para evaluar estos límites de fatiga, SFL1 y SFL99, se aplican dos niveles de carga  $S_a$  y  $S_b$ , elegidos de tal manera que en el nivel de carga más bajo  $S_a$ , todas las probetas superen el nivel de ciclos  $N_g$  (todas no rompen) y en el nivel de carga mayor  $S_b$  se produzca el evento contrario, es decir que se fracture antes de  $N_g$ . En este último nivel, se establece un criterio de “pasa - no pasa”, en el cual se contabilizan las probetas que se fracturan antes ( $r$ ) y las que sobreviven a los ciclos  $N_g$ . A cada nivel de carga se le debe asignar una probabilidad de fractura ( $P_f$ ) como se muestra en la ecuación 2.20 y 2.21 según su restricción.

$$P_f = 100 \frac{3r-1}{3n+1} \quad \text{si } r \neq 0 \quad (2.20)$$

$$P_f(r = 0) = 0,5. P_f(r = 1) = 100. (3r + 1) \quad \text{si } r = 0 \quad (2.21)$$

Siendo  $r$  el número de probetas rotas y  $n$  el número total de probetas de cada nivel  $S_i$ . Con la pareja de puntos  $(S_a, P_f^a)$  y  $(S_b, P_f^b)$  se puede representar la probabilidad de fractura  $P_f$  frente a  $S$  (MPa), y se obtiene una curva en forma de S (figura 2.6).

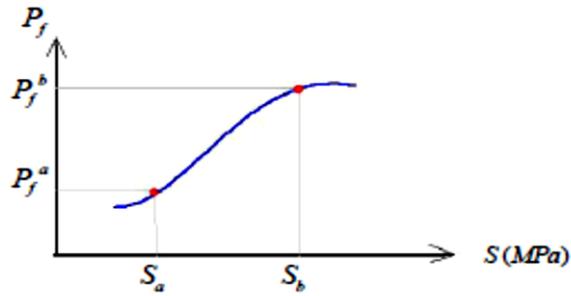


Figura 2. 6 Grafica Pf - S(MPa)

Como ésta relación no es lineal, para hallar una relación lineal entre la probabilidad y el esfuerzo se calcula la transformada de la probabilidad de fractura,  $\psi$ , y el logaritmo del esfuerzo como se expresa en la ecuación 2.22:

$$\psi = \sqrt[3]{\text{Ln}P_f} \quad (2.22)$$

$$\text{Ln}S = \text{Ln}(S) \quad (2.23)$$

De esta forma se obtienen los datos  $\psi^a$  e  $\psi^b$ , y la pareja de puntos  $(\text{Ln}S_a, \psi^a)$  y  $(\text{Ln}S_b, \psi^b)$  pueden ser ajustados por una recta como se puede observar en la figura 2.7.

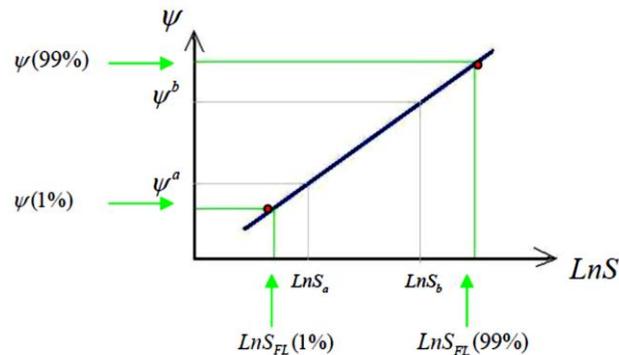


Figura 2. 7 Ajuste lineal de los datos experimentales

Conocida la ecuación de la recta de ajuste (Ec.2.22), es posible extrapolar para calcular los límites de fatiga  $S_{FL1}$  y  $S_{FL99}$ , (Ec.2.23) asociados con la probabilidad de fractura del 1% y del 99%.

$$\psi = A + B \cdot \text{Ln}S \quad (2.24)$$

Donde  $A$  y  $B$  son los coeficientes de ajuste con valores constantes.

$$S_{LF}(1\%) = e^{\left[\frac{-1,664-A}{B}\right]} ; \quad S_{LF}(99\%) = e^{\left[\frac{-0,216-A}{B}\right]} \quad (2.25)$$

## 2.14 Intervalo de vida finita

Para evaluar el intervalo de vida finita se aplican distintos niveles de carga,  $S_m$  y en cada uno se ensayan “ $n$ ” probetas. A diferencia del tratamiento de datos en el intervalo de transición, ahora la probabilidad de fractura se calcula por la expresión (Ec.2.26) y es asignada a cada ensayo.

$$P_f^m(i) = \frac{i-0,417}{n+0,166} \quad (2.26)$$

Donde  $i$  es la numeración de cada probeta, que se determina ordenando las probetas de menor a mayor número de ciclos de rotura, y  $n$  es el número total de probetas ensayadas.

También se obtiene la transformada,  $\psi_i^m$ , para cada probeta dentro del mismo nivel:

$$\psi_i^m = \sqrt[3]{\text{Ln}(P_f^m(i))} \quad (2.27)$$

Y los logaritmos del número de ciclos de rotura para cada ensayo,  $x^m_i$ ,

$$x^m_i = \text{Ln}(N^m_i) \quad (2.28)$$

Representando los puntos  $(x^m_i, \psi^m_i)$  se obtiene una recta del tipo (figura 2.8):

$$\psi^m = A + B \cdot x^m \quad (2.29)$$

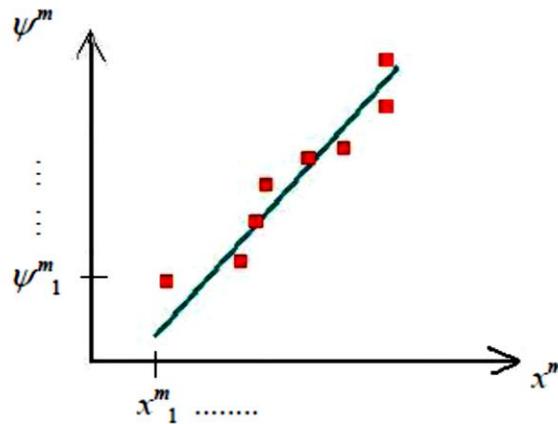


Figura 2. 8 Ajuste de los puntos para obtener la recta

Ahora se pueden calcular los valores del número de ciclos correspondientes a las probabilidades de rotura del 1%, 50% y 99% para el nivel  $m$ .

Luego, se realiza el mismo proceso cuantas veces sea necesario, en los niveles de carga que se consideren (figura 2.9). En cada nivel se obtienen valores del 1, 50 y 99% de la probabilidad de fractura del material.

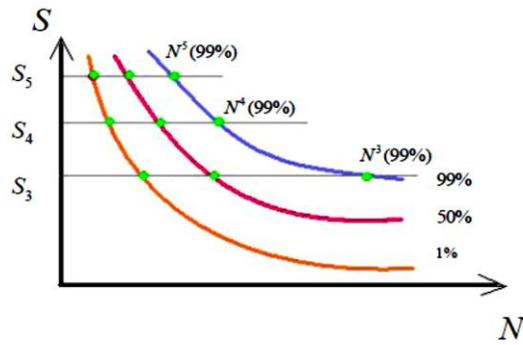


Figura 2. 9 Ejemplo de las curvas obtenidas de la probabilidad de fractura del material

### 2.15 Ajuste de la curva S-N-P

Se ajustan todos los puntos obtenidos hasta ahora del tipo  $(S_m, N^m)$  a las tres curvas  $S - N$  correspondientes a las probabilidades de fractura ( $P_f$ ) del 1% , 50% y 99% como se muestra en la figura 2.10:

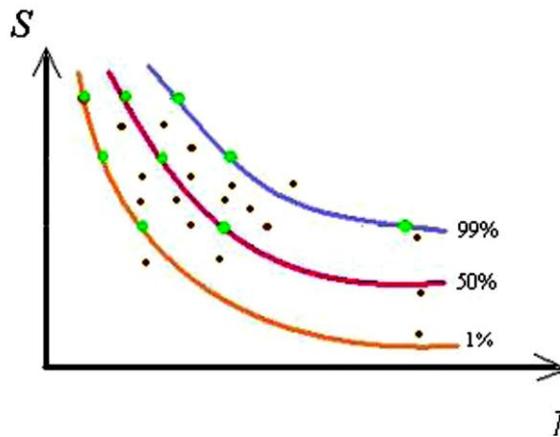


Figura 2. 10 Ajuste de puntos a las probabilidades de rotura  $P_f$

Los datos de probabilidad del 1%, 50% y 99% pueden ser ajustados con la ecuación hiperbólica:

$$(\log N + B)(\log S + D) = A \quad (2.29)$$

Donde A, B y D son las constantes de ajuste.

Los métodos de ajuste gráficos varían en relación a los estudios realizados por Wöhler, Basquin, Stromeyer, Palmgren, Weibull, demostrando que en ocasiones existe dos constantes fijando el coeficiente  $B$ , y en otros estudios permiten al menos tres puntos característicos de cada curva ( $S_m, N^m$ ), ajustándose a curvas de diferentes tipos y calculando los coeficientes  $A, B, C$  de manera independiente.

En principio, se utilizan como puntos contrastados los llamados *puntos Maening* (los calculados en el examen del intervalo de vida a fatiga, más los puntos obtenidos en la evaluación del intervalo de transición).

## **CAPITULO III**

### **3.1 Nivel de investigación**

Para llevar a cabo este proyecto de investigación se debe establecer el nivel de profundidad que se alcanzó, para dar respuesta al problema planteado.

La investigación que se realizó fue de dos tipos:

Esta será descriptivo, ya que por las características y propiedades del material a investigar se establece su comportamiento al fenómeno de fatiga con tratamiento térmico de normalizado, por lo tanto también se describirán las características de la estructura metalográfica del acero a estudiar y de cómo se propaga la grieta a través de la superficie. Por último será explicativo, porque inmediatamente de realizado el análisis del fenómeno de fatiga, se determinó la relación entre el tratamiento térmico de normalizado y el fenómeno.

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

Para lograr cumplir con los objetivos anteriormente planteados se aplicaron dos tipos de investigaciones, las cuales se clasifican en: investigación documental, basada tanto en trabajos de investigación de pre y post grado, consultas bibliográficas, esto como estrategias para dar respuesta al planteamiento del problema, y también investigación experimental, basada en los datos que se obtendrán en el laboratorio mediante observaciones del ensayo de fatiga con probetas apropiadas y observaciones microscópicas.

### **3.3 Población y muestra**

Las probetas del acero AISI 1045 a ensayar serán consideradas como los elementos de la población, pero para que una probeta sea tomada como parte de la muestra la fractura debe ocurrir en una zona definida y establecida por parámetros y especificaciones de los investigadores.

### **3.4 Tipo de muestreo**

#### **3.4.1 Muestreo probabilístico**

Forman parte de este tipo de muestreo todos aquellos métodos para los que puede calcular la probabilidad de extracción de cualquiera de las muestras posibles. Este conjunto de técnicas de muestreo es el más aconsejable, aunque en ocasiones no es posible optar por él. En este caso se habla de muestras probabilísticas, pues no es en rigor correcto hablar de *muestras representativas* dado que, al no conocer las características de la población, no es posible tener certeza de que tal característica se haya conseguido.

### **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 realizaran observaciones a través del microscopio, toma de fotografías y se obtendrán datos directamente del ensayo de fatiga. Los instrumentos utilizados para la recolección de datos son tablas, gráficas y fotografías que resulten de los diferentes ensayos de laboratorio.

### 3.6 Estudio del acero

#### 3.6.1 Material

El material utilizado para la investigación es un acero de medio carbono AISI 1045, el cual será 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 Sumindu, empresa Venezolana dedicada a la distribución de aceros especiales, inoxidable, aleaciones no ferrosas, se presenta en la tabla 3.1. (Ver anexo A)

**Tabla 3. 1 Composición química del acero AISI 1045**

<b>Intervalos de composición química</b>				
Carbono	Azufre	Fosforo	Silicio	Manganeso
C 0,37-0,44	S 0,04 (máx.)	P 0,04 (máx.)	Si 0,15-0,35	Mn 0,60-0,90
Cromo	Níquel	Molibdeno	Vanadio	tungsteno
Cr ----	Ni ----	Mo ----	V ----	W ----

Tabla tomada: Sumindu, 1969

#### 3.6.2 Mecanizado y preparación de probetas para fatiga:

Luego de adquirido el material en barras cilíndricas calibradas de 12,7 mm de diámetro, se procederá a cortarlos en barras de 220mm de longitud, tomando en consideración las medidas indicadas por la norma ASTM E-606 y el manual de máquina de fatiga (considerando condiciones de maquinado, como el refrentado) para luego ser mecanizadas en un torno CNC.

