

Ensayo de Fatiga en Flexión Rotativa del Acero AISI-SAE 1018 por el Método Esfuerzo-Vida

Christian Polanco P.⁽¹⁾ Julián Peña E.⁽²⁾
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción⁽¹⁾
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
chranpol@espol.edu.ec⁽¹⁾
Ing. Mecánico, Profesor FIMCP-ESPOL, jpena@espol.edu.ec⁽²⁾

Resumen

En el presente trabajo se estudia la vida útil a fatiga por el método esfuerzo-vida en probetas estandarizadas de acero AISI-SAE 1018 más conocido como “acero de transmisión”, utilizando para ellos la modalidad de fatiga en flexión rotativa. Para la realización de los ensayos de fatiga se construyó un banco de pruebas experimental que alcanza esfuerzos de hasta 1400 MPa con probetas de 5mm a 7.5mm de diámetro. Las cargas se aplican mediante pesas y un mecanismo de palanca. El banco de pruebas está equipado con un sistema de control que permite su automatización. Previamente se realizaron ensayos de tracción, dureza, composición química y metalografía, con el objetivo de verificar el material. Se han trazado las curvas S-N-P (esfuerzo, número de ciclos, probabilidad de fractura) a través del método de Maennig. Se determinó tanto el rango de transición como el de vida finita, calculándose en cada rango las probabilidades de fractura del 1, 50 y 99%. Se utilizó la técnica de la macrografía para caracterizar el mecanismo de fractura presente. Se concluye que la utilización de la metodología de Maennig, permite evaluar de forma precisa la vida útil a fatiga en el material estudiado.

Palabras Claves: Fatiga, flexión rotativa, curvas S-N-P, límite de resistencia a la fatiga.

Abstract

In this article it study the remaining life in fatigue by the method stress-life in standardized specimens of steel AISI-SAE 1018 known as “transmission steel” using for them the form of rotative bending fatigue. To perform the fatigue test was built a testing bench who reaches stress of 1400 MPa with specimens from 5mm to 7.5mm in diameter. The loads are applied by weights and a lever mechanism. The testing bench is equipped with a control system that allows automation. Previously tension test, hardness, chemical composition and metallographic were made. The SNP curves (stress, number of cycles, fracture probability) have been drawn through the Maennig method. Was determined the transition range and the finite life range, calculating at each range the fracture probabilities of 1, 50 and 90%. It concludes that the Maennig methodology allows to accurately assess the fatigue life in the material studied.

Keywords: Fatigue, rotative bending, S-N-P curves, limit of fatigue strength.

1. Introducción

Este trabajo tiene por objetivo principal la construcción de un banco de pruebas experimental de ensayos de fatiga para que mediante la experimentación en el laboratorio sea posible ampliar los conocimientos en esta área particularmente inexplorada.

Es importante por lo tanto el estudio de la influencia de la fatiga en el comportamiento de los materiales en servicio, ya que permite ampliar nuestro entendimiento de porqué ocurren las fallas por fatiga, de manera que se puedan prevenir de manera óptima.

En nuestro país las empresas fabricantes y comercializadoras de aceros no disponen de información referente al comportamiento a la fatiga de los materiales disponibles o fabricados en el medio.

Este trabajo permitirá sentar las bases de la creación de un laboratorio dedicado a la investigación en la mecánica de la fractura y el comportamiento de todo tipo de materiales en fatiga.

1.1. Objetivos

El principal objetivo del presente trabajo es la construcción de un banco de pruebas experimental de ensayos de fatiga en flexión rotativa, que sea precisa, automatizada y segura para su operación.

