

33^{ER} ENCUENTRO DEL
**GRUPO ESPAÑOL
DE FRACTURA**



ANALES DE MECÁNICA DE LA FRACTURA
VOLUMEN 33

Donostia-San Sebastián

9, 10 y 11 de marzo de 2016



tecnun
Universidad
de Navarra

ceit
IK4 Research Alliance

GEF Grupo
Español
de Fractura
Sociedad Española de Integridad Estructural

COMPORTAMIENTO CICLICO DE UN ACERO St-52-3N: INFLUENCIA DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD EN LAS ESTIMACIONES DE VIDA A FATIGA.

M. López-Prieto¹, B. Moreno¹, J. Zapatero¹, P. López-Crespo¹

¹ Departamento de Ingeniería Civil de Materiales y Fabricación, (Universidad de Málaga),
C/Dr Ortiz Ramos s/n, 29071 Málaga, España,
* E-mail: mlopezp@uma.es

RESUMEN

Dada la dependencia de los módulos de elasticidad en los métodos de estimación de vida a fatiga, se analiza el comportamiento cíclico y la variación de estos con el grado de deformación. En este estudio se llevan a cabo una serie de experimentos de fatiga uniaxial en control de deformación, con $R=-1$, a bajo número de ciclos y a temperatura ambiente, para caracterizar el comportamiento cíclico del acero al carbono St-52-3N. Se realizaron ensayos de fatiga uniaxial tanto de tracción como de torsión.

Se compara los valores de los módulos de elasticidad monotónico y cíclico, además de los valores cíclicos correspondientes a los segmentos de descarga y carga (E_1, E_2) (acordes con ISO/DIS 121106). Se pone de manifiesto la variabilidad cometida al calcular el incremento de deformación plástica según el Método Estándar de ensayo que utilizamos (BS/ISO, ASTM, AECMA) y que determinará en cada caso la estimación del módulo de elasticidad cíclico

PALABRAS CLAVE: Módulo de de elasticidad, comportamiento cíclico, fatiga, estimaciones de vida.

ABSTRACT

Given the dependence of the modulus of elasticity in the methods of estimating fatigue life, the cyclic behavior and the change of these with the total strain range is analyzed. A series of experiments, including constant amplitude low-cycle fatigue tests, with $R = -1$, were performed at room temperature, to characterize the cyclic behavior of carbon steel St-52-3N. Uniaxial fatigue test and torsional fatigue test were performed.

The values of monotonic and cyclic modulus of elasticity were compared, and the values of the modulus of elasticity determined on the unloading and loading segments (E_1, E_2) respectively in accordance with ISO / DIS 121106. It shows the variability committed to evaluate the plastic strain range under the different Standard Test method we use (BS / ISO, ASTM, AECMA) and which will determine in each case the way to estimate the cyclical elasticity module.

KEYWORDS: Modulus of elasticity, cyclical behavior, fatigue, life estimates.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas, tales como los módulos de elasticidad longitudinal y transversal, son comúnmente determinados con los ensayos monotónicos de tracción o torsión pura, usándose dichos valores en el diseño de componentes estructurales, estimaciones de vida, etc. Es sobradamente conocido que hay al menos dos valores para dichos módulos, el "estático" o monotónico y el "dinámico" o cíclico.

Además observaciones sobre los primeros ciclos de las curvas de histéresis muestran que realmente éstas no posee un segmento elástico lineal lo cual aumenta las

posibilidades a la hora de elegir los valores de los módulos E o G con aproximaciones lineales.

En algunos casos es fácil determinar los módulos E o G de las curvas de tensión deformación con un alto grado de exactitud. Sin embargo, en las curvas de histéresis obtenidas durante ensayos a fatiga, resultan más difíciles de obtener y se obtienen diferentes valores en los segmentos de carga y descarga. Las diferentes normas de ensayo establecen distintos métodos para determinar con carga cíclica el rango de deformación plástica, $\Delta\epsilon_p$. Dependiendo del método de cálculo empleado, esta variabilidad de resultados puede llevar en los ajustes a distintos valores de los coeficientes que caracterizan el comportamiento cíclico del material. Dichos valores, son

usados por los distintos modelos de daño para el cálculo de vida a fatiga. En este trabajo se analiza la influencia que este hecho puede tener en las predicciones de vida.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Material

Todos los ensayos realizados en este trabajo fueron llevados a cabo temperatura ambiente usando un acero con bajo contenido en carbono (St-52-3N), el cual es usado ampliamente en aplicaciones estructurales, construcción naval, etc.

