

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE METALES DÚCTILES PARA EMBUTICIÓN. INFLUENCIA DE LA DEFORMACIÓN PREVIA Y ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE PANDEO

Cristina Gómez, José L. Núñez, Susana Calvo, E. Fullola, José L. Pelegay

Área de Mecánica y Nuevos Materiales, Instituto Tecnológico de Aragón (ITA),
María de Luna, 8, 50018-Zaragoza, España.

Resumen. En el presente trabajo se analiza la influencia en el comportamiento a fatiga que, sobre dos aceros con diferentes composiciones, ambos adecuados para la fabricación de productos mediante conformado metálico, tiene el nivel de deformación inicial y el nivel de deformación media bajo el que se realizan los ensayos. Los aceros analizados responden a la denominación DC05 (DIN EN 10130) y ZStE 260 (DIN EN 10268). En los dos casos se aceptan como válidas para describir el comportamiento de ambos materiales las expresiones propuestas por Ramberg-Osgood [1] para la curva tensión – deformación cíclica del material (σ - ϵ cíclica), así como las propuestas por Basquin [2], Manson-Coffin [3], [4] para la expresión de la relación amplitud de deformación total – vida (ϵ -N). La caracterización a fatiga de dichos materiales se realiza conforme a procedimientos de laboratorio previamente puestos en marcha en el ITA ([5] y [6]) usando como punto de partida las recomendaciones propuestas por la ASTM ([7], [8] y [9]). Debido a la geometría de las probetas analizadas (pequeño espesor, entorno a los 1.5 mm.), los problemas más frecuentes encontrados han estado asociados al fenómeno de pandeo de las probetas bajo cargas de compresión, cuya solución se ha abordado mediante diversas técnicas experimentales y la fabricación de utillajes de ensayos adecuados (como se describe, entre otros, en [10]).

Abstract. In the current work, the influence of the initial and medium strain under which fatigue tests are performed in the fatigue behaviour of two different steels for deep drawing is analysed. The two steels analysed has the commercial denomination DC05 (according to DIN EN 10130) and ZStE 260 (DIN EN 10268). In both cases, the expressions proposed by Ramberg-Osgood [1] for the cyclic stress-strain curve (σ - ϵ) as well as those proposed by Basquin [2] and Manson-Coffin [3], [4] for the relationship between strain amplitudes and life (ϵ -N curve) are assumed as valid. The fatigue characterisation of both materials is made according to standard laboratory procedures, previously developed and setting up in the ITA ([5] and [6]), using for that as basis the recommendations proposed by ASTM ([7], [8] and [9]). The most usual problems found during the tests have been associated to buckling in the specimens under compression loads. Those problems, due to the geometry of the specimens tested (small thickness, about 1.5 mm.), have been solved by using several experimental techniques and by manufacturing specific tests tooling (as is described in [10]).

1. INTRODUCCIÓN

Los componentes de la industria actual, están generalmente sujetos a deformaciones previas debido a los procesos de fabricación en los que se ven envueltos, o a operaciones posteriores (ya sean intencionadas o no) sobre el producto terminado. Todas estas predeformaciones pueden ser potencialmente peligrosas y reducir considerablemente la vida a fatiga del componente o incluso beneficiosas si generan tensiones residuales opuestas a las cargas de servicio. Para una adecuada estimación de la vida a fatiga en estos componentes, tanto el daño como los efectos beneficiosos de estas predeformaciones deberían ser considerados por los modelos de predicción de vida a fatiga.

Para ello se ha analizado el efecto de la deformación inicial sobre dos materiales (DC05 y ZStE260) comúnmente empleados para la fabricación de

componentes por conformado metálico. El comportamiento a fatiga se ha determinado mediante ensayos de deformación constante sobre probetas sin predeformar y con una predeformación en tracción del 15%, con el fin de establecer un análisis comparativo. Adicionalmente, en el caso del ZStE 260, se ha analizado la influencia de la deformación media realizando los ensayos a $R_{\epsilon}=0$ y $R_{\epsilon} = -1$.

