

Determination of the effect of a normalized thermal treatment on the fatigue life by rotating flexion of an AISI 1045 steel

Hernán Ulloa^a, Dessireé Scope^a, Argel Porrello^{*,b}, Carlos Alfonzo^b, Franklin Camejo^b

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

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

Abstract.-

In this research, the effect of a normalized thermal treatment on the fatigue life by rotating flexure of an AISI 1045 steel was determined. For this, the mechanical properties of the normalized steel were defined by tensile tests and five groups of specimens were studied under fatigue at the same level of alternating stress exceeding the fatigue limit of the material. A control group was used in which it was tested until fracture to determine the failure probability interval by the Maennig method. The other groups were tested with an interruption to perform a normalized, three of them were cycled values lower than the 1 % probability of failure and one slightly above it. Each group was determined the failure probability interval and compared to the control group, a variation of the same was found. With the quantification of these results, we can talk about the possibility of reversion of accumulated fatigue damage, at a number of cycles lower than the 1 % probability of failure, which could be used to extend life fatigue AISI 1045 steel.

Keywords: Maennig method; fatigue; AISI 1045; cumulative damage; normalized.

Determinación del efecto de un tratamiento térmico de normalizado sobre la vida a fatiga por flexión rotativa de un acero AISI 1045

Resumen.-

En esta investigación se determinó el efecto de un tratamiento térmico de normalizado sobre la vida a fatiga por flexión rotativa de un acero AISI 1045. Para ello se definieron las propiedades mecánicas del acero normalizado mediante ensayos de tracción y se estudiaron a fatiga cinco grupos de probetas a un mismo nivel de esfuerzo alternante superior al límite de fatiga del material. Se usó un grupo de control en el cual se ensayó hasta la fractura para determinar el intervalo de probabilidad de falla mediante el método de Maennig. Los otros grupos se ensayaron con una interrupción para realizar un normalizado, tres de ellos fueron ciclados unos valores menores que el de 1 % de probabilidad de falla y uno ligeramente por encima del mismo. A cada grupo se le determinó el intervalo de probabilidad de falla y se comparó con el grupo de control, encontrándose una variación del mismo. Con la cuantificación de estos resultados, se puede hablar de la posibilidad de la reversión del daño acumulado por la fatiga, a un número de ciclos inferior que el de 1 % de probabilidad de falla, lo cual pudiera utilizar para extender la vida una fatiga de acero AISI 1045.

Palabras clave: Método Maennig; fatiga; AISI 1045; daño acumulado; normalizado.

Recibido: diciembre 2016

Aceptado: marzo 2017

1. Introducción

El deterioro de los materiales bajo esfuerzos fluctuantes se conoce como daño acumulado por fatiga, concepto introducido por Palmgren [1] en los años veinte. En la actualidad la

*Autor para correspondencia

Correo-e: ajporrello@uc.edu.ve (Argel Porrello)

industria requiere elementos como ejes, árboles de transmisión de potencia, bielas, ruedas, engranajes, entre otros; los cuales son fabricados en su mayoría de materiales metálicos, generalmente de aceros; dichos elementos son sometidos a los efectos de la fatiga, en ocasiones minimizando su vida útil sin poder predecir la falla, causando la ejecución de mantenimientos correctivos, así como también paradas de planta que incrementan los costos operacionales y disminuyen la producción.. En esta investigación se evaluó el efecto producido por un normalizado sobre el daño acumulado, antes de la iniciación de la micro grieta, utilizando el método de Maennig [2, 3] y escogiendo un acero de gran utilidad para la fabricación de piezas relevantes en el funcionamiento de la industria en general, las cuales frecuentemente se encuentran bajo el efecto de la fatiga. Este método permitió definir la vida a fatiga para un esfuerzo alternante “S” con probabilidades de falla del 1 % y 99 % llamadas $N(1\%)$ y $N(99\%)$ respectivamente, definiendo un intervalo de ciclos de probabilidad de falla, como se muestra en la Figura 1.

