

SOBRE LA ESTIMACIÓN DE LA VIDA A FATIGA EN ENTALLAS DIFERENCIANDO LAS ETAPAS DE INICIACIÓN Y PROPAGACIÓN DE GRIETAS

Jesús Vázquez Valeo, Carlos Navarro Pintado, Jaime Domínguez Abascal

Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales (Universidad de Sevilla),
Avda. De Los Descubrimientos, s/n,
41092 Sevilla. España
E-mail: jesusvaleo@esi.us.es

RESUMEN

En las tres últimas décadas se han desarrollado varios modelos para predecir la vida de componentes sometidos a fatiga. Estos modelos se basan en considerar que el proceso de fatiga como una combinación de las fases de iniciación y propagación de grietas, algunos considerando únicamente una de las fases y otros considerando ambas. La idea de este artículo, es hacer un análisis comparativo de tres de estos métodos, para ello se verán las predicciones que cada uno de los modelos realizan sobre componentes entallados sometidos a ensayos, las ventajas e inconvenientes de cada uno y por último la posibilidad que ofrece cada uno de los modelos de aplicarlos a geometrías más reales.

ABSTRACT

In the last three decades a great variety of models have been developed to predict the life of components subjected to fatigue. These models are based in the concepts of initiation and propagation of cracks, some of these only consider one of the process and others both. The idea of this article is to make a comparative analysis with three of these models, for it, the predictions provided of all the models in a notched component, the advantages and disadvantages of each of the models, and lastly the possibility to apply in more realistic geometries will be analyzed.

PALABRAS CLAVE: Fatiga en entallas, predicción de vida, iniciación, propagación.

1. INTRODUCCIÓN

La fatiga es un problema bastante común en estructuras sometidas a cargas cíclicas. Como consecuencia de ello, se ha desarrollado una variedad de modelos para predecir el fallo por fatiga de componentes metálicos.

Uno de los puntos más frecuentes de iniciación de grietas en fatiga son las entallas. Por lo que una gran cantidad de los modelos existentes han sido inicialmente desarrollados para este tipo de geometrías, aunque posteriormente han sido aplicados a otras diferentes.

Hay muchos autores que modelan el proceso de fatiga como la suma de un proceso de iniciación seguido de otro de propagación. La predicción de vida la realizan sumando los números de ciclos dedicados a iniciación N_i y a propagación, N_p . Entre estos cabe citar las propuestas de Socie et al. [1] y de McClung et al. [2]. La primera determina la longitud de grieta, a_i , a la que se inicia la propagación (longitud de iniciación) a partir del análisis de las fases de iniciación y propagación. La segunda puede considerarse una clásica de unión entre iniciación y propagación en la que debe definirse previamente a_i . Ambos métodos, en relación a la iniciación, se basan en la curva ϵ - N , ya sea directamente o mediante algún parámetro que dependa de esta, por ejemplo, el de Smith-Watson-Topper

(SWT) [3].

Otra posibilidad para estimar la vida como combinación de iniciación y propagación es hacer una extensión de los modelos de daño para estimar el crecimiento de grietas. Estos modelos consideran la propagación de una grieta tanto corta como larga, como un proceso sucesivo de daño [4]. Si este modelo se combina con un modelo de iniciación basado en los mismos supuestos, se puede estimar la vida completa. Este modelo al permitir simular el crecimiento de grietas pequeñas a partir de la iniciación, permite considerar la iniciación como el tiempo necesario para obtener una grieta mucho menor que las normalmente consideradas en estos casos. Posteriormente continua con el mismo modelo para el análisis de crecimiento de grietas largas o aplicando directamente modelos tipo Paris. El criterio de daño empleado se basa en la energía de deformación producida en el borde de una entalla o grieta como criterio para estimar la iniciación o la velocidad de crecimiento.

2. MODELO DE SOCIE, MORROW Y CHEN

Este modelo combina la iniciación y la propagación. La distinción entre las dos fases se realiza en función de las condiciones en que se desarrolla una y otra fase, como se verá a continuación.

El modelo considera que en cada punto próximo a la entalla, el número de ciclos necesarios para se inicie grieta se puede determinar mediante la ley de Manson-Coffin.

