

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA SUPERALEACIÓN DE BASE Ni**

F. Longo(1) ; V. Quintanilla(1);P. Sebastián(1);J. Larrea(2); A. Sánchez(1)

- (1) INSTITUTRO NACIONAL DE TÉCNICA AEROSPAZIAL (INTA)  
División de Materiales y Estructuras  
Área de Materiales Metálicos  
Ctra. Torrejón –Ajalvir p.k. 4 – 28850 Torrejón de Ardoz (MADRID)
- (2) SENER INGENIERÍA Y SISTEMAS, S.A. (SENER)  
Avda. Zugazarte, 56  
48930 – Las Arenas (VIZCAYA)

**RESUMEN:** En este trabajo se presentan valores del comportamiento mecánico a altas temperaturas de una superaleación de base Ni. Los ensayos de tracción se han realizado a 650 °C y 870 °C en modo de control por desplazamiento. Los ensayos de fatiga a bajo número de ciclos se han realizado en tracción-compresión en control por deformación a 580 °C y 770 °C con  $R=-1$ .

Los resultados experimentales se han analizado y se han obtenido las curvas de tracción esfuerzo-deformación y las curvas de Coffin-Manson para cada temperatura. Los valores de los parámetros, de los modelos matemáticos expresados por las leyes de Hollomon y Coffin-Manson, se han calculado usando el método de mínimos cuadrados.

**ABSTRACT:** In this paper values of mechanical behaviour at high temperature of a Ni-base forging superalloys are presented. The tensile test have been carried out at 650 °C and 870 °C under stroke control. The low cycle fatigue test have been carried out in tension-compression and under strain control at 580 °C and 770 °C with  $R=-1$ .

The experimental results have been analyzed and the tensile stress-strain curves and Coffin-Manson curves have been obtained at each temperature. The parameter values of the Hollomon and Coffin-Manson laws have been evaluated using the least-square method.

**1 INTRODUCCIÓN**

La creciente necesidad de la industria, y en especial de la aeroespacial, de disponer de materiales que tengan un buen comportamiento a elevadas temperaturas para su utilización en elementos en la zona caliente de motores, tales como discos y álabes de turbina, y teniendo en cuenta la complejidad de las condiciones de utilización de estos materiales, hace necesario un buen conocimiento de su comportamiento para que la elección de estos materiales, sea la óptima a la hora de su utilización.

Para ello, debe realizarse de cada material la caracterización físico-química y microestructural, así como la realización de ensayos mecánicos en diferentes condiciones de carga y temperatura, para optimizar sus condiciones de utilización, poniendo un especial énfasis en el comportamiento de estos materiales sometidos a cargas repetidas, ya que el fenómeno de fatiga es una de las causas más comunes de las roturas en servicio de piezas y mecanismos.

Entre los materiales utilizados para aplicaciones estructurales a altas temperaturas están las aleaciones de base Ni o Co, de las que al buscar datos oficiales[1][2][3] recomendados para su utilización en la industria aeronáutica, se encuentra la dificultad de no disponer de valores concretos del comportamiento a fatiga a bajo número de ciclos y elevadas temperaturas.

El objetivo de este trabajo es obtener datos concretos del comportamiento mecánico a elevada temperatura, reflejar la tendencia de comportamiento que se infiere de los resultados que se han obtenido en los diferentes ensayos y su

concordancia con los modelos matemáticos de comportamiento dados por Hollomon y Coffin-Manson [4][5][6][7].

**2 SÍMBOLOS:**

b: Exponente de resistencia a fatiga  
E : Módulo de elasticidad  
e : Deformación en términos de ingeniería  
k: Coeficiente de resistencia  
k': Coeficiente de resistencia a fatiga  
n: Exponente de endurecimiento  
N<sub>f</sub> : Ciclos a rotura  
n': Exponente de ductilidad a fatiga  
R : Razón de deformaciones ( $e_{máx.}/e_{mín.}$ )  
R<sub>máx.</sub>: Resistencia a la tracción  
R<sub>p0,2</sub>: Límite elástico al 0,2%  
S : Esfuerzo en términos de ingeniería  
x<sub>e</sub>: Componente elástica de la magnitud x  
x<sub>p</sub>: Componente plástica de la magnitud x  
e : Deformación verdadera  
e': Coeficiente de ductilidad a fatiga  
s : Esfuerzos verdaderos  
ρ : Coeficiente de correlación

**3 ENSAYOS****3.1 Material y su caracterización:**

La composición química de la colada utilizada, expresada en % en peso, y las cantidades nominales según especificación AMS 5713F están indicadas en la **Tabla I**.