2. DETALLES DEL ENSAYO

2.1. Material y probetas

Los materiales de partida para la realización de los ensayos han sido el DC05 (acero al carbono) y el ZStE 260 (acero microaleado) cuyas composiciones químicas aparecen en la tabla 1. Para la obtención de muestras predeformadas y sin predeformar, se ha partido de bandas de material de 50 mm de anchura y 600 mm de longitud, las cuales fueron troqueladas de planchas de

chapa en bruto. Estas bandas fueron cortadas al menos a 100 mm de distancia de los extremos de las planchas, para evitar posibles efectos de borde por formación de

ondas o por diferentes microestructuras causadas por gradientes de enfriamiento.

Tabla 1. Composición química de los aceros utilizados

Material	C (% max)	Mn (% max)	P (% max)	S (% max)	Si (% max)	Al (% max)	Nb (% max)	Ti (% max)
DC05	0.06	0.35	0.025	0.025	0.10			
ZstE260	0.06	0.50	0.60	0.030		0.015	0.09	0.22

La predeformación uniaxial ($\varepsilon_2 = -1/2\varepsilon_1$) se ha llevado a cabo sobre las bandas una vez troqueladas, mediante una máquina de tracción uniaxial, hasta alcanzar deformaciones plásticas del 15%. Después de esto, las bandas han sido sometidas a un recocido durante 45 minutos a una temperatura de 200°C.

Las probetas de fatiga han sido mecanizadas de las bandas predeformadas, utilizando un equipo de electroerosión. Este procedimiento cubre completamente los requerimientos en cuanto a perpendicularidad se refiere, además de tener una menor influencia sobre los bordes de las probetas, comparado con un mecanizado convencional. Las probetas han sido extraídas transversalmente ($rd=90^\circ$) a la dirección de enrollamiento de las bandas de chapa. El espesor de las probetas varía entre 1.53 mm para el material ZstE 260 y 1.20 mm para el material DC05 como se observa en la Fig.1.

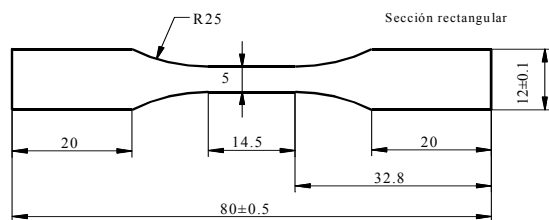


Fig. 1. Probeta de ensayo. Dimensiones en mm.

2.2. Equipamiento y condiciones de ensayo

El equipamiento de ensayo, empleado tanto para los ensayos estáticos como los cíclicos, ha consistido en una máquina de ensayos de alta frecuencia con un servocilindro hidráulico de 25kN como se observa en la Fig. 2.

La deformación ha sido controlada mediante un extensómetro acoplado a los bordes de las probetas, con una longitud inicial entre marcas $L_0 = 10$ mm. Las cargas de ensayo han sido generadas por un software de control, capaz de almacenar también los datos de ensayo resultantes. Todas las muestras han sido ensayadas a temperatura ambiente, bajo un rango de amplitudes de deformación constantes, aplicadas en la dirección longitudinal de las probetas.

Para la obtención de datos de partida que permitan la elaboración de un plan de ensayos optimizado, se han determinado las curvas monotónicas de los materiales

(tensión real frente a deformación real), las cuales permiten la obtención tanto del límite como del módulo elástico de los mismos (ver resultados de los ensayos en tabla 2). Las amplitudes de deformación empleadas para los ensayos de fatiga están incluidas en la zona elastoplástica de dichas curvas y la máxima amplitud de deformación se ha seleccionado de tal modo que no se alcance el 80% de la carga teórica de pandeo.

