

COMPORTAMIENTO A FATIGA DEL ACERO ESTRUCTURAL S355-J0

A. Sendín Álvarez, M. López Aenlle, P. Fernández Fernández, S. Núñez Carreira

Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación
EPS de Ingeniería de Gijón (Universidad de Oviedo)
Campus de Viesques, s/n. Ed. Oeste, bloque 7
33203 Gijón. España
E-mail: aenlle@uniovi.es

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos de crecimiento de grieta por fatiga realizados sobre probetas normalizadas SENB3 de acero S355 J0, sometidas a flexión bajo distintos niveles de carga y con $R=0.1$. El tamaño de la grieta se ha estimado de forma indirecta a partir de la flexibilidad de la probeta, obtenida mediante los valores de carga y COD registrados durante el ensayo. Finalmente, los valores $da/dN - \Delta K$ se han ajustado mediante la ecuación de Paris. Se han propuesto estrategias correctoras para minimizar la dispersión en los datos obtenidos para bajas velocidades de crecimiento de grieta. Los datos del comportamiento a fatiga de este material se utilizarán para predecir el fallo a fatiga de modelos estructurales construidos a escala y que se ensayarán en laboratorio bajo diferentes condiciones de carga.

ABSTRACT

In this paper, the experimental results corresponding to crack growth fatigue tests carried out on SENB3 normalized specimens made of S355 J0 steel, under bending load and $R=0.1$, are presented. The crack length was indirectly estimated using the specimen compliance, obtained from the load-COD values registered during the tests. Finally, the curve $da/dN - \Delta K$ was fitted considering the Paris equation. Several strategies are proposed to minimize the scatter resulting at low crack growth rates. The fatigue behaviour corresponding to this material will be used to predict fatigue failures in scaled structural models under different load conditions.

PALABRAS CLAVE: Acero S355, Fatiga, Velocidad Crecimiento, Ecuación de Paris, Flexibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

La fatiga es un importante modo de fallo a considerar en el dimensionamiento de estructuras, presentando a menudo, un carácter catastrófico sin previo aviso, causando gran cantidad de pérdidas humanas y materiales. El fallo de los materiales metálicos por fatiga tiene lugar con cargas que son considerablemente menores que la carga de rotura estática.

El procedimiento a seguir en el proyecto de estructuras sometidos a fatiga está razonablemente bien documentada en la bibliografía existente y en la normativa correspondiente. Sin embargo, no se han desarrollado metodologías para el estudio del daño acumulado a fatiga de estructuras en servicio, que puede presentarse en:

- Estructuras que, tras una prolongada vida de servicio, pueden haber llegado al final de su vida de proyecto por lo que la eventual prolongación de su vida útil pasa por una comprobación de seguridad por fatiga.

- Estructuras en las que se ha detectado daño a fatiga y se requiere saber si pueden repararse y, por tanto, seguir en servicio o, si por lo contrario, deben derruirse.
- Estructuras en las que se van a modificar las condiciones de carga y es preciso predecir la vida a fatiga bajo la nueva sollicitación.

Para evitar fallos catastróficos en estructuras, en los últimos años se han desarrollado técnicas de monitorización que permiten detectar la presencia de daño, así como localizar la posición del mismo. La mayor parte de estas técnicas están basadas en análisis modal [1, 2, 3, 4].

Sin embargo, una vez detectado y localizado el daño, es necesario aplicar un modelo para determinar el daño acumulado a fatiga, así como su vida remanente. El enfoque de mecánica de la fractura parece el más adecuado para aquellos casos en los que se detecte y localice la presencia de daño.

En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos de crecimiento de grieta por fatiga realizados

sobre probetas a flexión de material S355 J0. Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación MEC-BIA2005-07802-C02 “Análisis de sensibilidad y evaluación de daño a fatiga en proyectos de ingeniería civil” que tiene como objetivo mejorar la fiabilidad en la predicción de vida a fatiga utilizando análisis modal para estimar las historias de tensiones presentes en cada punto de la estructura y, a continuación, estimar el daño acumulado a fatiga.