Designa.	Base	Cr	Mo	Ti	Al	Co	Fe	C
AMS5713F	Ni	18-20	9-10,5	3-3,3	1,4-1,8	10-12	<5	<0,12
Colada ensayos	Ni	19,57	11,26	3,73	1,27	11,50	1,10	0,090

TABLA I: Composición Química ( % en peso)

Las diferencias en la composición de Al, Ti y Mo no se consideran significativas.

### 3.2 Estado del material

El material se recibió tratado y según el usuario su estado era el de solubilización (calentamiento a 1950°F durante 30 minutos y enfriamiento al aire) y maduración (calentamiento a 1400 °F durante 10 h y enfriamiento al aire) según especificación AMS 5713F.

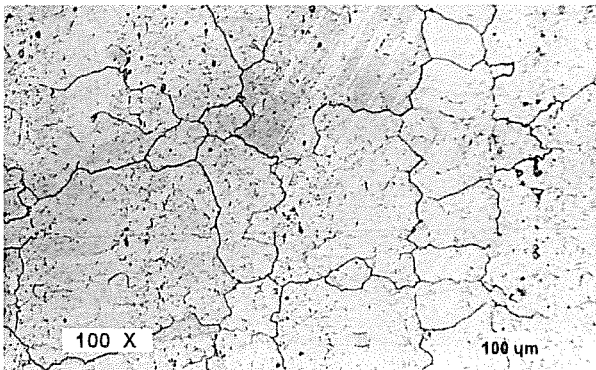


Figura 1

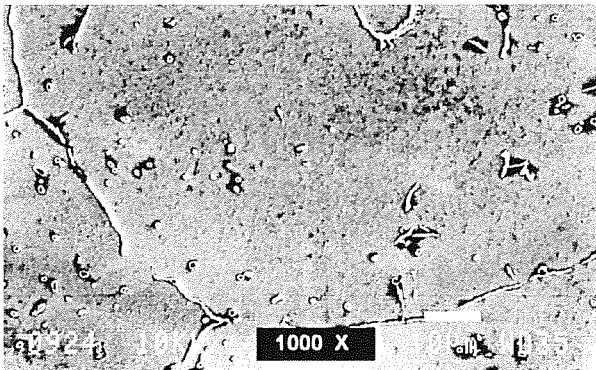


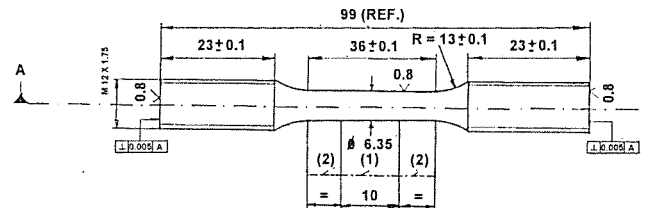
Figura 2

**Muestra en estado de recepción: Ataque electrolítico: Ácido nítrico (205 ml) + Ácido sulfúrico (35 ml) + Ácido fosfórico. 5 V durante 5 minutos**

El grano es de tipo duplex y tiene un tamaño entre 2 y 3 [8] y la microestructura está constituida por una matriz austenítica,  $\gamma$ , con precipitación homogénea de fase  $\gamma'$  y con existencia de carburos del tipo  $C_6Cr_{23}$  en límite de grano y del tipo  $CMO_6$  en el interior del grano, como puede observarse en las figuras 1 y 2.

### 3.3 Probetas

Se utilizaron probetas de sección circular uniforme y la configuración de las mismas, con sus dimensiones nominales, se muestran en las figuras 3 y 4. Las probetas se recibieron totalmente mecanizadas.



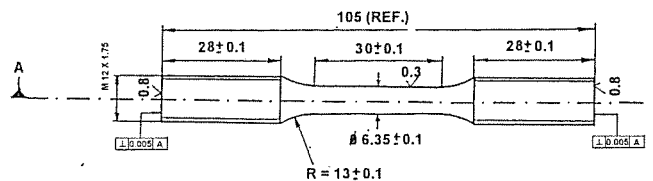
\* Cotas en mm.

