

INFLUENCIA EN LOS PARAMETROS DE LA LEY DE COFFIN-MASON, APLICADA
AL CASO DE ALEACIONES LIGERAS, DEL TIPO DE ALEACION,
TRATAMIENTO TERMICO Y EXISTENCIA DE ENTALLAS

J.M. Pintado Fé, J. Ibáñez Ularguí y J.M. Badía Pérez
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)
Departamento de Estructuras y Materiales Estructurales

RESUMEN.

Basándose en los datos experimentales de un programa de ensayos de fatiga a flexión rotativa de dos aleaciones ligeras Al-Mg-Si y otras dos Al-Cu, en diversas variantes de tratamientos térmicos, se estudia la aplicabilidad de la ley de Coffin-Mason y la influencia que en los parámetros fundamentales de dicha ley tienen la aleación, tratamiento térmico y existencia o no de entallas.

ABSTRACT.

Based upon the experimental results of a rotative bending fatigue test program carried out on four light alloys, (two Al-Mg-Si and two Al-Cu) treated to different thermal treatments, the applicability of Coffin-Mason law has been analyzed. The influence of the type of alloy, heat treatment and the existence of notches on the fundamental parameters of that law has also been investigated.

RESUME.

A partir de les donnes experimentaux obtenus des essais de fatigue á flexion rotative effectués sur deux alliages légères Al-Mg-Si et deux Al-Cu, dans différents conditions de traitements thermiques, on a étudié l'aplicabilité de la loi de Coffin-Mason et l'influence que, sur les paramètres fondamentaux de dite loi, ont l'alliage, le traitement thermique et l'existence d'entailles.

1.- INTRODUCCION

La realización en los laboratorios del INTA de un amplio programa de ensayos, en aleaciones Al-Mg-Si y Al-Cu en distintas variantes de tratamiento térmico, uno de cuyos objetivos era obtener datos básicos de comportamiento a fatiga de estas aleaciones e influencia en dicho comportamiento de las variantes de tratamiento, ha permitido, analizar algunos aspectos interesantes sobre la aplicación de la ley de Coffin-Mason a la vista de los resultados experimentales y sobre la influencia que en los parámetros de dicha ley tienen el tipo de aleación, tratamiento térmico y existencia o no de entalla, así como de las posibilidades de extrapolación de los resultados experimentales de ensayos a un número de ciclos muy superiores a los alcanzados en los ensayos. En esta comunicación se exponen los resultados del análisis antes citado.

2.- ALEACIONES Y TRATAMIENTOS TERMICOS ENSAYADOS. OBTENCION DE PROBETAS

Para el programa de ensayos se eligieron dos aleaciones Al-Cu de uso aeronáutico, (una tolerante al daño y otra de alta resistencia), una aleación Al-Mg-Si de uso también aeronáutico y otra aleación Al-Mg-Si del mismo grupo que la anterior pero sin elementos afinantes de grano. Estas aleaciones son:

L-3140 S/N UNE (AA-2024 S/N ASTM), L-3130 (AA-2214),
L-3420 (AA-6261) y L-3431 (AA-6101).

Las aleaciones Al-Mg-Si se recibieron en forma de redondo extruido de 60 mm de diámetro y las del grupo Al-Cu, en forma de plancha de 60 mm de espesor.

El análisis del material recibido, dió las composiciones expresadas en % en peso en la cabecera de los cuadros n^{os} II a V. De cada una de estas aleaciones se obtuvieron probetas, en dirección longitudinal, para realizar ensayos de tracción y de fatiga; las probetas, mecanizadas con excedente en sus dimensiones, fueron sometidas antes del mecanizado final, a los tratamientos térmicos indicados en los cuadros mencionados. La aleación L-3431 fue sometida, en los tratamientos B y C, a un recocido previo de 2 h a 375°C; en la aleación L-3420, el recocido previo fue 1 h a 325°C. En las aleaciones Al-Cu no se dió ningún tratamiento previo de recocido. En el caso de la aleación L-3140, de maduración natural, las variantes de tratamiento corresponden a las condiciones de enfriamiento después de la solubilización, indicadas en el cuadro n^o V; en el tratamiento C, la temperatura de solubilización está ya por encima del "solidus" del material, habiéndose iniciado la fusión de eutécticas.

La designación de las variantes de tratamiento térmico por A, B, C y D es puramente convencional y solo sirven como referencia en este trabajo.