Los objetivos complementarios son los siguientes:

- Diseñar un ensayo de fatiga en flexión rotativa que permita determinar el comportamiento de los metales en las condiciones mencionadas.
- Evaluar y comprobar el funcionamiento óptimo del banco de pruebas realizando una serie de ensayos cuidadosamente planificados utilizando probetas metálicas estandarizadas de acero AISI-SAE 1018.
- Elaborar una base de datos de curvas S-N-P a temperatura ambiente para el acero AISI-SAE 1018 utilizando el ensayo de fatiga en flexión rotativa.
- Desarrollar prácticas de laboratorio con sus respectivas guías sobre ensayos de fatiga para reforzar los conocimientos teóricos de los estudiantes sobre el diseño de elementos mecánicos metálicos.
- Aportar información técnica confiable sobre el comportamiento en condiciones de fatiga del acero AISI-SAE 1018 a la literatura científica, ya que el mismo es uno de los aceros más utilizados en nuestra industria para la fabricación de elementos mecánicos metálicos.

2. El fenómeno de la fatiga

Muchos diseñadores erróneamente emplean sólo consideraciones estáticas al diseñar, ignorando por completo la fatiga del material y emplean únicamente coeficientes de seguridad y tensiones permisibles para

evitar fallas por fatiga, mientras que en la vida real la fatiga se encuentra presente en todo momento.

Método esfuerzo-vida [1]

Consiste en una metodología que busca relacionar los esfuerzos fluctuantes de magnitudes especificadas con los ciclos hasta la rotura de las muestras para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de la fatiga.

El método más común y extendido para evaluar el comportamiento en la fatiga de un material es el estudio de la amplitud o del rango de esfuerzo versus el logaritmo del número de ciclos hasta la rotura, este modelo se lo llama curva S-N o diagramas de Wöhler donde la ordenada se la denomina S_f y representa la resistencia a la fatiga y N representa el número de ciclos hasta la rotura.

Una de las características más importantes de estas curvas es la elevada dispersión de los resultados, además se observa que cuando decrece el rango de tensión aumenta la dispersión del número de ciclos hasta la rotura.

Análisis estadístico de la curva S-N [2]

Por lo tanto el número de ciclos hasta la rotura es una variables por lo tanto sería incorrecto hablar de una sola curva S-N, es más preciso considerar una familia de curvas percentiles S-N o curvas isoprobables S-N-P, que dividen la gráfica S-N en tres regiones diferenciadas, como se muestra en la figura 1, y se describen a continuación.

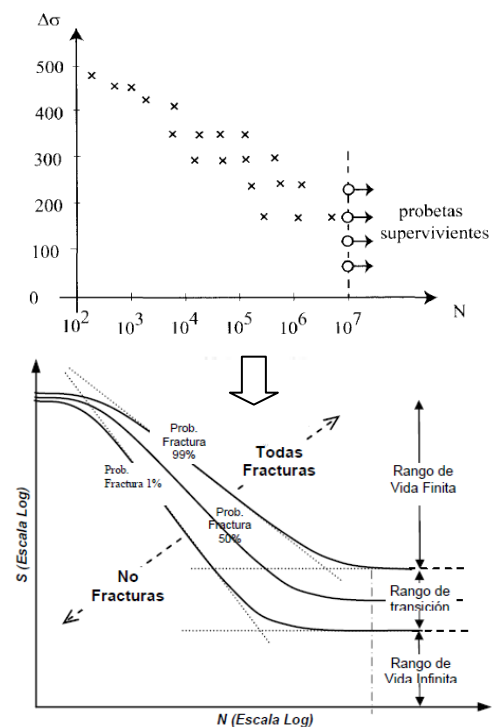


Figura 1. Curvas S-N-P

- Rango de vida finita. Región definida por encima de la curva del 99% de probabilidad de fractura. Los niveles de tensión asociados a esta zona corresponden a valores para los que siempre se produce la rotura de las probetas.
- Rango de vida infinita. La curva de 1% de probabilidad de fractura determina el llamado rango de vida infinita, ya que las probetas con niveles de tensión por debajo de éste valor de tensión no se rompen.
- Rango de Transición. Es la región entre los rangos de vida finita e infinita. En esta región se calcula el límite de resistencia a la fatiga, que se define como el valor de la tensión que lleva a un número de ciclos hasta la rotura de N_g ciclos (número de ciclos tecnológico), para la curva percentil mediana $P_f = 0,5$.