2. LA ECUACIÓN DE PARIS

Hasta los años 60, las caracterizaciones de los elementos sometidos a fatiga se realizaba intentando relacionar velocidades de crecimiento de grieta con valores de tensiones aplicadas sobre el elemento en cuestión y su longitud de grieta, dando lugar a expresiones del tipo [5]:

$$\frac{da}{dN} \propto \Delta S^q \cdot a^p \quad (1)$$

La llegada de los nuevos conceptos de la mecánica de la fractura supuso un nuevo enfoque en el estudio del fenómeno de la fatiga.

En 1961, Paris et al. [6] sugieren la utilización del factor de intensidad de tensiones como parámetro caracterizador de la velocidad de crecimiento estable de grietas por fatiga. Dicho factor representa la severidad de la distribución de tensiones alrededor del frente de grieta. La utilización de dicho parámetro representa un avance considerable en el estudio del fenómeno, debido a que combina información sobre la geometría del elemento, tensión nominal y longitud de grieta, describiendo el proceso desde un punto de vista más global y unificando criterios anteriores que describían el fenómeno de una forma parcial.

La ecuación de Paris [6] se formula de la siguiente forma:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m, \quad (2)$$

siendo “C” y “m” constantes características de cada material.

Dicha ecuación representa las velocidades de avance de grieta exclusivamente en la llamada región II o región de Paris, donde dichas velocidades aumentan de manera aproximadamente lineal [7, 8].

En la figura 1 se pueden ver representadas las 3 regiones consideradas para representar la velocidad de crecimiento de grieta respecto al incremento del factor de intensidad de tensiones.

La zona I está relacionada con velocidades de crecimiento de grieta muy bajas, que prácticamente se

anulan cuando el incremento del factor de tensiones llega a su valor umbral (ΔK_{th}). Por el contrario, en la zona III el factor de intensidad de tensiones se aproxima a un valor crítico y las velocidades de crecimiento de grieta crecen considerablemente (del orden de 0.01 mm/ciclo), al aproximarse a la fractura total del elemento.

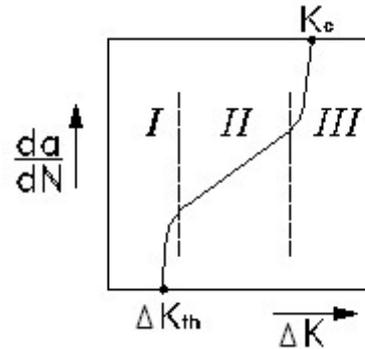


Figura 1. Representación de la velocidad de avance de grieta en las diferentes regiones I, II y III.

Un material queda caracterizado a fatiga si se hallan la constante “C” y el exponente “m”, cuya determinación es el objetivo del presente trabajo.

3. ENSAYOS ESTÁTICOS

Previamente a los ensayos dinámicos, se procedió a realizar ensayos estáticos de tracción sobre 4 probetas cilíndricas normalizadas (diámetro = 8 mm., longitud libre = 70 mm) Para ello se utilizó una máquina universal de ensayos MTS modelo 810 de 250 KN y extensómetro estático MTS modelo 632.12C-20 para medir deformaciones.

Los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad (E), límite elástico (σ_{ys}) y tensión de rotura del material (σ_R), se recogen en la tabla 1:

Tabla 1. Resultados de los ensayos estáticos de tracción

Probeta	E (MPa)	σ_{ys} (MPa)	σ_R (MPa)
1	1.96e5	393	528
2	2.02e5	391	552
3	2.00e5	395	551
4	2.02e5	391	530
Valor medio μ	2.00e5	392.5	540.25
Desviación típica σ	2449	1.66	11.27

ENSAYOS DE FATIGA

El programa experimental de fatiga consistió en la realización de ensayos baja carga de amplitud constante, a una frecuencia de 4 Hz y utilizando probetas de

flexión en 3 puntos tipo SENB3. La geometría de las probetas se muestra en la figura 2.

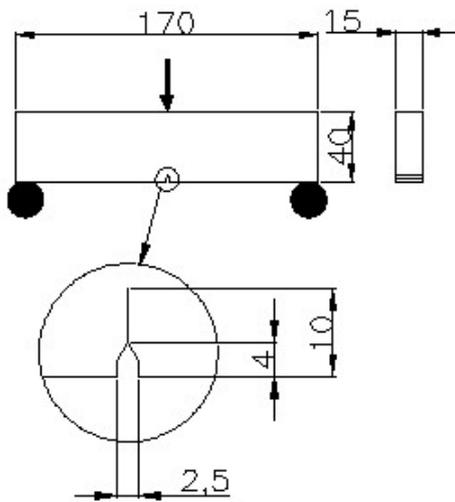


Figura 2. Geometría de la probeta SENB3 utilizada en los ensayos dinámicos. Cotas en mm.