Para la preparación de las probetas de los ensayos de fatiga, se utilizó la norma ASTM E-606 y el manual de instrucciones de la máquina para ensayos de fatiga, así como las recomendaciones recibidas de parte de los profesores y técnicos del laboratorio. La elaboración de las mismas se realizó en un torno CNC, de la empresa FORTOR DE VENEZUELA C.A. (Ver Anexo B) donde se muestran las especificaciones de entrega de las probetas. Con esto se asegura que el acabado superficial, ángulo de la entalla, nivel de rugosidad y diámetro del cuello del entalle, posean una mayor precisión y así no puedan ser causantes de grietas prematuras durante el ensayo, lo cual alteraría significativamente los resultados.

Sin embargo se comprobó la rugosidad del área mecanizada con el rugosímetro del laboratorio de metrología de la Facultad de Ingeniería. Se encontró que la rugosidad estaba por encima de norma ASTM E-606, por lo tanto se procedió a lijar las muestras con lijas de grano fino para disminuir la rugosidad en el área a estudiar cuidando no hacer ningún cambio en el perfil.

Para el mejoramiento del acabado superficial del área en estudio se usa el rugosímetro Marca Mitutoyo, modelo SJ-201P que se encuentra en el laboratorio de metrología de la Facultad de Ingeniería, se tomaron 10 muestras al azar y se les mide la rugosidad en diferentes zonas, con esto verificaremos que estén dentro del valor establecido por la norma de fatiga.



**Figura 3. 1 Rugosímetro**

La norma ASTM E-606 indica que la rugosidad no debe de ser mayor a 0,2  $\mu\text{m}$ , por lo tanto se miden en 10 muestras aleatoriamente si en dichas muestras supera dicho valor, se procede a realizar un desbaste con lijas de grano fino de 240, 280, 360, 400 y 600 en las 60 muestras para obtener un acabado superficial con una rugosidad menor. Se toman nuevamente 10 probetas de forma aleatoria y se pasan por el rugosímetro para verificar la disminución de la misma.



**Figura 3. 2** Ejemplo de la muestra siendo medida en el rugosímetro

### **3.8 Tratamiento térmico**

Una vez preparadas las probetas, se procede a tratarlas térmicamente por normalizado. El tratamiento térmico se realiza calentando las probetas hasta la temperatura requerida a un intervalo entre 800°C y 900°C en el horno marca TEMCO mostrado en la figura 3.3 por 30 minutos, posteriormente sacándolas del horno y dejándolas al aire tranquilo.



**Figura 3. 3 Horno para realizar el tratamiento térmico**

### **3.9 Ensayo de tracción**

Para la obtención de las propiedades mecánicas del acero AISI 1045, se prepararon 10 muestras previamente tratadas térmicamente, luego se procedió a ser ensayadas en la máquina de ensayos universal GALDABINI, se obtuvieron los datos para evaluar las propiedades mecánicas en los puntos máximos y de ruptura; también se obtuvieron algunas características mecánicas como el porcentaje de alargamiento y reducción de área.

### **3.10 Ensayo de fatiga**

#### **3.10.1 Consideraciones sobre el método de Maennig**

Este método divide la curva S-N en el intervalo de transición y en el intervalo de vida finita. Se evalúa en forma independiente el *Intervalo de Transición* y el *Intervalo de Vida Finita*, concentrándose en el intervalo de transición como aporte principal. Como metodología clásica para la evaluación de ambos intervalos se emplea la distribución de Weibull, esta distribución es de un manejo matemático complejo. En cambio, ésta distribución puede ser modelada sin diferencias por medio

de una distribución del tipo normal logarítmica (distribución normal del logaritmo de la variable), de manejo más sencillo.

### 3.10.2 Evaluación del Intervalo de Transición

La evaluación del intervalo de transición exige que se fije un número de ciclos y se estudie cómo varía la probabilidad de fractura con respecto a la carga aplicada. En la práctica, el investigador sólo puede manipular la carga, y el número de ciclos se convierte en una variable dependiente. Para el acero AISI 1045 el número de ciclos con el cual se trabajó fue de  $10^6$  ciclos, considerando este valor como el máximo límite de fatiga para el acero AISI 1045 según Rodríguez, (2010)

Si la distribución de las probabilidades es factible, las cuales puedan ser representadas por una recta a través de una transformación adecuada, teóricamente, esta recta está representada por dos niveles de esfuerzo que tratan de colocarse cerca de los extremos superior e inferior del intervalo de transición. Estudios teóricos y prácticos han demostrado que el método es viable y que los resultados son conservadores. Monsalve, (2003)

El método se comenzó ensayando con una probeta tomada al azar en cualquier nivel de amplitud de carga o esfuerzo ( $S_a$ ) alternado, hasta que alcanzó el número de ciclos  $N = N_g$ , que fue elegido en forma arbitraria antes del ensayo, cuidando que fuese suficientemente alto como para representar al intervalo de transición. Si al llegar a este límite  $N_g$  la probeta no hubiera fracturado, se debía de hacer un ensayo de una nueva probeta con un nivel de carga mayor y así sucesivamente hasta que se fracturase antes de  $N_g$ . En este último nivel de esfuerzo, se realizó el primer ensayo completo, con nueve probetas más, para completar un total de 10 (en general  $n$  probetas) y se estableció un criterio de “*pasa -no pasa*”, en el cual se contabilizó las probetas que se fracturaron antes ( $r$ ) y las que no rompieron en los ciclos  $N_g$ . A este

nivel de carga se le asignó una probabilidad de fractura ( $P_f$ ), la cual se calculó por las ecuaciones (2.20 y 2.21) según el valor de ( $r$ )

El segundo nivel de carga se encontró a una distancia  $D=\Delta S_a$ , que se determinó de la relación 3.1 y 3.2:

$$D = \left(1 - \frac{r}{n}\right) \cdot d \cdot S_a \quad \text{si } r \leq 0,5n \quad (3.1)$$

$$D = \left(-\frac{r}{n}\right) \cdot d \cdot S_a \quad \text{si } r > 0,5n \quad (3.2)$$

Donde  $S_a$  fue la carga del primer nivel ensayado completo y del tamaño estimado del intervalo de transición que se obtuvo de los datos ya tabulados (por Ej. 0,1-0,3 para probetas de geometría suave y 0,05-0,15 si tienen entalle). En éste nivel se ensayaron 10 probetas y se le asignó la probabilidad de acuerdo a las ecuaciones (2.20 y 2.21).

En el momento que se grafica la probabilidad de fractura con respecto al logaritmo de la carga se obtiene una curva en forma de  $S$  usualmente simétrica con respecto al punto de inflexión. Por medio de una transformación apropiada, esta curva en  $S$  se transformó en una línea recta, resultando conveniente para realizar extrapolaciones. Destacando dos transformaciones: la de Probabilidad Acumulativa de Gauss, que está derivada de la Log-normal y que se trabaja a través de tablas y papeles especiales con escala de Gauss; la segunda es la transformación la cual se calculó por la ecuación (2.22).

Ambas transformaciones fueron apropiadas con diferencias menores. La transformación de Gauss se utilizó tradicionalmente, pero su uso es lento y tedioso. Con la introducción de la computación se ha facilitado el uso de la función  $\psi$  que es

simple de programar y graficar. Así, con base a los resultados se obtuvo la carga para una probabilidad del 1% y 99% en forma analítica representando la recta de la forma:

$$y = \sqrt[3]{\ln(P)} = \alpha \cdot \ln(S_a) + \beta \quad (3.2)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  se encuentran con técnicas de mínimos cuadrados.

De esta manera, se definió  $S_a$  como:

$$S_a = e^{\left( \frac{\sqrt{\ln\left(\frac{P_f}{100}\right) - \beta}}{\alpha} \right)} \quad (3.3)$$

Donde  $P_f$  está expresado en %.

Este método entrega resultados confiables mientras más alejados se encuentran los puntos entre si y cerca de los extremos máximos y mínimos, por ejemplo un punto en 10% y el otro en 90%. Si ambos puntos se encuentran en un mismo extremo de la distribución, como: uno en 80% y otro en 90%, o, muy cercanos al 50%, por ejemplo uno 45% y otro en 55%, o en general muy cercanos entre ellos, probablemente los resultados no serian confiables y fuese necesario un tercer punto (con  $n$  probetas más) para que converjan los resultados. Una forma de manejar lo anterior es el parámetro “ $d$ ” en las ecuaciones (3.1 y 3.2). Este debe ser elegido cuidadosamente, ya que de ser muy grande, el segundo nivel podría caer fuera del intervalo de transición y de ser muy pequeño, podrían ambos niveles estar muy próximos o en el mismo extremo. En la presente investigación, dado que se trabajó con probetas de perfil suave (tal como se comenta más adelante), se utilizó  $d = 0,3$ . En la tabla 3.1 se muestra como seleccionar el parámetro “ $d$ ” según la forma de la muestra.

**Tabla 3. 2 Valores d y m para el uso de la técnica de bordes**

Factor	Modelo de muestra	Modelo de lisa	Piezas simples	Piezas como pernos	Forma: Partes complicadas	
					Bien definida	Pobrementemente definida
D	0,05-0,015	0,1-0,3	0,2-0,4	0,4-1,2	0,4-1-?	0,6-?
m	1-1,2	1-1,7	1,4-2	2,2-3,2-?	2,2-3,2-?	2,2-?

Nota: d da una estimación del tamaño de la gama (tecnológico) del intervalo en el régimen de transición, m es un factor multiplicador para aplicar en 10 y da n, el número de muestras necesarias en un nivel (m = 2, n = 20). Fuente: ASM- Metals- Handbook, fatigue and fracture. 1996

### 3.10.3 Evaluación del intervalo de vida finita

La evaluación de este intervalo es similar a la del intervalo de transición, pero más sencillo, ya que esta vez la variable independiente es la carga y la variable dependiente el número de ciclos, que es el modo intuitivo de trabajar con fatiga.

En este intervalo, al aplicar la función de transformación los valores experimentales no se ajustan a una recta de la misma manera como en el de transición. Pero aun así la distribución de Gauss y la transformación  $\psi$  fueron las que mejor se ajustaron. Para la estimación de la probabilidad se utilizó la expresión (2.26) que destaca dentro de algunas utilizadas.

En general, tres niveles con diez probetas cada uno se utilizó para encontrar este intervalo, se les asignó una probabilidad y luego se aplicó la función de transformación. Quedan completamente descartados los niveles de carga en los cuales se encuentren fracturas en el intervalo de fatiga de bajos ciclos. Idealmente se inicio con un nivel de carga un poco mayor que el intervalo de transición y luego se aumentó la carga alternante.

Para elegir los siguientes niveles de carga se utilizó el siguiente procedimiento. Asumiendo que el intervalo de vida finita se puede representar por una recta en un gráfico log-log, con pendiente  $K$ , y si la distancia entre un nivel y otro se elige de tal manera que la media  $P_{50}$  (50% de probabilidad de fractura) tenga un desplazamiento máximo entre un nivel y el próximo, de  $N_{50,2}/N_{50,1} = \phi = (10)^{1/2} = 3.16$ , para decisiones de ingeniería y de  $(10)^{1/3} = 2.16$ , para ensayos de alta confiabilidad o intervalos pequeños de confianza, según ASM-Metals Handbook (1996) el número de los niveles necesarios de alterna de carga se determina por la regla de que la mediana  $P_{50}$  con 50% de probabilidad de fractura no debe pasar de un nivel a otro más, Sin embargo, el aumento del número de muestras en los niveles aumenta la fiabilidad más que reducir el cambio. La colocación de un segundo nivel después de haber evaluado una primera se hace fácil mediante el uso de las ecuaciones suficientemente exactas, en la tabla 3.3 se pueden observar los diferentes valores de  $K$  según su valor correspondiente de  $\phi$ , para hacer uso de la ecuación 3.4:

$$\frac{S_{a1}}{S_{a2}} = \phi^{\frac{1}{K}} \quad (3.4)$$

**Tabla 3. 3 Valores de Sa2/Sa1 variando con K y  $\phi$**

Década	$\phi$	K								
		4	5	6	7	8	9	10	11	12
1/2	3,16	0,750	0,796	0,825	0,848	0,866	0,880	0,892	0,902	0,908
1/3	2,16	0,826	0,858	0,880	0,896	0,909	0,918	0,926	0,933	0,938

Nota:  $S_{a2}$  es el nivel más bajo

**Fuente: ASM- Metals- Handbook, fatigue and fracture. 1996**

Donde  $K$  es la pendiente de la recta y los subíndices 1 y 2 son dos niveles de carga consecutivos, siendo  $S_{a2}$  el más bajo. Para el primer valor de  $K$ , de no haber información previa, se puede partir con valores de  $K$  entre 6 y 9, preferiblemente con valores altos.