Método de Maennig [3, 4, 5]

Para el análisis estadístico de los datos experimentales se ha seguido el método de Maennig aceptado internacionalmente y respaldado por muchos investigadores. Mediante esta metodología estadística se obtienen curvas S-N, incluyendo la probabilidad de fractura como un tercer parámetro y se evalúa en forma independiente el rango de transición y el rango de vida finita.

En la práctica, se trata de evaluar de forma independiente S_{FL1} y S_{FL99} , que representan los límites de resistencia a la fatiga del 1% y del 99%. Estos valores demarcan el rango de vida infinita y el rango de vida finita en la gráfica S-N-P.

Para encontrar estos límites de resistencia a la fatiga, S_{FL1} y S_{FL99} , se aplican dos niveles de esfuerzo S_a y S_b , elegidos de tal manera que en el nivel de esfuerzo más bajo S_a , todas las probetas superen el nivel de ciclos N_g sin romperse mientras que en el nivel de carga mayor S_b se produzca el caso contrario, es decir que las probetas se rompan antes de alcanzar N_g , a cada nivel de esfuerzos se le asigna una probabilidad de fractura (P_f). La probabilidad de fractura está dada por:

$$P_f = 100 \frac{3r - 1}{3N + 1} \text{ si } r \neq 0$$

$$P_f(R = 0) = 0.5P_f(R = 1) = \frac{100}{3N + 1} \text{ si } r = 0$$

Siendo r el número de probetas rotas y N el número total de probetas de cada nivel S_i . Para linealizar entre la probabilidad y el esfuerzo se calcula la transformada de la probabilidad de fractura, ψ , y el logaritmo del esfuerzo:

$$\psi = \sqrt[3]{\ln P_f}$$

La gráfica que se obtiene se muestra en la figura 2, a continuación:

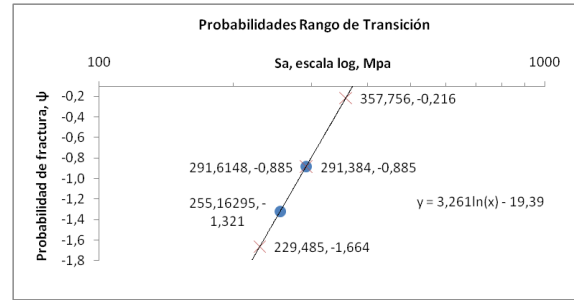


Figura 2. Ajuste lineal de datos experimentales para el cálculo de S_{FL1} , S_{FL50} y S_{FL99}

Para determinar el rango de vida finita se aplican distintos niveles de esfuerzo, S_m y en cada uno se ensayan “n” probetas. Ahora la probabilidad de fractura se calcula por la siguiente expresión y es asignada a cada prueba.

$$P_f^m(i) = \frac{i - 0.417}{n + 0.166}$$

Donde i es la numeración de cada probeta, que se fija ordenando las probetas de menor a mayor número de ciclos hasta la rotura, y n es el número total de probetas ensayadas en ese nivel de esfuerzo.

Finalmente el ajuste de curvas se hace mediante métodos gráficos utilizando una línea de tendencia potencial entre los datos.

3. Método experimental

Para la realización del ensayo se maquinaron 50 probetas según la norma ASTM E466, posteriormente se realizó el acabado superficial utilizando lijas 120, 240, 320, 400, 600, 1000, 1200 y 1500 teniendo cuidado en no dejar ralladuras superficiales. [6]

Los ensayos de fatiga se realizaron a temperatura ambiente, aplicando una onda senoidal de amplitud constante con una razón de carga $R=-1$, y a una frecuencia de 60 Hz. En la figura 3 se puede observar una fotografía del banco de pruebas experimental donde se realizaron los ensayos:



Figura 3. Banco de pruebas experimental

Para la curva S-N se realizaron ensayos en seis niveles de esfuerzo (80, 70, 60, 50, 40 y 35% del S_{ut} del material), utilizando de 3 a 4 probetas por nivel y como herramienta estadística el método de Maennig para obtener las curvas S-N al 1, 50 y 99% de probabilidad de fractura.