Tabla 2. Resultados de las curvas monotónicas

Material	A_0 (mm ²)	$F_{p0.2}$ (N)	E (GPa)	$\sigma_{p0.2}$ (MPa)
DC05 (0% predef.)	7.69	1444	211.8	187.8
DC05 (15% predef.)	7.26	2477	193.5	341
ZStE260 (0% predef.)	6.48	2074	202.33	320
ZStE260 (15% predef.)	66.06	2866	202.39	473

A_0 = Área inicial; $F_{p0.2}$ = Fuerza en el límite elástico; E = Módulo elástico o de Young; $\sigma_{p0.2} = F_{p0.2} / A_0$

La forma de la onda de la señal de deformación empleada es un seno. La forma de la onda así como la frecuencia de la misma se mantienen constantes durante todo el ensayo, realizándose éste a frecuencias de rango entre 3 Hz y 25 Hz (dependiendo de la amplitud de deformación), con el fin de conseguir un tiempo de ensayo no muy prolongado y asegurar un espectro de cargas y deformaciones tan exacto como fuera posible.



Fig. 2. Probeta en ensayo

La parada del ensayo se realiza cuando se alcanza un número de ciclos predeterminado de 2×10^6 (criterio de “run out”) o cuando la diferencia de amplitud de carga entre un ciclo y el anterior alcanza una variación del 50% (pérdida de rigidez por aparición de grieta).

3. PLAN DE ENSAYOS Y RESULTADOS

Para cada material se ha realizado un plan de ensayos obteniendo inicialmente la curva monotónica del material, citada anteriormente, y posteriormente su curva cíclica. Para ello se ha considerado, en la medida

de lo posible, cuatro niveles de deformación y tres probetas por nivel, y se han determinado los valores de amplitud de deformación dentro de la zona elastoplástica del material. El plan de ensayos se detalla en la tabla 3.

Durante la ejecución de los ensayos de fatiga se ha modificado ligeramente el plan de ensayos inicial previsto, en función de los resultados que se han ido obteniendo. Estos resultados se muestran en las tablas 4 a 7.

Tabla 3. Plan inicial de ensayos

Material	Valor de predeformación	Ratio deformación (R_e)	N° total probetas	Niveles	Probetas por nivel	Amplitud de deformación %			
						0.09	0.10	0.12	0.13
DC05	0%	-1	12	4	3	0.09	0.10	0.12	0.13
DC05	15% uniaxial	-1	12	4	3	0.10	0.12	0.13	0.14
ZStE 260	0%	0	12	4	3	0.11	0.12	0.14	0.15
ZStE 260	15% uniaxial	-1	12	4	3	0.13	0.15	0.17	0.21

Tabla 4. DC05, 0% predeformado ($R_e = -1$)

N° Probeta	ϵ_a (%)	A_0 (mm ²)	F_a (N)	σ_a (MPa)	N_f
2M000368.003	0.13	7.545	1075	142.48	139600
2M000368.004	0.13	7.610	1091	143.36	131400
2M000368.006	0.13	7.530	1083	143.82	155300
2M000366.004	0.12	7.614	1147	150.64	130200
2M000366.005	0.12	7.595	1149	151.28	180800
2M000366.002	0.12	7.565	1120	148.05	172000
2M000368.001	0.10	7.580	988	130.34	266135
2M000368.005	0.10	7.617	1003	131.68	302000
2M000367.006	0.09	7.227	1050	145.29	391000
2M000367.002	0.09	7.495	1100	146.76	730000
2M000368.002	0.09	7.654	1090	142.41	696840

Tabla 5. DC05, 15% predeformado ($R_e = -1$)

N° Probeta	ϵ_a (%)	A_0 (mm ²)	F_a (N)	σ_a (MPa)	N_f
2M000371.001	0.14	7.28	1273	174.89	112000
2M000371.002	0.14	7.31	1277	174.74	160000
2M000371.003	0.14	7.35	1281.5	174.32	182000
2M000369.002	0.13	7.24	1263.5	174.44	262000
2M000369.005	0.13	7.01	1256.5	179.3	370000
2M000369.004	0.13	7.31	1186	162.14	352000
2M000370.006	0.12	7.33	1240.5	169.25	483200
2M000370.003	0.12	7.26	1243.5	171.34	357650
2M000370.004	0.12	7.34	1232	167.81	430000
2M000370.002	0.1	7.31	1193.7	163.34	737000
2M000371.004	0.1	7.29	1151	157.81	1400000
2M000371.005	0.1				2000000 (*)