Una vez ensayados dos niveles, se calculó un valor más correcto de  $K$  usando la ecuación 3.5:

$$K = \frac{\log\left(\frac{N_{50,1}}{N_{50,2}}\right)}{\log\left(\frac{S_{a2}}{S_{a1}}\right)} \quad (3.5)$$

Para cada nivel se hace una gráfica como la de la Fig. 3.5 y se estiman las probabilidades buscadas. De esta manera, después de evaluar tres niveles, ya se tiene suficiente información sobre el intervalo de vida finita, que al unirla con la de transición, permite construir el diagrama S-N-P del material en evaluación.

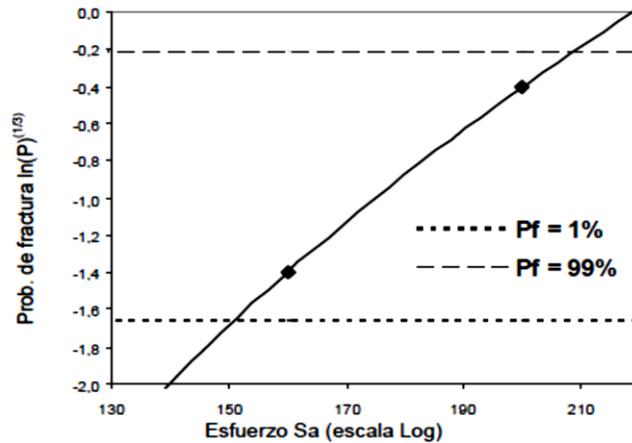


Figura 3. 4 Probabilidad de fractura vs. Esfuerzo aplicado.  
Fuente: Monsalve, Valencia, Páez, Sepúlveda, 2003

### 3.10.4 Ajuste de curva S-N

Para el ajuste de la curva S-N se realizó por la ecuación de Basquin la cual representamos con la siguiente ecuación:

$$\text{Log } N = a - b \text{Log } S \quad (3.6)$$

Con esta ecuación se realiza un ajuste de forma de hipérbola que será asintótica en el eje N, sin embargo se realizaron ciertos cambios en la ecuación para transformarla en una forma mas sencilla de trabajar.

Se reemplaza:  $A=e^a$  y  $c = 1/b$ , la ecuación se transforma en la ecuación 3.7:

$$S = \left(\frac{A}{N}\right)^c \quad (3.7)$$

Para la obtención de los valores de dicho ajuste, se utilizo un software libre SciDavis 0.2.4 liberado en marzo del 2010. Donde se obtienen los valores de a,b y c.

En la figura 3.4 se muestra el equipo de fatiga donde fueron realizados los ensayos, una máquina de flexión rotativa modelo RDF-200 MT. La máquina esta diseñada para aplicar cargas totalmente invertidas en voladizo. Los ensayos se llevaron a cabo con un regulador de velocidad.



**Figura 3. 5** Equipo utilizado para el ensayo de fatiga en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo

### **3.11 Análisis microscópico**

Para este análisis, se prepararon 9 muestras de acero de manera aleatoria con respecto a la metodología en estudio, se selecciona una en su condición original y ocho con el tratamiento térmico de normalizado las cuales fueron seleccionadas a los diferentes esfuerzos ensayados (2 en régimen de transición y 6 en vida finita). Ya que la selección de muestras no depende de la probabilidad si no de causas relacionadas con las características de la investigación o del analista que realiza la muestra, realizando así una muestra aleatoria abarcando un número apropiado de probetas con la cual se puedan obtener resultados confiables.

Con el análisis microscópico y la toma de fotografías, se determinaron las características de la microestructura. El equipo que se utilizó es el microscopio óptico Marca Unión MC 86267 con cámara Panasonic modelo WV-CP230. Que se muestra en la figura 3.6

Para éste estudio la preparación de la muestra para el análisis microscópico, es la siguiente:

Como se trata de un material duro, se debe obtener una sección circular de un tamaño convenientemente 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 sobre una lija de banda rotatoria, manteniéndola fría, pudiendo tener que refrigerarla frecuentemente con agua durante esta operación. En todas las operaciones de esmerilado y pulido, la muestra deberá moverse perpendicularmente a las rayas existentes. El esmerilado continuará hasta que la superficie quede plana, libre de mellas, rebabas y todas las rayas debido al corte.

Se continuará el desbaste con papel de lija 180 o 240, pasando sucesivamente a un papel de lija más fino hasta llegar a un papel de lija 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 (alumina). 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 zonas 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 realizó con un microscopio óptico con el cual se procedió a la toma de las microfotografías.



**Figura 3. 6 Microscopio Óptico**

### **3.12 Estudio de la superficie de fractura.**

Se evaluó 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 aplicaron aumentos progresivos en la microscopía electrónica de barrido (MEB) para poder 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

realizaran con un microscopio electrónico marca JEOL- JSM-5300, para análisis químico por espectroscopia ubicado en la Universidad de Carabobo.

Se llevó a cabo el estudio fractográfico en el cual se seleccionaron las probetas a ser estudiadas, tomando como criterio las más representativas de las zonas de más alto esfuerzo (ciclos bajos) y de las zonas de más bajos esfuerzo (ciclos altos). Se seleccionaron 8 muestras de cada nivel de esfuerzo, las mismas en condición de normalizado. Ya que la selección de muestras no depende de la probabilidad si no de causas relacionadas con las características de la investigación o del analista que realiza la muestra, realizando así una muestra aleatoria abarcando un numero apropiado de probetas con la cual se puedan obtener resultados confiables.

Se colocaron las muestras en la base para ser observadas mediante el microscopio electrónico de barrido, las mismas se cortaron aproximadamente a 10 mm de la superficie de fractura, este corte se realizó con una cortadora metalográfica, a fin de asegurarse de observar una superficie libre de excesos de óxidos y sucios.

En la fotografía que se presenta a continuación (figura 3.5) se muestra el microscopio electrónico de barrido el cual fue utilizado en los ensayos realizados en el presente trabajo.



**Figura 3. 7 Microscopio electrónico de barrido**

## CAPITULO IV

### Resultados y análisis de resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados de acabado superficial, ensayos a tracción, ensayos de fatiga, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido

#### 4.1 Acabado superficial

En la tabla 4.1 se muestra los valores obtenidos en el rugosímetro para verificar que las muestras cumplen con la norma ASTM E-606

**Tabla 4. 1 Resultados de la medición de rugosidad en las probetas de acero AISI 1045 después de pulidas**

Probetas	Rugosidad 1 ( $\mu\text{m}$ )	Rugosidad 2 ( $\mu\text{m}$ )
1	0,11	0,11
2	0,08	0,13
3	0,12	0,08
4	0,10	0,12
5	0,16	0,12
6	0,20	0,12
7	0,12	0,14
8	0,13	0,11
9	0,18	0,12
10	0,11	0,12

Se pudo observar que la rugosidad superficial del área a fatigar cumple con los estándares de la norma de fatiga ASTM E-606, lo que indica que es valido trabajar con las probetas de acero AISI 1045.

## 4.2 Ensayos a tracción

En la tabla 4.2 se presentan las propiedades del acero AISI 1045 en condición original, datos suministrados según Castellanos y Rodríguez (2009)

**Tabla 4. 2 Esfuerzos mecánicos del acero AISI 1045 en condición original**

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo de fluencia <math>\sigma_y</math> 0,2% (MPa)</b>	<b>Esfuerzo máximo <math>\sigma_{max}</math> (MPa)</b>	<b>Esfuerzo de ruptura <math>\sigma_{rup}</math> (MPa)</b>
<b>1</b>	786,49	878,09	720,62
<b>2</b>	779,22	894,80	732,55
<b>3</b>	782,03	833,22	702,15
<b>Promedio</b>	782,58	868,70	718,44

Fuente: Evaluación de la resistencia a la fatiga del acero AISI 1045, sometido a tratamiento térmico de temple en aceite y normalizado. (2009)

**Tabla 4. 3 Dimensiones de las probetas de tracción AISI 1045**

<b>Probetas</b>	<b>Do (mm)</b>	<b>Df (mm)</b>	<b>Lo (mm)</b>	<b>Lf (mm)</b>	<b>Ao (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Af (mm<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	6	4,08	30	36,44	28,27	13,07
<b>2</b>	6	3,94	30	36,14	28,27	12,19
<b>3</b>	6	3,94	30	36,19	28,27	12,19
<b>4</b>	6	3,90	30	36,47	28,27	11,95
<b>5</b>	6	4,2	30	36,12	28,27	13,85
<b>6</b>	6	4,37	30	36,5	28,27	15,0
<b>7</b>	6	3,96	30	35,87	28,27	12,32
<b>8</b>	6	4,21	30	36,59	28,27	13,92
<b>9</b>	6	4,21	30	36,59	28,27	13,92

En la tabla 4.3 se presentan las dimensiones de las probetas de acero AISI 1045 en condiciones de normalizado antes y después de cada ensayo de tracción.

En las tablas 4.4 y 4.3 se puede observar los resultados obtenidos por el ensayo de tracción de las probetas AISI 1045 en condición de normalizado, en las mismas se presentan los valores de porcentaje de alargamiento, reducción de área, esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y esfuerzo de ruptura, como también los promedios y la desviación estándar de el esfuerzo último y máximo.

**Tabla 4. 4 Resultados obtenidos en el ensayo de tracción**

<b>Probetas</b>	<b>Alargamiento %AL</b>	<b>Reducción de área %RA</b>	<b>Esfuerzo fluencia <math>\sigma_y</math> (MPa)</b>	<b>Esfuerzo máximo <math>\sigma_{max}</math> (MPa)</b>	<b>Esfuerzo de ruptura <math>\sigma_{rot}</math> (MPa)</b>
<b>1</b>	21,47	53,76	449,0	679,45	470,00
<b>2</b>	20,47	56,88	402,0	546,93	486,87
<b>3</b>	20,63	56,88	410,0	498,72	452,81
<b>4</b>	21,57	57,75	465,0	698,69	559,27
<b>5</b>	20,40	51,0	435,0	475,91	482,87
<b>6</b>	21,67	46,95	495,0	553,22	579,43
<b>7</b>	19,57	56,44	410,0	640,69	529,49
<b>8</b>	21,97	50,77	460,0	581,16	561,43
<b>9</b>	21,97	50,77	415,0	517,85	567,40

**Tabla 4. 5 Promedios y desviación estándar de los esfuerzo de ultimo y máximo**

	<b>Promedio (MPa)</b>	<b>Promedio (Lbf/in<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación Estándar (MPa)</b>
<b><math>\sigma_y</math></b>	437,89	63493,89	29,786
<b><math>\sigma_{max}</math></b>	576,96	83658,95	75,050
<b><math>\sigma_{rot}</math></b>	521,05	75554,18	45,470

Comparando los resultados de la tabla 4.1 con la tabla 4.5 se pudo observar que al realizar los ensayos de tracción del acero AISI 1045 en su condición original sin tratamiento térmico y al comparar con las sometidas a tratamiento térmico de normalizado, las de menor resistencia a tracción se reporta en las probetas con tratamiento térmico de normalizado, cuyo porcentaje de disminución fue de un 27,47% con respecto a las probetas en condición original, producto del tratamiento térmico, el cual hizo que el material se volviera mas dúctil y su esfuerzo de ruptura sea menor, en relación al esfuerzo de fluencia, hay una disminución en un 44% con respecto a las probetas en condición original, lo que indica que aumentó la capacidad del material para deformarse plásticamente.

### **4.3 Ensayo de Fatiga**

Los ensayos de fatiga fueron realizados en una maquina de flexión rotativa, la máquina esta diseñada para aplicar cargas totalmente invertidas en voladizo, los ensayos se llevaron a cabo con un regulador de velocidad a 5000 rpm. En vista de que nivel esfuerzo es necesario para cada ensayo se aplica a través de la barra calibrada en función del momento flector, que a su va unida al eje cónico que sujeta uno de los extremos de la probeta, se debe conocer el momento flector con el esfuerzo aplicado.

