|  |
| --- |
| **VALIDACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS A TRAVÉS DE UNA MÁQUINA DE FATIGA POR FLEXIÓN ROTATIVA** **UTILIZANDO ACERO AISI SAE 1045** |

|  |
| --- |
| **Carlos Cárdenasa, Camilo Sandovala, Alfonso Santosb** |

|  |
| --- |
| **a** Ingeniería Electromecánica, Unidades Tecnológicas de Santander [ccardenas@correo.uts.edu.co](mailto:ccardenas@correo.uts.edu.co)  **b** Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, [alfonso.santos@upb.edu.co](mailto:alfonso.santos@upb.edu.co) |

*Resumen -* La incertidumbre que se tiene con respecto a los resultados que arroja el equipo para ensayos de fatiga por flexión rotativa con que cuenta las Unidades Tecnológicas de Santander es un problema que requiere de atención y análisis; debido a esto, se realizaron pruebas en el laboratorio y a través de la aplicación de un análisis estadístico se pretende responder ¿En qué grado la máquina de fatiga por flexión rotativa arroja resultados satisfactorios comparados con los valores teóricos esperados de los materiales?. Para responder esta pregunta se planteó una hipótesis que consistió en que cuando se realizan pruebas de fatiga por flexión rotativa, a una misma magnitud de esfuerzo, en el laboratorio de las Unidades Tecnológicas de Santander las probetas de aceros con bajo contenido de carbono, como el acero 1045, siempre se rompe en el mismo punto de la curva S-N. Con el fin de comprobar la hipótesis se realizaron pruebas siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E-606 para ensayos de fatiga y para el análisis estadístico se determinó el promedio y la desviación estándar característica de cada prueba realizada. Los resultados obtenidos presentaron un error máximo de un 25.8% con respecto a los valores teóricos que se debían obtener para las mismas condiciones de esfuerzos aplicados a las probetas, adicionalmente el valor máximo de desviación estándar que se presentó en los ensayos realizados a probetas de acero AISI 1045 fue de 6.27% para un esfuerzo alternante aplicado de 161 MPa.

*Palabras clave -* Esfuerzos Cíclicos, Fatiga, Flexión rotativa, Fiabilidad

***Abstract*** *-*The uncertainty regarding the results of the equipment for tests of rotary bending fatigue at Unidades Tecnologicas de Santander is a problem that requires attention and analysis; Due to this, tests were carried out in the laboratory and through the application of a statistical analysis which is intended to answer what degree does the rotary bending fatigue machine yield satisfactory results compared to the expected theoretical values of materials? To answer this question a hypothesis was proposed and it consisted on that when rotary bending fatigue tests are carried out, at the same magnitude of stress, in the laboratory of Unidades Tecnologicas de Santander, the specimens of low carbon steel such as 1045 steel always rupture in the same point of the S-N curve. To prove the hypothesis, tests were carried out following the guidelines of ASTM E-606 for fatigue tests and for the statistical analysis were determined the average and standard deviation characteristic of each test performed. The results obtained presented a maximum error of 25,8%regarding the theoretical values that may be obtained for the same conditions of stress applied to the specimens, additionally the maximum value of standard deviation in the tests performed to specimens of AISI 1045 steel was 6,27% for an applied alternating stress of 161 MPa.

***Keywords*** *– Cyclic Stress, Fatigue, Rotary Bending, Reliability*

# Introducción

Los componentes estructurales sometidos a esfuerzos alternantes requieren ser diseñados para soportar un gran número de ciclos o condiciones de vida infinita; Herramientas como el diagrama de Goodman (Goodman, 1899) y el de Goodman modificado (Nicholas & Zuiker, 2004) se utilizan a menudo, pero estos son generalmente construido usando datos de fatiga uniaxial, por lo que los diseños se basan en este tipo de esfuerzos.

La fatiga mecánica es un fenómeno físico que se produce debido a cargas cíclicas o alternantes (variables) a las que es expuesto un material. El comportamiento bajo este tipo de carga es diferente a si estuviera bajo cargas estáticas.