\* La cota menor ha de darse en la zona (1), permitiéndose que la cota menor en el diámetro a lo largo de esta zona sea un 0.5% inferior al valor que tenga en la zona (2).

Figura 3.- Probeta de tracción S/N ASTM E - 8

### 3.4 Equipos y condiciones generales de ensayo.

Los ensayos de tracción se realizaron en máquinas servohidráulicas de 100 kN de capacidad máxima, utilizando la sensibilidad de escala de 50 kN. En estas condiciones las máquinas de ensayo están clasificadas como clase 1 S/N EN-10002-2 [9] de 1.991.



\* Cotas en mm.

\* La norma ASTM E-606 permite una longitud galgada de la probeta de cuatro veces el diámetro de la sección galgada. En este caso tomamos 30 mm. para una mejor colocación del extensómetro.

\* La norma ASTM E-606 indica un diámetro en la cabeza de dos veces el diámetro de la cabeza. En este caso hemos tomado M12 por condicionamiento de amarre a las mordazas.

Figura 4.- Probeta de fatiga a bajo número de ciclos S/N ASTM E-606

Los ensayos de tracción se realizaron S/N ASTM E-21 [10], controlando el desplazamiento del pistón móvil a una velocidad de 0,25 mm/min hasta alcanzar una deformación del 0,8 %, continuando el ensayo a una velocidad de 2,5 mm/min hasta conseguir la rotura de la probeta.

Los ensayos de fatiga a bajo número de ciclos se realizaron S/N ASTM E-606 [11] en modo de control por deformación, utilizando una onda triangular de frecuencia 0,5 Hz.

El calentamiento de las probetas se hizo por radiación mediante hornos de resistencia de tipo libro, dotados de tres zonas con regulación independiente, con un gradiente de temperaturas a lo largo de la longitud calibrada de la probeta de 3°C. Una vez alcanzada la temperatura de ensayo, las probetas antes de iniciarse el ensayo se mantuvieron veinte minutos a esa temperatura.

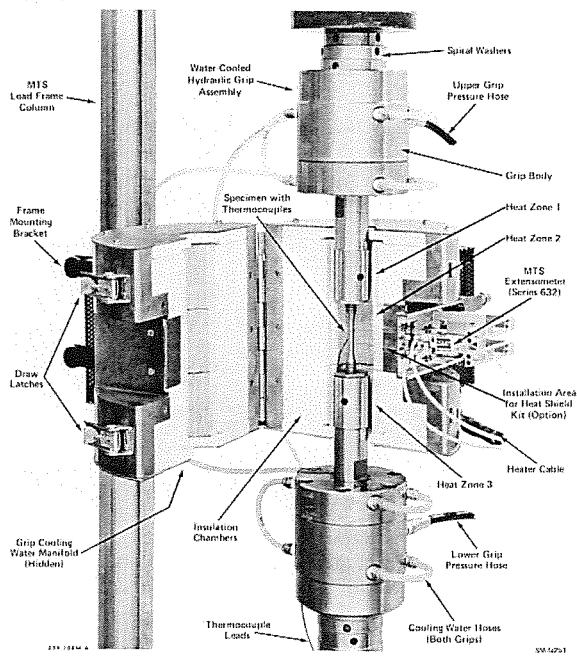


Figure 1. High-Temperature Furnace, Internal View

Figura 5.- Esquema de montaje de la probeta

La fijación de las probetas de ensayo a los equipos de ensayo se realizó mediante mordazas hidráulicas, refrigeradas por agua, que aseguran el alineamiento de la probeta y evitan que se produzcan holguras en los procesos de descarga en los ensayos de fatiga. Un esquema [12] del montaje de puede verse en la figura 5.

La captación de las deformaciones se realizó con extensómetros axiales provistos de varillas radiales de cuarzo de 25 mm de longitud base a temperatura ambiente y con la sensibilidad de escala de 2,5 mm., que se encuentra clasificado como B1 S/N ASTM E-83 [13].

3. 5 Condiciones específicas de ensayo.