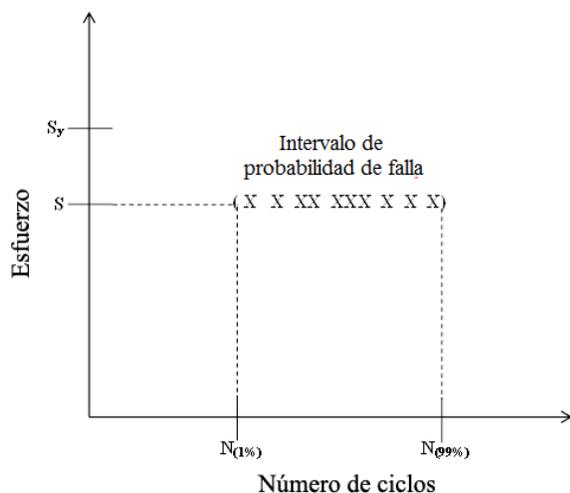


Figura 1: Representación esquemática del intervalo de probabilidad de falla.

2. Metodología

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 2013). Para la obtención de las propiedades mecánicas se mecanizaron las muestras de acuerdo a la norma ASTM E-8M [4], y se ensayaron en una máquina universal marca Galdabini, modelo CTM 20. Obteniéndose: 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 con las dimensiones especificadas en la norma ASTM E-606 [5]. Posteriormente, se pasó a un proceso de lijado, con los papeles abrasivos de números: 240, 280, 360, 400 y 600 hasta garantizar que la rugosidad promedio (R_a) se encontraba por debajo de $0,2 \mu\text{m}$, dando cumplimiento a las especificaciones de la norma ASTM E-606 [5]. Una vez preparadas las probetas, se procedió a tratarlas térmicamente por normalizado calentándolas a $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 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. Se utilizó una velocidad de giro de 5000 rpm.

2.1. Determinación del intervalo de probabilidad de falla

El método de Maennig [6, 3] contempla el rango de transición y de vida finita, como antes fue mencionado. Sin embargo, para el presente trabajo sólo se llevó a cabo el estudio del intervalo de vida finita, debido al interés presente en la evaluación de la variación del intervalo de probabilidad de falla al practicar un tratamiento térmico después de haber sometidos a ciclos de fatiga inferiores al 1 % de probabilidad de falla para luego continuar ciclando hasta la fractura. En la evaluación del intervalo de vida finita la variable independiente es la carga y la variable dependiente el número de ciclos. Para la estimación de la probabilidad de fractura de cada probeta, se utilizó la ecuación (1),

de acuerdo a lo descrito por Mosalve [7].

$$P_f = \frac{i - 0,417}{n + 0,166} \quad (1)$$

Donde P_f es la probabilidad de fractura en tanto por uno, i es el orden correlativo que correspondiente a la probeta al ordenarlas de manera ascendente de acuerdo al número de ciclos para la fractura y n es el número de probetas ensayadas.

Posteriormente se calculó las transformadas del número de ciclos para la fractura y de la probabilidad de fractura, utilizando las ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

$$X = \ln(N) \quad (2)$$

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

Donde X es la transformada del número de ciclos de fractura N y ψ es la transformada de la probabilidad de fractura P_f (todas adimensionales)

Al graficar todos los puntos (X, ψ) , y hacer un ajuste por mínimo cuadrados a una función lineal, se puede determinar el número de ciclos para probabilidades de fractura de 1% y 99% al hallar los valores de X correspondientes a los valores de ψ para dichos valores de probabilidad de fractura. En la Figura 2 se puede observar una representación esquemática del proceso.