El espesor de dichas probetas (B=15 mm) es insuficiente para cumplir la condición de deformación plana:

$$(B \geq 2.5(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2), \quad (3)$$

cuyo cumplimiento, aunque deseable en este tipo de ensayos con el fin de garantizar unas condiciones de deformación plana en la mayor parte del frente de grieta, obligaría a utilizar espesores de probeta excesivos. No obstante, en los ensayos de fatiga a alto número de ciclos y centrandlo su estudio en la región de Paris, se desarrollan unas tensiones en el frente de grieta relativamente bajas, si se comparan con la tenacidad a fractura del material. Por lo tanto, el radio de zona plástica en el frente de grieta generado durante el ensayo es relativamente pequeño (en comparación con las dimensiones de la probeta).

Para la realización de los ensayos se utilizó una máquina universal de ensayos MTS modelo 810 de 250KN. Durante los ensayos se registró el valor de la carga aplicada y el desplazamiento en abertura de grieta (COD) mediante un extensómetro dinámico MTS modelo 632.03C-30.

En el desarrollo de los ensayo se siguió la normativa BS6835:1988 [9].

3.1 Preagrietameinto

Para el cálculo de la carga máxima en la etapa de preagrietamiento [10] se consideró como referencia la expresión:

$$K_{max}/E \leq 0.0002\sqrt{m} \quad (4)$$

en la que:

E es el módulo elástico del material y K_{max} el factor de intensidad de tensiones máximo permitido para la etapa de preagrietamiento.

Conocido el valor máximo del factor de intensidad de tensiones, la carga máxima se determina a partir de la ecuación:

$$K_{max} = \left(\frac{P_{max} \cdot S}{\sqrt{B \cdot B_N \cdot W^{3/2}}} \right) \cdot f(a/W) \quad (5)$$

donde:

S = distancia entre apoyos (160 mm).

W = longitud de la probeta (170 mm)

B = espesor de probeta (15 mm)

B_N = espesor neto de probeta (15 mm)

$$f(a/W) = \frac{3(a/W)^{1/2} \cdot \left[\frac{1.99 - (a/W)(1 - (a/W))}{2.15 - 3.93(a/W) + 2.7(a/W)^2} \right]}{2(1 + 2(a/W))(1 - (a/W))^{3/2}} \quad (6)$$

Además, esta carga máxima de preagrietamiento tiene una limitación adicional:

$$P_{max} \leq P_f = \frac{0.5B(W - a_0)^2 \left(\frac{\sigma_{ys} + \sigma_R}{2} \right)}{S} \quad (7)$$

No obstante, aunque esta carga es la establecida como carga máxima en la etapa de preagrietamiento, los valores utilizados han sido considerablemente menores para asegurar que las plastificaciones generadas en el frente de grieta sean suficientemente pequeñas y garantizar el comienzo del ensayo bajo las hipótesis de la MFEL.

3.2 Ensayos

Se realizaron 4 ensayos de fatiga bajo carga de amplitud constante, manteniendo un coeficiente de asimetría R = 0,1. La norma establece, para esta geometría en particular, una longitud de preagrietamiento no menor a 8 mm. Los parámetros de los diferentes ensayos se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros utilizados en los ensayos de fatiga

Probeta	P_{max} (N)	$R=P_{min}/P_{max}$	a_0 (mm)
1	17000	0.1	9.8

2	15000	0.1	11.07
3	13000	0.1	10.59
4	11000	0.1	10.47

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La longitud de grieta se obtuvo de forma indirecta mediante el método de la flexibilidad. Para ello, se registraron bucles de Carga-COD cada 2 minutos. En la figura 3, se muestran algunos de los bucles de histéresis correspondientes a la probeta 1.