Para calcular el número de ciclos de iniciación en función de la distancia al borde de entalla es necesario obtener dos curvas (figura 1). Primeramente una que defina las tensiones y deformaciones a los que se encuentra sometido el material en función de la distancia al borde de la entalla. En segundo lugar, otra curva que indique en función de las tensiones y deformaciones el número de ciclos que es necesario para que se inicie una grieta. Como combinación de estas dos curvas se obtiene otra tercera que indica el número de ciclos necesarios para que se inicie una grieta a cada profundidad x . O lo que es lo mismo, para que crezca una grieta iniciada a longitud x

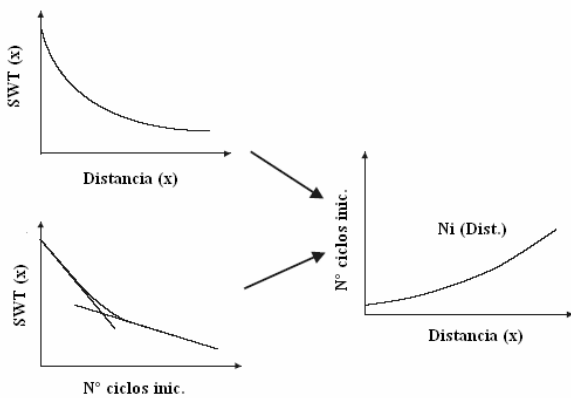


Fig. 1. Obtención de curva de iniciación.

En este caso para cuantificar el daño que se produce en función de la distancia a la entalla se ha utilizado el parámetro SWT:

$$SWT = \sigma_{max} \frac{\Delta \epsilon}{2} \quad (1)$$

Este parámetro se puede relacionar con el número de ciclos de iniciación N_i mediante la curva ϵ - N , tal y como se indica,

$$SWT = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_i)^{2b'} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_i)^{b'+c'} \quad (2)$$

El esquema para el calcular el número de ciclos que una grieta iniciada de longitud x tarda en propagarse hasta la fractura, es el mostrado en la figura 2.

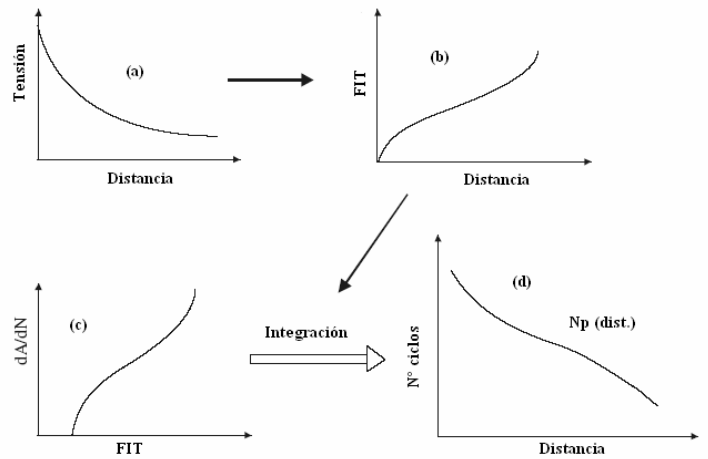


Fig. 2. Obtención de curva de propagación.

Como se observa en el esquema, en primer lugar, con la distribución de tensiones a lo largo de la línea en la que se desarrollará la grieta (a) se puede conocer el factor de intensidad de tensiones (FIT) para cada longitud de grieta (b). Mediante la integración de funciones de peso, y suponiendo que la grieta se propaga en dirección perpendicular a la superficie, mediante el método de Bueckner [5] se tiene,

$$K_I = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_l w(s) \sigma(s) ds \quad (3)$$

A su vez el FIT se puede relacionar con la velocidad de propagación (c) con la ley de Paris [6],

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (4)$$

Donde ΔK es la variación del FIT a lo largo de un ciclo. Mediante integración de la relación de velocidad de crecimiento desde una longitud inicial l_i hasta una longitud final l_f y la relación del FIT con la longitud de grieta, se obtiene una curva (d) que nos relaciona el número de ciclos necesarios para que una grieta de longitud l se propague hasta una longitud final l_f .

Una vez obtenidas las curvas de iniciación hasta una distancia x y de propagación desde esta distancia hasta la fractura final, éstas se pueden sumar. Dicha suma representa en función de la distancia x al borde de entalla el número de ciclos necesarios para que una grieta se forme a esa distancia y se propague hasta la longitud final l_f .