En la tabla 4.6 se pueden observar los cálculos necesarios para la obtención del momento flector, los cuales son importantes para el correcto uso de la máquina de fatiga rotatoria. De igual manera se observan el momento flector en los distintos porcentajes referenciales necesarios para hacer uso de la metodóloga de Maennig.

**Tabla 4. 6 Cálculo del momento flector**

	<b>Sistema Métrico</b>	<b>Sistema Ingles</b>
<b>Radio</b>	3,175 mm	0,125 in
<b>Diámetro</b>	6,35 mm	0,25 in
<b><math>I = \pi * D^4 / 64</math></b>	79,811 mm <sup>4</sup>	0,000191748 in <sup>4</sup>
<b><math>M = \sigma_{max} * I / C</math></b>	14503,254 MPa.mm <sup>3</sup>	128,331 lbf.in <sup>3</sup>
<b><math>M = \sigma_y * I / C</math></b>	11007,406 MPa.mm <sup>3</sup>	97,398 lbf.in <sup>3</sup>
<b>Momento flector al 30%</b>	4350,976 MPa.mm <sup>3</sup>	38,499 lbf.in <sup>3</sup>
<b>Momento flector al 40%</b>	5801,301 MPa.mm <sup>3</sup>	51,332 lbf.in <sup>3</sup>
<b>Momento flector al 50%</b>	7251,627 MPa.mm <sup>3</sup>	64,165 lbf.in <sup>3</sup>

En la tabla 4.7 se puede observar los diferentes ensayos de prueba que se realizaron hasta obtener el valor de esfuerzo deseado.

**Tabla 4. 7 Pruebas para obtener el esfuerzo a utilizar en el régimen de transición.**

<b>Probetas</b>	<b>Momento (lb.in)</b>	<b>Duración (ciclos)</b>	<b>Rpm</b>	<b>Observaciones</b>	<b>%</b>
1	64,16	107000	3571	Fracturo muy rápido, disminuimos el momento	50
2	44,92	1033700	5000	No fracturó se aumenta el momento	35
3	51,33	1028200	5000	No fracturó, se aumenta el momento	40
4	57,75	1050200	5000	No fracturó, se aumenta el momento	45
6	59	1000000	5000	No fracturó, se aumenta el momento	46
5	60,32	514300	5000	fracturó	47

### Régimen de transición

Una vez definido el primer valor de carga se procede a realizar los primeros 10 ensayos, donde se contabilizará la cantidad de probetas que fracturan y las que no. Para luego de eso, se realizaron los cálculos pertinentes para la obtención de la probabilidad de fractura.

En la tabla 4.8 se puede observar los resultados obtenidos en el ensayo al primer nivel de carga estudiado.

**Tabla 4. 8 Datos del régimen de transición en el nivel de carga**

<b>Probetas</b>	<b>Momento flector (lb.in)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Duración (ciclos)</b>	<b>Rpm</b>	<b>Observaciones</b>
1	60,32	271,67	514300	5000	Fracturó
2	60,32	271,67	62300	5000	Fracturó
3	60,32	271,67	1000000	5000	No fracturó
4	60,32	271,67	714700	5000	Fracturó
5	60,32	271,67	1000000	5000	No fracturó
6	60,32	271,67	793000	5000	fracturó
7	60,32	271,67	238400	5000	fracturó
8	60,32	271,67	1000000	5000	No fracturó
9	60,32	271,67	441600	5000	fracturó
10	60,32	271,67	272500	5000	fracturó

En la tabla 4.8 se puede observar que algunas muestras fracturaron y otras no, a pesar de estas sometidas en igualdad de condiciones, esto pudo ser causados por imperfecciones internas del material, porosidades, vibraciones de la maquina de fatiga, entre otros.

Posteriormente se procedió a realizar los cálculos necesarios para definir el segundo nivel de carga

$$n = 10$$

$$0,5 * n = 5$$

$$r = 7$$

$$S_a = 60,32$$

$$d = 0,1 - 0,3 \quad \text{Perfil suave}$$

$$r \neq 0; \quad P_f = 100 \times \frac{(3r-1)}{(3n+1)} = 64,51612903$$

$$r > 0,5 \times n; \quad D = (-r/n) \times d \times S_a = -8,4448$$

$$\Delta S = 51,8752$$

De los cálculos anteriores obtenemos el 2do nivel de esfuerzo y se vuelven a ensayar 10 probetas. En la tabla 4.9 se podrá observar los resultados de los ensayos en el segundo nivel de carga.

Tabla 4. 9 Datos del régimen de transición en el 2do nivel de carga

Probetas	Momento flector (lb.in)	Esfuerzo (MPa)	Duración (ciclos)	Rpm	Observaciones
1	51,8	233,64	1000000	5000	No fracturó
2	51,8	233,64	1000000	5000	No fracturó
3	51,8	233,64	475800	5000	Fracturó
4	51,8	233,64	1000000	5000	No fracturó
5	51,8	233,64	746800	5000	Fracturó
6	51,8	233,64	1000000	5000	No fracturó
7	51,8	233,64	1000000	5000	No fracturó
8	51,8	233,64	1000000	5000	No fracturó
9	51,8	233,64	1000000	5000	No fracturó
10	51,8	233,64	1000000	5000	No fracturó

En la tabla 4.9 se puede observar que solo 2 muestras fracturaron, esto pudo ser causado ya que el esfuerzo al cual fueron sometidas es un 40% de esfuerzo máximo, lo que indica que su probabilidad de fractura es baja.

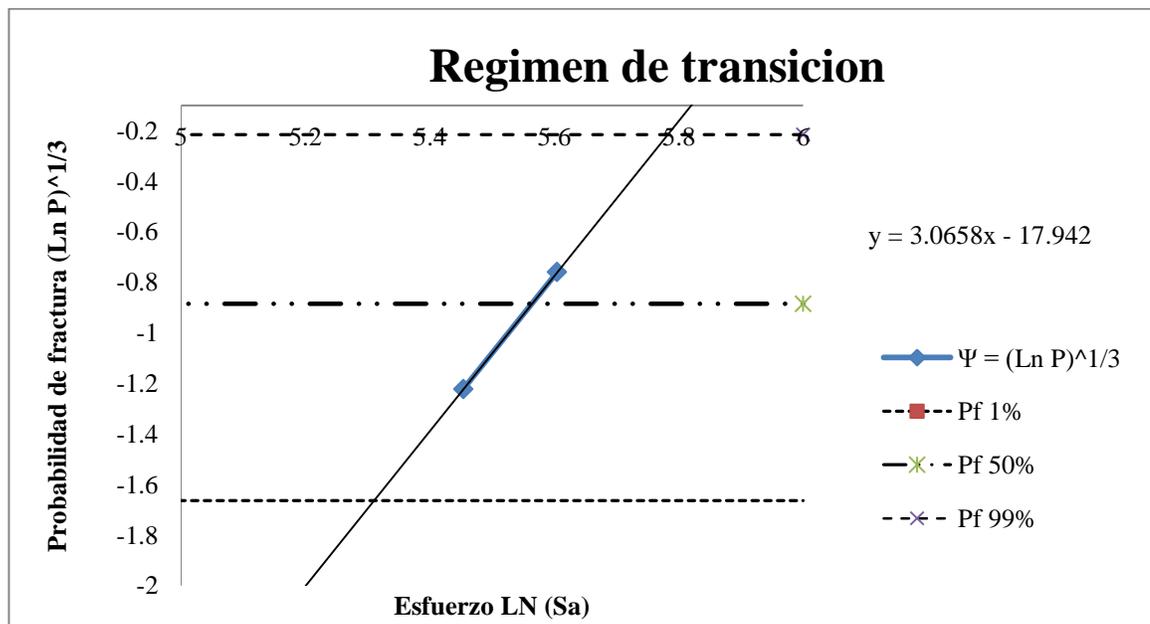


Figura 4. 1 probabilidad de fractura vs. Esfuerzo aplicado

En la figura 4.1, se muestra la gráfica de probabilidad de fractura vs el esfuerzo de aplicado, los cuales fueron evaluados en 233,64 y 271,67 (MPa). Así, ya con base en estos resultados se puede obtener la carga para una probabilidad del 1% y 99%

En el gráfico de régimen de transición, representado en la figura 4.1 se puede observar que los valores de la probabilidad de fractura obtenido en el ensayo, están a una distancia equis espaciada como para ser considerado valido, también podemos observar que los puntos están dentro de los limites demarcados por las probabilidad de fractura en 1% y 99% lo que demuestra que los resultados son consistentes.

### **Vida Finita**

Para elegir los siguientes niveles de carga que se utilizan en vida finita. Se realizan los siguientes cálculos:

$$\kappa = 9$$

$$\phi = 3,16$$

$$S_{a2} = 260,77$$

$$\left(\frac{S_{a1}}{S_{a2}}\right) = (\phi)^{(1/\kappa)}$$

$$S_{a1} = S_{a2}(\phi)^{(1/\kappa)} = 297,022 \text{ Mpa}$$

$$S_{a1} = S_{a2}(\phi)^{(1/\kappa)} = 337,528 \text{ Mpa}$$

$$S_{a1} = S_{a2}(\phi)^{(1/\kappa)} = 383.557 \text{ Mpa}$$

En las tablas 4.10; 4.11; 4.12 se observan los resultados de los ensayos en cada nivel de esfuerzo.

**Tabla 4. 10 Datos de vida finita en el 1er nivel de carga**

<b>Probetas</b>	<b>Momento flector (lb.in)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Duración (ciclos)</b>	<b>Rpm</b>	<b>Observaciones</b>
1	65,9	296,80	336000	5000	Fracturó
2	65,9	296,80	721000	5000	Fracturó
3	65,9	296,80	177000	5000	Fracturó
4	65,9	296,80	130000	5000	Fracturó
5	65,9	296,80	168600	5000	Fracturó
6	65,9	296,80	298100	5000	Fracturó
7	65,9	296,80	556500	5000	Fracturó
8	65,9	296,80	276500	5000	Fracturó
9	65,9	296,80	153500	5000	Fracturó
10	65,9	296,80	240100	5000	Fracturó

**Tabla 4. 11 Datos de vida finita en el 2do nivel de carga**

<b>Probetas</b>	<b>Momento flector (lb.in)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Duración (ciclos)</b>	<b>Rpm</b>	<b>Observaciones</b>
1	74,9	337,33	46600	5000	Fracturó
2	74,9	337,33	58700	5000	Fracturó
3	74,9	337,33	56400	5000	Fracturó
4	74,9	337,33	51700	5000	Fracturó
5	74,9	337,33	45700	5000	Fracturó
6	74,9	337,33	63800	5000	Fracturó
7	74,9	337,33	68500	5000	Fracturó
8	74,9	337,33	144400	5000	Fracturó
9	74,9	337,33	82200	5000	Fracturó
10	74,9	337,33	54700	5000	Fracturó