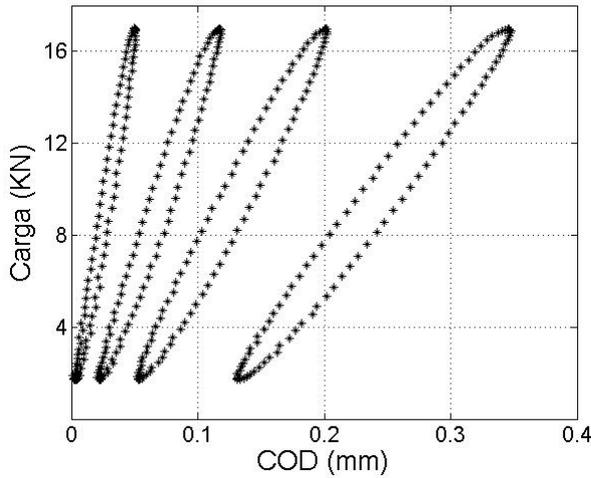


Figura 3. Representación de bucles de histéresis para la probeta 1.

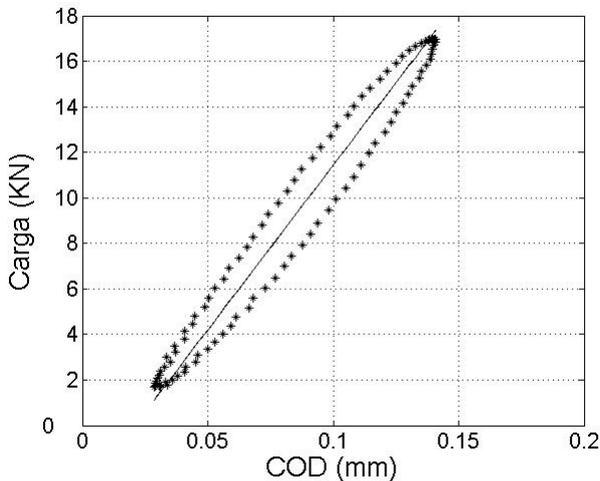


Figura 4. Cálculo de la flexibilidad Ci para un bucle de correspondiente a la probeta 1.

Para cada bucle de histéresis, se determinó la flexibilidad Ci. La figura 4 ilustra el cálculo de la flexibilidad de un bucle correspondiente a la probeta 1.

Una vez obtenidos los valores de flexibilidad correspondiente a cada ciclo, la longitud de grieta se obtiene mediante la ecuación (8):

$$a_i/W = \left(\begin{matrix} 0.999748 - 3.9504 \cdot u + 2.9821 \cdot u^2 - \\ 3.21408 \cdot u^3 + 51.51564 \cdot u^4 - 113.031 \cdot u^5 \end{matrix} \right) \quad (8)$$

donde:

$$u = \frac{l}{\left[\frac{B_e W E' C_i}{S/4} \right]^{1/2} + l} \quad (9)$$

siendo:

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad (10)$$

Be = Espesor efectivo de la probeta (para este caso, Be=B).

En la figura 5 se representan las curvas de crecimiento de grieta en función del número de ciclos, obtenidas para cada uno de los ensayos.

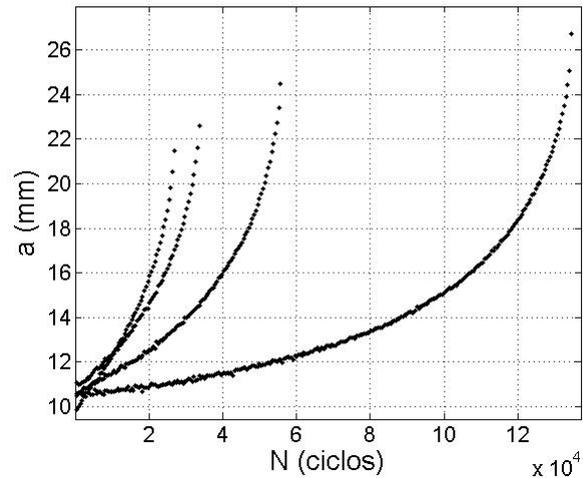


Figura 5. Evolución del tamaño de grieta para los 4 ensayos realizados.

El factor de intensidad de tensiones se determinó mediante la expresión:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a_{medio}}{W}\right) \quad (11)$$

aplicable a ensayos de flexión en tres puntos en probetas SENB3 [5], en la que $f\left(\frac{a_{medio}}{W}\right)$ viene dado por la expresión (12):

$$f(\alpha) = \frac{6\sqrt{\alpha} \left[1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2) \right]}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{1.5}} \quad (12)$$

en la que:

$$\alpha = a_{\text{medio}}/W, \quad (13)$$

siendo “ a_{medio} ” el valor medio entre los 2 valores de longitud de grieta considerados al aplicar la simplificación propuesta en la fórmula (14).