ϵ_a = Amplitud deformación ; A_0 = Area inicial ; F_a = Amplitud carga a $N_f/2$; $\sigma_a = F_a / A_0$; N_f = Ciclos fallo;
(*) Run-out. No se incluyen el resto de los datos del ensayo

Tabla 6. ZStE 260, 0% predeformado ($R_e = 0$)

N° Probeta	ϵ_a (%)	A_0 (mm ²)	F_a (N)	σ_a (MPa)	N_f
2M000377.003	0.21	6.012	1559	259.315	25200
2M000377.005	0.21	5.892	1561	264.936	25500
2M000375.003	0.19	6.030	1587	263.184	61500
2M000376.003	0.19	6.066	1588	261.787	74000
2M000377.004	0.19	5.982	1590	265.810	38200
2M000376.002	0.17	6.070	1579	260.132	95000
2M000377.001	0.17	6.036	1561	258.615	82000
2M000377.006	0.17	5.8617	1528	260.675	57200
2M000376.004	0.15	6.086	1501	246.632	179800
2M000376.006	0.15	6.024	1535	254.814	129000
2M000377.002	0.15	5.900	1517	257.118	125000
2M000375.001	0.13	6.086	1451	238.416	464500
2M000375.004	0.13	6.002	1442	240.253	406000
2M000376.005	0.13	6.000	1427	237.833	368000

Tabla 7. ZStE 260, 15% predeformado ($R_e = -1$)

N° Probeta	ϵ_a (%)	A_0 (mm ²)	F_a (N)	σ_a (MPa)	N_f
2M000373.005	0.15	6.346	1470	231.640	109000
2M000373.001	0.15	6.454	1493	231.330	98400
2M000374.006	0.15	6.350	1482	233.386	102000
2M000373.002	0.14	6.363	1462	229.770	170500
2M000373.003	0.14	6.438	1420	220.565	265500
2M000372.004	0.14	6.325	1383.5	218.735	123500
2M000372.002	0.12	6.476	1393	215.100	330500
2M000374.001	0.12	6.350	1387	218.425	354000
2M000374.002	0.12	6.396	1390	217.323	368300
2M000373.004	0.11	6.388	1323	207.110	693500
2M000373.006	0.11	6.379	1320	206.930	756000
2M000374.003	0.11	6.438	1317	204.567	637000

El modelo matemático (1) y (2) utilizado para describir el comportamiento en ambos materiales es el propuesto por Ramberg-Osgood [1] para la curva tensión-deformación cíclica (σ - ϵ cíclica), sustituyendo (2) en (1):

$$\epsilon_a = \epsilon_{a,e} + \epsilon_{a,p} \tag{1}$$

$$\epsilon_{a,e} = \frac{\sigma_a}{E} \quad ; \quad \epsilon_{a,p} = \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \tag{2}$$

y las expresiones (1) y (3) propuestas por Basquin [2],

Manson-Coffin [3] y [4] para la relación amplitud de deformación total-vida (ϵ - N_f), sustituyendo las ecuaciones de (3) en (1):

$$\epsilon_a = \epsilon_{a,e} + \epsilon_{a,p} \tag{1}$$

$$\epsilon_{a,e} = \frac{\sigma_f'}{E} \cdot (2N_f)^b \quad ; \quad \epsilon_{a,p} = \epsilon_f' \cdot (2N_f)^c \tag{3}$$

Los parámetros cíclicos característicos para cada material se muestran en la tabla 8:

Tabla 8. Parámetros de Ramberg-Osgood y Basquin, Manson-Coffin

Material	K' (MPa)	n'	σ_f' (MPa)	b	ϵ_f'	c
DC05 (0% predeformado)	152.24	0.0079	172.3	-0.0142	4.7123	-0.7155
DC05(15% predeformado)	286.945	0.0658	448.370	-0.0722	1.6305	-0.6291
ZStE260(0% predeformado)	386.15	0.0656	519.15	-0.0655	15.7766	-0.8647
ZStE260(15% predeformado)	387.207	0.0524	442.207	-0.04517	3.127	-0.7479

En las figuras 3 y 4 se muestran las curvas amplitud de deformación-vida (ϵ - N_f) obtenidas para cada material respectivamente (DC05 y ZstE 260), comparando niveles de predeformación inicial del material. La Fig. 5

representa las curvas tensión-deformación cíclica (σ - ϵ cíclica) de cada material respectivamente (DC05 y ZstE 260) para los distintos niveles de predeformación.