Tabla 1. Composición química para el acero St-52-3N considerado en este estudio (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.17	0.225	1.235	0.010	0.0006	0.072	0.058	0.16

2.2 Probeta

Para la realización de los ensayos se han utilizado probetas cilíndricas hueca descritas en trabajos anteriores [3]. Para la caracterización de las propiedades del material se han realizado ensayos tanto monotónicos como cíclicos a torsión y a tracción (para tres niveles de deformación).

Tabla 2 Designación de las probetas utilizadas en los diferentes ensayos.

Ensayo	Designación	N _f
Monotónico tracción	SPC-1, SPC-2	-
Monotónico torsión	SPC-3, SPC-4	-
Fatiga- Tracción		
Δε _t = 0.8 %	SPC-5	1683
Δε _t = 0.9%	SPC-6	1619
Δε _t = 0.1%	SPC-7	1200
Fatiga -Torsión		
Δγ _t = 0.8 %	SPC-8	4200

2.3 Ejecución de los ensayos

Todos los ensayos fueron realizados en control de deformación con la ayuda de un extensómetro biaxial Epsilon 3550 utilizándose para ello una señal senoidal con una media de deformación cero (R=-1). El número de ciclos a la rotura, N_f, fue definido como el correspondiente al 10% de caída de la máxima amplitud de tensión.

Los ensayos se realizaron en una máquina servohidráulica MTS 809, la cual permite aplicar cargas de tracción-compresión-torsión. Se han realizado ensayos con tres amplitudes de deformación axial en tracción-compresión y en una amplitud de deformación angular en torsión tal y como se resume en la tabla 2.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados de los ensayos monotónicos de tracción y torsión

El ensayo monotónico de tracción revela un comportamiento lineal en el rango elástico, con un valor promedio de E = 206 GPa, Fig 1. A su vez con el ensayo monotónico de torsión se obtiene un valor promedio de G=76 GPa, Fig 2.

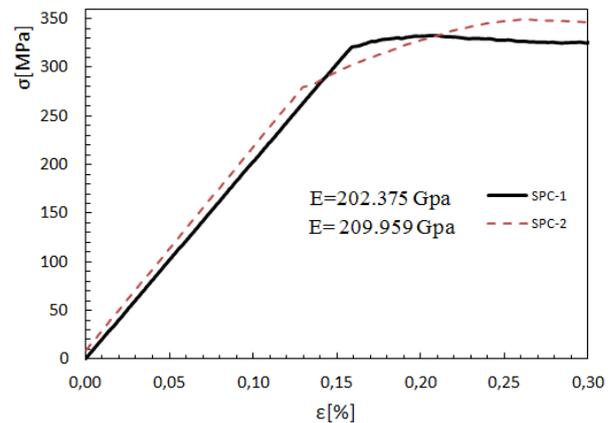


Fig.1 Curva tensión deformación del Ensayo Monotónico de tracción.

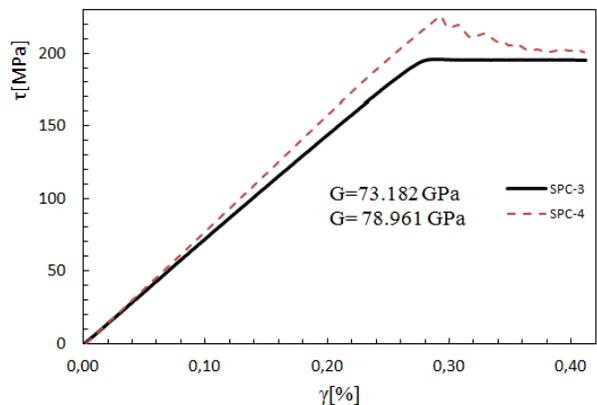


Fig.2 Curva tensión deformación del Ensayo Monotónico de torsión.