La característica de esta falla por fatiga es que inicia con una pequeña grieta la cual puede presentarse desde la formación del material, lo cual puede anticipar el daño disminuyendo la vida útil del elemento. Dado que inicialmente la falla se atribuyó a una cristalización del material que lo volvía como el vidrio, Wöhler (1860) investigó sobre este fenómeno y descubrió que la fatiga no alteraba las propiedades del material y que era un proceso de agrietamiento paulatino producido por la acción de cargas repetitivas. En cuanto al caso más simple de carga de amplitud variable, los efectos de está sobre la propagación de las fisuras ha sido estudiado extensivamente para un gran número de aleaciones de acero (Sander et al., 2006) (Kalnaus et al., 2008) y aluminio (Borrego et al., 2003) (Zhou et al., 2016).

En todos los materiales existentes ocurre este fenómeno de fatiga, el cual es el causante de aproximadamente el 90% de las fallas mecánicas que se producen en máquinas (Schijve, 2003) (Arutyunyan & Arutyunyan, 2014); debido a este hecho su estudio es importante pues puede surgir sin previo aviso y de forma rápida, debido a la condición de sus cargas. Por esto se llevan a cabo investigaciones que permitan determinar la vida en fatiga, es decir, la resistencia última en fatiga para diferentes tipos de materiales según sus propiedades o características físicas.

Existen varios tipos de ensayos para determinar la vida a fatiga de un espécimen. El más empleado es el de viga rotatoria el cual puede ser realizado bien sea con la máquina de Moore o la de tipo de viga en voladizo. En los ensayos de fatiga por flexión rotativa se aplica una carga transversal conocida al espécimen, seguidamente se enciende el motor, el cual gira a un determinado número de rpm, hasta que la probeta rompe. En el instante cuando se origina la falla por fractura se consigna el valor del número de ciclos y el esfuerzo al cual ocurre la rotura y con esos datos se construye el diagrama esfuerzo-número de ciclos (S-N). En el caso de un acero, la probeta tarda hasta medio día en alcanzar el millón de ciclos, lo cual indica que estos ensayos toman tiempo. Dado que se requiere conocer los valores de límite de fatiga a bajo y alto ciclaje, se deben ensayar un número significativo de probetas para obtener datos estadísticamente confiables y repetibles.

Esté ensayo se utiliza tanto para determinar el comportamiento de elementos de sección trasversal maciza como para secciones huecas, aun siendo extensamente conocido su comportamiento a la fatiga y ampliamente estudiado el fenómeno de crecimiento de grieta en ellos, la compresión del fenómeno empírico adolece aún de un soporte teórico que valide los resultados obtenidos (Ariza et al., 2014).

La validación de un ensayo consiste en demostrar experimentalmente que los procedimientos de análisis que se aplican durante la prueba generan resultados confiables (válidos), y esta debe hacerse siempre antes de poner a disposición de los usuarios la metodología y los equipos requeridos para la determinación de cualquier variable que se desee cuantificar.

Para realizar la validación de los resultados obtenidos de un ensayo es necesario inicialmente determinar que parámetros se necesitan para demostrar la confiabilidad del método, de acuerdo a las normas nacionales e internacionales que sean aplicables, y a los recursos disponibles, para asegurar la trazabilidad de las mediciones y determinaciones que se deben realizar en la fase experimental de la validación.

La incertidumbre se calcula para cuantificar la calidad y confiabilidad de las medidas realizadas a través de un instrumento o un ensayo; la relación entre la calidad y la incertidumbre es inversamente proporcional, si la magnitud de la incertidumbre es baja la calidad de la medida es mayor y viceversa (Kadis, 2017) (Paolino et al., 2013)

La incertidumbre de una medida es el valor de la semi-amplitud de un intervalo alrededor del valor resultante de la medida (valor convencionalmente verdadero). Dicho intervalo representa una estimación adecuada de una zona de valores entre los cuales es casi seguro que se encuentra el valor verdadero de la medida.

Algunos de los factores de los cuales depende la magnitud de la incertidumbre son: influencia de las condiciones ambientales, lecturas diferentes de instrumentos analógicos, variaciones en las observaciones repetidas de la medida en condiciones aparentemente idénticas, límite en la resolución del instrumento de medida, valores inexactos de los materiales de referencia utilizados, valores inexactos de constantes y otros parámetros de fuentes externas, etc. (Correia et al., 2017) (Bengtsson & Rychlik, 2009)

# materiales y métodos

Los ensayos de fatiga por flexión rotativa se realizaron en una máquina diseñada y construida en las Unidades Tecnológicas de Santander, la cual se observa en la Fig. 1



Fig. 1. Equipo utilizado para la realización de los ensayos de fatiga. Fuente: autores del proyecto

El muestreo se realizó según la norma ASTM E-606, que menciona como primer requerimiento que los elementos de sujeción de la probeta deben estar perfectamente alineados, de no ser así se generan esfuerzos axiales indeseados en el ensayo que alteran la lectura de los resultados.

