

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

Marirey Marín O.^a, Argel Porrello^b, Carlos Alfonzo^{*,a}, Sandra Cabello-Sequera^b

^aEscuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

^bCentro de Investigaciones en Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Resumen.-

El propósito de esta investigación fue determinar las curvas S-N-P (esfuerzo, número de ciclos, probabilidad de falla) a través del método Maennig, mediante ensayos de fatiga en el acero AISI 1045 normalizado. Se utilizaron barras calibradas de media pulgada de diámetro (1/2'). Se realizaron ensayos de tracción para determinar la resistencia a la tracción ($S_{m\acute{a}x}$) y el esfuerzo de fluencia (S_y), según la norma ASTM E 8M-04. Se realizaron ensayos de flexión rotativa y se determinaron las curvas S-N-P a través del método Maennig, para la determinación 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 realizó la caracterización microestructural y se evaluaron las superficies de fractura de las probetas en fallo por fatiga por la técnica de microscopía electrónica de barrido. Se obtuvieron ajustes potenciales para las curvas S-N del acero AISI 1045 para cada probabilidad de fractura, siendo estas: $N_1 = 1451S^{-0,143}$, $N_{50} = 1109,8S^{-0,105}$ y $N_{99} = 792,07S^{-0,068}$, donde N está en ciclos y S en MPa.

Palabras clave: Método Maennig, Fatiga, AISI 1045.

Determination of the fatigue curve S-N-P using Maennig's method for steel AISI 1045 subjected to heat treatment of normalized.

Abstract.-

The purpose of this research was to determine the SNP curves (stress, number of cycles, probability of failure) through Maennig method by fatigue tests on AISI 1045 steel normalized. Calibrated bars half an inch in diameter (1/2') were used. Tensile tests were performed to determine the tensile strength (S_{max}) and the yield strength (S_y), according to ASTM E 8M-04. Rotating bending tests were performed and curves were determined SNP through Maennig method for determining the fatigue strength. The transition interval was determined and finite life, calculated in each case probabilities of fracture of 1 %, 50 % and 99 %. Microstructural characterization was carried out and the fracture surfaces of the specimens tested in fatigue failure by the technique of scanning electron microscopy. Potential adjustments for the AISI 1045 steel SN for each fracture probability curves were obtained, which are: $N_1 = 1451S^{-0,143}$, $N_{50} = 1109,8S^{-0,105}$ y $N_{99} = 792,07S^{-0,068}$, where N is in cycles and S in MPa.

Keywords: Maennig Method, Fatigue, AISI 1045.

Recibido: Julio 2014

Aceptado: Noviembre 2014

1. Introducción.

El acero al carbono es el más común, económico y aplicable de los metales que se emplean en la industria. Gracias a sus excelentes propiedades mecánicas, tiene una gran gama de aplicaciones tales como: carrocerías de automóviles, cámaras catalíticas, estructuras de construcción, máquinas

*Autor para correspondencia

Correo-e: calfonzo@uc.edu.ve (Carlos Alfonzo)

y la mayoría de los componentes móviles como los ejes, árboles de transmisión, ruedas, bielas, entre otros. El hombre ha tratado de mejorar las materias primas diseñando aleaciones y sometiendo a diversos tratamientos térmicos, con el fin de hacerlos más aptos para soportar los esfuerzos a los que van a estar sometidos, uno de esos tratamientos térmicos es el normalizado, que consiste en homogeneizar las propiedades del material, partiendo de la modificación de su microestructura [1]. Una de las causas más comunes de falla de los componentes rotativos es la fatiga, consiste en una falla repentina y generalmente suele ser catastrófica. Algunas veces los diseñadores incurren en el sobrediseño de las piezas para garantizar el buen funcionamiento [2], pero esta medida tiene un costo muy elevado. Por tanto, se hace indispensable contar con una metodología más confiable de predecir la falla por fatiga de los materiales.