Todas las probetas correspondientes a un mismo tratamiento, fueron tratadas juntas en horno de sales para la solubilización y en estufa para la maduración artificial. Las probetas, para la solubilización, se introdujeron estando el horno a la temperatura de solubilización, contándose el tiempo a partir de recuperar el horno dicha temperatura; el temple se hizo por enfriamiento en agua a temperatura ambiente nada más sacarlas del horno, con las excepciones que, en la aleación L-3140, se indican en el cuadro n° V. Una vez realizado el tratamiento térmico, las probetas fueron terminadas a las dimensiones y acabado superficial definitivos. Las probetas de fatiga, de dos tipos corresponden, en su forma y dimensiones definitivas, a los croquis de la figura n° 1; el valor del factor teórico de concentración de esfuerzos K_t correspondiente a la probeta escalonada es $K_t=2,31$ según los gráficos de Peterson [1]. En todas y cada una de las probetas de fatiga se comprobó que su rugosidad superficial y radios de acuerdo estaban dentro de los límites establecidos en plano.

Las características mecánicas obtenidas en los ensayos de tracción son las indicadas en el Cuadro n° 1 y corresponden a la media de las obtenidas en dos probetas. En este mismo cuadro se incluyen las medidas de dureza y conductividad eléctrica, así como, los valores de dos parámetros, $(\sigma_a, N=1)/\sigma_u$ y b que corresponden a características de comportamiento a fatiga como se verá más adelante.

3.- ENSAYOS DE FATIGA: RESULTADOS OBTENIDOS Y PROCESADO DE LOS MISMOS

Las probetas de fatiga fueron ensayadas a flexión rotativa, bajo carga constante y 6000 rpm, en 10 máquinas Schenk Rapid. Para cada combinación aleación-tratamiento térmico y tipo probeta ($K_t=1$ y $K_t=2,3$) se ensayaron 4 grupos de 6 probetas, cada grupo a un nivel de esfuerzos, con objeto de estimar la vida a dichos niveles y poder determinar la curva S-N. Los valores de estos cuatro niveles de esfuerzos se eligieron de forma que las probetas rompiesen en torno a $4 \cdot 10^4$, $1 \cdot 5 \cdot 10^5$, 10^6 y $4 \cdot 10^6$ ciclos (valores medios). También se ensayaron, en cada combinación antes mencionada, 10 probetas para obtener, mediante el procedimiento "en escalera" [2], el límite de fatiga a $20 \cdot 10^6$ ciclos. A partir de los datos obtenidos en los ensayos a diferentes niveles de esfuerzos, se han determinado, mediante análisis de regresión lineal, las rectas $\log \sigma - \log N$ correspondientes a los valores N_{med} (valor mediano de los diferentes ciclos de duración obtenidos en cada nivel de esfuerzos, $N_{med} = (N_3 + N_4)/2$) y N_1 (número mínimo de ciclos de duración en cada nivel de esfuerzos) que representan, respectivamente, los diagramas de duración o de vida "finita" del 50% y 89% respectivamente de probabilidad de supervivencia con el 50% de fiabilidad según la distribución binomial [2].

En los cuadros n°s II a V, se exponen los valores de los coeficientes de correlación de las rectas obtenidas por regresión lineal, así como las pendientes b de dichas rectas y los valores de σ_a correspondientes en las mismas a 10^5 , 10^6 y $2 \cdot 10^7$ ciclos. También se indican, los

valores del límite de fatiga σ_a 2.10^7 ciclos obtenidos directamente por el procedimiento "en escalera" antes citado, que representan el valor medio σ_m del límite de fatiga (50% de probabilidad de supervivencia) a ese número de ciclos y el valor corregido para el 89% de probabilidad de supervivencia, que se ha determinado, dado que los valores de límites de fatiga para un número de ciclos dado se distribuyen según una distribución normal, por la expresión $\sigma_{89\%} = \sigma_{50\%} \cdot (1 - 1,23 \cdot \Delta / \sigma_{50\%})$ en que Δ es el valor de la desviación calculada, en los casos en que ha sido posible, a partir de los datos obtenidos al aplicar el procedimiento en escalera. En la última columna de los cuadros se indica el valor $(\sigma_a(N-1) / \sigma_u)$, cuyo significado se explicará más adelante. En la figura nº 2 se representa, a modo de ejemplo, una de las rectas $\log \sigma = \log N$, obtenidas por el procedimiento descrito realizando el análisis de regresión sobre 5 puntos.