3.2 Resultados de ensayos cíclicos de tracción y torsión uniaxial.

De los ensayos cíclicos se obtuvieron los lazos de histéresis estabilizados a la mitad de la vida. Estos resultados para los tres niveles de deformación axial considerados se muestran en la figura 3. La determinación del módulo elástico a partir de la curva de histéresis se realiza partiendo de la deformación máxima en el segmento lineal de descarga, E₁, o partiendo de la deformación mínima durante el segmento de carga, E₂ (fig. 4). Los valores calculados del módulo elástico dependerán entre otros del método de determinación, la frecuencia de muestreo y el incremento de deformación sobre el cual se lleva a cabo el ensayo [1].

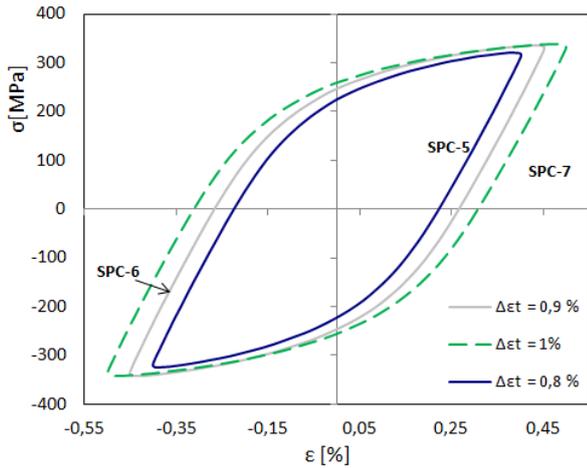


Fig.3 Curva de histéresis a mitad de vida para las probetas SPC-5, SPC-6 y SPC-7.

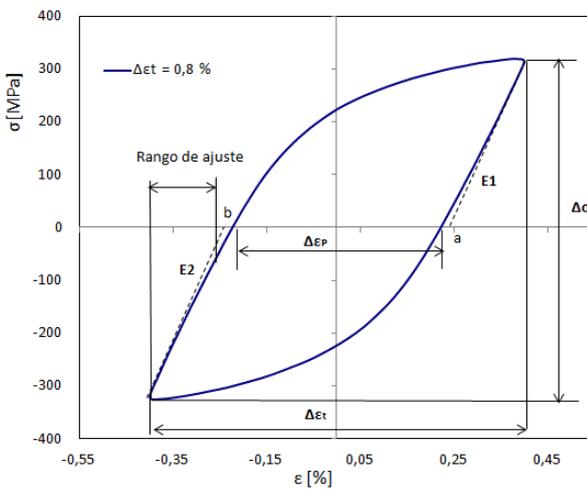


Fig.4 Curva de histéresis a mitad de vida para la probeta SPC-5.

En la figura 5 se observa la variación de E_1 y E_2 con el rango de deformación usado en el ajuste lineal, decreciendo siempre estos con el aumento del rango de deformación utilizado en el ajuste lineal, con una variabilidad máxima del 11 % aproximadamente para ambos módulos.

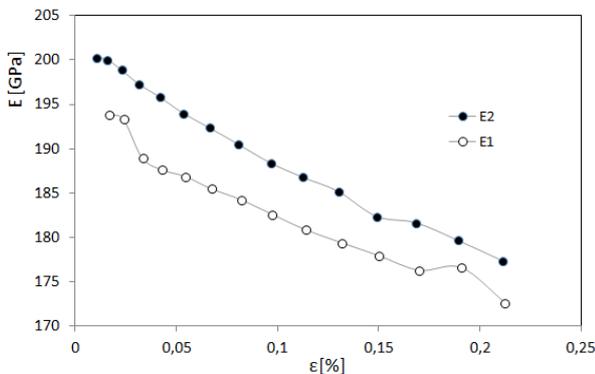


Fig.4 Variación de E_1 y E_2 con el rango de ajuste de deformación desde el pico de la curva de histéresis ($\Delta\epsilon_t=0,4$).