**Tabla 4. 12 Datos de vida finita en el 3er nivel de carga**

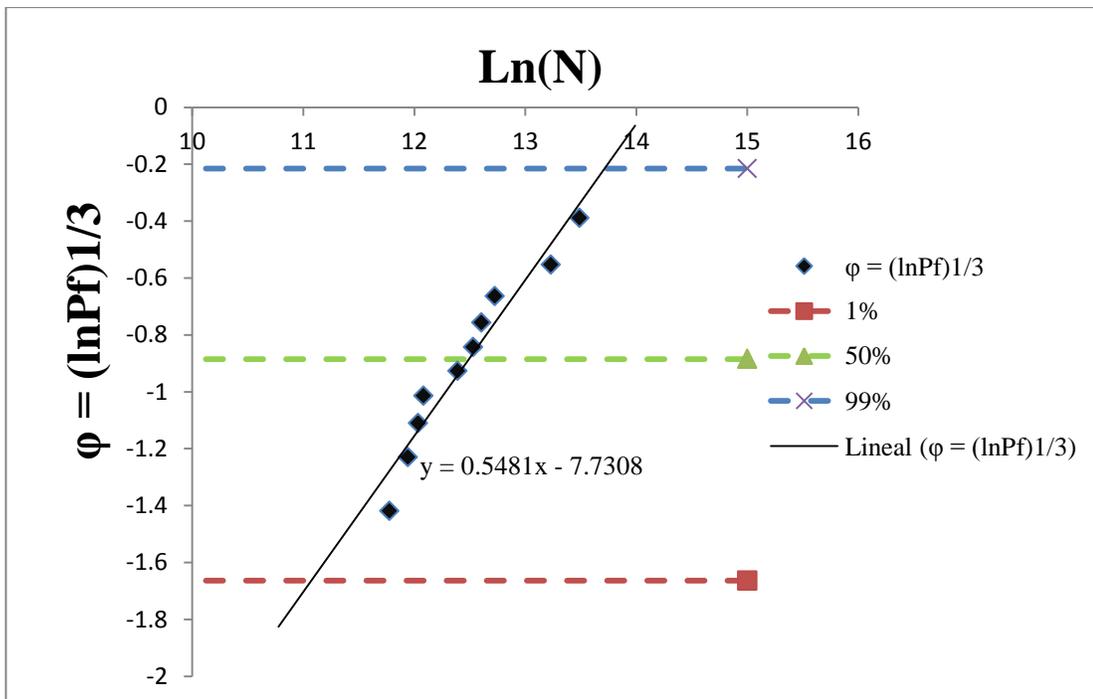
<b>Probetas</b>	<b>Momento flector (lb.in)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Duración (ciclos)</b>	<b>Rpm</b>	<b>Observaciones</b>
1	85,1	383,27	20800	5000	Fracturó
2	85,1	383,27	40900	5000	Fracturó
3	85,1	383,27	18600	5000	Fracturó
4	85,1	383,27	27400	5000	Fracturó
5	85,1	383,27	44000	5000	Fracturó
6	85,1	383,27	35800	5000	Fracturó
7	85,1	383,27	48700	5000	Fracturó
8	85,1	383,27	21600	5000	Fracturó
9	85,1	383,27	22300	5000	Fracturó
10	85,1	383,27	27800	5000	Fracturó

De las tablas 4.10, 4.11 y 4.12 se puede observar que todas las muestras fracturan, esto debido a que el esfuerzo al cual fueron sometidas es mas alto cada vez, en los niveles de esfuerzo hay un aumento de forma progresiva y una disminución en el valor de los ciclos al que fracturan cada una de las muestras.

Para la obtención de las curvas S-N-P es necesario realizar una serie de cálculos que se presentaran en las tablas 4.13; 4.14 y 4.15; las cuales muestran la probabilidad de fractura y la transformada de la probabilidad de las muestras en su respectivo momento flector, en las figuras 4.2; 4.3; 4.4 se representan los gráficos de la probabilidad de fractura vs la transformada de la probabilidad de fractura y su ajuste lineal para la obtención de los ciclos al 1% y 99%.

**Tabla 4. 13 Probabilidad de fractura y la transformada de la probabilidad evaluada en 296,80 MPa**

Momento flector (lb.in)	S (MPa)	Duración (ciclos)	Ln (N)	i	$Pf_i = (i-0.417)/(n+0.166)$	$\phi = (\ln Pf)^{1/3}$
65,9	296,80	721000	13.,488394	10	0,942651977	-0,3894
65,9	296,80	556500	13,229422	9	0,844284871	-0,5531
65,9	296,80	336000	12,724866	8	0,745917765	-0,6642
65,9	296,80	298100	12,605184	7	0,647550659	-0,7574
65,9	296,80	276500	12,52996	6	0,549183553	-0,8431
65,9	296,80	240100	12,388810	5	0,450816447	-0,9270
65,9	296,80	177000	12,083905	4	0,352449341	-1,0140
65,9	296,80	168600	12,035284	3	0,254082235	-1,1106
65,9	296,80	153500	11,941455	2	0,155715129	-1,2297
65,9	296,80	130000	11,775289	1	0,057348023	-1,4192



**Figura 4. 2 Ajuste lineal de datos experimentales para el cálculo de N1%, N50% y N99% evaluado en 296,80 MPa**

De la tabla 4.13 y figura 4.2 se puede observar de los datos tabulados se grafican y se ajustan linealmente para la obtención de los ciclos correspondientes a la probabilidad de 1%, 50% y 99% evaluados en 296,80 MPa, también se observa que los puntos de la gráfica tienen una correlación lineal positiva y están dentro de los límites de las probabilidades de fractura de 1% y 99% lo que demuestra que los resultados son consistentes.

**Tabla 4. 14 Probabilidad de fractura y la transformada de la probabilidad evaluada en 337,33 MPa**

<b>Momento flector (lb.in)</b>	<b>S (MPa)</b>	<b>Duración (ciclos)</b>	<b>Ln (N)</b>	<b>i</b>	<b>Pfi = (i-0.417) / (n+0.166)</b>	<b><math>\phi = (\ln Pf)^{1/3}</math></b>
74,9	337,33	144400	11,880342	10	0,942651977	-0,3894
74,9	337,33	82200	11,316910	9	0,844284871	-0,5531
74,9	337,33	68500	11,134589	8	0,745917765	-0,6642
74,9	337,33	63800	11,063508	7	0,647550659	-0,7574
74,9	337,33	58700	10,980195	6	0,549183553	-0,8431
74,9	337,33	56400	10,940224	5	0,450816447	-0,9270
74,9	337,33	54700	10,909618	4	0,352449341	-1,0140
74,9	337,33	51700	10,853213	3	0,254082235	-1,1106
74,9	337,33	46600	10,749355	2	0,155715129	-1,2297
74,9	337,33	45700	10,729853	1	0,057348023	-1,4192

De la tabla 4.14 y figura 4.3 se puede observar de los datos tabulados se grafican y se ajustan linealmente para la obtención de los ciclos correspondientes a la probabilidad de 1%, 50% y 99% evaluados en 337,33 MPa, también se observa que los puntos de la gráfica tienen una correlación lineal positiva y están dentro de los límites de las probabilidades de fractura de 1% y 99% lo que demuestra que los resultados son consistentes.

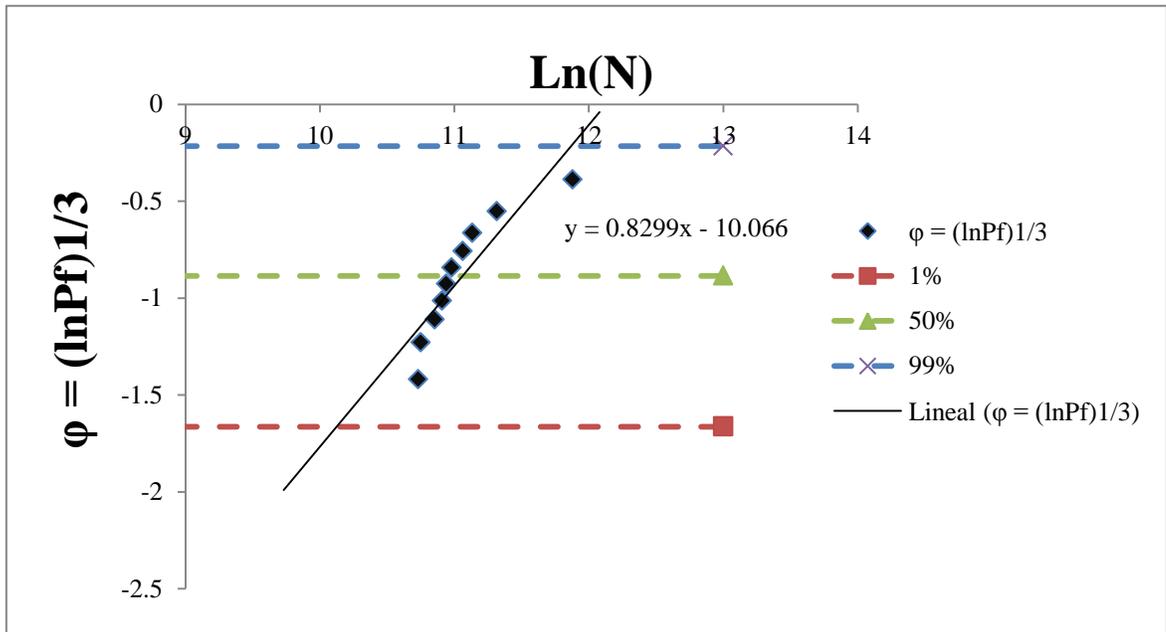


Figura 4. 3 Ajuste lineal de datos experimentales para el caculo de N1%, N50% y N99% evaluado en 337,33 MPa

Tabla 4. 15 Probabilidad de fractura y la transformada de la probabilidad evaluada en 383,27 MPa

Momento flector (lb.in)	S (MPa)	Duración (ciclos)	Ln (N)	i	$Pfi = \frac{(i-0.417)}{(n+0.166)}$	$\phi = (\ln Pf)^{1/3}$
85,1	383,27	48700	10,793434	10	0,942651977	-0,3894
85,1	383,27	44000	10,691944	9	0,844284871	-0,5531
85,1	383,27	40900	10,618885	8	0,745917765	-0,6642
85,1	383,27	35800	10,485703	7	0,647550659	-0,7574
85,1	383,27	27800	10,23279	6	0,549183553	-0,8431
85,1	383,27	27400	10,218298	5	0,450816447	-0,9270
85,1	383,27	22300	10,012341	4	0,352449341	-1,0140
85,1	383,27	21600	9,980448	3	0,254082235	-1,1106
85,1	383,27	20800	9,9427082	2	0,155715129	-1,2297
85,1	383,27	18600	9,830916	1	0,057348023	-1,4192

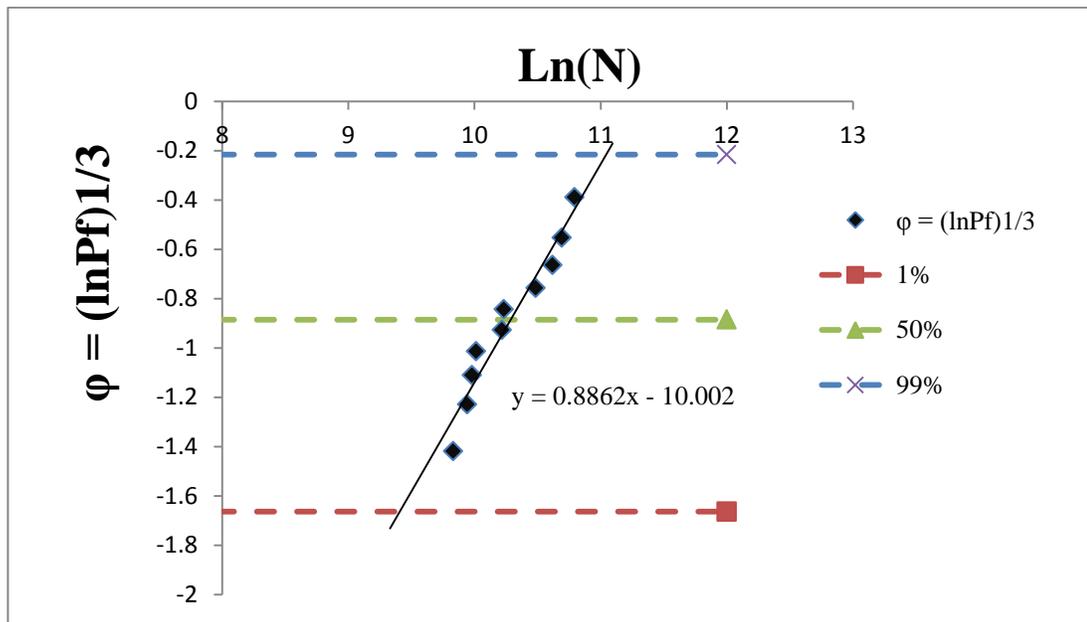
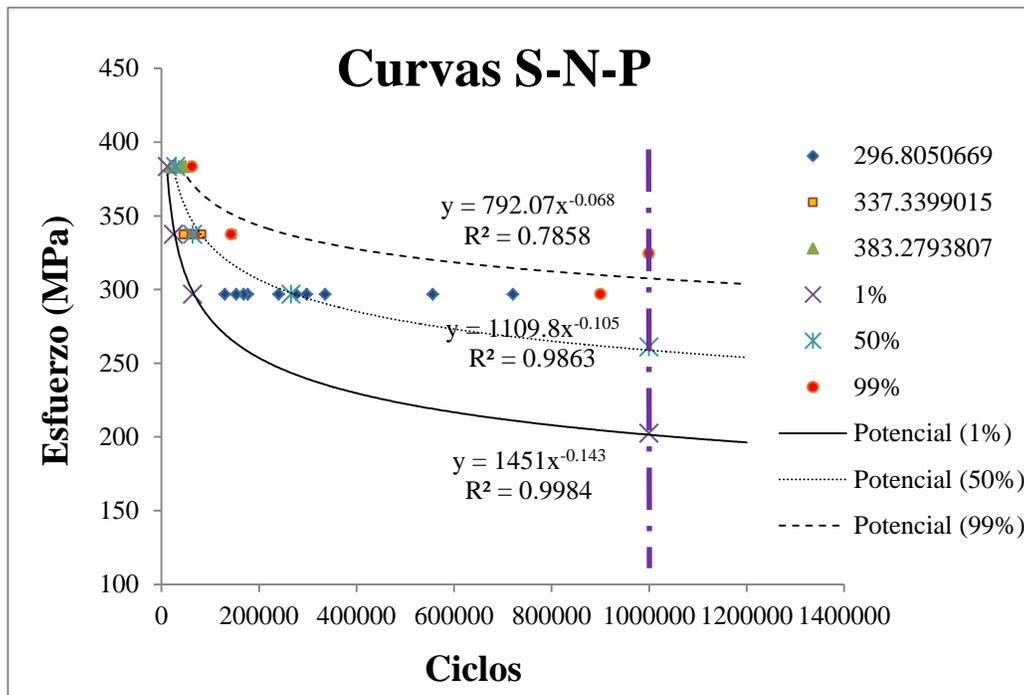


Figura 4. 4 Ajuste lineal de datos experimentales para el calculo de N1%, N50% y N99% evaluado en 383,27 MPa

De la tabla 4.14 y figura 4.4 se puede observar de los datos tabulados se grafican y se ajustan linealmente para la obtención de los ciclos correspondientes a la probabilidad de 1%, 50% y 99% evaluados en 383,27 MPa, también se observa que los puntos de la gráfica tienen una correlación lineal positiva y están dentro de los límites de las probabilidades de fractura de 1% y 99% lo que demuestra que los resultados son consistentes.