La elección de las condiciones de ensayo (temperaturas, amplitudes y frecuencias) fueron fijadas por el usuario de las aleaciones, reflejando en este trabajo las siguientes condiciones indicadas en la Tabla II:

Ensayos	Temp. (°C)	R	Δε(%)	f (Hz)	Tipo de onda
LCF	650	-1	1'1;0'95;0'75	0'5	Triangular
	770		1;0'85;0,72		
TRACCIÓN	580 y 870				

Tabla II.- Condiciones de ensayo

4 Resultados obtenidos en los ensayos

4.1 Tracción

De los resultados obtenidos en los ensayos de tracción (esfuerzo y deformaciones referidos en términos de ingeniería) y teniendo en cuenta la definición de Ludwik para la deformación verdadera, se calcularon los esfuerzos y deformaciones verdaderas para cada uno de los ensayos, mediante las siguientes expresiones:

$$\sigma = S(1+e) \quad (1)$$

$$\epsilon = \ln(1+e) \quad (2)$$

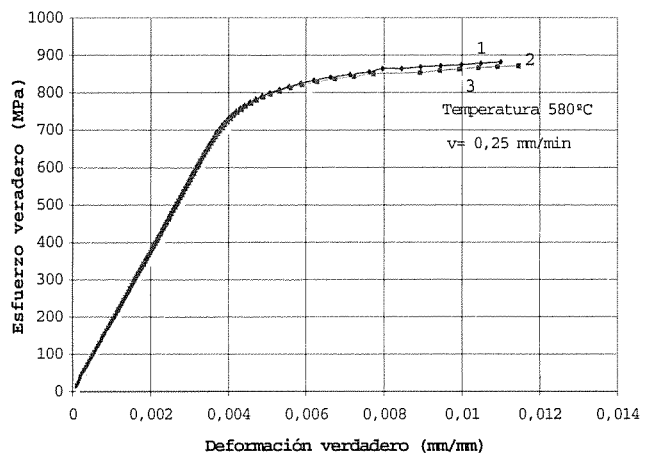


Figura 6.- Gráficos de ensayos de Tracción a 580 °C

En el tramo lineal de la curva y mediante análisis de regresión lineal, se calculó el valor del módulo de elasticidad. La deformación plástica se calculó mediante la ecuación 3 y, a partir de ella, nuevamente mediante análisis de regresión lineal de la expresión dada por Hollomon, ecuación 4, indicada en forma logarítmica, se calcularon los distintos parámetros [14] característicos de este material para estas temperaturas.

$$\epsilon_p = \epsilon - \sigma/E \quad (3)$$

$$\sigma = K(\epsilon_p)^n \quad (4)$$

$$\epsilon = \sigma/E + (\sigma/K)^{1/n} \quad (5)$$

En las figuras 6 y 7 pueden observarse la representación gráfica de los ensayos realizados en términos de esfuerzos y deformaciones verdaderas. En la Tabla III están reflejados los valores de los parámetros correspondientes a la expresión analítica dada por Hollomon y los valores del límite elástico al 0,2% y la resistencia a tracción.