El método Maennig constituye una alternativa para predecir el comportamiento a fatiga de los materiales [3, 4]. Consiste en la construcción de la curva S-N-P (esfuerzos-número de ciclos-probabilidad de falla), en la que se pueden distinguir tres intervalos: uno se produce para grandes esfuerzos a los cuales el material se fractura luego de un determinado número de ciclos, llamado intervalo de vida finita, el segundo, que ocurre a bajos niveles de esfuerzo, donde el material no fallará por fatiga y el tercero, comprende una banda de transición donde la probabilidad de falla varía de 1 % al 99 %. El método Maennig evalúa de forma independiente el intervalo de transición y el intervalo de vida finita, lo principal de esta evaluación es que puede ser modelada, por una distribución de tipo normal logarítmica. 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 al esfuerzo aplicado [3, 4]. Con respecto a la evaluación del intervalo de vida finita, la variable independiente es el esfuerzo y la dependiente, el número de ciclos.

Dada la importancia de predecir la ocurrencia de falla por fatiga en componentes metálicos de aceros al carbono con diversas aplicaciones

industriales, específicamente, el efecto que tiene la utilización de tratamientos térmicos de normalizado en el acero AISI 1045, en este estudio se aplicará el método Maennig para definir en dicho material, su curva S-N-P correspondiente.

2. Metodología.

2.1. Preparación de muestras para los ensayos de tracción y fatiga.

Para el presente trabajo se utilizó un acero AISI 1045 suministrado en barras de 6 metros de longitud y 12,7 mm de diámetro, con una composición química de [0,43-0,50] % C, [0,60-0,90] % Mn, 0,04 % P máx. y 0,05 % S máx tomado del catálogo de Sumindu del 2003.

Para la obtención de las propiedades mecánicas del acero AISI 1045, se mecanizaron 10 muestras de acuerdo a la norma ASTM E 8M-04 [5], y se ensayaron en una máquina universal marca GALDABINI CTM 20. A partir de los datos de este ensayo, se determinaron las propiedades mecánicas correspondientes: Resistencia a la fluencia, resistencia a la tracción, porcentaje de alargamiento y porcentaje de reducción de área.

Para los ensayos de fatiga se fabricaron sesenta (60) muestras. Inicialmente se cortaron barras de 220 mm de longitud, para luego ser mecanizadas en un torno CNC de acuerdo a las dimensiones especificadas en la norma ASTM E-606 [6]. Posteriormente, se pasó a un proceso de lijado, con los papeles de lija siguientes: 240, 280, 360, 400 y 600. Una vez lijadas, se tomaron 10 muestras al azar y se verificó que la rugosidad se encontraba por debajo de $0,2 \mu\text{m}$, dando cumplimiento a las especificaciones de la norma ASTM E-606 [6].

Una vez preparadas las probetas, se procedió a tratarlas térmicamente por normalizado. El tratamiento térmico consistió en calentar las probetas a 850°C en un horno marca TEMCO durante 30 minutos para luego enfriarlas al aire tranquilo hasta temperatura ambiente.

Los ensayos de fatiga fueron realizados en una máquina de flexión rotativa modelo RDF-200 MT, la cual está diseñada para aplicar cargas totalmente invertidas en voladizo. Los ensayos se llevaron a cabo a 5000 rpm.

2.2. Obtención de curvas S-N-P según el Método Maenning.

Intervalo de transición.

1. Se ensayó una probeta tomada al azar en un nivel de amplitud de esfuerzo alternado (S_a) cualquiera hasta que se alcanzó el número de ciclos N_g que fue elegido en forma arbitraria antes del ensayo, cuidando que fuera lo suficientemente alto como para representar al intervalo de transición. Si al llegar a este límite N_g la probeta no se había fracturado, se ensayaba una nueva probeta en un nivel de carga mayor y así sucesivamente hasta que el evento contrario sucediera, es decir que se fracturara antes de N_g (Límite de fatiga). Para definir el primer nivel de esfuerzo en el régimen de transición, se estableció como límite $N_g = 1 \times 10^6$ ciclos y se inició la estimación de S_a , partiendo de un nivel de esfuerzo alternante igual al 50 % de $S_{m\acute{a}x}$.
2. Una vez definido el primer valor de esfuerzo, se procedió a ensayar diez (10) probetas a dicho nivel, donde se contabilizó la cantidad de probetas que fracturaron antes (r) de 1×10^6 ciclos y las que sobrevivieron a los ciclos N_g . A cada nivel de carga se le asignó una probabilidad de fractura (P_f) utilizando las ecuaciones (1) y (2) [4].