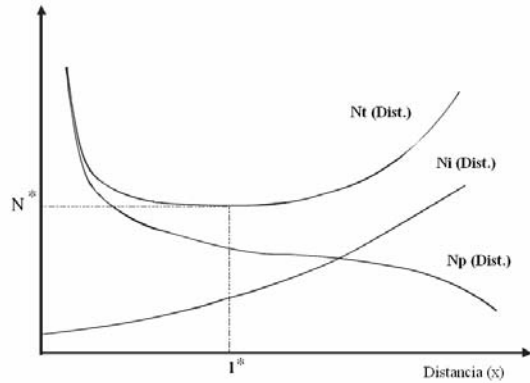


Fig.3. Curvas de iniciación, propagación y total.

La distancia desde el borde de la entalla que produce un menor número de ciclos totales será la longitud de iniciación l^* , y el número de ciclos correspondientes N^* , la vida del componente entallado.

3. MODELO DE McCLUNG

El modelo de McClung también contempla dos fases, una de iniciación y otra de propagación, pero la forma de aplicar los conceptos es algo diferente del modelo de Socie. Primero el modelo calcula el número de ciclos necesarios para iniciar grietas de pequeño tamaño en un espécimen liso. Para hallar ese número de ciclos, inicialmente calcula la vida total del espécimen liso mediante la curva ϵ -N (fig. 5). Luego calcula el número de ciclos de propagación desde cada longitud de grieta x , hasta una longitud en la que se considera que el espécimen liso ha fallado, restando ambas curvas se obtiene las curvas de iniciación para cada longitud de grieta.

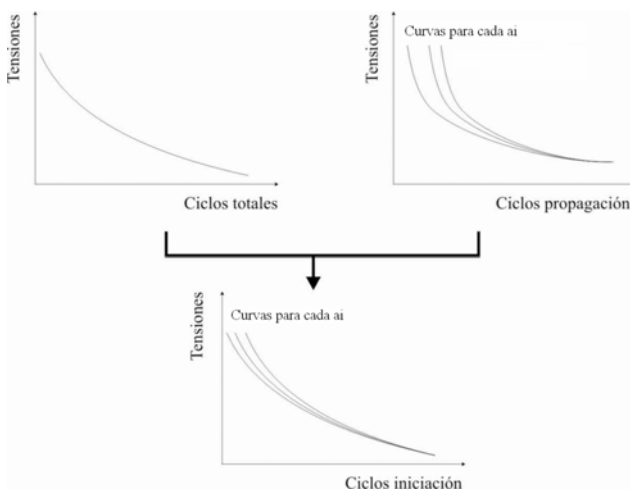


fig. 5. Esquema del modelo de McClung.

Hecho esto, la forma de calcular la vida del espécimen entallado sería como se indica a continuación;

1. Se calcula el estado tensional en puntos que se encuentran de la punta de la entalla a distancias iguales a las longitudes de grieta supuestas de iniciación para calcular el número de ciclos de iniciación del espécimen liso.

2. Con estos valores de tensiones se va a la curva de iniciación correspondiente para cada longitud de iniciación y se ve cual es el número de ciclos de iniciación para cada uno de los puntos anteriores en el componente entallado.

3. Una vez obtenidos los ciclos de iniciación, se calcula los ciclos de propagación necesarios para llevar la grieta desde cada longitud de iniciación hasta la longitud de rotura del componente entallado.

4. La suma de las dos vidas para cada longitud de iniciación será la vida total del espécimen, por lo que habrá tantas curvas como longitudes de iniciación.

5. Mediante comparación con los datos experimentales se toma la longitud de iniciación que mejor se ajuste a los estos datos.

Un caso particular de este método puede considerarse la propuesta de Lazzarin et al [7], que define como longitud de iniciación el valor a_0 definido mediante le expresión propuesta por El Haddad et al [8]

4. MODELO DE GLINKA

El modelo se basa en dos conceptos; el primero es suponer que la energía de deformación que existe en las cercanías del borde de una grieta, no difiere de las que se obtendrían mediante un modelo elástico [9], y la segunda es suponer que el proceso de avance de una grieta se debe al daño de sucesivos bloques de material de una determinada longitud ρ^* . Para el cálculo de las tensiones en el borde de la grieta considera que esta es roma en el borde, y con radio igual a ρ^* . Con esta geometría determina las tensiones en el borde mediante el modelo propuesto por Creager y Paris [10] tal y como se muestra en la figura 4.