3.1. Caracterización del acero AISI-SAE 1018

Ensayo de tracción y dureza: se realizó un ensayo de tracción en una probeta estandarizada según la norma ASTM E8 [7] en la Máquina de Ensayos Universal, marca Shimadzu y modelo AG-IS 10KN. El ensayo de dureza se realizó con un medidor de dureza, marca Wilson y modelo 3YR. Los resultados del ensayo de tracción y dureza se encuentran en la tabla 1 a continuación:

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción.

Esfuerzo de cedencia, S_v	Mpa	706,563
Resistencia a la tracción, S_{ut}	Mpa	729,037
Elongación	%	13,5
Reducción de área	%	62
Dureza	HB	213,79

Composición química y metalografía: se determinó la composición química utilizando un analizador químico, marca LECO y modelo GDS 500A. Los resultados del análisis químico se encuentran en la tabla 2 a continuación:

Tabla 2. Resultados del análisis químico.

Fe	C	Mn	P	S
98.5%	0.153%	0.603%	0.045%	0.030%

De acuerdo con los resultados del análisis de la composición química tenemos que el carbono se encuentra presente en 0.153%, lo cual significa que se trata de un acero hipoeutectoide.

La figura 4 muestra una fotomicrografía de la microestructura del acero AISI-SAE 1018 tomada a 100x después de un ataque químico con Nital al 3%, la cual consta de 75% de ferrita proeutectoide (áreas claras) y 25% de cementita (áreas oscuras). [8]

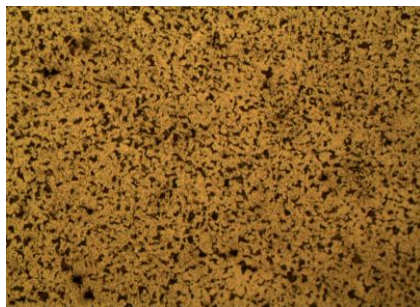


Figura 3. Fotografía de la microestructura del acero AISI-SAE 1018

3.2. Resultados experimentales

Los niveles de esfuerzo aplicados en los ensayos de fatiga tomaron valores menores al 96% de la resistencia última a la tracción del material para evitar caer en la zona de deformación plástica.

Los resultados experimentales obtenidos se encuentran en la tabla 3 a continuación:

Tabla 3. Resultados experimentales del ensayo de fatiga.

RANGO	Nivel	Esfuerzo	N
	S_a/S_{ut}	MPa	ciclos
VIDA FINITA	0,8	583,2296	4687
	0,8	583,2296	2092
	0,8	583,2296	1624
	0,8	583,2296	1144
	0,7	510,3259	9355
	0,7	510,3259	10834
	0,7	510,3259	8264
	0,7	510,3259	3140
	0,7	510,3259	3371
	0,7	510,3259	5712
	0,7	510,3259	10438
	0,7	510,3259	3348
	0,6	437,4222	164790
	0,6	437,4222	140710
	0,6	437,4222	12505
	0,6	437,4222	50599
	0,5	364,5185	69864
	0,5	364,5185	154626
	0,5	364,5185	392945
	0,5	364,5185	227532
TRANSICIÓN	0,4	291,6148	500556
	0,4	291,6148	116809
	0,4	291,6148	1000000
	0,35	255,163	1000000
	0,35	255,163	1000000
	0,35	255,163	1000000

4. Análisis de resultados

4.1. Análisis del comportamiento de los datos experimentales

Para la zona de vida finita se ensayaron cuatro niveles de esfuerzo que corresponden al 80%, 70%, 60% y 50% de la resistencia última a la tracción (S_{ut}) del material, teniendo en cuenta que el límite de resistencia a la fatiga no se encontró en el rango comprendido entre el 50% y 40% se tomó la decisión de ensayar un nivel más próximo con un intervalo del 5% para discernir con claridad el valor de límite de resistencia a la fatiga, en cambio para valores más elevados de esfuerzo sería con intervalos del 10%, ya que con tres o cuatro niveles es suficiente para encontrar la ecuación de la vida finita.