De los gráficos representados anteriormente se pudo obtener los ciclos al 1%, 50% y 99% intersectando la línea de tendencia con los esfuerzos al 1%, 50% y 99%. y así presentar el gráfico de la figura 4.5 donde se muestran las curvas S-N-P con su tendencia potencial, y las probabilidades de fractura al 1%, 50% y 99% de las muestras de acero AISI 1045 en condición de normalizado



**Figura 4. 5 Curva S-N-P del acero AISI 1045 en condiciones de normalizado**

Del grafico representado por la figura 4.5, se puede observar que el acero AISI 1045 en condición de normalizado presenta mayor resistencia a la fatiga que en condición original, lo que indica que su vida útil puede ser mayor. También que al 1% el material tendrá una vida infinita, a diferencia del 99% de la probabilidad ya que allí su probabilidad de fractura es mayor. También se pueden observar los diferentes límites de fatiga para cada probabilidad de fractura del acero AISI 1045 en condición de normalizado, los cuales se presentan en la tabla 4.16.

**Tabla 4. 16 Limites de fatiga obtenidos de las curvas S-N-P**

Probabilidad de fractura	Limite de fatiga (MPa)		
	1%	50%	99%
acero 1045	202,27	260,76	324,37

#### 4.4 Ajuste de la curva S-N

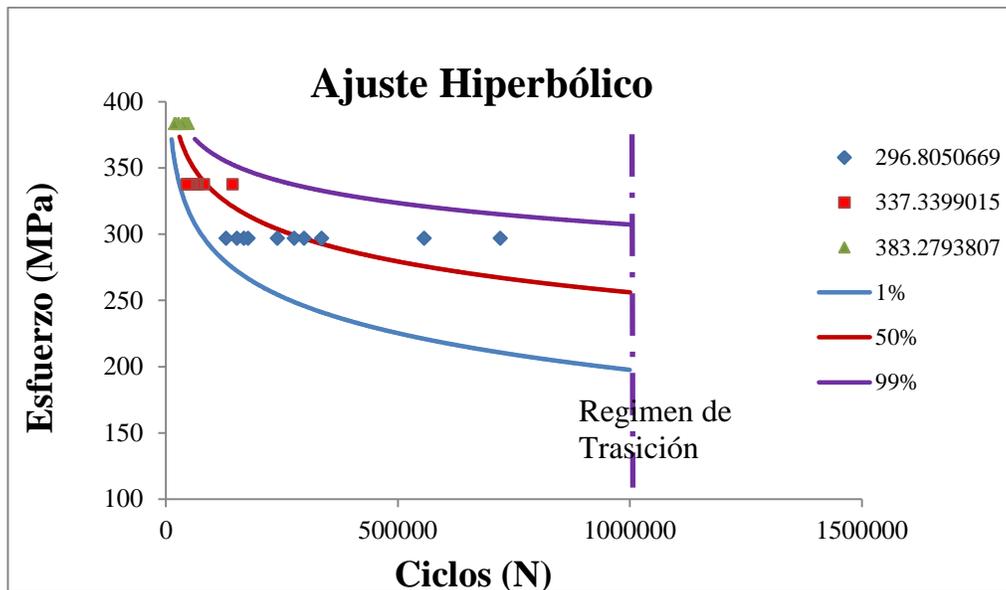
Para la obtención de los valores de dicho ajuste, se utilizó un software libre SciDavis 0.2.4 liberado en marzo del 2010. Donde se obtienen los valores de a, b y c, para las probabilidades de fractura al 1%, 50% y 99%; los cuales se presentan en la tabla 4.17

**Tabla 4. 17 Valores obtenidos usando SciDavis para realizar ajuste hiperbólico**

	<b>1%</b>	<b>50%</b>	<b>99%</b>
<b>a</b>	7504,327	5249,748	3383,876
<b>b</b>	-6774,581	-4549,487	-2768,175
<b>c</b>	0,005473	0,006742	0,007644

Con estos valores se pudo realizar la gráfica que se presenta en la figura 4.6 de la cual se puede observar que el ajuste hiperbólico realizado es muy similar a las curvas presentadas en la figura 4.5 describiendo tendencias potenciales de las probabilidades de fractura.

Del grafico representado por la figura 4.6, se puede observar que hay una similitud en la tendencia de las curvas, quiere decir que hay congruencia entre la tendencia potencial y el ajuste hiperbólico realizado con la herramienta computacional. También se observa que existe una coherencia en los valores de los límites de fatiga para cada probabilidad. Presentados en la tabla 4.16



**Figura 4. 6 Ajuste hiperbólico de las curvas S-N-P**

Se realizaron dos tipos de ajuste diferentes el primero por Stromeyer figura 4.5 para la obtención de una curva asintótica horizontal en la ordenada, es muy similar a la curva de Basquin figura 4.6, que fue la realizada para la demostración de una curva asintótica pero con el eje de las abscisas. Sin embargo la ecuación de Stromeyer es claramente más realista que las curvas de Wöhler y Basquin, claro está, es necesaria una gran cantidad de resultados experimentales para un examen exhaustivo y poder detectar las insuficiencias.

A continuación se presenta la Figura 4.7 en representación del gráfico de la curva S-N en condición original de fatiga realizado por la metodología tradicional, datos suministrados según Castellanos y Rodríguez (2009)

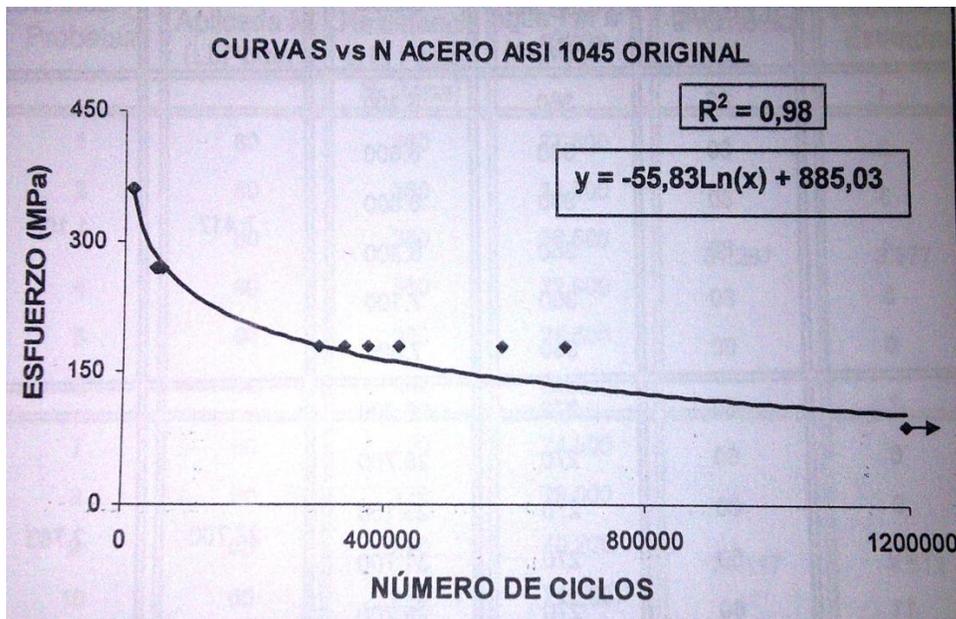


Figura 4. 7 Curva S-N del acero AISI 1045. Condición original. Castellanos y Rodriguez. (2009)

En la figura 4.5 se muestra la curva S-N de una muestra de acero AISI 1045 en condición original, se observa que la curva es graficada a una probabilidad de fractura al 50% mostrando un límite de fatiga de 114,26 MPa. En las figuras 4.6 y 4.7 se puede observar que las probetas que presentaron un límite de fatiga en una probabilidad de fractura al 50 % de 260,76 MPa, evidentemente se observa un aumento de casi el doble, con respecto a la condición original, lo indica una mayor resistencia a la fatiga, este fenómeno ocurre debido a que el material es más dúctil y puede soportar más esfuerzos alternantes que la condición original del acero.

Un rasgo característico del comportamiento a la fatiga, es la dispersión de los resultados de los ensayos, podría decir 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. A partir de esto, se procede a analizar los resultados obtenidos, los cuales arrojaron mayor dispersión para el nivel de esfuerzo más bajo (233,64 MPa), es decir, cuando se disminuía el esfuerzo aumentaba el tiempo de fractura, lo que aumenta la dispersión. Parte de la dispersión observada en

los resultados de los ensayos de fatiga se debe a la variación en las condiciones y procedimiento de ensayos, los cuales deben ser cuidadosamente controlados cuando se hace investigación estadística. Se atribuye que la fuente principal de esta dispersión es la heterogeneidad del acero.

#### 4.5 Metalografía

Para completar el estudio de la fractura por fatiga se analizan imágenes de microfotografías de las muestras de acero AISI 1045 en condición de normalizado.

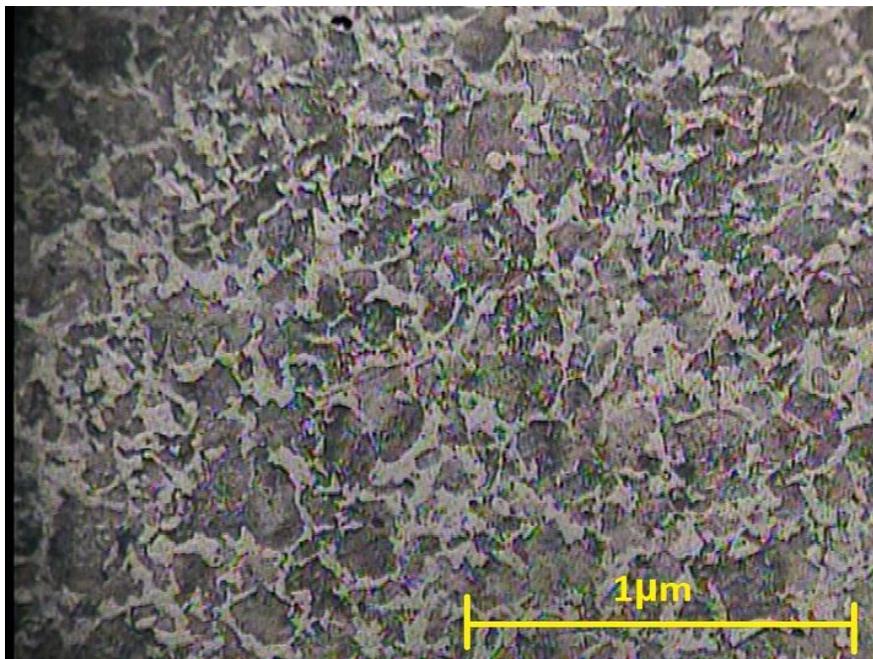
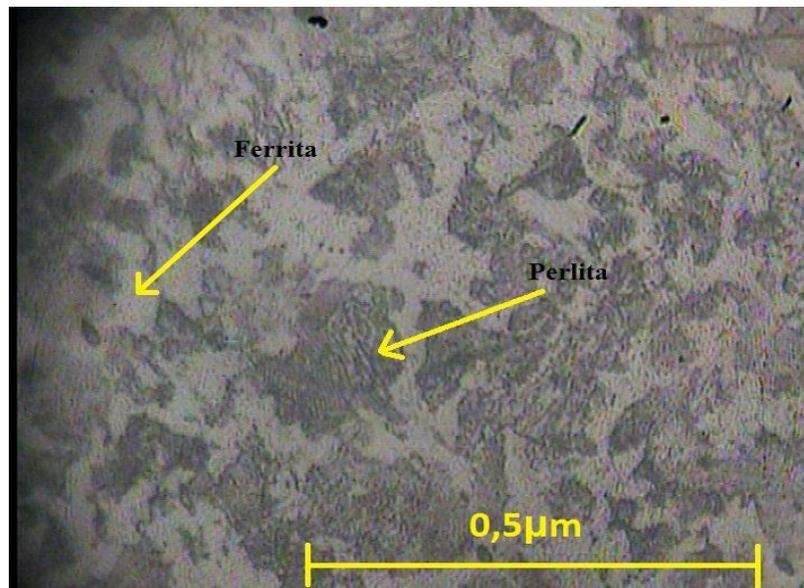