Se estudiaron cinco grupos de probetas, uno de los cuales fue establecido como de control al determinarse el intervalo de probabilidad de falla sin interrupción del ensayo en cada probeta (cómo normalmente se lleva a cabo un ensayo de fatiga); luego en otros tres grupos, las probetas fueron ensayadas hasta un número de ciclos menor al de 1% de probabilidad de falla determinado para el grupo de control, se detuvo el ensayo, una vez cicladas todas las probetas se les realizó un normalizado calentando a 850°C y durante media hora y luego enfriando al aire libre quieto. y el restante grupo se ensayó a un número de ciclos ligeramente superior al de 1% de probabilidad de falla del grupo de control.

Todos los grupos fueron ensayados a un mismo nivel de esfuerzo e igual rpm, cada grupo con 8 probetas, manteniendo las sobrantes de respaldo

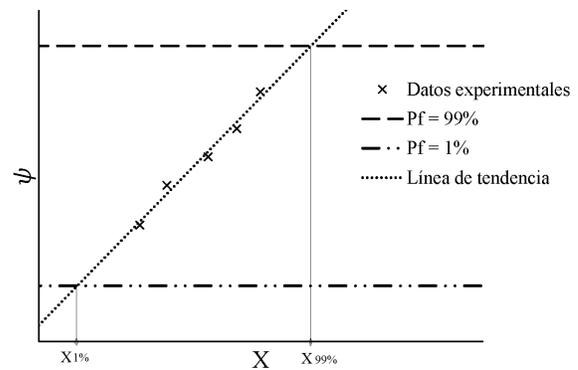


Figura 2: Determinación del intervalo de probabilidad de falla.

por cualquier eventualidad durante los ensayos. Para los grupos con tratamiento térmico intermedio, el número de ciclos para la fractura fue la suma de los ciclos antes y después del normalizado (ecuación (4))

$$N = N_t + N_f \quad (4)$$

Donde N es la vida a fatiga de la probeta, N_t y N_f los ciclos realizados antes y después del tratamiento de normalizado, respectivamente.

Inicialmente se realizó una prueba con un nivel de esfuerzo (S) de 300 MPa, menor al valor de fluencia y mayor al límite de fatiga, presentado por Marín [8]. Luego de ensayadas dos primeras probetas del primer grupo, se observó que los valores de número de ciclos de fractura (N_f) fueron muy bajos y cercanos entre sí, por lo que se decidió tomar un valor de esfuerzo de 290MPa, cuidando que siguiera siendo mayor al límite de fatiga, esto con la finalidad de garantizar la falla de las probetas y obtener un intervalo de probabilidad de falla suficientemente amplio para realizar el estudio.

3. Resultados y discusión

Mediante los ensayos de tracción realizados se determinó un esfuerzo de fluencia promedio de 461,7 MPa (S_y) con una desviación estándar de 1,15 MPa; un esfuerzo máximo de 738,4 MPa (S_u) con una desviación estándar de 1,5 MPa; el porcentaje de alargamiento a la rotura fue de 20,6% con una desviación estándar de 1,69%

y el porcentaje de reducción de área fue de 41,7% con una desviación estándar de 3,47%. El esfuerzo de fluencia determinado fue un 5,4% mayor al obtenido por Marín [8] lo cual dio sustento al uso del límite de fatiga determinado en esa investigación como valor de referencia para determinar el esfuerzo de estudio en este trabajo.

Respecto a los ensayos de fatiga, en la Tabla 1 se muestran los resultados de vida a fatiga de cada una de las ocho probetas ensayadas, así como el correlativo al ordenarlas en orden ascendente y los cálculos de probabilidad de falla y la transformada de ésta y de la vida a fatiga.