En este trabajo se ha determinado el módulo de elasticidad mediante ajuste lineal del segmento de carga E_2 o el de descarga E_1 de la curva de histéresis a mitad de vida (o desde el primer ciclo en el caso de $E_{1/4}$) con un rango de ajuste lineal 0,10 - 0,12 %.

3.3 Análisis de los resultados de los módulos de elasticidad.

Los resultados de la figura 5 muestran que la relación tensión-deformación en el inicio de los segmentos de carga y descarga no es estrictamente lineal, de ahí la dependencia de los módulos elásticos con el rango de deformación usado en el ajuste. Los valores obtenidos de E_1 y E_2 son menores que el correspondiente a los ensayos monotónicos. Además, como se muestra en la figura 6, dichos módulos cambian dependiendo del grado de deformación máxima aplicado a la probeta.

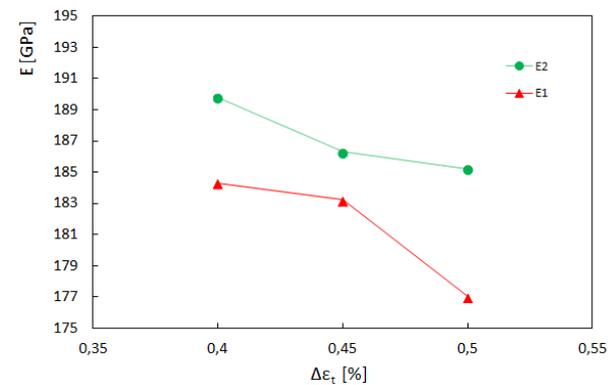


Fig.6 Variación del módulo E_1 y E_2 con el rango total de deformación en las probetas a mitad de vida.

Durante el estudio también se ha obtenido la variabilidad de los módulos con el número de ciclos aplicados en el ensayo a fatiga, figuras 7 (a), (b) y (c). Los resultados muestran que dichos valores se estabilizan rápidamente, mucho antes de la mitad de la vida, y se mantienen prácticamente constantes.

Los resultados para el módulo de elasticidad transversal, G , obtenidos de los ciclos de histéresis del ensayo de fatiga a torsión pura se muestran en la figura 8. En este caso, los valores de los módulos G_1 y G_2 (correspondientes a los segmentos de descarga y carga del ciclo de histéresis) también se estabilizan rápidamente con el número de ciclos y también son superiores los valores obtenidos para el segmento de carga que para el de descarga. No obstante, a diferencia de lo observado para los módulos de elasticidad longitudinales, los valores obtenidos de los módulos de elasticidad transversal G_1 y G_2 son muy similares con diferencias significativamente menores.

Las diferencias para las tres amplitudes estudiadas no excede del 11% para los ensayos de tracción-compresión (medido entre el valor inicial y rotura) y un 9,5 % para el ensayo de fatiga a torsión.