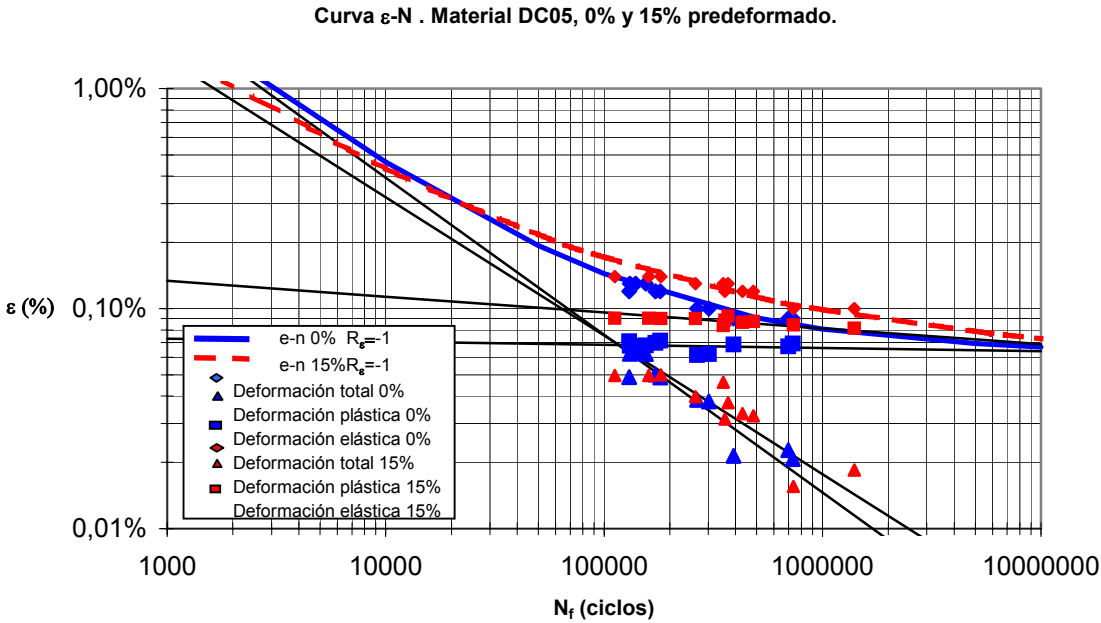


Fig. 3. Curvas ϵ -N de Material DC05.