Se evitó ensayar niveles cercanos al 90% del S_{ut} para evitar ensayar en la zona de bajo ciclaje ($N < 10^3$ ciclos), donde debido a la alta intensidad de esfuerzos entran en juego deformación plástica que altera el comportamiento elástico.

Respecto a los resultados obtenidos en la zona de transición donde los ensayos superaron el millón de ciclos para un rango de 35-40% de la resistencia última a la tracción (S_{ut}), que corresponden a un rango de esfuerzos comprendido entre 255-292 MPa, se determinó que el límite de resistencia a la fatiga estaría situado en estos rangos mencionados.

El intervalo de vida en fatiga cubierto por esta serie de ensayos estuvo comprendido entre los 10^3 y 10^6 ciclos. Los resultados experimentales se pueden observar en la figura 4, donde en la ordenada se representa la amplitud del esfuerzo en MPa y en la abscisa se representa la vida en fatiga en número de ciclos en escala logarítmica.

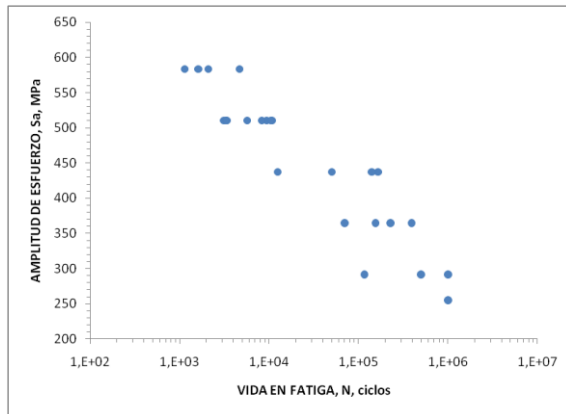


Figura 4. Curva S-N del acero AISI-SAE 1018

4.2. Análisis estadístico del diagrama S-N

La tabla 4 resume los valores de los coeficientes de ajuste A y B que permiten calcular el número de ciclos hasta la rotura relacionada con las probabilidades del 1%, 50% y 99%.

Tabla 4. Resultados del análisis estadístico

Nivel % S_{ut}	Constantes	
	A	B
RANGO DE VIDA FINITA		
80	0,494	-4,659
70	0,542	-5,61
60	0,245	-3,599
50	0,419	-5,954
RANGO DE TRANSICIÓN		
40	3,261	-19,39
35		

A partir de los resultados estadísticos anteriores es posible graficar los diagramas S-N-P de acuerdo a la metodología de Maennig, entendiendo que cada

conjunto de puntos del color representan una curva S-N con una probabilidad de fractura diferente. En la figura 5 se representan los puntos de Maennig correspondientes a las probabilidades de fractura del 1%, 50% y 99%.

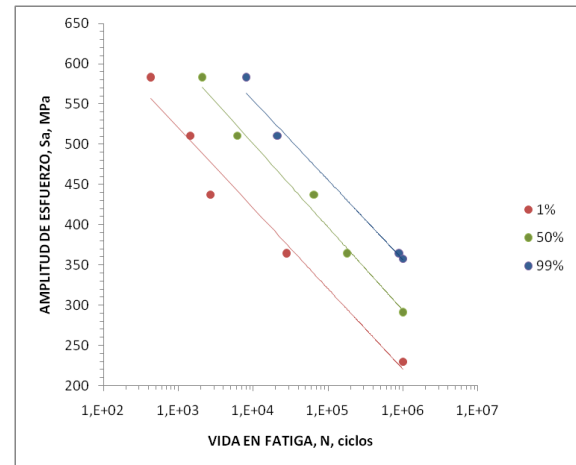


Figura 5. Curva S-N-P del acero AISI-SAE 1018

Ecuación de la vida finita

Luego se procedió a graficar la curva S-N para una probabilidad de fractura del 50% y a encontrar los coeficientes de ajuste de la ecuación, además la bondad de ajuste (coeficiente de regresión R^2) es de 0.9866 el cual es superior a 0.95 lo que significa que existe un buen ajuste lineal entre los datos, como se puede observar en la figura 6 a continuación:

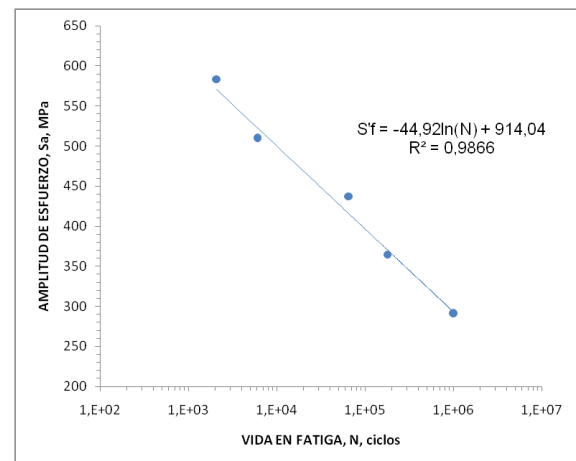


Figura 6. Ajuste de los puntos del 50% de probabilidad de fractura para el acero AISI-SAE 1018

Límite de resistencia a la fatiga

Para concluir el análisis estadístico se calcularon los límites de resistencia a la fatiga considerando el número de ciclos tecnológico de 1×10^6 ciclos hasta la rotura utilizando la metodología de Maennig, los resultados se encuentran resumidos en la tabla 5 a continuación:

Tabla 5. Límites de resistencia a la fatiga según la probabilidad de la fractura del acero AISI-SAE 1018

S_{FL} 1% (MPa)	229,485
S_{FL} 50% (MPa)	293,684
S_{FL} 99% (MPa)	357,756

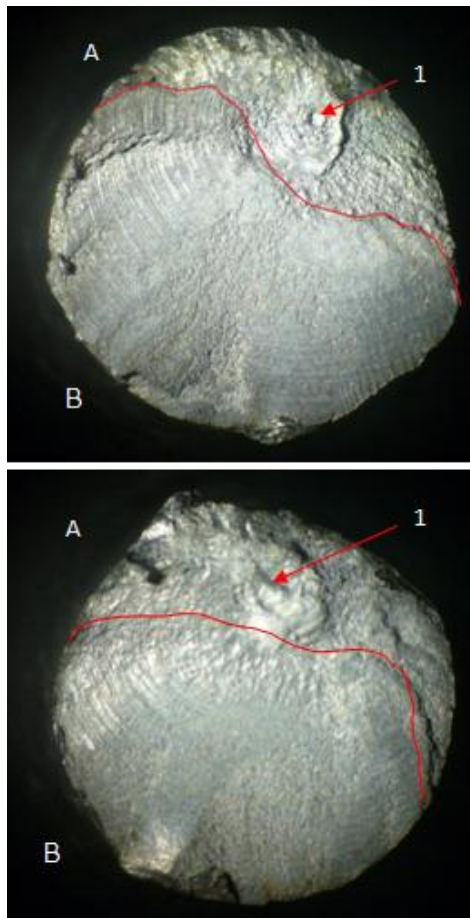
Relacionando los datos de la tabla 5 con la resistencia última a la tracción, obtenemos el límite de resistencia a la fatiga como fracción de la resistencia última a la tracción, los resultados se encuentran en la tabla 6 a continuación:

Tabla 6. Límites de resistencia a la fatiga relacionados con la resistencia última a la tracción del acero AISI-SAE 1018

S_{FL}/S_{UT} 1%	0,315
S_{FL}/S_{UT} 50%	0,403
S_{FL}/S_{UT} 99%	0,491

4.3. Análisis de las superficies de fractura

Para estudiar las fallas por fatiga se analizan las imágenes obtenidas por fractografía mediante la técnica de macrofractografía usando el estereoscopio (marca Wild Heerbrugg y modelo PHOTOMAKROSHOP M400)



Figura

7. Macrografía de las superficies de fractura

En la figura 7 se puede observar una fotografía de la superficie de fractura que se ha producido en un nivel de esfuerzos bajo (0,4 Sa/Sut), en la fotografía se pueden diferenciar claramente dos zonas: una zona basta y con tonalidades oscuras, llamada zona A y otra brillante y con marcas de playa, llamada zona B.