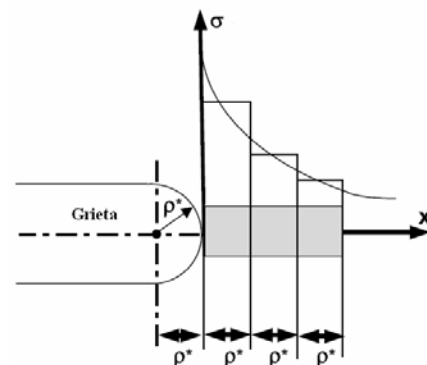


Fig. 4. Estructura del material y forma de la punta de grieta.

Para el cálculo del daño en cada uno de los elementos, las tensiones en estos se toman como promedio de las existentes en la zona ocupada por cada elemento.

El modelo implica tomar un tamaño adecuado de estos elementos, que se define como [4]

$$\rho^* = \left\{ \frac{C}{2} \left[\frac{(\psi_{y,1})^2}{4\pi(\sigma_f')^2} \right]^{1/2b'} \right\}^{2b'/(2b'+1)} \quad (5)$$

Donde $\psi_{y,1}=1.633$, y C es el coeficiente de la ley de Paris, y σ_f' y b' se definen en la ecuación 2.

A partir de las consideraciones anteriores, empleando la curva $\epsilon-N$ del material, el modelo propone que el número de ciclos necesarios para romper el bloque i es,

$$N_i = \frac{\phi}{2} \left[\frac{\psi_{y,1}^2 (n'+1) \Delta K_{eff}^2}{16\pi EK' \rho^*} \right]^{1/c'(n'+1)} \left[\frac{1}{\epsilon_f'} \right]^{1/c'} \quad (6)$$

Donde ϕ es un parámetro que depende del material mediante la curva $\epsilon-N$ y la ecuación de Ramberg-Osgood, cuya expresión es

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^n \quad (7)$$

Donde n' y K' son las constantes de la ecuación cíclica de Ramberg-Osgood, y ΔK_{eff} es el rango del FIT efectivo cuando el borde de grieta se encuentra en el bloque i .

Mediante la ecuación (6) se obtiene en número necesario de ciclos para propagar una grieta a partir del segundo elemento, ya que no es válida para el elemento 1, pues en este caso ΔK_{eff} es cero. Sin embargo para obtener el número de ciclos totales del componente entallado, se debe de calcular la vida del primer elemento, que es aquel que se encuentra en el borde de la entalla. Para ello de nuevo se puede aplicar algún tipo de parámetro como puede ser el SWT para estimar la vida de ese primer elemento

5. APLICACIÓN PRÁCTICA A LOS MODELOS

5.1 Geometrías y propiedades en el material bajo estudio.

Como aplicación práctica de estos tres modelos se han realizado predicciones de vida para dos componentes entallados de los que se dispone de resultados experimentales para diferentes niveles de carga [11]. Ambos componentes son placas que tienen un agujero en el centro de esta (uno con forma circular y otro con forma elíptica) tal y como se muestran en la figura 6, y que están sometidas a esfuerzos cíclicos axiales con una $R=0.1$. El material de las placas es Al 7075-T651, y las propiedades del material se resumen en la tabla 1.

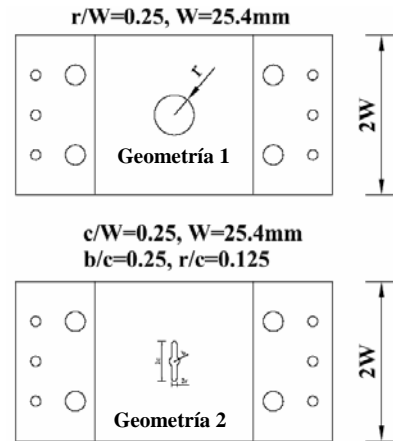


fig. 6 Geometrías de las probetas ensayadas.