Si se disponen de datos de longitud de grieta suficientemente próximos, la velocidad de crecimiento de grieta se puede obtener considerando la simplificación:

$$da/dN \approx \Delta a/\Delta N \quad (14)$$

Finalmente, se estimaron las constantes “C” y “m” de la ecuación de Paris mediante regresión lineal en escala doblemente logarítmica.

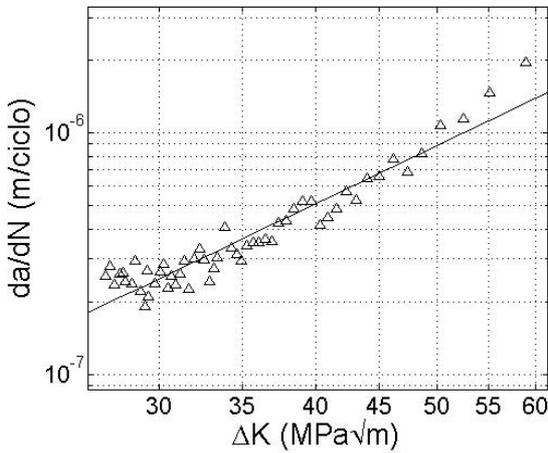


Figura 6. Ajuste de los datos obtenidos para la probeta 1

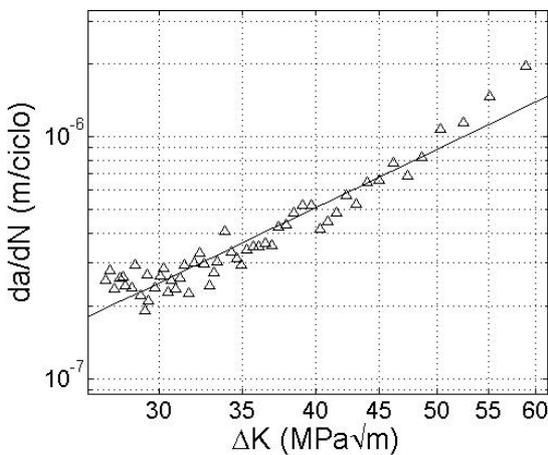


Figura 7. Ajuste de los datos obtenidos para la probeta 3.

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La estimación de la longitud de grieta mediante el método de la flexibilidad presenta el inconveniente de que conduce a valores de velocidad de crecimiento de grieta muy dispersos para bajo número de ciclos. Esto se debe a que la variación de la flexibilidad de la probeta al inicio del ensayo es muy reducida, por lo que pequeños errores en el ajuste de los bucles de histéresis se traducen en una gran dispersión de la velocidad de crecimiento de grieta, que disminuye progresivamente a medida que transcurre el ensayo.

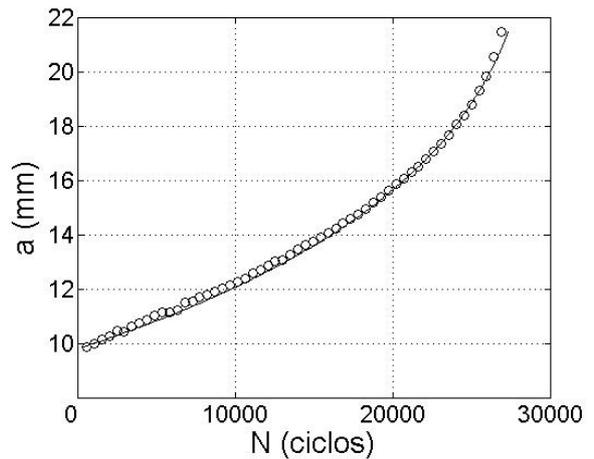


Figura 8. Comparación de datos experimentales de la probeta 1 con el ajuste obtenido a partir de la ecuación de Paris.