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

$$P_f = 0,5P_{f(r=1)} = \frac{100}{(3n + 1)} \quad \text{si } r = 0 \quad (2)$$

Siendo r el número de probetas rotas y n el número total de probetas de cada nivel S_i

3. El segundo nivel de esfuerzo se estableció a una distancia D , que se determinó mediante las ecuaciones (3) y (4) [3].

$$D = (1 - r/n)dS \quad \text{si } r < 0,5n \quad (3)$$

$$D = (-r/n)dS \quad \text{si } r \geq 0 \quad (4)$$

Donde S fue la carga del primer nivel ensayado completo y “ d ” el tamaño estimado del intervalo de transición que se obtuvo de datos ya tabulados (0,1-0,3 para probetas de geometría suave y 0,05-0,15 si tienen entalle).

4. En este nivel se ensayaron 10 probetas y se le asignó la probabilidad de acuerdo a las ecuaciones (1) y (2).
5. Luego, con los dos niveles de carga ensayados, se trazó la curva P_f versus $\log S$, con P_f según la transformación Y, obteniéndose una línea recta. A partir del ajuste anterior, se calculó el esfuerzo para 1, 50 y 99 % de probabilidad de falla [3].

$$\psi = \sqrt[3]{\ln P_f} \quad (5)$$

Intervalo de vida finita.

1. Para evaluar el intervalo de vida finita se aplicaron tres niveles de carga y en cada uno se ensayaron 10 (diez) probetas. La probabilidad de fractura se calculó para cada probeta mediante la ecuación (6) [3, 4].

$$P_f = \frac{i - 0,417}{n + 0,166} \quad (6)$$

Donde “ i ” es el orden correlativo que tienen las probetas ensayadas al ordenarlas de mayor a menor de acuerdo al número de ciclos que resisten antes de romperse.

2. Para elegir los siguientes niveles de carga se utilizó el siguiente procedimiento: Si se asume 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 $N_{50,2}/N_{50,1} = j = 3, 16$, para decisiones de ingeniería y de $j = 2, 16$ para ensayos de alta confiabilidad, la relación entre un nivel de esfuerzo y el siguiente se puede expresar mediante la Ecuación (7) [3].

$$\frac{S_{a1}}{S_{a2}} = \varphi^{\frac{1}{K}} \quad (7)$$

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 (determinación del segundo nivel), de no haber información previa, se puede partir con valores de K entre 6 y

9, preferiblemente con valores altos. Una vez que ya se han ensayado dos niveles de esfuerzo, el siguiente se puede calcular con un valor de K que viene dado por la Ecuación (8) [3].

$$K = \frac{\log\left(\frac{N_{50,1}}{N_{50,2}}\right)}{\log\left(\frac{S_{a2}}{S_{a1}}\right)} \quad (8)$$

3. Para cada nivel se hizo una gráfica de logaritmo de esfuerzo versus la función de transformación Y y se calculó el número de ciclos para 1, 50 y 99 % de probabilidad de falla.
4. Finalmente se reunieron los resultados del intervalo de transición y del intervalo de vida finita y se ajustaron las curvas S-N que representan las envolventes de 1, 50 y 99 % de probabilidad de falla por el método de mínimos cuadrados utilizando la función representada en la Ecuación (9).

$$(\log(N) + B)(\log(S) + D) = A \quad (9)$$

Siendo A, B y D constantes del ajuste

Análisis microscópico. Para este análisis, se prepararon 9 muestras de acero, 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). Se utilizó un microscopio óptico Marca Unión MC 86267 con cámara Panasonic modelo WV-CP230. El reactivo químico utilizado fue Nital al 3 % (3 % de ácido nítrico diluido en 97 % de alcohol etílico), de acuerdo a lo establecido por la norma ASTM E 407-99. [7]

2.3. Estudio de la superficie de fractura.

Se evaluó la superficie de fractura de las probetas ensayadas, fueron seleccionadas 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. Estos estudios se realizaron con un microscopio electrónico marca JEOL- JSM-5300.

Tabla 1: Propiedades del acero AISI 1045 en condición original y normalizado.