Un segundo requerimiento es equipar al banco de ensayos de un transductor de fuerza con el cual se toma de una forma exacta la lectura de las diferentes cargas aplicadas a las probetas.

Para la medición y el control de parámetros se recurre al acondicionamiento de dispositivos eléctricos y electrónicos, como se observa en la Fig. 2, que posibilitan ciertas acciones como la medición de ciclos y magnitud de carga, apagado de emergencia del motor y al momento de la fractura.

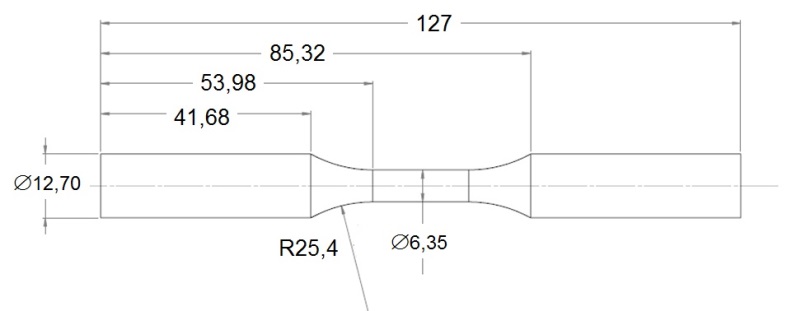


Fig. 2. Dispositivos utilizados para el control de parámetros durante el ensayo de fatiga. Fuente: autores del proyecto

La medición de la carga sobre el módulo de prueba se realiza por medio de una celda de carga tipo “S”, la cual proporciona una salida digital, con una resolución de 0.1 kg.

La toma de datos se realiza de forma visual a través de una interfaz gráfica llamada LabVIEW, que permite obtener resultados en tiempo real y un historial de datos de las variables esfuerzo vs números de ciclos; se varia la magnitud proveniente del módulo de carga y la velocidad de giro del motor para cada prueba, con el propósito de obtener las curvas S-N.

Las probetas utilizadas (Fig. 3) en los ensayos de flexión rotativa deben tener un diámetro mínimo de 0.25 in (6.35 mm), mecanizadas en un torno CNC para proporcionar una superficie altamente pulida con el fin de evitar que el material falle en una zona que no es de interés y el ensayo se considere válido por fatiga según la norma ASTM E606.



Unidades mm

Fig. 3. Plano de las probetas utilizadas en los ensayos de fatiga. Fuente: autores del proyecto

El modelo estadístico utilizado para el análisis de resultados fue el de regresión de mínimos cuadrados, donde la ecuación de modelado es:

Donde

*N* representa la vida a la fatiga y *S* el esfuerzo a que se somete el elemento.

# Desarrollo del TrAbajo

Inicialmente se fabricaron 40 probetas estandarizadas según la norma ASTM E606 (Fig. 4) para realizar 4 ensayos con nueve magnitudes de esfuerzo diferentes en el rango de alto ciclaje de vida finita, y uno en el rango de alto ciclaje de vida infinita; durante el desarrollo del ensayo de flexión rotativa se cuantificó la fuerza aplicada en la prueba, el esfuerzo cíclico que soporta la probeta y el número de ciclos aplicado hasta la ocurrencia de la falla por fractura; con estos ensayos iniciales se busca determinar la resistencia a la fatiga del material y compararla con los datos teóricos obtenidos.



Fig. 4. Probetas utilizadas en los ensayos de fatiga. Fuente: autores del proyecto

El material utilizado para la fabricación de las probetas fue el acero AISI 1045, sus propiedades mecánicas más relevantes se relacionan en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades típicas del acero AISI 1045 a temperatura ambiente sin endurecimiento

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Propiedad** | **Laminado en Caliente** | **Normalizado** | **Recocido** |
| Resistencia a la tracción (MPa) | 655 | 655 | 620 |
| Punto de fluencia (MPa) | 413 | 413 | 379 |
| % de elongación | 23 | 23 | 26 |
| % reducción de área | 44 | 45 | 53 |
| Dureza Brinell (3000 kg.) | 190 | 190 | 180 |

Fuente: Compañía general de aceros S.A.