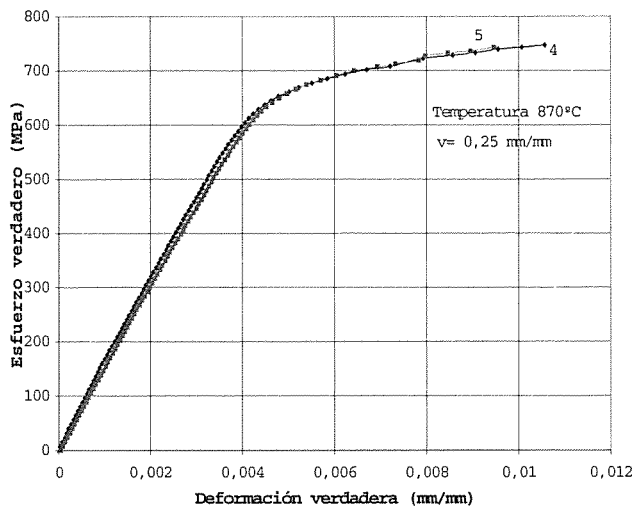


Figura 7.- Gráficos de ensayos de Tracción a 870 °C

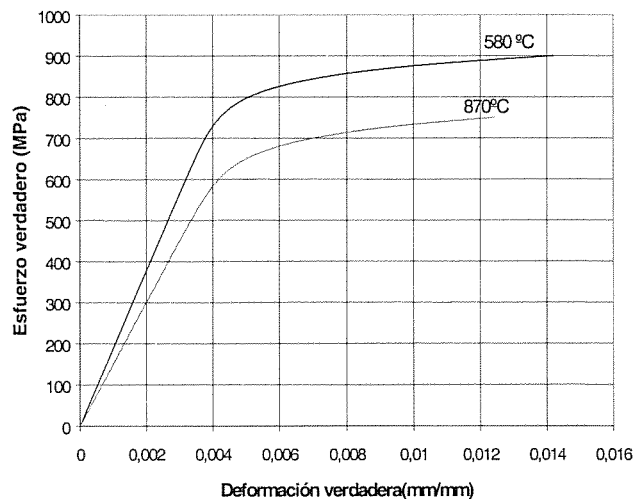


Figura 8.- Curvas teóricas de Tracción

T (°C)	Prob.	E (Mpa)	$\rho^2$	K(MPa)	n	$\rho^2$	R <sub>p0.2</sub> (MPa)	R <sub>máx.</sub> (MPa)
580	1	184811	0,9999	1095,09	0,04505	0,9982	805	1143
	2	189584	0,9999	1160,37	0,05207	0,9995	831	1131
	3	190578	0,9999	1152,19	0,05089	0,9959	830	1127
870	4	150990	0,9998	994,32	0,05972	0,9952	695	809
	5	149095	0,9997	1014,48	0,05891	0,9948	698	809

Tabla III.- Coeficientes de la ecuación de Hollomon para cada probeta ensayada

De los resultados de tracción en términos verdaderos, obtenemos como curvas típicas [15], para esta colada y estas temperaturas, las representadas en la figura 8. Siguiendo el mismo procedimiento que el mencionado para los diferentes ensayos, se calcularon los coeficientes de las expresiones analíticas indicadas en las ecuaciones (4) y (5) y sus valores se indican en la Tabla IV:

TEMPERATURA °C	E (MPa)	K (MPa)	n
580	188290	1130,28	0,0487
870	150035	1003,62	0,0594

Tabla IV.- Coeficientes de la ecuación de Hollomon para las curvas típicas

4.2 Fatiga a bajo número de ciclos.

En las figuras 9 y 10 se muestran gráficamente la variación, en términos de ingeniería, de los esfuerzos máximos y mínimos a lo largo del proceso de fatiga de dos probetas y que pueden considerarse como representativos de los obtenidos en el resto de las probetas.

Las figuras 11 y 12 representan tres ciclos de la parte inicial del ensayo, tres ciclos de la parte final y dos ciclos intermedios para una de las probetas ensayadas.

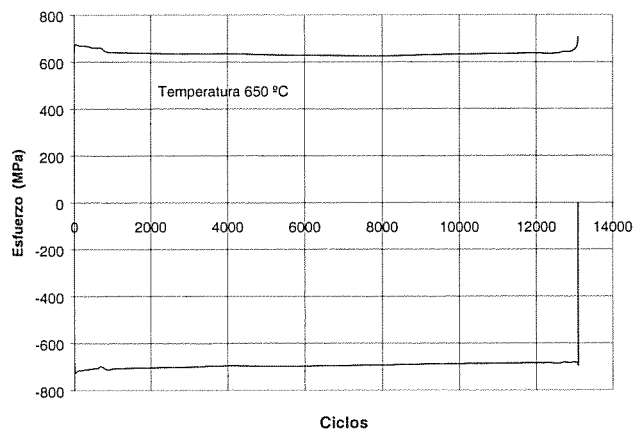


Figura 9.- Variación de S<sub>máx.</sub> y S<sub>mín</sub> (650°C, Δε= 0,75 %, R= -1)