Condición	Probetas	% AL	% RA	S _y (MPa)	S (MPa)	S _{rot} (MPa)
Original	1			786	878	721
	2			779	895	733
	3			782	833	702
	Promedio			783	869	718
	Desviación Estándar			3,67	31,85	15,32
Normalizadas	1	21,47	53,76	449	679	470
	2	20,47	56,88	402	547	487
	3	20,63	56,88	410	499	453
	4	21,57	57,75	465	699	559
	5	20,40	51,0	435	476	483
	6	21,67	46,95	495	553	579
	7	19,57	56,44	410	641	529
	8	21,97	50,77	460	581	561
	9	21,97	50,77	415	518	567
	Promedio	21,08	53,47	438	577	521
	Desviación Estándar	0,84	3,77	31,59	79,60	48,23

AL: Alargamiento.

RA: Reducción de área.

S_y: Esfuerzo fluencia.

S: Esfuerzo máximo.

S_{rot}: Esfuerzo de rotura.

3. Resultados y discusión.

Acabado superficial. Luego de tratar las superficies mecanizadas de las probetas para fatiga con los papeles de lija y hacer dos mediciones de rugosidad en cada una de las diez piezas tomadas al azar, se determinó una rugosidad promedio de 0,124 μm con una desviación estándar de 0,029 μm, lo cual cumple con lo requerido por la norma ASTM E-606 [6]

Ensayos a tracción. En la Tabla 1 se presentan las propiedades del acero AISI 1045 en condición original y las propiedades obtenidas a partir de las muestras ensayadas. Comparando los resultados de la Tabla 1 se puede observar una disminución del esfuerzo de fluencia en 43,6 % en el material normalizado respecto al de la condición original, de manera similar, los esfuerzos máximo y de rotura mostraron disminución de 35,59 % y 29,44 % respectivamente en el material normalizado respecto a la condición original. Lo anterior era de esperarse, ya que el material suministrado tiene un tratamiento térmico de temple más revenido con el cual se obtiene una gran resistencia en los aceros al carbono como el AISI 1045, y

al ser normalizados, la microestructura obtenida proporciona una resistencia menor.

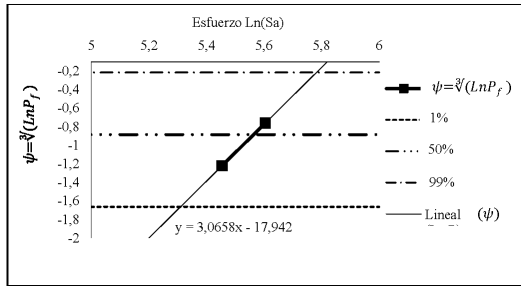


Figura 1: Probabilidad de fractura vs. esfuerzo aplicado en intervalo de transición.

Ensayo de Fatiga. En lo que respecta al intervalo de transición y siguiendo la metodología planteada, se estableció los siguientes límites: 234 MPa y 272 MPa, cuyas probabilidades de fractura se pueden observar en la Figura 1, a partir de la cual se obtuvo que los esfuerzos asociados con las probabilidades de falla de 1 %, 50 % y 99 % corresponden a 202 MPa, 261 MPa y 324 MPa, respectivamente. En cuanto al intervalo de

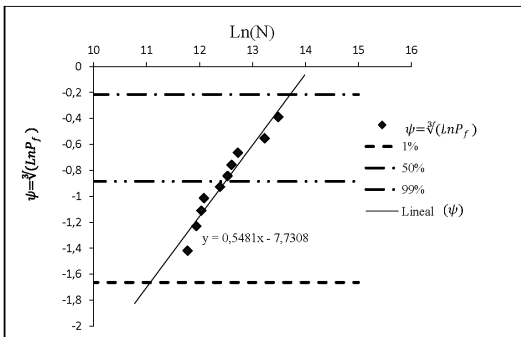


Figura 2: Ajuste lineal de datos experimentales para el cálculo de N1 %, N50 % y N99 %.

vida finita, se establecieron los tres niveles de esfuerzos siguientes: 297 MPa, 337 MPa y 383 MPa. En la Figura 2 se muestran los valores de transformada de probabilidad y de ciclos hasta la fractura obtenidos para el nivel de esfuerzo más bajo de este intervalo (297 Mpa), así como la función lineal que representa la tendencia de los datos utilizada para hacer la extrapolación y determinar los ciclos para probabilidades de fractura de 1 %, 50 % y 99 %. Para cada nivel de esfuerzo se siguió el mismo procedimiento.