Tabla 1: Vida a la fatiga, probabilidad de fractura y sus transformadas para el grupo de control.

| Probeta | N(ciclos) | X | i | P_f | ψ |
|---------|-----------|--------|---|-------|--------|
| 1 | 298.000 | 12,605 | 8 | 0,929 | -0,420 |
| 2 | 278.200 | 12,536 | 6 | 0,684 | -0,724 |
| 3 | 206.700 | 12,239 | 2 | 0,194 | -1,179 |
| 4 | 213.100 | 12,270 | 3 | 0,316 | -1,048 |
| 5 | 218.000 | 12,292 | 4 | 0,439 | -0,937 |
| 6 | 291.600 | 12,583 | 7 | 0,806 | -0,600 |
| 7 | 120.900 | 11,703 | 1 | 0,071 | -1,382 |
| 8 | 232.800 | 12,358 | 5 | 0,561 | -0,833 |

En la Figura 3 se representan gráficamente los valores de transformada de la probabilidad de fractura (ψ), y de la transformada del número de ciclos de falla (X) junto con el ajuste lineal mediante mínimos cuadrados y las líneas horizontales que representan las transformadas de probabilidad para 1% y 99%.

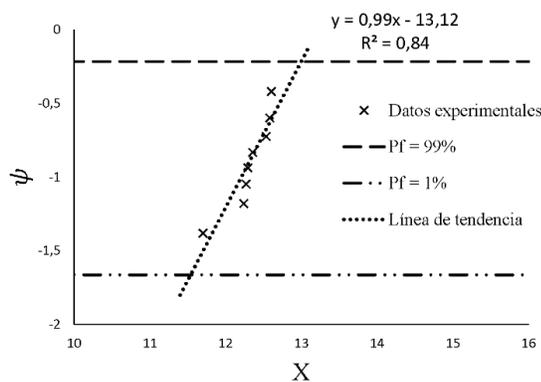


Figura 3: Intervalo de probabilidad falla mediante el método de Maennig.

Al intersectar la línea de ajuste hecha para los valores experimentales con las líneas horizontales de transformada de la probabilidad de 1% y 99%, se obtuvieron los valores de transformada del número de ciclos de vida a fatiga correspondientes a los mismos. En la Tabla 2 se resumen los valores de transformada obtenidos y de vida a fatiga para cada probabilidad de falla (intervalo de probabilidad de falla) para el grupo de control.

Tabla 2: Intervalo de probabilidad de falla del grupo de control.

| P_f | $\psi = \sqrt[3]{\ln(P_f)}$ | $X = \frac{\psi+13,11}{0,992}$ | $N = e^X$ (ciclos) |
|-------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 0,01 | -1,664 | 11,544 | 103.205 |
| 0,99 | -0,216 | 13,004 | 444.154 |

Como puede observarse en la Tabla 2, el número de ciclos para una probabilidad de falla de 1% a 290 MPa es de 103.205 ciclos, de manera que los siguientes grupos estudiados tuvieron cantidades de ciclos de 40000, 80000, 100000 y 120000 antes de detener el ensayo para luego normalizar y nuevamente ensayar hasta la fractura. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos del intervalo de probabilidad de falla para cada grupo estudiado.

Tabla 3: Intervalo de probabilidad de falla para los diferentes grupos estudiados.

| GRUPO | Ntt (ciclos) | $N_{1\%}$ | $N_{99\%}$ |
|---------|-----------------|-----------|------------|
| Control | 0 | 103.205 | 444.154 |
| grupo 1 | 40.000 | 124.826 | 703.737 |
| grupo 2 | 80.000 | 115.146 | 816.886 |
| grupo 3 | 100.000 | 94.088 | 639.215 |
| grupo 4 | 120.000 | 59.283 | 500.081 |

En la Figura 4 se representan los intervalos de probabilidad de falla de los diferentes grupos estudiados, observándose su comportamiento para las probetas de acero AISI 1045 bajo condiciones de ciclaje acumulado, con un normalizado intermedio antes de la fractura, a un nivel de esfuerzo fluctuante de 290 MPa.