Figura 4. 8 Microestructura de acero AISI 1045. Condición original 400X



**Figura 4. 9** Microestructura del acero AISI 1045. Condición original 1000X

En las figuras 4.9 y 4.10, se observó 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 gris oscuras que corresponde a la perlita laminar, la misma presenta zonas que se aprecian como una huella dactilar. En los aceros, la ferrita puede aparecer como cristales mezclados con los de perlita, en los aceros medio carbono; formando una red o malla que limita los granos de perlita, en los aceros en forma de agujas o bandas circulares orientados en la dirección de los planos cristalográficos de la austenita como en los aceros en bruto de colada o en aceros que han sido sobrecalentados. Donde además se observan puntos negros que corresponden a porosidades en el material, causados por el proceso de fabricación del acero.

En las figuras 4.11 y 4.12, se observó la microestructura del acero AISI 1045 en su condición de normalizado fatigadas a alto ciclaje. El efecto del normalizado produjo una estructura perlítica más fina y un incremento de la ferrita, esto indica que el material se vuelve más dúctil en comparación con el material en condición original.

Al realizar el tratamiento térmico de normalizado a un acero hipoeutectoide se logra afinar y obtener granos de mayor tamaño debido a la velocidad de enfriamiento.

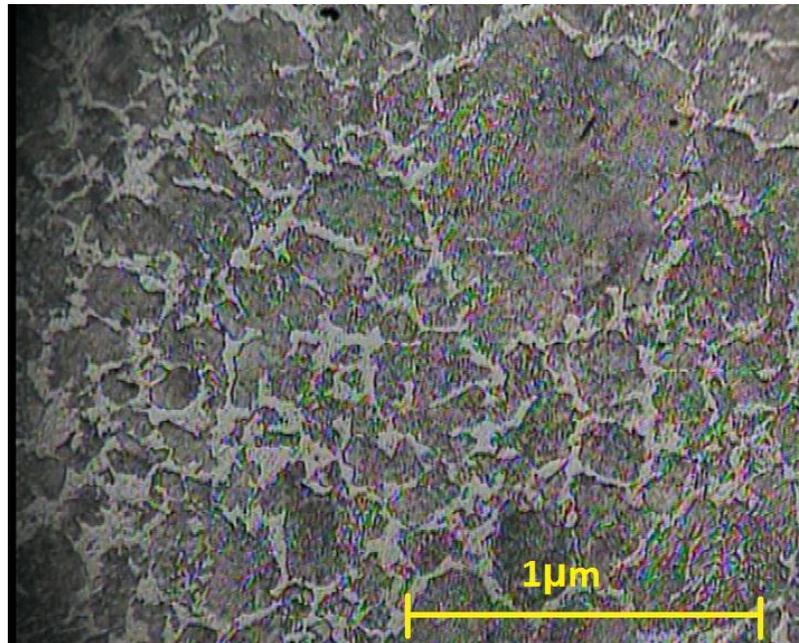


Figura 4. 10 Microestructura del acero AISI 1045. Condición normalizado sometida a fatiga en alto ciclaje 400X (S=271,63 MPa)

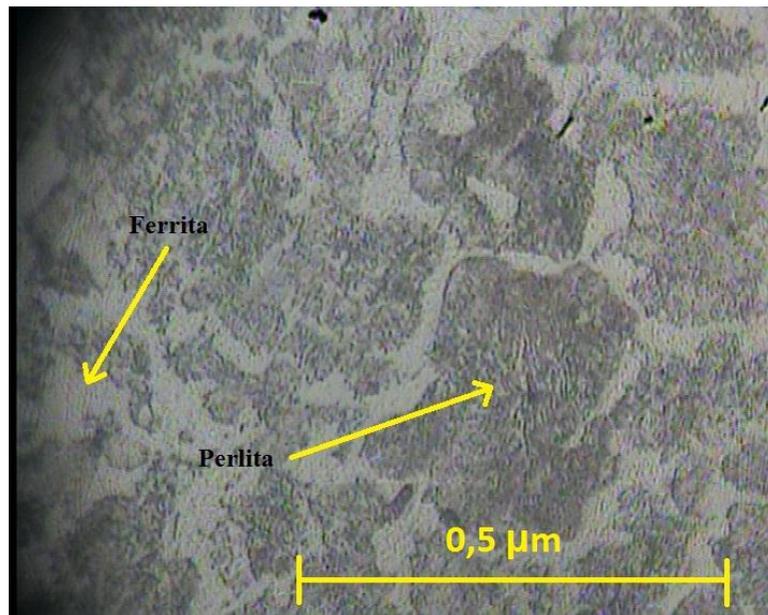
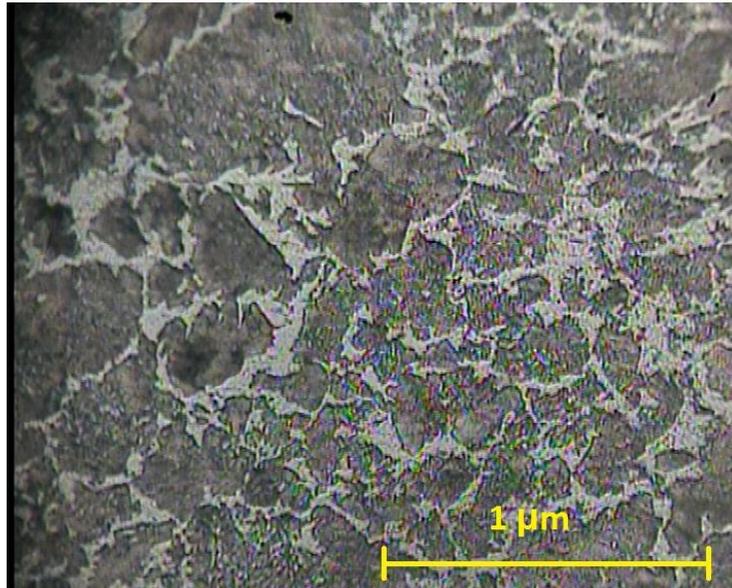
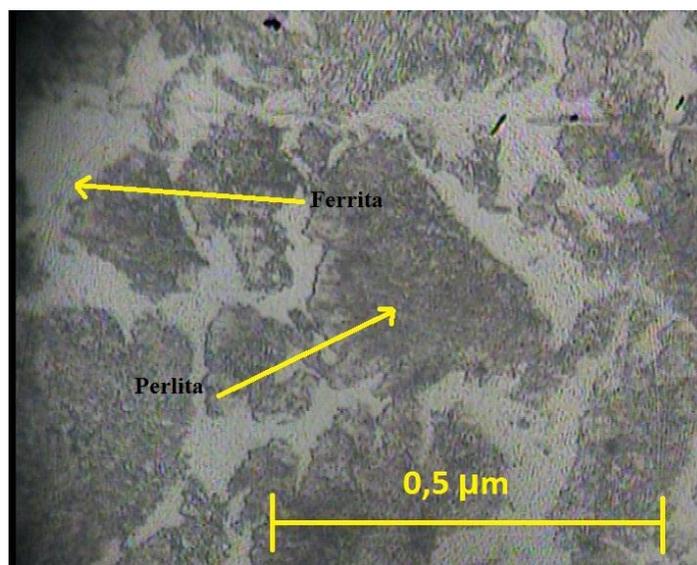


Figura 4. 11 Microestructura del acero AISI 1045. Condición normalizado sometida a fatiga en alto ciclaje 1000X (S=233,64 MPa)



**Figura 4. 12** Microestructura del acero AISI 1045. Condición normalizado sometida a fatiga en bajo ciclaje 400X (S=383,55 MPa)



**Figura 4. 13** Microestructura del acero AISI 1045. Condición normalizado sometida a fatiga en bajo ciclaje 1000X (S=383,55 MPa)

En las figuras 4.13 y 4.14, se observa la microestructura del acero AISI 1045 en su condición de normalizado fatigada a bajo ciclaje. El efecto del normalizado produjo un incremento de una estructura perlítica laminar y de ferrita esto indica que

el material se vuelve aun más dúctil, que el acero en condición original, ya que se aprecia un aumento del tamaño de grano perlítico, lo cual le genera un aumento de la resistencia a fatiga como era de esperarse al ser tratada térmicamente; también se puede observar que los granos son mas grandes y definidos. Los granos de ferrita se vuelven más finos.

En general en las microfotografías se aprecia que el acero AISI 1045, presenta una microestructura de secciones delgadas como en los aceros hipoeutectoides normalizados los cuales, están compuestos de ferrita proeutectoide y perlita de estructura fina. Partiendo de eso se puede decir que el tamaño de grano con respecto a la condición original muestran un incremento del tamaño de grano en la perlita producto del tratamiento térmico lo que indica un aumento de la ductilidad del material y un incremento de la resistencia a la fatiga, y con respecto a al ensayo de tracción, hubo disminución en la resistencia a la tracción.

#### **4.6 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 fotografías de las fracturas y las microfotografías tomadas para su análisis:

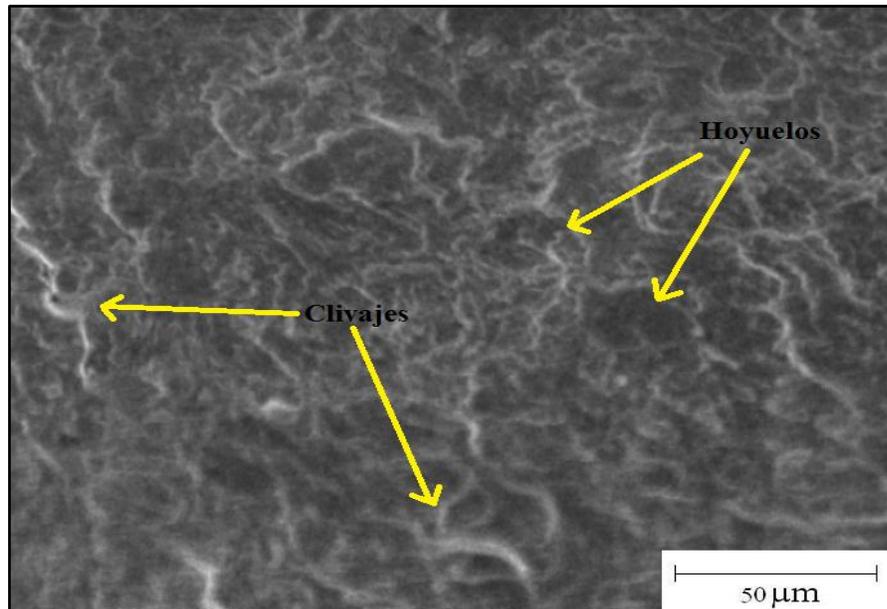
##### **Muestra sometida a fatiga en alto ciclaje**

En la figura 4.15 se muestra una macrofotografía del acero AISI 1045. En la cual se observan los detalles en la zona de fractura y el inicio de la grieta.