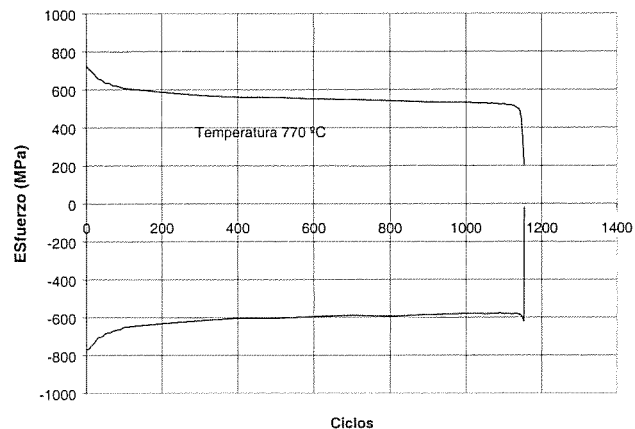


Figura 10.- Variación de S<sub>máx.</sub> y S<sub>mín</sub> (770°C, Δε= 1 %, R= -1)

Los resultados obtenidos durante los ensayos, al igual que en los ensayos de tracción, estaban referidos a términos de ingeniería por lo que mediante las ecuaciones (1) y (2) se calcularon los esfuerzos y deformaciones verdaderas para los ciclos a vida media de cada uno de los ensayos

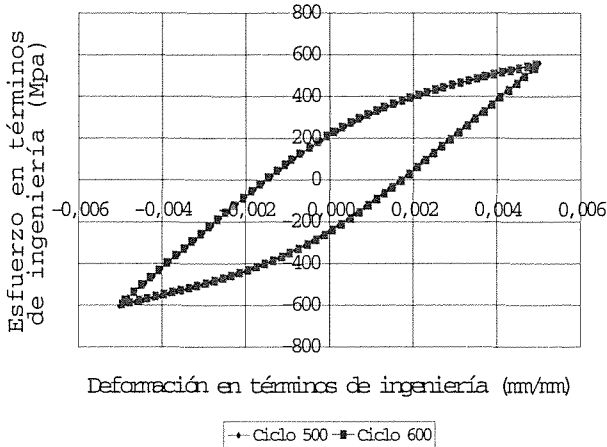


Figura 11.- Ciclos de histéresis a vida media (770°C, Δε= 1 %, R= -1)

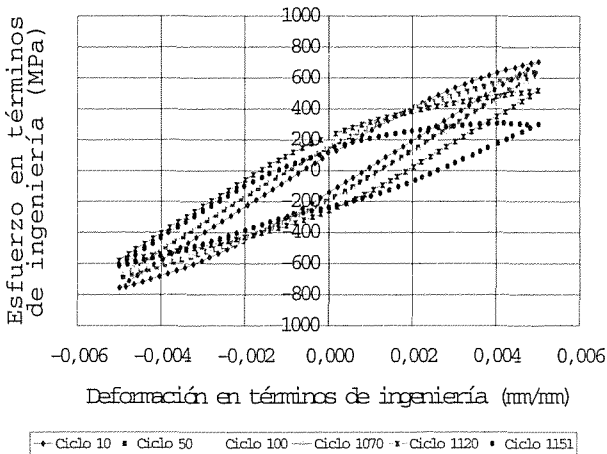


Figura 12.- Ciclos de histéresis a vida media (770°C, Δε= 1 %, R= -1)

El cálculo del módulo de elasticidad se ha obtenido, en los ensayos de fatiga, del ciclo de histéresis correspondiente al ciclo cuyo valor es la mitad del total obtenido para la rotura de la probeta, se realizó [16] entre los puntos  $s'_1$  y  $s'_2$  para el cálculo de  $E_d$  y entre los puntos  $s''_1$  y  $s''_2$  para el cálculo de  $E_a$ , tal y como puede observarse en la figura 13. La determinación de la deformación plástica en este ciclo se realizó a partir de los resultados obtenidos para  $E_a$  y  $E_d$ . Al no disponer del registro correspondiente a este ciclo, los cálculos se hicieron en los dos ciclos más próximos, uno por defecto y otro por exceso, y como valor de la deformación plástica se tomó la media de la obtenida para estos dos ciclos.