La carga que se puede aplicar a las probetas para garantizar condiciones de vida infinita se obtuvo con base en las propiedades del material y un análisis teórico de la resistencia a la fatiga (1) (Schmid et al., 2013)

(1)

Donde ηs es el factor de seguridad que se desea tener en la probeta, en este caso se asumió un valor de 1 ya que la finalidad del ensayo es llevar la probeta hasta la fractura; σa es el esfuerzo alternante aplicado en la probeta (2) y Se es el límite de resistencia a la fatiga de alto ciclaje (3).

(2)

Donde *Kf* es el factor de concentración de esfuerzos en el filete, *M* es el momento flector que se obtiene del diagrama de momentos, *c* es el radio de la sección transversal de la probeta e *I* es el momento de inercia de esa misma sección transversal.

(3)

Donde *kf* es el factor de acabado superficial, *ks* es el factor de tamaño, *kr* es el factor de confiabilidad, *kt* es el factor de temperatura y *km* son los factores diversos; los datos utilizados fueron 0.78, 0.97, 0.5, 1 y 1 respectivamente. El valor de *Se’* fue de 328 MPa y equivale al 50% de la resistencia última del material (Budynas & Nisbett, 2014)

Después de comprobar los resultados obtenidos con la información teórica disponible, se procedió a fabricar 12 probetas adicionales las cuales se ensayaron a una condición de carga de 150N y con estos resultados se procedió a cuantificar la incertidumbre del ensayo realizado en la máquina de fatiga por flexión rotativa a través de la determinación de la desviación estándar presente en la prueba.

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La carga máxima teórica que se puede aplicar a la probeta para alcanzar condiciones de vida infinita en el filete de la probeta es:

Para determinar la fuerza transversal que se debe aplicar para alcanzar el límite de resistencia a la fatiga de bajo ciclaje (1000 ciclos) se realiza el mismo procedimiento, sólo que el valor de resistencia a la fatiga para esta condición es 90% de la resistencia última del material, es decir tiene una magnitud de 590 MPa y los factores que modifican este valor se consideran como 1, ya que en teoría para este número tan bajo de ciclos no afectan la capacidad del material (Budynas & Nisbett, 2014). El resultado obtenido según estas consideraciones es de 548 N.

En este rango de fuerzas transversales que se pueden aplicar se realizaron 9 subdivisiones, una cada 50 N, y para cada uno de estos valores se determinó el número de ciclos teórico según una tendencia lineal que define la fatiga de alto ciclaje de duración finita (4).

(4)

Donde *Nt* es el número de ciclos de falla, *Sf* es la resistencia a la fatiga para N ciclos, es la intersección de la línea con el eje vertical y *bs* es la pendiente de la línea. Los resultados obtenidos de estos análisis teóricos se relacionan en la tabla 2.

Tabla 2. Número de ciclos teóricos que soporta el acero AISI 1045 para diferentes magnitudes de fuerzas transversales

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Fuerza (N)** | **Esfuerzo (MPa)** | **Número de Ciclos** |
| 550 | 592 | < 1000 |
| 500 | 538 | 1503 |
| 450 | 484 | 2396 |
| 400 | 431 | 4038 |
| 350 | 377 | 7296 |
| 300 | 323 | 14444 |
| 250 | 269 | 32396 |
| 200 | 215 | 87062 |
| 150 | 161 | 311416 |
| 100 | 108 | ∞ |

Fuente: Autores del proyecto

Para cada magnitud de carga definida en la tabla 2 se realizaron 4 ensayos a través de la máquina de fatiga por flexión rotativa, con el fin de cuantificar el máximo error presente que se obtiene con el equipo. Los resultados obtenidos se relacionan en la tabla 3.

Tabla 3. Porcentajes de error del número de ciclos obtenidos entre los datos experimentales y los datos teóricos

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Fuerza (N)** | **Ciclos Teóricos** | **Ciclos Experimentales** | **Error (%)** |
| 550 | < 1000 | 920 | - |
| 500 | 1503 | 1115 | 25.8 |
| 450 | 2396 | 1875 | 21.7 |
| 400 | 4038 | 3589 | 11.1 |
| 350 | 7296 | 6638 | 9.02 |
| 300 | 14444 | 13472 | 6.73 |
| 250 | 32396 | 31058 | 4.13 |
| 200 | 87062 | 84178 | 3.31 |
| 150 | 311416 | 301468 | 3.19 |
| 100 | ∞ | 1125351 | - |