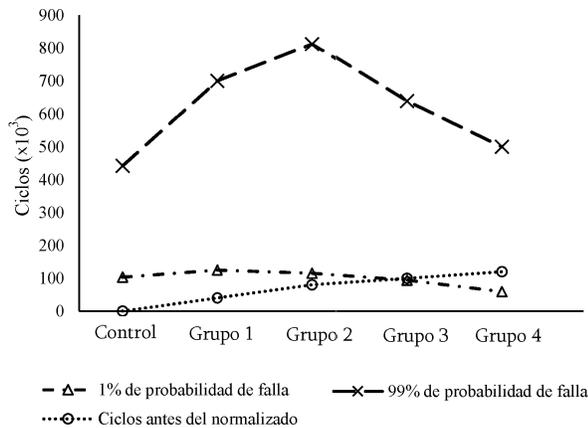


Figura 4: Intervalos de probabilidad de falla de los grupos estudiados.

Como se puede observar en la Figura 4, todos los intervalos de probabilidad de falla se expandieron al aplicar un normalizado al acero AISI 1045 luego de haber sido sometido a condición de carga durante un número de ciclos determinado. En los grupos 1 y 2 con 40000 y 80000 ciclos antes del normalizado, respectivamente, mostraron un aumento del número de ciclos para una probabilidad de fractura de 1 % (20,9 % y 11,6 %, respectivamente), lo cual se pudiera interpretar como una ganancia en la vida a fatiga del material respecto al grupo de control, sugiriendo una posible reversión del daño acumulado antes del normalizado, para una cantidad de hasta 80.000 ciclos previos, que representa el 77,5 % de los ciclos para 1 % de probabilidad de falla. Por otro lado, los grupos 3 y 4 mostraron una disminución del número de ciclos para una probabilidad de fractura de 1 % (-8,8 % y -42,6 %, respectivamente), a pesar de que el grupo tres fue ciclado a un valor inferior, pero muy cercano, al del grupo de control, lo cual pudiera sugerir la existencia de un umbral para la reversión del daño por fatiga, el cual estaría a un nivel de ciclos inferior al de 1 % de probabilidad de fractura.

Respecto al límite superior del intervalo de probabilidad de falla (99 %), se puede observar en la Figura 4 que todos los grupos presentaron aumento en dicho valor, reforzando esto la suposición de la posibilidad de revertir el daño acumulado por fatiga y de la existencia de un umbral más allá del

cual el daño será irreversible, de acuerdo con el siguiente planteamiento:

Supóngase que existe un valor N_u de ciclos hasta el cual el daño acumulado por fatiga es reversible (umbral de daño acumulado), el cual estaría por debajo del número de ciclos para una probabilidad de fractura de 1 %. Ahora supóngase que se cuenta con un número de probetas (4 por ejemplo) de las cuales se conoce, para un determinado esfuerzo cíclico, la vida a fatiga y el umbral de fatiga. Como son conocidas las vidas a fatigas, entonces se puede determinar el intervalo de probabilidad de falla para ese nivel de esfuerzo mediante el método de Maennig, representado por la intersección del ajuste lineal (inicial) y las horizontales de 1 % y 99 % de probabilidad de falla de la Figura 5.

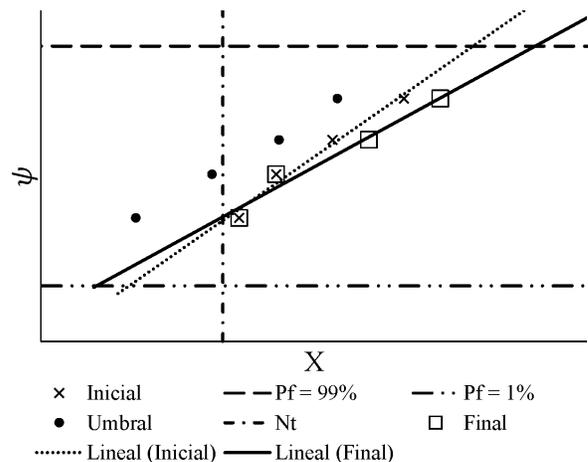


Figura 5: Representación de la expansión del intervalo de probabilidad de falla.