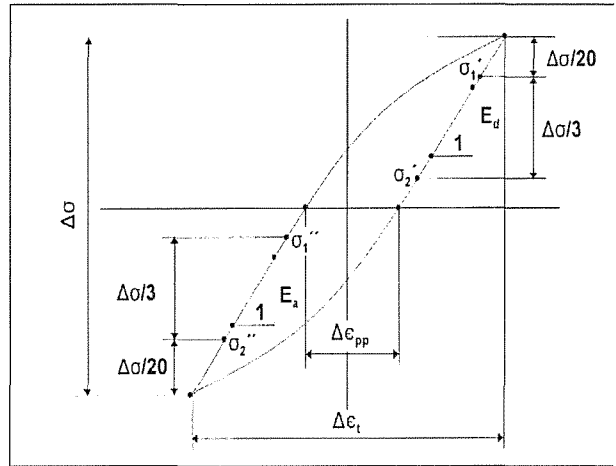


Figura 13.- Referencia para cálculos a vida media

La Tabla V refleja los resultados obtenidos para cada una de las probetas.

Mediante análisis por mínimos cuadrados se comprobó la concordancia de los valores obtenidos en los ensayos, TABLA V, con las expresiones dadas por Coffin y Manson, ecuaciones 6 y 7, indicadas en términos logarítmicos. Los resultados se pueden observar en la Tabla VI.

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = K' (2N_f)^b \quad (6)$$

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon' (2N_f)^{n'} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = K' (2N_f)^b + \epsilon' (2N_f)^{n'} \quad (8)$$

Temp. (°C)	$\Delta \epsilon_T$ (mm/mm)	$\Delta \epsilon_p$ (mm/mm)	$\Delta \epsilon_e$ (mm/mm)	$E_d$ (Mpa)	$E_a$ (Mpa)	Ciclos
650	0,0110	0,0039	0,0071	185374	186613	1542
	0,0095	0,0019	0,0076	187557	191613	4014
	0,0095	0,0022	0,0073	183754	185991	2861
	0,0095	0,0026	0,0069	184728	186375	2212
	0,0075	0,0005	0,0070	186909	187828	13088
	0,0075	0,0009	0,0066	186946	189570	9945
	0,0075	0,0009	0,0066	185286	186543	8852
770	0,0100	0,0033	0,0067	168875	170752	1154
	0,0100	0,0033	0,0067	168811	172776	1128
	0,0085	0,0021	0,0064	168381	170877	2367
	0,0072	0,0012	0,0060	173852	175715	7335
	0,0072	0,0013	0,0059	171904	171512	9864

TablaV.- Resultados a vida media

T (°C)	$e'$	$n'$	$\rho$	$K'$	$b$	$\rho$
770	0,0623	-0,4740	0,9919	0,0053	-0,0592	0,9999
650	1,2598	-0,8076	0,9989	0,0060	-0,0607	0,8063

Tabla VI.- Coeficientes de la ecuación de Coffin-Manson

Las representaciones gráficas de estas expresiones se encuentran en las figuras 14 y 15

## 5 Conclusiones

### 5.1 Ensayos de tracción.

a) Se han obtenido, a las temperaturas que el usuario estima de particular interés, las curvas de comportamiento a tracción en caliente de la aleación RENE 41. La dispersión de los resultados obtenidos en estos ensayos (tres y dos probetas según temperaturas) ha sido muy pequeña como normalmente sucede en los ensayos estáticos, por lo que, aunque no pueden establecerse, dado el número de probetas utilizadas, valores concretos de fiabilidad, las curvas representativas son suficientes para utilizar en proyectos. Por otra parte los valores obtenidos superan los valores mínimos admisibles en esta aleación según MIL-HDBK-5F.

b) Se ha comprobado la validez de modelo matemático de comportamiento establecido por Hollomon, determinando los parámetros específicos del material ensayado a introducir en el modelo matemático de Hollomon

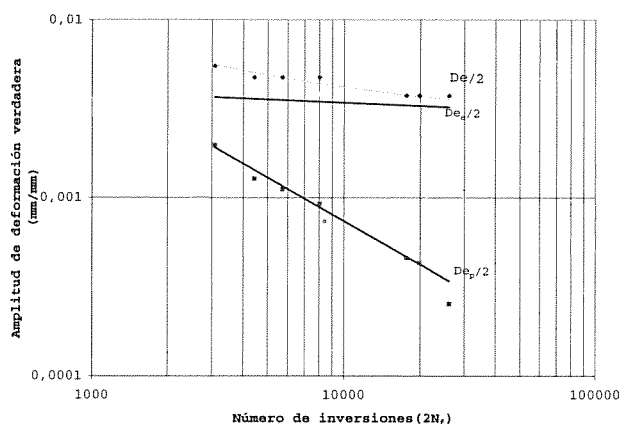


Figura 14.- Curvas representativas de fatiga a bajo número de ciclos (650 °C)