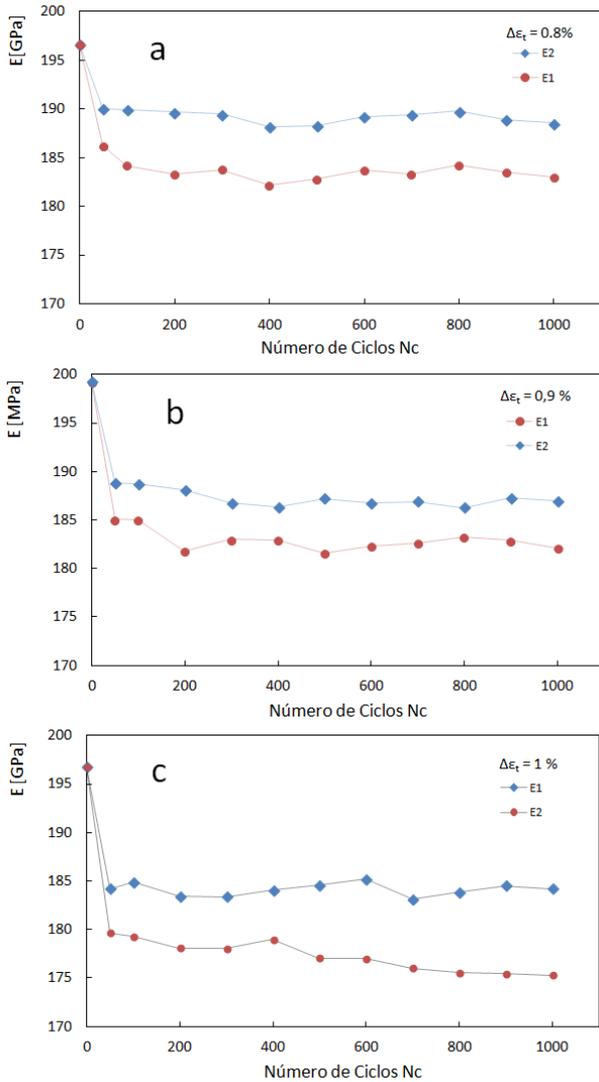


Fig.7 Variación de E_1 y E_2 con el número de ciclos para $\Delta\epsilon_t = 0,8\%$ (a), $\Delta\epsilon_t = 0,9\%$ (b) y $\Delta\epsilon_t = 1\%$ (c).

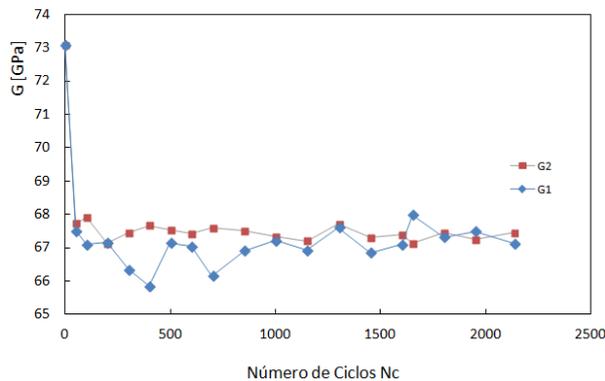


Fig.8 Variación de los módulos G_1 y G_2 con el número de ciclos para $\Delta\gamma_t = 0,8\%$.

3.4 Determinación de $\Delta\epsilon_p$ en control de deformación para ensayos de fatiga a bajo número de ciclos.

En los ensayos a fatiga a bajo número de ciclos en control de deformación existen diferentes métodos, definidos en las distintas normas o standards de ensayos, para determinar el incremento de deformación plástica tal como se describe en tabla 3.

Tabla. 3 Standards para determinar $\Delta\epsilon_p$ en ensayos de fatiga a bajo número de ciclos en control de deformación.

Ensayo	Determinación de $\Delta\epsilon_p$
BS 7270:2006	$\Delta\epsilon_p$ en la fig. 5
ASTM- E606M-12	$= \Delta\epsilon_t - \frac{\Delta\sigma}{E^*}$
AECMA PrEN 3988	$\Delta\epsilon_p$ en la fig. 5
ISO/DIS 12106	$= \Delta\epsilon_t - \frac{\Delta\sigma}{E_m}$

E^* se define como el módulo obtenido ensayando la probeta a tensiones o deformaciones cerca del límite elástico. Asumimos que $E^* \approx E_{1/4}$, ($E_{1/4}$ módulo obtenido mediante ajuste lineal en el primer cuarto de ciclo), según la aproximación tomada por Kandil [1]. E_m es definido como la media entre módulos E_1 y E_2 .

Los resultados muestran pequeñas variaciones para $\Delta\epsilon_p$, en oposición a los estudios realizados anteriormente para una aleación de Níquel Niomic 101 [1], ó para fundiciones [2], presentando en aquellos trabajos errores en el cálculo entre 30% al 300% respectivamente.

El cálculo mediante el método ISO y AECMA dio similares resultados en los tres niveles de deformación realizados. El método ASTM sin embargo presentó ligeras diferencias con los anteriores, arrojando errores relativos del orden del 5%.