Tabla 1. Propiedades mecánicas 7075-T651

Límite elástico	σ_v	537 MPa
Módulo de Young	E	69.64 GPa
Coeficiente de Poisson	ν	0.3
Coeficiente de resistencia a fatiga	σ_f'	537 MPa
Coeficiente de ductilidad a fatiga	ϵ_f'	69.64 GPa
Exponente de resistencia a fatiga	b	-0.149
Exponente de ductilidad a fatiga	c	-0.83
Coeficiente de resistencia cíclica	K'	694 MPa
Exponente de endurecimiento cíclico	n	0.04
Coeficiente ley Paris (R=0.1)	C	$1.18 \cdot 10^{-8}$
Exponente ley Paris (R=0.1)	m	2.94

5.2 Predicciones sobre los componentes entallados

5.2.1 Modelo de Socie, Morrow y Chen

Las predicciones que produce este modelo sobre ambos componentes se ven en las figuras 7 y 8

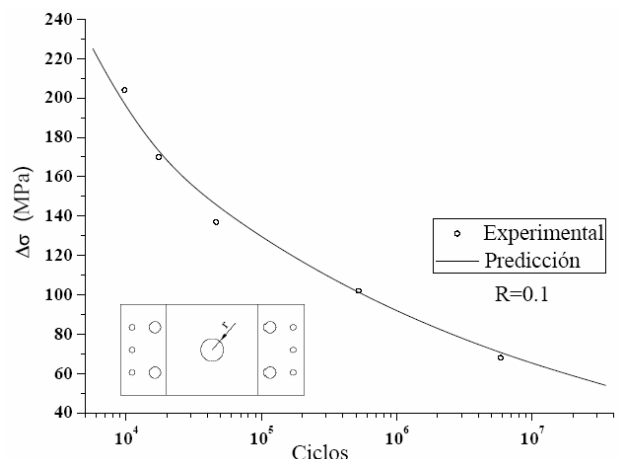


fig. 7 Predicción para la geometría 1.

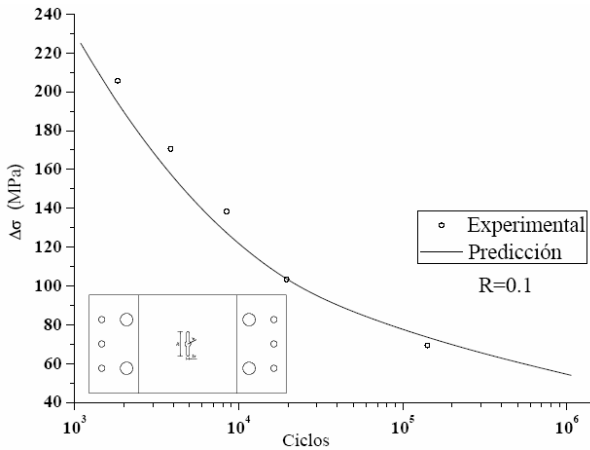


fig. 8 Predicción para la geometría 2.

Comparando los resultados experimentales con las predicciones obtenidas se observa que el máximo error cometido en la estimación de la vida es de un 49%, y que este se produce en la primera geometría para una carga de 137 MPa. El cálculo del error se ha efectuado de la siguiente forma,

$$error (\%) = \frac{N_{experimental} - N_{estimada}}{N_{experimental}} \cdot 100$$

En la tabla 5 se resumen los resultados obtenidos,

Tabla 5. Resultados en el modelo de Socie

Carga (MPa)	Geometría 1			Geometría 2		
	Exp.	Pred.	Error (%)	Exp.	Pred.	Error (%)
68	5842984	6962375	19.16	141192	193271	36.86
102	521785	490586	5.98	19562	19437	0.63
137	46193	68887	49.13	8459	6186	26.87
170	17445	18916	8.43	3851	2900	24.7
204	9726	8407	13.56	1834	1500	18.22

5.2.2 Modelo de McClung

Las predicciones para cada geometría y para cada longitud de iniciación se muestran en las figuras 9 y 10.