### 5.2 Ensayos de fatiga a bajo número de ciclos.

a) Se han obtenido, a las temperaturas definidas por el usuario, las curvas de comportamiento a fatiga en caliente a bajo número de ciclos de la aleación RENE 41. En este caso y debido al bajo número de probetas ensayadas y a la dispersión de resultados típica de los ensayos de fatiga, las curvas obtenidas deben interpretarse como una tendencia de comportamiento ya que no pueden asignárseles valores de supervivencia y fiabilidad superiores al 50/50, por lo que la utilización de estas curvas en proyectos debe hacerse con las debidas precauciones.

b) Se ha comprobado la validez de modelo matemático de comportamiento establecido por Coffin y Manson, determinando los parámetros específicos del material ensayado a introducir en el modelo matemático dado por ellos, con la salvedad del grado de fiabilidad de los mismos.

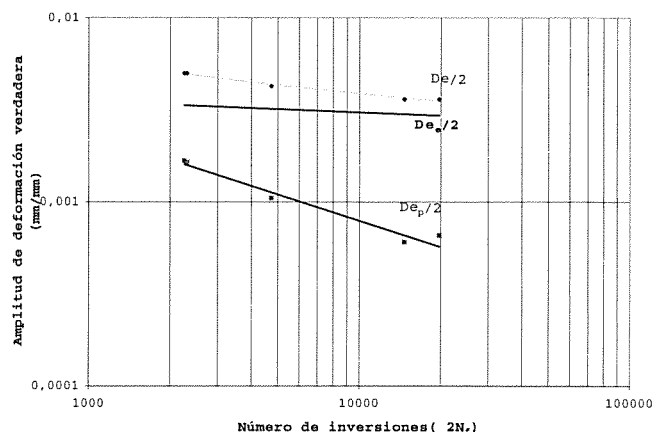


Figura 15.- Curvas representativas de fatiga a bajo número de ciclos (770 °C)

## 6. Agradecimientos

Los autores quieren dejar constancia de su agradecimiento a todos aquellos que han hecho posible este trabajo: a D. J. M<sup>a</sup> Pintado Fe por el asesoramiento recibido durante el desarrollo del trabajo; a D. J.A. Cañas Olalla y D. C. Carballar Domínguez por su labor en la realización de los ensayos.

De la misma forma los autores quieren mostrar su agradecimiento a SENER e ITP que han financiado el programa de caracterización de la aleación RENE 41, que ha permitido la presentación de este trabajo.

## 7.- BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Aerospace Structural Metals Handbook - August 1994 - Code 4205.
- 2.- MIL-HDBK-5F Vol. 2 - November 1990 - Pag. 6.77-6.83
- 3.- AMS Specification 5713F
- 4.- Fallos en Servicio de los Materiales Metálicos - José M<sup>a</sup> Pintado Fe - INTA - Cap.6.
- 5.- Fatigue and Fracture - ASM Handbook - Vol 19 -Pág 695-699.
- 6.- Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue - S.S. Manson - McGraw Hill - Cap. 4
- 7.- Metal Handbook Ninth Edition-Vol.8 Mechanical Testing- ASM
- 8.- ASTM E 19 - Determining Average Grain Size.
- 9.- EN 10002-2 - Materiales Metálicos. Ensayos de Tracción.
- 10.- ASTM E21 - Elevated Temperature Tension Test of Metallic Materials.
- 11.- ASTM E606 - Constant-Amplitude, Low cycle Fatigue Testing
- 12.- MTS Product Specification - Model 632.1. High Temperature Furnace.
- 13.- ASTM E83 - Practice for Verification and Classification of Extensometer
- 14.- ASTM E646 - Tensile Strain-Hardening Exponents (n-values) of Metallic Materials.
- 15.- MIL-HDBK-5F Vol. 2 - November 1990 - Pag. 9.56-9.60
- 16.- Enging Disc Cooperative Test Programme - AGARD Report N766.