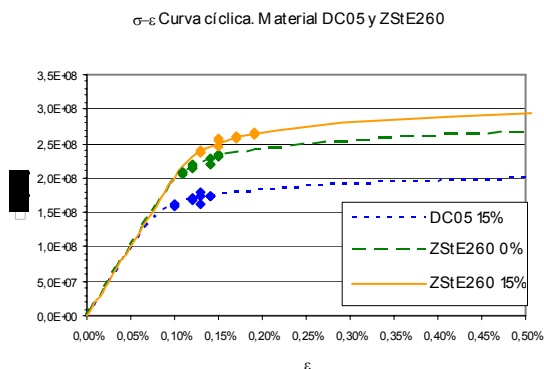
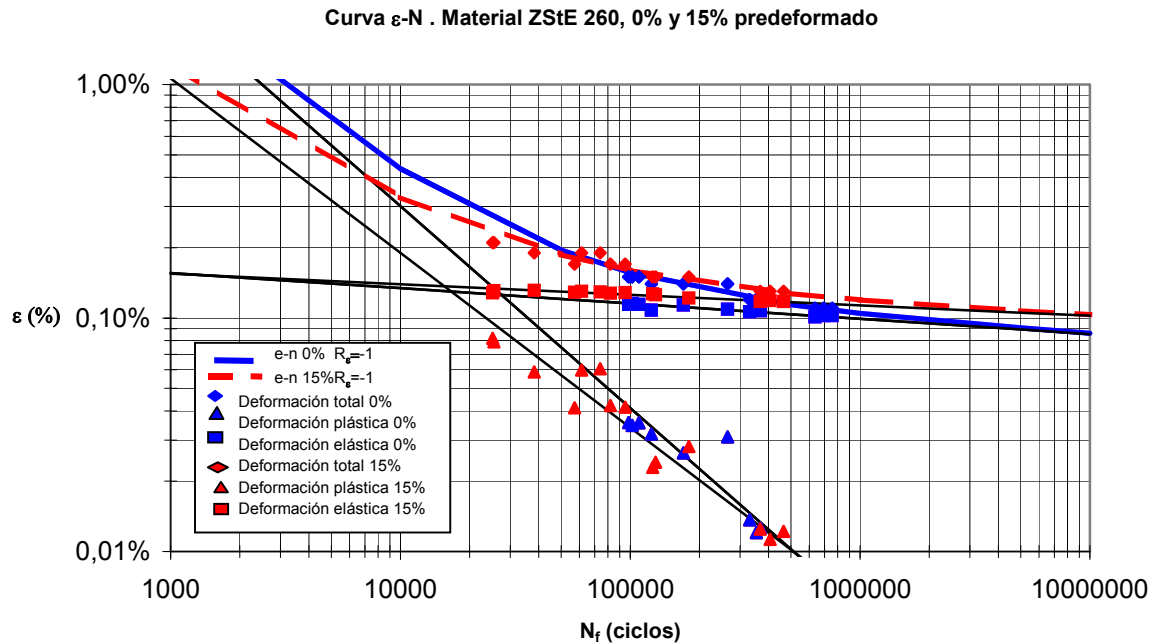


Fig. 5. Curvas cíclicas de los materiales

4. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Como puede observarse de los resultados obtenidos para el acero DC05 en la Fig. 3, el comportamiento a fatiga presentado por dicho material bajo condiciones de predeformación y sin ellas, difiere entorno al 20% en los niveles de deformación necesarios para alcanzar una vida de 1.000.000 de ciclos (mejor comportamiento a fatiga del material predeformado). No obstante, esta diferencia de comportamiento tiende a reducirse conforme se somete al material a amplitudes de deformación más elevadas, en los que los niveles de amplitud de deformación plástica (hasta del 0.065%) son del mismo orden que los de deformación elástica (hasta el 0.09%). De hecho, para niveles de deformación plástica elevados, las curvas deformación – vida del material predeformado y sin predeformar tienden a cruzarse, presentando un mejor comportamiento a fatiga

el material no predeformado. Es importante remarcar que el rango en el que se ha trabajado con este material está comprendido entre los 100.000 y los 1.500.000 ciclos, por lo que extrapolar las conclusiones obtenidas fuera de dicho rango, puede no ser muy adecuado. Los intentos que se realizaron para ensayar probetas de este material a niveles de deformación más elevados (por encima del 0.14% de amplitud de deformaciones) fracasaron, debido a la aparición de fenómenos de inestabilidades estructurales a compresión (pandeos).

Para la resolución de dicho problema, aparecido por el pequeño espesor y elevada esbeltez de las probetas utilizadas (entorno a 1.5 mm), se plantearon dos técnicas alternativas. La primera de ellas consistía en ensayar el material tan solo en tracción (es decir, con un ratio de deformación, R_ϵ , de 0). Esta técnica presentaba el problema de introducir una nueva variable de incertidumbre en la caracterización del material (el efecto de la deformación media impuesta) y fue utilizada en el acero ZstE 260 no predeformado (ya que, al presentar un menor límite elástico que el predeformado, era susceptible de sufrir problemas de inestabilidades estructurales a compresión). La segunda de las técnicas consistía en la realización de un dispositivo “anti-pandeo”, cuyas ideas generales fueron extraídas de [10]. Este dispositivo, según se observa en la Fig. 6, ha sido ya fabricado y probado con éxito sobre probetas de prueba de acero St52 y será utilizado para, en los próximos meses, extender el rango de los resultados obtenidos sobre el material DC05 hasta el orden de las decenas de miles de ciclos (amplitudes de deformación de hasta 0.20% aproximadamente).