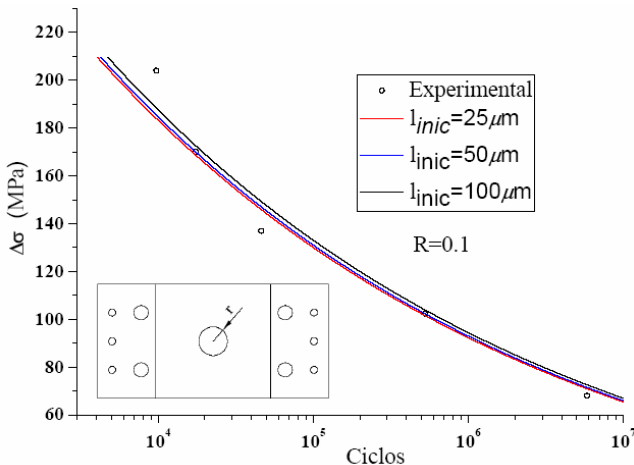


fig. 9 Predicción para la geometría 1

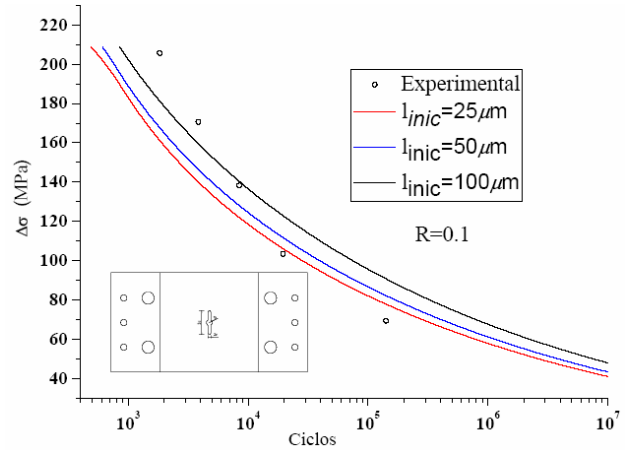


fig. 10 Predicción para la geometría 2

Si se considera la longitud de iniciación que mejor se ajusta, como aquella longitud cuya curva produce un error medio menor sobre todos los datos experimentales, vemos que para la geometría primera esta longitud es la de 25 μm, obteniéndose un valor promedio del error del 29% y un máximo del 52% para la estimación en la vida para una carga de 137 MPa. En cuanto a la segunda geometría los mejores resultados se encuentran nuevamente para una longitud de iniciación de 25 μm, donde el error promedio es de un 63%, con un máximo del 112% para la carga de 69.4 MPa. Los resultados se resumen en las tablas 6.

Tabla 6. Resultados en el modelo de McClung

Carga (MPa)	Geometría 1			
	Exp.	25 μm	50 μm	100 μm
68	5842984	7770324	8185096	9070296
102	521785	511071	538391	596657
137	46193	70518	74294	82346
170	17445	16546	17435	19239
204	9726	4856	5118	5678
	Error medio (%)	28.58	30.31	40.05

Carga (MPa)	Geometría 2			
	Exp.	25 μm	50 μm	100 μm
68	141192	298637	430224	838679
102	19562	22922	31874	59803
137	8459	4116	5349	9247
170	3851	1388	1672	2594
204	1834	544	663	918
	Error medio (%)	62.87	84.97	158.32

5.2.3 Modelo de Glinka

Para el modelo de Glinka los resultados de las predicciones se muestran en las figuras 11 y 12,

En este caso el máximo error se obtiene de nuevo en la primera geometría para una carga de 137 MPa. El error es de un 55%. Estos resultados se ven en la tabla 7.