Fuente: Autores del proyecto

El porcentaje de error máximo presente durante los ensayos fue del 25.8% y se presenta a bajos esfuerzos, esto se debe probablemente a que en los datos teóricos calculados el factor de concentración de esfuerzos se consideró independiente del número de ciclos que soporta la probeta, lo cual concuerda con las afirmaciones realizadas por (Juvinall, 2002); sin embargo otros autores como (Dowling, 1993) recomiendan utilizar una porción reducida del factor de concentración de esfuerzos en función del número de ciclos que se le aplicará a la pieza y esto puedo conllevar un incremento en el porcentaje de error obtenidos en los ensayos.

Adicionalmente también se evidencia que el porcentaje de error es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada durante el ensayo, debido probablemente a la consideración teórica que los factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga no afectan la resistencia de los materiales para condiciones de bajo ciclaje (Norton, 1999) y se realiza una aproximación lineal de su influencia en función del número de ciclos.

Fig. 5. Curva S-N en escala aritmética para un acero AISI 1045 obtenida a partir de ensayos realizados en la máquina de fatiga por flexión rotativa

El comportamiento de la curva S-N obtenida a partir de los ensayos realizados se relaciona en la Fig. 5; cuando se utiliza una escala aritmética la tendencia de los datos se puede expresar matemáticamente a través de una función logarítmica natural.

Para obtener un comportamiento lineal de la curva S-N, como se encuentra reportado en la mayor parte de la literatura, los datos de esfuerzo y número de ciclos se deben representar en escala logarítmica, como se observa en la Fig. 6.

Fig. 6. Curva S-N en escala logarítmica para un acero AISI 1045 obtenida a partir de ensayos realizados en la máquina de fatiga por flexión rotativa

Para cuantificar la incertidumbre originada por la repetibilidad de la prueba en los ensayos de fatiga se realizaron 12 ensayos adicionales a una carga constante de 150 N, ya que para esta magnitud de esfuerzo (161 MPa) se presenta la mayor diferencia entre los datos teóricos y experimentales del número de ciclos que soporta la probeta, con un valor de 9948 ciclos. Los resultados obtenidos se relacionan en la tabla 4.

Tabla 4. Promedio y desviación estándar obtenidos de los ensayos de fatiga realizados con una fuerza transversal de 150 N

|  |  |
| --- | --- |
| **# Ensayo** | **Ciclos Experimentales** |
| 1 | 301486 |
| 2 | 275425 |
| 3 | 324156 |
| 4 | 275128 |
| 5 | 311478 |
| 6 | 301456 |
| 7 | 284971 |
| 8 | 300457 |
| 9 | 289564 |
| 10 | 328941 |
| 11 | 311578 |
| 12 | 328452 |
| Promedio (ciclos) | 302758 |
| Desviación Estándar (ciclos) | 18990 |

Fuente: Autores del proyecto

La desviación estándar obtenida de los ensayos representa un 6.27% del valor promedio de la variable cuantificada. Este valor puede ser clasificado como aceptable ya que la caracterización de materiales con respecto a su capacidad de soportar cargas que originan esfuerzos completamente alternantes se considera bastante aleatoria y difícil de predecir.

Con base en esta prueba se encontró la varianza de los datos obtenidos de la siguiente manera:

Tabla 5. Logaritmo y varianza de los ciclos obtenidos en los ensayos de fatiga realizados con una fuerza transversal de 150 N

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **# Ensayo** | **Log N** |  |
| 1 | 5,479267 | 1,08299E-06 |
| 2 | 5,440003 | 0,001624466 |
| 3 | 5,510754 | 0,000926979 |
| 4 | 5,439534 | 0,001662492 |
| 5 | 5,493427 | 0,000172117 |
| 6 | 5,479224 | 1,17434E-06 |
| 7 | 5,4548 | 0,000650641 |
| 8 | 5,477782 | 6,37901E-06 |
| 9 | 5,461744 | 0,00034461 |
| 10 | 5,517118 | 0,001355 |
| 11 | 5,493567 | 0,00017581 |
| 12 | 5,516472 | 0,001307859 |
| Suma (Log N) | 65,763692 | 0,008228611 |
| Media | 5,480307667 | 0,000748056 |

Un concepto en el análisis de resultados importante para valorar como es de dispersa una variable es hallando el coeficiente de variación, que se da como el cociente entre la desviación estándar y la media.