**Figura 4. 14 Macrofotografía de Acero AISI 1045. Condición normalizado sometidas a fatiga en alto ciclaje ( $S=233,64$  MPa)**

En la figura 4.15 se observa el área de la superficie de fractura de la probeta AISI 1045 en la condición de normalizado fatigada a alto ciclaje y bajo esfuerzo (233,64MPa), en la misma podemos observar Se observan las características marcas de playa que indican sucesivas etapas del proceso de rotura, una zona brillante en uno de los bordes que corresponde al inicio la fractura, una zona oscura que es cuando la probeta ha fracturado allí se reconoce por los labios cortantes que presenta la muestra, la fractura en general se aprecia que toda la sección da fractura es fibrosa, lo que indica que la probeta estuvo sometida a bajo ciclaje y alto esfuerzo. En fatiga de alto ciclo las estrías están más juntas y son más definidas



**Figura 4. 15** Microfotografía del Acero AISI 1045. Condición normalizado sometida a fatiga en alto ciclaje 500X (S= 233,64 MPa)

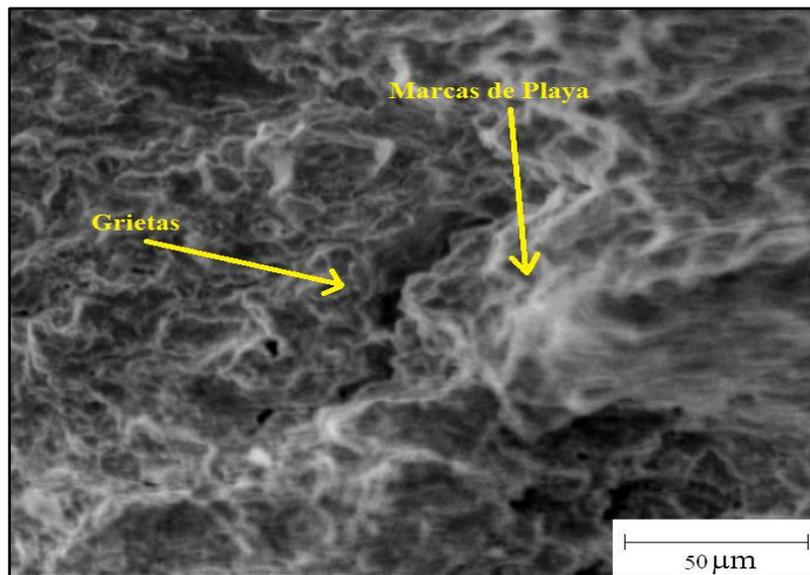
En la figura 4.16 se observa hoyuelos o dimples y algunas facetas de clivaje, lo que indica que el mecanismo de fractura es dúctil.

#### **Muestra sometida a fatiga en bajo ciclaje**



**Figura 4. 16** Macrografía del Acero AISI 1045. Condición normalizado a bajo ciclaje (S= 383,55 Mpa)

En la figura 4.17 se observa el área de la superficie de fractura de la probeta AISI 1045 en condición de normalizado a bajo ciclaje, en la misma se puede observar una fractura frágil, donde también puede verse la deformación típica de copa y cono para falla dúctil en el diámetro mayor, acompañada de estrías “chevrons” que indican el lugar desde donde se propagan las grietas. El sector 1 muestra el primer plano de propagación de falla, a velocidad media. El sector 2, por su baja rugosidad, indica una rápida propagación de las grietas. En el sector 3, se puede observar una alta rugosidad en el material libre de corrosión, que falló por sobrecarga en el esfuerzo al final. También se puede observar marcas de labios cortantes en casi toda el área de la muestra, producto de una fractura sometida a un esfuerzo alto, y en las zonas brillantes presenta una fractura frágil, en general la muestra indica que su fractura es mixta.



**Figura 4. 17 Microfotografía del Acero AISI 1045. Condición normalizado sometida a fatiga en bajo ciclaje 500X (S=383,55 MPa)**

En la figura 4.18 se observa hoyuelos o dimples y algunas facetas de clivaje, lo que indica que el mecanismo de fractura es mixto y una grieta en el centro de la misma, producto de las porosidades internas del materia o de los mismos hoyuelos que se aprecian en la imagen.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

- ✓ Del acero AISI 1045 sometido a fatiga en condición de normalizado, se observó que la resistencia a fatiga por la metodología de Maennig en una probabilidad del 50% fue de 260,76 Mpa tuvo un incremento del 56% con respecto al material en condición original
- ✓ La aplicación de tratamiento térmico de normalizado, realizado al acero AISI 1045, afecta el comportamiento a la fatiga del material; produciendo un aumento de la resistencia a fatiga del material en comparación con el mismo en condición original.
- ✓ El método Maennig permitió incluir de manera sencilla y precisa la probabilidad de fractura como tercer parámetro de evaluación de las curvas de Wöhler.
- ✓ Se obtuvieron las curvas S-N-P mediante el método Maening dando unos resultados favorables, en los cuales se pueden observar la curva de probabilidades de falla al 1%, 50% y 99% con respecto al esfuerzo y el número de ciclos.
- ✓ Las microestructuras del acero AISI 1045 en condición original, tuvieron presencia de ferrita y perlita.

- ✓ Las microestructuras del acero AISI 1045 con tratamiento térmico de normalizado, la perlita se observo en forma de huella dactilar y presencia de ferrita, con incremento del tamaño de grano perlítico.
- ✓ Comparando las microestructuras del acero AISI 1045 en condición original con las normalizadas, indica que el acero en condición normalizado es dúctil debido al incremento del tamaño de grano perlítico, lo que concuerda con los resultados obtenidos de la resistencia a tracción y la resistencia a fatiga.
- ✓ Las muestras del acero AISI 1045 para la condición de normalizado se presenta una fractura de tipo dúctil para las probetas de alto ciclaje y de tipo frágil para las de bajo ciclaje las mismas con presencia de hoyuelos, clivajes y grietas.
- ✓ En los resultados obtenidos por el método Maennig, se observó que los mismos son similares a los que se obtuvieron a través de la metodología tradicional, sin embargo en Maening los cálculos para la obtención de las curvas requieren de un menor tiempo en su aplicación que por el método tradicional. No obstante por ambas metodologías se llegara los mismos resultados y conclusiones similares. (Este, P y Sáenz, L., 2004);(Castellanos, C. y Rodríguez, J.,2009)

## **RECOMENDACIONES**

- ✓ Actualización del equipo para la realización de los ensayos de fatiga para así poder garantizar que los resultados sean más precisos.
- ✓ Elaboración de un manual de uso y puesta en marcha del equipo de fatiga, para que permita al estudiante un fácil manejo de la misma.

- ✓ Se recomienda realizar otros estudios en diversos tratamientos térmicos y diversos aceros.
  
- ✓ Habilitar mayor disponibilidad de personal técnico, para así contar con supervisión durante la realización de ensayos en horarios especiales.

## REFERENCIAS

- A. Monsalve, N. Valencia, M. Páez, Y. Sepúlveda, (2003). Evaluación A Fatiga Rotatoria De Aluminio 2024-T3, Santiago, Chile.
- Askeland, D. (1998). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Tercera Edición.
- ASTM E 647-00. Standard Test method for measurement of fatigue crack growth rates. American Society of testing and materials, Philadelphia, 2004.
- ASTM E 8M-04, Standard Test Methods for, Tension Testing of Metallic Materials (Metric)<sup>1</sup>. American Society of testing and materials, Philadelphia, 2004.
- Bathias, C. “There is no infinite fatigue life in Metallica materials”. Fatigue and fracture of engineering materials and structures, Vol. 22, n°7, pp. 559-565. 1999.
- Callister, W.D. Introducción a la ciencia de los Materiales. Ed. Reverté. Barcelona, España. 2002.
- Castellanos Crlos y Rodrigues José. (2009). Evaluación de la resistencia a la fatiga del acero AISI 1045, sometido a tratamientos termicos de temple en aceite y Normalizado. Tesis De Pregrado No Publicada, Universidad De Carabobo, Naguanagua, Valencia.
- Cobos D., Amarelys L., Maiz G., Jennifer P., (2004). Comportamiento A Fatiga De Un Acero Aisi 1045. Recubierto Con Una Aleación De Nicrbsiw. Depositado Por Termorrociado. Tesis de Pregrado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Coronado, J. (2007). Efecto de la Preparación superficial y la aplicación de recubrimientos en la resistencia a la fatiga del Acero SAE 1045. pp 213-218. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- Dowling, N.E.; Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. Prentice Hall Ed. Englewood Cliffs, N.J. 1990.
- Este, P y Saenz, L. (2004). Evaluación de la resistencia a fatiga y límite de fatiga de aceros de medio y bajo carbono. Pp. 69-75. Universidad de Carabobo, Valencia. Venezuela. 2004.
- Félix R., Moreno, Wilman J. Salazar, Laura A. Sáenz. (2005). Evaluación Del Comportamiento Mecánico A La Fatiga En Acero. Valencia, Venezuela.

- Ferrer, C.; Amigo, V. "Tecnología de Materiales". UPV. Valencia, España. 2003.
- Jürgen, J.; Wolfgang-Werner, M. "Safe evaluation of fatigue data in the range of finite endurance". International Journal of Fatigue, Vol. 19, No 4, pp. 335-344. 1997.
- Monsalve, A; Páez, M.; Toledano, M.; Artigas, A.; Sepúlveda, Y. (2003)<sup>a</sup> Evaluación a fatiga rotatoria de aluminio 2024-T3. Anales de mecánica de la fractura. Volumen 20. 2003.
- John J. Coronado, (2007). De La Preparación Superficial Y Aplicación De Recubrimientos En La Resistencia A La Fatiga Del Acero SAE 1045, Pereira, Colombia.
- Loaiza Arlines. (2007). Studio microestructural del acero AISI 1045 sometidos a tratamientos térmicos (reconocidos, normalizados, temple, revenido, envejecimiento). Tesis de Pregrado no Publicada, Universidad de Carabobo, Naguanagua, Valencia.
- M. Canales, C. Gómez, S. Calvo, J. L. Núñez, J. L. Pelegay, (2006). Estimación Del Comportamiento A Fatiga Torsional De Un Acero Estructural, Zaragoza; España. María De Luna.
- Monsalve, A; Páez, M.; Toledano, M.; Artigas, A.; Sepúlveda, Y. (2003)<sup>b</sup> Determinación de las curvas S-N-P en fatiga rotatoria de las aleaciones de aluminio 2024-T3 y 7075-T7351 y su dependencia con los tratamientos superficiales. Jornadas SAM, CONAMET, Simposio Materia 2003.
- Monsalve, A.; Páez, M.; Toledano, M.; Artigas, A.; Sepúlveda, Y; Valencia, N.(2007) "S-N-P Curves in 7075 T351 and 2024 T3 aluminium alloys subjected to surface treatments". Fatigue Fracture Engineering Mater. Struct, 30, pgs. 748-758. 2007.
- Moreno, F; Salazar, W; Sáenz, L. (2005). Evaluación del comportamiento mecánico a la fatiga en aceros AISI 4340 y AISI 4140 tratados térmicamente con recocidos y normalizados. Universidad de Carabobo, Valencia
- Morrison, M.L.; Buchanana, R.A.; Liawa, P.K.; Greena, B.A.; Wanga, G.Y.; Liua, C.T.; Horton, J.A. (2007) "Four point bending fatigue behaviour of the Zr-based Vitreloy 105 bulk metallic glass". Materials, science &engineering: A. Vol. 467, issues 1-2. Pp.190-197. 2007.
- Paris, P.C. "The growth of cracks due to variations in loads". Ph. D. Thesis. Bethehem: Lehigh University. 1960.
- Paris, P.C.; Gomez, M.P.; Anderson, W.P. "A rational analytic theory of fatigue". The trend in engineering 13. Pp. 9-14. 1961.
- Revista internacional de la fatiga, (1997), vol. 19, no4, pp. 335-344 17.

Rice J.R. "Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue in fatigue Crack Propagation". Special Technical Publication 415, pp. 257-309. Philadelphia: American Society for Testing and Materials. 1967.

Sánchez Marín, JM; Lasheras, JM. Conocimiento de materiales. Editorial Donostiarra, San Sebastián, España. 1967.

Sanford, R.J. Principles of fracture Mechanics. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 2003.

William F. Smith. (1998). Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Caracas.

Wöhler, A. "Versuche über die Festigkeit der Esisenbahn Wagenachsen Zeitschrift für Bauwesen". 1860.

Wolfgang-Werner, M. "Planning and evaluation of fatigue tests". ASM Handbook Volume 19, Fatigue And Fracture (ASM International). Pp. 303-313. 1996.