Lo que pasaría con ese grupo de probetas, si fuesen cicladas hasta una cantidad N_i de ciclos, que como puede observarse en la Figura 5, sería mayor que el umbral de dos de las probetas, entonces para esas el daño acumulado es irreversible. Si después de cicladas fuesen sometidas, como en el caso de este estudio, a un normalizado, la muestras cuyo umbral no fue superado entonces extenderían su vida; mas no aquellas en las que se superó el umbral, este nuevo grupo está representado en la Figura 5 con el nombre de Final (Nótese que sólo dos vieron incrementada su vida a fatiga).

Puede observarse claramente en la Figura 5, que en el planteamiento hecho se observaría una

expansión del intervalo de probabilidad de falla, con disminución del número de ciclos para 1 % de probabilidad de falla respecto al grupo de probetas inicial, debido a que el ciclaje inicial superó el umbral de daño acumulado por fatiga.

Finalmente, se observa con los resultados mostrados, que el tratamiento de normalizado influye en el comportamiento a fatiga del material con un ciclaje acumulado, observándose que para las muestras con ciclaje acumulado menor al correspondiente a Pf de 1 %, la repuesta del material normalizado es favorable, ya que los puntos que representan este daño en la gráfica, fueron desplazados hacia una zona de mayor número de ciclos por encima de la del intervalo de referencia. Sin embargo, este comportamiento no puede aseverarse en su totalidad, pudiéndose atribuir también a la elevada dispersión obtenida en los resultados.

4. Conclusiones

El tratamiento térmico de normalizado aplicado al acero 1045 con ciclaje acumulado, influye en el aumento del número de ciclos para la probabilidad de fractura de 1 % traduciéndose en una ganancia en la vida a la fatiga.

El producido por el T.T. Normalizado en un acero AISI 1045 sobre el daño acumulado antes de la iniciación de grieta utilizando método de Maening en un ensayo de fatiga por Flexión rotativo con ciclaje menor correspondiente a la probabilidad de fractura de 1 % (PF) es favorable.

Los intervalos de probabilidad de falla 1 % se expandieron luego de haber sido sometido a la condición de carga durante un número de ciclos determinado en comparación al grupo de control, lo cual puede sugerir un umbral para la reversión del daño por fatiga alrededor de la probabilidad de falla 1 %.

En cuanto al límite superior del intervalo de probabilidad de fractura del 99 % aumentaron también reforzando la suposición de la posibilidad de revertir el daño acumulado por fatiga y de la existencia de un umbral del cual el daño sea irreversible.

Referencias

- [1] A Palmgren. Die lebensdauer von kugellagern. *Veifahrenstechnik, Berlin*, 68(14):339–341, 1924.
- [2] W. W. Maennig. *ASM Handbook. Fatigue and fracture*, volume 19, chapter Planning and Evaluation of Fatigue Tests, pages 303–313. ASM International, 1976.
- [3] Jürgen Jahn and Wolfgang-Werner Maennig. Safe evaluation of fatigue data in the range of finite endurance. *International journal of fatigue*, 19(4):335–344, 1997.
- [4] ASTM E-08(2004), E-08 Standard test methods for tension testing of metallic materials, 2012.
- [5] ASTM E-606(2012), E-606 Standard practice for strain-controlled fatigue testing, 2012.
- [6] W. W. Maennig. Planning and evaluation of fatigue tests. *ASM International, Member/Customer Service Center, Materials Park, OH 44073-0002, USA, 1996.*, pages 303–313, 1996.
- [7] 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.
- [8] Marirey Marín, Argel Porrello, Carlos Alfonso y Sandra Cabello-Sequera. Determinación de la curva snp a través del método Maennig para el acero AISI 1045 sometido a un tratamiento térmico de normalizado. *Revista Ingeniería UC*, 21(3):38–44, 2014.