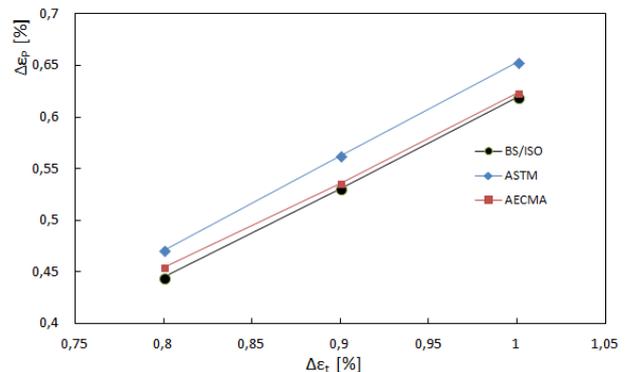


Fig.9 Diferencias del incremento de deformación plástica obtenidas acordes con los standards.

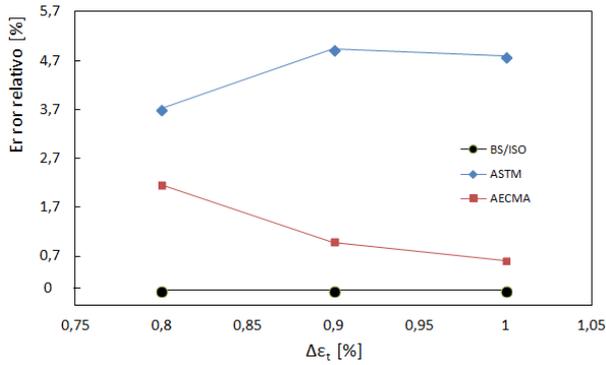


Fig.10 Error relativo del incremento deformación plástica calculado con los diferentes standards de ensayo.

3.4 Influencia en las estimaciones de vida a fatiga usando modelos de daño.

El comportamiento cíclico de un material se suele caracterizar en base a resultados de ensayos de fatiga a tracción y/o torsión, es decir, en base a las curvas ϵ -N y/o γ -N. En el caso de tracción, las curvas ϵ -N son definidas mediante los coeficientes σ'_f y ϵ'_f y los exponentes b y c, ajustando (mediante regresión lineal en coordenadas logarítmicas) las semiamplitudes de deformación elástica y plástica independientemente (ecuación 1). De forma análoga se determinan los coeficientes τ'_f y γ'_f y los exponentes b_γ y c_γ , para el caso de las curvas γ -N.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

La diferente determinación de $\Delta\epsilon_p$ según las distintas normas, hace que se obtengan distintos valores para los coeficientes y exponentes en el ajuste de la ecuación 1. En la tabla 4 aparecen los valores obtenidos a partir de la determinación de $\Delta\epsilon_p$ siguiendo las normas ASTM (ajuste 1) o AECMA/BS (ajuste 2).

Tabla 4 parámetros cíclicos obtenidos en los distintos ajustes.

	Ajuste 1	Ajuste 2
σ'_f	564 MPa	564 MPa
b	-0.058	-0.058
ϵ'_f	0.155	0.138
c	-0.466	-0.459

Como se puede comprobar a partir de los valores de la tabla las diferencias no afectan a los coeficientes de la parte elástica, puesto que éstos son función de las tensiones pero sí a los correspondientes a la parte plástica, el coeficiente ϵ'_f y el exponente c. Se pretende analizar la influencia de estas diferencias en las estimaciones de vida a fatiga usando modelos de daño.

Los modelos de daño usados en fatiga multiaxial establecen la vida a fatiga a través de un parámetro de daño. La relación entre parámetro de daño y vida se obtiene en general partir de ensayos con las curvas ϵ -N, dichas relaciones para los modelos de Fatemi-Socie (FS), Smith-Watson-Topper (SWT) y Liu I (LI) se corresponden con las ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente.

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_{n,\max}}{\sigma_y} \right) = \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^{b_\gamma} + \gamma'_f (2N_f)^{c_\gamma} \quad (2)$$

$$\sigma_{n,\max} \frac{\Delta\epsilon_n}{2} = \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (3)$$

$$(\Delta\sigma_n \Delta\epsilon_n)_{\max} + (\Delta\tau \Delta\gamma) = 4\sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} + \frac{4(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} \quad (4)$$

Haciendo uso de estos modelos y a través del software libre disponible en la web efatigue se han estimado las vidas a fatiga para diferentes niveles de deformación axial equivalente usando los parámetros de los dos ajustes de la tabla 4. Para la aplicación del modelo de Fatemi-Socie los parámetros de torsión son estimados a partir de los de tracción. Los resultados obtenidos con el ajuste 1 se muestran en la tabla 5. Los resultados obtenidos con los parámetros del ajuste 2 se muestran en la tabla 6 como las diferencias en % obtenidas respecto a los valores de la tabla 5.