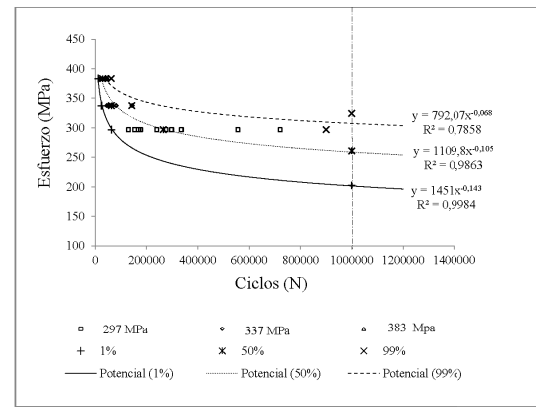
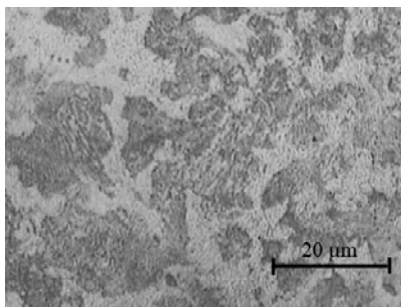


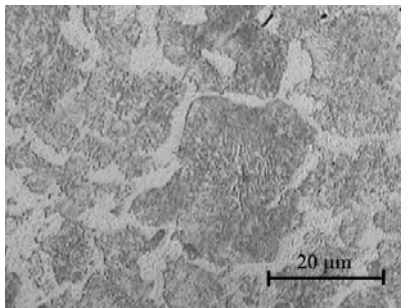
Figura 3: Curva S-N-P del acero AISI 1045 en condiciones de normalizado.

Ajuste de la curva S-N-P. En la Figura 3 se muestra la curva S-N-P y los ajustes potenciales para las curvas definidas por las probabilidades de fractura de 1 %, 50 % y 99 %. Se puede notar que la dispersión en los datos es mayor para valores de esfuerzo menores, lo cual es característico de este tipo de ensayos, debido a la naturaleza del fenómeno de fatiga, ya que a medida que los esfuerzos son menores, la ocurrencia de falla es más susceptible al acabado superficial de las muestras, vibraciones del equipo de ensayo, entre otros, que pueden favorecer la nucleación de microgrietas para un número de ciclos difícil de predecir; mientras que para esfuerzos más grandes, es precisamente el nivel de esfuerzo el factor predominante para la nucleación de las microgrietas y por tanto hay más convergencia en cuanto los ciclos necesarios para la ocurrencia de falla.

Metalografía. Para complementar el estudio de la fractura por fatiga se analizaron imágenes de las muestras de acero AISI 1045 en condición original y normalizadas (ver Figura 4), utilizadas para los diferentes niveles de esfuerzo ensayado. Se pudo constatar tanto en condición original como en las tratadas térmicamente, que la microestructura se componía de: perlita, caracterizada por presentar una estructura de láminas alternas en forma de huella digital, y ferrita, que parece como una fase clara [1], con una distribución y proporción similar en ambas condiciones.



(a)



(b)

Figura 4: Foto micrografía del material en: (a) estado de entrega y (b) normalizado (1000X).



Figura 5: Macrofotografía de Acero AISI 1045. Condición normalizado sometidas a fatiga de alto ciclaje ($S=234$ MPa).

Fractografía. La Figura 5 muestra una macrofotografía del Acero AISI 1045 en la condición de normalizado fatigada a alto ciclaje y bajo esfuerzo (234 MPa), en la cual se observan los detalles en la zona de fractura y la zona del inicio de la grieta. En la misma se puede observar las características marcas de playa que indican sucesivas etapas del proceso de rotura, una zona opaca en uno de los bordes que corresponde al inicio la fractura y una zona brillante que es la zona final, en dirección de la propagación de la grieta,

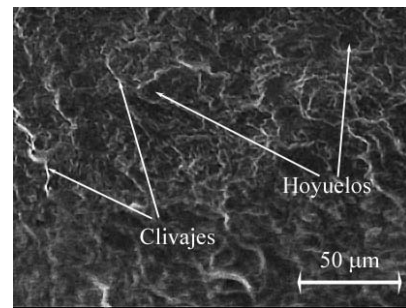


Figura 6: Microfotografía del Acero AISI 1045. Condición normalizado sometida a fatiga de alto ciclaje 500X ($S=234$ MPa).

acompañada de un labio de corte, característico de la zona terminal de la fractura. La zona de fractura presenta estriaciones consecutivas y bien demarcadas, lo cual es consistente con el un alto número de ciclos para el cual se da la falla. Al observar la misma condición con una mayor magnificación, mediante MEB, se aprecia en la Figura 6 la presencia de hoyuelos o dimples, que corresponden a un mecanismo de fractura dúctil.