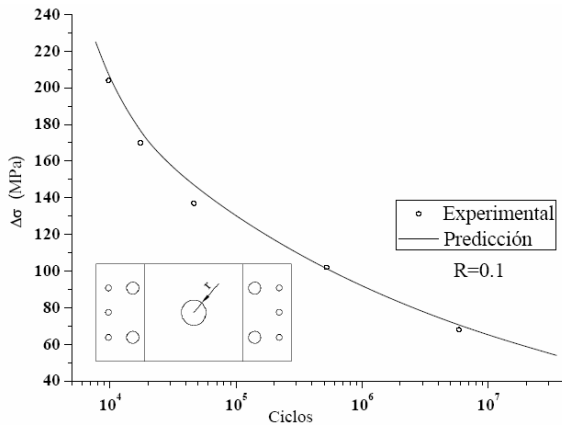


fig. 11 Predicción para la geometría 1

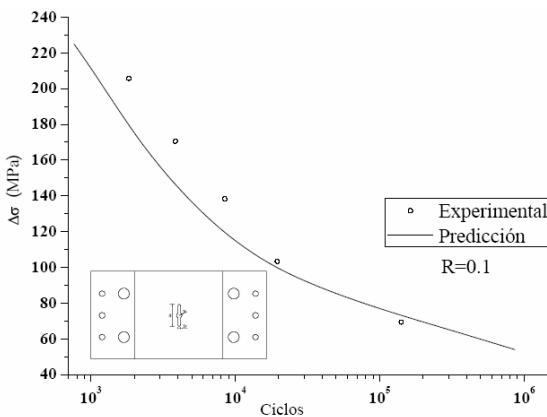


fig. 12 Predicción para la geometría 2

Tabla 7. Resultados en el modelo de Glinka

Carga (MPa)	Geometría 1			Geometría 2		
	Exp.	Pred.	Error (%)	Exp.	Pred.	Error (%)
68	5842984	6912628	18.31	141192	171056	21.15
102	521785	491306	5.84	19562	13530	30.84
137	46193	71626	55.06	8459	4746	43.89
170	17445	20373	16.78	3851	2202	42.82
204	9726	10227	5.15	1834	1120	38.93

6. CONCLUSIONES

Como se puede ver los tres métodos dan unas predicciones razonables si se comparan con los resultados experimentales de que se disponen, aunque de todos ellos el que mejores resultados ofrece en promedio para ambas geometría es el de Socie.

El modelo de Glinka, da unos resultados bastantes buenos para la geometría con entalla circular. Sin embargo no ocurre lo mismo para la geometría de entalla elíptica cuando se le aplican cargas altas, esto se puede deber a que la suposición que se hace en la energía de deformación en el entorno de la entalla, no es válida cuando se tienen entallas bastante pronunciadas, ya que es posible que en estos casos la energía de deformación no se pueda tomar como la que obtendríamos si consideráramos un modelo elástico.

En lo que respecta al modelo de McClung, de las tres longitudes de iniciación tomadas, se comentó que la que mejor se adapta a los resultados experimentales es la de 25 micras en ambas geometrías. Cabe mencionar que esta longitud es aproximadamente la mitad del tamaño medio de los granos para el caso de AL 7075-T651.

REFERENCIAS

- [1] D.F. Socie, J. Morrow and W.-C. Chen, "A procedure for Estimating the Total Fatigue Life of Notched and Cracked Members", Engineering Fracture Mechanics. 1979, Vol. 11, pp. 851-859.
- [2] R.C. McClung, W.L. Francis, S.J. Hudak Jr. "A new approach to fatigue life prediction based on nucleation and growth", 9th International Fatigue Congress, Atlanta, mayo 2006.
- [3] K.N. Smith, P. Watson, and T.H. Topper, "A Stress-Strain Function for the fatigue of Metals", Journal of Materials, 1970, Vol. 5, pp. 767-778.
- [4] A.H. Noroozi, G. Glinka, S. Lambert, "A two parameter driving force for fatigue crack growth analysis", Int. J. of Fatigue, 2005, Vol. 27, pp. 1277-1296
- [5] H.J. Bueckner, In: G.C. Sih, editor, "Methods of analysis and solutions of crack problems", Leyden: Noordhoff International P., 1973, pp. 306-307.
- [6] P. C. Paris, "The fracture mechanics approach to fatigue", Proc. 10th Sanamore Conf. Syracuse University Press.
- [7] B. Lazzarin, R. Tovo, G. Meneghetti, Fatigue crack initiation and propagation phases near notches in metals with low notch sensitivity, Int. J. Fatigue, 1997, Vol. 19, 647-665.
- [8] M.H. El Haddad, T.H. Topper y K.N. Smith, Prediction of non-propagating cracks, Engineering Fracture Mechanics, 1979, Vol. 11, 573-584
- [9] K. Molski, G. Glinka, "A Method of Elastic-Plastic Stress and Strain Calculation at a Notch Root", 1981 Materials Science and Engineering, Vol. 50, pp. 93 - 100.
- [10] M. Creager, P.C. Paris, "Elastic field equations for blunt cracks with reference to stress corrosion cracking", 1967, Int. J. Fract. Mech., Vol. 3, pp. 247-252.
- [11] W.-C. Chen, "A Model for Joining the Fatigue Crack Initiation and Propagation Analysis", 1979, Phd. Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.