La zona B que muestra las marcas de playas, nos confirma la presencia del fenómeno de la fatiga, ya que a través de esta superficie se puede observar el avance de la grieta por fatiga; mientras que la zona A es donde ocurre la falla, en el punto 1 se observa un orificio y es donde se presenta la ruptura súbita, el inicio de la falla por fatiga se presente en múltiples puntos sobre la superficie de la zona A, extendiéndose finalmente hacia el punto 1.

5. Conclusiones

1. En conformidad con el objetivo principal, se construyó un banco de pruebas automatizado para la experimentación en el fenómeno de la fatiga que permite realizar ensayos en probetas estandarizadas a temperatura ambiente.
2. Mediante la metodología propuesta para realizar el ensayo de fatiga es posible configurar el ensayo para que arroje resultados sencillos con fines académicos y también resultados completos totalmente fiables para el diseño de elementos mecánicos.
3. En el estudio de la fatiga con cargas de amplitud constante en el rango de alto ciclaje, el método esfuerzo-vida (Curva de Wöhler) es el más adecuado por su: simplicidad, precisión y fácil comprensión.
4. El método Maennig en el tratamiento estadístico de los datos experimentales permite incluir de manera precisa la probabilidad de fractura como tercer parámetro de evaluación de las curvas de Wöhler.
5. Para definir los valores de amplitud de tensión en los ensayos de fatiga se debe utilizar como referencia la zona de deformación plástica para evitar ensayar en ella.
6. Se definió como criterio de terminación de ensayos, un número de ciclos tecnológico (Ng) de 1×10^6 ciclos, ya que la vida útil del banco de pruebas está limitada por la duración del elemento más susceptible al desgaste.

7. La frecuencia con la que se realizó los ensayos no incide en los datos experimentales obtenidos.
 8. La dispersión de los datos experimentales aumenta conforme se disminuye el nivel de esfuerzo aplicado, en comparación con los datos experimentales obtenidos para altos niveles de esfuerzo.
 9. La vida a fatiga aumenta conforme el nivel de esfuerzo aplicado disminuye, es decir hay una relación inversamente proporcional entre la resistencia a la fatiga (S_f) y el número de ciclos hasta la rotura (N).
 10. La bondad de ajuste (más conocido como coeficiente de correlación de la regresión lineal) entre los datos experimentales de los gráficos resultantes es mayor a 0,95.
 11. El valor calculado del límite de resistencia a la fatiga del acero AISI-SAE 1018 se encuentra dentro de lo reportado por la literatura científica existente, lo cual comprueba el funcionamiento óptimo del banco de pruebas.
 12. En las fallas por fatiga, la grieta se propaga por la fibra interior de la probeta, desde un extremo hacia el centro y en algunas ocasiones ligeramente desviadas del centro. La fractura final asociada al crecimiento de la grieta ocurre por fractura frágil.
- [6] Norma ASTM E466 “Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials”.
 - [7] Norma ASTM E8 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”
 - [8] AVNER, SYDNEY, Introducción a la Metalurgia Física, Segunda Edición, McGraw-Hill.
 - [9] ESTE, PEDRO Y SÁENZ, LAURA, “Evaluación de la resistencia a fatiga y límite de fatiga de aceros de medio y bajo carbono”. Revista INGENIERÍA UC [en línea] 2004, vol. 11.

6. Referencias

- [1] SHIGLEY, MISCHKE, Diseño de Ingeniería Mecánica, Editorial McGraw-Hill.
- [2] RAMÍREZ, LEIDY, “Fatiga de aleaciones de aluminio aeronáutico con nuevos tipos de anodizado de bajo impacto ambiental y varios espesores de recubrimiento” (Tesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña, 2010).
- [3] ASM Metals Handbook, Vol. 19, “Fatigue and Fracture”.
- [4] 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.
- [5] WOLFGANG-WERNER, M. “Planning and evaluation of fatigue tests”. ASM 19, Fatigue And Fracture (ASM International). Pp. 303-313. 1996.