4.- ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En el análisis de los datos que figura en los cuadros números II a V permite establecer lo siguiente:

- a) La linealidad de la función $\log \sigma_a = f(\log N)$ en el intervalo explorado entre 10.000 y 4.10^6 ciclos es evidente, como se deduce de los valores de correlación, $>0,97\%$ obtenidos en el análisis de regresión sobre 4 puntos y esto independientemente de que la probeta sea lisa o entallada y de la aleación, tratamiento y % de supervivencia considerados, no observándose influencia sistemática de ninguno de estos parámetros en los valores de correlación obtenidos. Los únicos valores de correlación inferiores a 0,97 encontrados lo han sido en la aleación L-3130-C, $K_t=1$ (correlación 0,85), L-3130-D, $K_t=1$ (correlación 0,964), aleación L-3140-C, $K_t=1$ (correlación 0,94) y L-3140-A, $K_t=2,3$ (correlación 0,91).
- b) Lo dicho en el apartado anterior es aplicable, con la salvedad que expondremos, también si el campo lo extendemos hasta un número de ciclos $N=2.10^7$, es decir, efectuando el ajuste de la recta (análisis de regresión) sobre 5 puntos, de los cuales el 5º es el obtenido por la curva de respuesta 2.10^7 ciclos. Los únicos valores de correlación inferiores a 0,97 encontrados ahora han sido en la aleación L-3420-A, $K_t=2,3$ (correlación 0,95), L-3130-B, $K_t=1$ (correlación 0,92); L-3130-A, $K_t=2,3$ (correlaciones 0,94 y 0,96), L-3130-D, $K_t=2,3$ (correlación 0,92) y L-3140-C, $K_t=1$ (correlación 0,96). Sin embargo la situación sufre cierta variación en el caso de las probetas escalonadas ($K_t=2,3$) de la aleación L-3140 en que el número de casos con correlación inferior a 0,97 (valores entre 0,96 y 0,91) es cinco.
- c) Si comparamos los valores del coeficiente de correlación de las rectas de 4 y 5 puntos en cada caso, no existen diferencias significativas ni sistemáticas en las aleaciones L-3431, L-3420 y L-3130, con la excepción de la aleación L-3130 en estado D, en que para $K_t=2,3$ el coeficiente de correlación disminuye en el caso de 5 puntos con

respecto al caso de 4 y esto tanto en el 50% como en el 89% de supervivencia. En el caso de la aleación L-3140 para $K_t=2,3$ y tratamientos B, C y D, aparece ya claramente una cierta disminución sistemática del coeficiente de correlación en la recta ajustada a los 5 puntos. en relación con la de 4. Esto, unido a la diferencia de pendientes de las rectas y de los valores de σ_a para $2 \cdot 10^7$ según la recta y según el punto determinado experimentalmente, indica que en este caso una representación más correcta sería dos rectas de distinta pendiente que se cortarían en un punto situado entre $4 \cdot 10^6$ y $2 \cdot 10^7$ ciclos; no obstante, la representación por una sola recta da una aproximación bastante aceptable (correlación $\geq 0,92$).

- d) Si consideramos ahora la fórmula de Coffin-Mason (ver fig. nº 3), la expresión general [I], considerando las condiciones [II], se convierte en [III]; Coffin-Mason encontraron, como valores medios para muchos materiales y tratamientos, en probetas $K_t=1$, la expresión [IV]. Según los resultados experimentales obtenidos, es evidente que la ley de Coffin-Mason simplificada es aplicable y representa el comportamiento a fatiga para $N \geq 10^4$ ciclos, al menos en flexión rotativa y hasta $2 \cdot 10^7$ ciclos de las 4 aleaciones ensayadas, independientemente del tratamiento, y valor de K_t , y esto tanto para los puntos N_1 como para los puntos N_{med} cuando se ensayan 6 probetas en cada nivel de esfuerzos, pero los valores de los dos parámetros de dicha ley, en este caso $\log[(\sigma_a, N=1)/\sigma_u]$ (ordenada en el origen de la recta experimental en escalas logarítmicas) y b (pendiente de la recta) se diferencian bastante de los valores medios ($(\sigma_a, N=1)/\sigma_u=1,75$ y $b=-0,12$) dados por Coffin-Mason y están influenciados por el tratamiento, tipo de aleación y valor de K_t , tal como puede observarse en las cuatro últimas columnas del Cuadro nº I, en que se exponen los parámetros citados utilizando los resultados de las rectas ajustadas sobre los 5 puntos de valores medianos N_{med} . Si consideramos primeramente el valor de las pendientes, resulta que en todos los tratamientos y aleaciones, los valores de b para $K_t=1$ son inferiores a 0,12, estando comprendidos entre 0,08 y 0,12, mientras que estos valores para $K_t=2,3$ están comprendidos entre 0,12 y 0,17 y comparando en cada caso de aleación y tratamiento los valores de b para los dos valores de K_t , siempre es mayor b en el caso de $K_t=2,3$ lo que corresponde a la conocida propiedad de la disminución de los valores reales de concentración de esfuerzos K_f (para un K_t fijo) al disminuir el número de ciclos a rotura.