Fig. 6. Dispositivo “anti-pandeo”

Conforme a lo anteriormente comentado, los resultados presentados para el material ZstE 260 muestran dos influencias mezcladas: el nivel de predeformación al que se ha sometido el material inicialmente y el nivel medio de carga con el que se realiza el ensayo. Como puede observarse, y gracias tanto al mayor límite elástico del material (en su aspecto predeformado) como a la utilización de un ratio de deformaciones igual a 0 (en el caso del material no predeformado), los rangos de ciclos de vida hasta el fallo obtenidos en este caso se han encontrado entre los 30.000 y los 800.000 ciclos (que corresponden con amplitudes de deformación elásticas máximas de hasta 0.14% y plásticas de hasta 0.065%). Como puede observarse en la Fig. 4, la diferencia entre la amplitud de deformaciones que producen vidas de entorno a 1.000.000 de ciclos es menor del 10% para ambas condiciones del material (con un mejor comportamiento para el material predeformado y ratio de deformaciones –1). De nuevo, y ahora de manera más acusada, se produce un cambio en este comportamiento cuando las amplitudes de deformación a las que se somete al material hacen que éste se encuentre en el rango de fatiga a bajos ciclos (“low cycle fatigue”, inferior a 50.000 ciclos).

No obstante, con estos resultados es posible concluir que, para el material microaleado, la influencia tanto del nivel de predeformación del mismo como del nivel medio de carga al que se realiza el ensayo son pequeñas en su vida a fatiga, siendo la variable dominante en este proceso de degradación la amplitud de deformaciones a la que se le somete.

De la comparación de valores de vida obtenidos para ambos materiales (DC05 y ZstE 260, ambos predeformados y con un ratio de deformación –1), es posible concluir el mejor comportamiento a fatiga del acero microaleado: soporta amplitudes de deformación mayores en un 20% para niveles de vida entorno a

1.000.000 de ciclos (fatiga a altos ciclos) y de aproximadamente un 6% para niveles de vida de entorno a 100.000 ciclos (límite superior de la fatiga a bajos ciclos). Este mejor comportamiento puede también observarse en la Fig. 5, curvas cíclicas del material, en donde el acero ZstE 260 presenta un mayor límite elástico que el acero DC05.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se enmarca dentro de la línea de investigación en materiales metálicos desarrollada por el Área de Mecánica y Nuevos Materiales del ITA, que ha sido financiada parcialmente por el MCyT y por fondos FEDER, dentro del proyecto “Diseño a fatiga mediante modelos estadísticos de daño acumulado y elementos finitos probabilistas (2FD97-2423 TPP)”.

REFERENCIAS

- [1] Rambert, W & Osgood, W.R. “Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters”, NACA Tech. Note
- [2] Basquin, O.H. “The Exponential Law of Endurance Tests”, Proc. ASTM, Vol. 10, Part II, 1910
- [3] Tavernelli, J.F. & Coffin Jr., L.F. “Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue”. Trans. ASME, J.Basic. Eng., Vol. 84, N° 4, 1962
- [4] Manson, S.S. “Discussion of reference 23”, Trans. ASME J. Basic Eng., Vol. 84, N° 4, 1962
- [5] Procedimiento ITA, “Procedimiento de Ensayo para la Determinación de la Curva de Fatiga ϵ -N de materiales metálicos”.
- [6] Procedimiento ITA, “Procedimiento para el Análisis de las Curvas de Fatiga Tensión-Vida (S-N) y Deformación – Vida (ϵ -N) de materiales metálicos”.
- [7] ASTM E206-72.- “Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data”.
- [8] ASTM E468-82.- “Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials”.
- [9] ASTM E513-74.- “Constant-Amplitude, Low-Cycle Fatigue Testing”.
- [10] NACA 931.- “Guides for Preventing Buckling in Axial Fatigue Tests on Thin-Sheet Metal Specimens”.