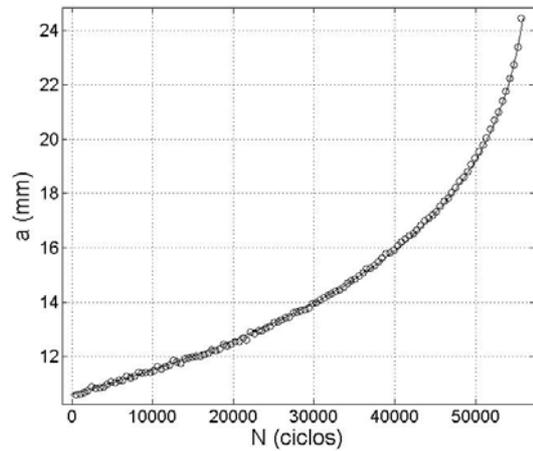


Figura 9. Comparación de datos experimentales de la probeta 3 con el ajuste obtenido a partir de la ecuación de Paris.

En este trabajo se ha optado por aplicar técnicas de suavizado a los valores discretos de $\Delta a/\Delta N$, correspondientes a bajo número de ciclos.

A continuación se ajustó la recta de Paris mediante regresión lineal en escala doblemente logarítmica, obteniéndose los parámetros “C” y “m”. En la figura (6) se muestra el ajuste correspondiente a la probeta 1 y en la figura (7) el correspondiente a la probeta 3. En la tabla 3 se muestran los valores correspondientes a un ajuste individual de los resultados de cada una de las probetas.

Finalmente, la bondad del ajuste se comprueba representando el conjunto de valores discretos a-N obtenidos experimentalmente, frente a la curva correspondiente a la recta de Paris definida por los valores “C” y “m”. En la figura (8) se muestra la curva “a-N” correspondiente a la probeta 1 y en la figura (9) la correspondiente a la probeta 3.

Tabla 3. Parámetros utilizados en los ensayos de fatiga

Probeta	C	m
1	5.303e-11	2.485
2	4.310e-12	3.173
3	6.76e-12	3.057
4	2.75e-13	3.795

6. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de caracterización realizados, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. Se ha caracterizado a fatiga el acero estructural S355-J0 mediante la realización de ensayos de crecimiento de grieta por fatiga sobre probetas SENB3.
2. La longitud de grieta se ha obtenido de forma indirecta mediante el método de la flexibilidad. Las pequeñas variaciones de la flexibilidad, junto con la incertidumbre en el ajuste de los bucles de histéresis, se traducen en una gran dispersión de los valores de velocidad de crecimiento de grieta al comienzo del ensayo.
3. La aplicación de técnicas de suavizado a las valores de velocidad de crecimiento de grieta se traducen en una reducción de la dispersión y en una mejor precisión en el ajuste.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Educación y Ciencia el apoyo económico recibido para la realización del proyecto MEC-BIA2005-07802-C02 “Análisis de sensibilidad y evaluación de daño a fatiga en proyectos de ingeniería civil” y al Gobierno del Principado de

Asturias a través del proyecto 02FC-06-COF05-012-MEC.

REFERENCIAS

- [1] Bernal, D. *Damage localization using load vectors*. COST F3, pp. 223-231. Madrid. 2000.
- [2] Gawronski, W.K. *Dynamics and control of structures: a modal approach*. Mechanical Engineering Series. Springer-Verlag. 1998
- [3] Salawu, O.S. Williams, C. *Damage location using vibration modes shapes*. Proc. of the 12th IMAC, pp. 933-939. 1994.
- [4] Pandey, A.K. Biswas, M. Samman, M.M. *Damage detection from changes in curvature mode shapes*. Journal of Sound and Vibration, vol. 145, n° 2, pp. 321-332.1991.
- [5] Schütz, W. *A history of fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, vol. 54, n° 2, pp. 263-300. 1996
- [6] Paris, P.C, Gomez, M.P. & Anderson, W.E. *A rational analytical theory of fatigue*. The Trend of Engineering, vol. 13, pp. 9-14. 1961.
- [7] Schijve, J. *Fatigue of structures and materials*. Kluwer Academic Publishers, pp. 180. 2001
- [8] Dowling, N.E. Thangjitham, S. *An overview and discussion of basic methodology for fatigue*. Fatigue and Fracture Mechanics. 31st volume, ASTM STP 1389, pp. 3-36. 2000.
- [9] BS 6835:1988. *Determination of the rate of fatigue crack growth in metallic materials*. British Standard Institution.
- [10] ASTM E1820-99. *Standard test method for measurement of fracture toughness*.