El coeficiente de variación por lo tanto da un valor de 0,499 por ciento, lo cual indica que la dispersión es pequeña

# CONCLUSIONES

* Los resultados obtenidos en los ensayos realizados con la máquina de fatiga por flexión rotativa construida en las Unidades Tecnológicas de Santander permiten validar su utilización para la determinación del comportamiento de materiales metálicos expuestos a condiciones de esfuerzos cíclicos completamente alternantes.
* El porcentaje de error máximo entre los valores teóricos y los datos obtenidos experimentalmente, para un acero AISI 1045, fue del 25.8% y se presentó para una magnitud de esfuerzo de 538MPa; la tendencia de este parámetro es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza transversal aplicada durante el ensayo.
* Para determinar la incertidumbre de los datos obtenidos se consideró solo la repetibilidad de la prueba, por lo cual se cuantificó a través de la desviación estándar, alcanzado un valor máximo de 18990 ciclos para un valor promedio de 302758 ciclos, lo que representa un 6.27%.
* El coeficiente de variación fue de 0.499 por ciento, que indica que los valores están muy concentrados respecto a la media.

# Referencias

Ariza, J., Gutyrya, S. S., & Jomyak Y. M. (2014). Tensiones en ejes huecos con una grieta superficial bajo flexión rotativa. Dyna: Ingeniería e Industria, 89(1), 85 - 88.

Arutyunyana, A. R., & Arutyunyana R. A. (2014). Application of the fracture mechanics and reliability methods to the fatigue problem. Procedia Materials Science, 3, 1291 – 1297.

Bengtsson, A., & Rychlik, I. (2009). Uncertainty in fatigue life prediction of structures subject to Gaussian loads. Probabilistic Engineering Mechanics, 24(2), 224 - 235.

Borrego, L.P., Ferreira, J.M., Cruz, J.M.P.D., & Costa, J.M. (2003). Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure. Engineering Fracture Mechanics, 70(11), 1379 - 1397.

Budynas, R., & Nisbett, K. (2014). Shigley’s Mechanical Engineering Design (10th ed). New York: McGraw-Hill

Correia, J., Apetre, N., Arcari, A., De Jesús, A., Muñiz-Calvente, M., Calçada, R., Berto, F., & Fernández-Canteli, A. (2017). Generalized probabilistic model allowing for various fatigue damage variables. International Journal of Fatigue, 100(1), 187 - 194.

Dowling, N. E. (1993). Mechanical Behaviour of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue (1 ed). Michigan: Prentice Hall.

Goodman, J. (1899). Mechanics applied to engineering. London: Longmans, Green and Co.

Juvinall, R. C. (2002). Fundamentos de Diseño para Ingeniería Mecánica (1ra ed). México D. F.: Limusa

Kadis, R. (2017). Evaluation of the measurement uncertainty: Some common mistakes with a focus on the uncertainty from linear calibration. Journal of Chromatography A, 1499, 226 - 229.

Kalnaus, S., Fan, F., Vasudevan, A.K., & Jiang, Y. (2008). An experimental investigation on fatigue crack growth of AL6XN stainless steel. Engineering Fracture Mechanics, 75 (8), 2002 - 2019.

Nicholas, T., & Zuiker J.R. (1996). On the use of the Goodman diagram for high cycle fatigue design. International Journal of Fracture, 80,219 - 235.

Norton, R. L. (1999). Diseño de Máquinas (1ra ed). México: Prentice Hall.

Paolino, D. S., Chiandussi, G., & Belingardi, G. (2013). Uncertainty in fatigue loading: Consequences on statistical evaluation of reliability in service. Probabilistic Engineering Mechanics, 33, 38 - 46.

Sander, M., & Richard, H.A. (2006). Fatigue crack growth under variable amplitude loading. Part II: analytical and numerical investigations. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 29(4), 303 - 319.

Schijve, J. (2003). Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. International Journal of Fatigue, 25(8), 679 - 702.

Schmid, S. R., Hamrock, B. J., & Jacobson, B. O. (2014). Fundamentals of Machine Elements (3er ed). Boca Raton: CRC Press

Zhou, X., Gaenser, H.P., & Pippan, R. (2016). The effect of single overloads in tension and compression on the fatigue crack propagation behaviour of short cracks. International Journal of Fatigue, 89, 77 - 86.