Figura 7: Macrografía del Acero AISI 1045. Condición normalizado sometida a fatiga de bajo ciclaje ($S=384$ Mpa).

En la Figura 7 se observa el área de la superficie de fractura de la probeta AISI 1045 en condición de normalizado a bajo ciclaje. Se observa una fractura frágil, acompañada de marcas chevron que indican la dirección de propagación de la grieta. El sector 1 muestra posible plano de propagación de falla, a velocidad media. El sector 2, por su baja rugosidad, indica una menor velocidad de propagación de la grieta con respecto a la zona 3, donde predomina alta rugosidad, indicativo del fallo por sobrecarga en la etapa final. La topografía de la superficie de fractura sugiere una

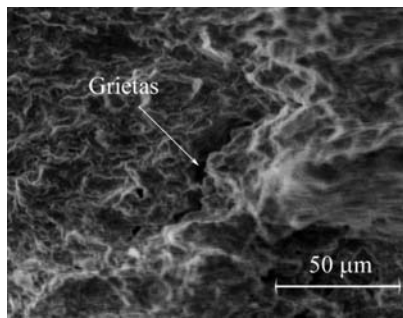


Figura 8: Microfotografía del Acero AISI 1045. Condición normalizado sometida a fatiga de bajo ciclaje 500X (S=384 MPa).

fractura de tipo mixta. Al observar con una mayor magnificación (Figura 8) obtenida mediante MEB, se observa hoyuelos o dimples, agrietamiento y algunas facetas de clivaje, lo que indica que un mecanismo de fractura es mixto.

4. Conclusiones.

La microestructura del acero AISI 1045 tanto en estado de entrega como normalizado presentó la estructura característica de perlita y ferrita con distribuciones y proporciones similares en ambas condiciones.

Se obtuvo la resistencia a la fatiga del acero AISI 1045 normalizado mediante el método de Maennig, para probabilidades de fractura de 1 %, 50 % y 99 % siendo de: 202 MPa, 261 MPa y 324 MPa, respectivamente.

Se obtuvieron ajustes potenciales para las curvas S-N del acero AISI 1045 para probabilidades de fractura de 1 %, 50 % y 99 %, siendo estas: $N_1 = 1451S^{-0,143}$, $N_{50} = 1109,8S^{-0,105}$ y $N_{99} = 792,07S^{-0,068}$, donde N está en ciclos y S en MPa.

Las muestras del acero AISI 1045 para la condición de normalizado presentaron fractura de tipo dúctil para las probetas de alto ciclaje y de tipo mixta para las de bajo ciclaje.

Agradecimientos.

Los agradecimientos son dirigidos al Concejo de Desarrollo Científico y humanístico de la

Universidad de Carabobo (CDCH-UC), por subvencionar esta investigación, a través del Proyecto de Investigación Menor CDCH-AM-039-11.

Referencias

- [1] W.F. Smith. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. McGraw Hill, Madrid, España, 1998.
- [2] M. F. Ashby y D. Jones. *Materiales para ingeniería 1*, volume 1. Reverté, 2008.
- [3] A. Monsalve, N. Valencia, M. Páez, y Y. Sepúlveda. Evaluación a fatiga rotatoria de aluminio 2024-t3. *Anales de Mec. de la Fractura*, 20:450–455, 2003.
- [4] Steven R. Lampman. *ASM Handbook: Volume 19, Fatigue y Fracture*. ASM International, ASM edition, 1996.
- [5] ASTM. *ASTM E-08, Standard Methods for Tension Testing of Metallic Material (Metric)*. ASTM, Philadelphia, 2004.
- [6] ASTM. *ASTM E-606, Standard practices for constant amplitude low-cycle fatigue testing*. ASTM, Philadelphia, 2004.
- [7] ASTM. *ASTM-E407-99, Standard practice for microetching metals and alloys*. ASTM, Philadelphia, 1999.