Tabla 5. Vidas estimadas (N_f) por los distintos modelos usando los parámetros del ajuste 1.

$\Delta\epsilon_{eq}/2$	N_f (FS)	N_f (SWT)	N_f (LI)
0.004	3860	3980	3870
0.003	10840	11620	11030
0.0027	16530	17770	16720
0.0025	22950	24420	22830
0.0021	52480	54890	50070
0.0019	90330	95770	85470
0.0015	433200	428400	367500

Tabla 6. Diferencias en % de las vidas estimadas usando los parámetros del ajuste 2 respecto a los valores mostrados en la tabla 5.

$\Delta\epsilon_{eq}/2$	N_f (FS)	N_f (SWT)	N_f (LI)
0.004	-9.9	-10.1	-7.1
0.003	-8.3	-8.4	-5.2
0.0027	-7.7	-7.7	-4.4
0.0025	-7.1	-6.4	-3.3
0.0021	-5.9	-5.9	-2.4
0.0019	-5.0	-5.0	-1.4
0.0015	-2.8	-1.8	1.5

Los resultados mostrados en la tabla 6 muestran, como cabía esperar, que la diferente determinación de $\Delta\epsilon_p$ tiene mayor influencia en las estimaciones de vida a fatiga a bajo número de ciclos, donde predominan las deformaciones plástica, que alto número de ciclos, predominio de las deformaciones elásticas. El modelo de Liu I es menos sensible a dichas diferencias que los modelos de Fatemi-Socie y Smith-Watson-Topper. Con cualquiera de los tres modelos analizados puede concluirse que la influencia es pequeña dado que las diferencias no superan el 10 %.

CONCLUSIONES

- Los resultados de este trabajo arrojan pocas variaciones en los valores de $\Delta\epsilon_p$ calculados con los diferentes métodos, en contra de los resultados obtenidos para por F.A. Kandil [1] y
- Los valores cíclicos correspondientes a los segmentos de descarga y carga (E_1, E_2) son diferentes y siempre E_1 menor que E_2 .
- Los resultados del ensayo también muestran que después de unos pocos ciclos, los valores del módulo E_1 y E_2 no son constantes y decrecen gradualmente con el incremento de deformación, con lo que se comporta de manera no lineal.
- La determinación de $\Delta\epsilon_p$ en ensayos a fatiga con control de deformación establecida de forma distinta en diferentes normas conduce a distintos valores de los parámetros que caracterizan el comportamiento cíclico del material.
- Los distintos parámetros cíclicos obtenidos conducen a similares estimaciones de vida por los modelos de daño de Fatemi-Socie, Smith-Watson-Topper o Liu I analizados en este trabajo.

- **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto referencia DPI2012-33382 y de la Junta de Andalucía a través del Proyecto de Excelencia TEP- 3244.

REFERENCIAS

- [1] F.A. Kandil, Potencial ambiguity in the determination of the plastic strain range component in LCF testing, *International Journal of Fatigue* 21 (1999) 1013–1018.
- [2] ISO/DIS 12106. Metallic materials -- Fatigue testing -- Axial-strain-controlled method.

- [3] Lopez-Crespo P, Moreno B, Lopez-Moreno A, Zapatero J. Study of crack orientation and fatigue life prediction in biaxial fatigue with critical plane models. *Engineering Fracture Mechanics*. 2015;136:115-130.
- [2] BS 7270:2006. Metallic materials. Constant amplitude strain controlled axial fatigue. Method of test, British Standards Institution, 2006.
- [4] ASTM E606 / E606M-12, Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [5] PrEN 3988:1998. Aerospace series, Test methods for metallic materials - constant amplitude strain-controlled low cycle fatigue testing. AECMA, draft no. 2, March 1998.