En cuanto al parámetro $(\sigma_a(N=1)/R)$, su valor en todos los casos es superior al valor 1,75, pero no se verifica en este caso que sus valores sean sistemáticamente mayores (o menores) para $K_t=1$ que para $K_t=2,3$.

- e) Para comparar el comportamiento a fatiga a través de estos parámetros, hay que considerarlos conjuntamente, ya que el punto de intersección de las dos rectas representativas de dos casos cualesquiera nos delimitará, de producirse, el número de ciclos a partir del cual puede ser más conveniente utilizar una u otra aleación y estado de tratamiento. Estos dos parámetros permiten estimar el comportamiento

a fatiga y determinar por sencillas operaciones numéricas, con más precisión que usando diagramas, datos concretos necesarios para proyecto. Y unidos a los valores obtenidos en los ensayos de tracción, completan los datos de comportamiento mecánico de las aleaciones estudiadas. Dado que el análisis de los datos correspondientes al 89% de supervivencia ha dado, unos valores de correlación del mismo orden, con valores de los parámetros b , para cada caso de aleación, tratamiento y valor de K_t iguales, muy similares al caso del 50% de supervivencia, pueden utilizarse igualmente para obtener datos concretos de cálculo, si bien, dado el número de puntos, solo 6, ensayado en cada nivel, los parámetros correspondientes a los valores N_{med} son más representativos en orden a determinar propiedades básicas de fatiga y por tanto para establecer comparaciones y estudiar la influencia de aleación, tratamiento, etc.

f) Finalmente, la posibilidad de extender los resultados de ensayos realizados entre 10^4 y $4 \cdot 10^6$ ciclos hasta $2 \cdot 10^7$ ciclos, es decir, que el valor de σ_a para $2 \cdot 10^7$ ciclos obtenido a partir de la recta determinada por el ajuste sobre los cuatro puntos experimentales obtenidos dentro del intervalo de número de ciclos citado, se mantenga dentro de ciertos límites de desviación con respecto al valor para $2 \cdot 10^7$ obtenido directamente por ensayo, se puede estimar analizando los cuadros números II a V, en que figuran caso por caso, los datos necesarios. Inicialmente y de forma general se aprecia ya que los valores de los parámetros b y $(\sigma_a(N=1)/\sigma_u)$ son ligeramente diferentes según se hayan obtenido considerando o no el valor experimental correspondiente a $2 \cdot 10^7$ (ajuste respectivamente sobre 5 ó 4 puntos). La comparación de los valores σ_a para $N=2 \cdot 10^7$, en ambos casos de % de supervivencia, con el valor experimental que figura en la columna adyacente del cuadro correspondiente permite establecer que no se aprecia ninguna correspondencia sistemática entre tratamiento y valor de la desviación y que estas, en todos los casos, son notablemente mayores para $K_t=2,3$ que para $K_t=1$. Considerando los valores de las desviaciones, expresadas en % con relación al valor de σ_a obtenido directamente en el ensayo "en escalera" a $2 \cdot 10^7$, se encuentra lo siguiente:

- Para $K_t=1$, la desviación, en todas las aleaciones y tratamientos ensayados, está comprendida entre 2% y 12%, con algún caso extremo (dos <2% y tres > 12%) fuera de estos límites. Los valores σ_a obtenidos de la recta son mayores, es decir, están del lado de la inseguridad, que el valor experimental directo en todos los casos en las dos aleaciones Al-Mg-Si, excepto en el tratamiento B de la L-3431, mientras que en el caso de las dos aleaciones de Al-Cu todos los valores son menores (es decir, del lado de la seguridad) excepto en el tratamiento T-451, en que están por encima, si bien con valores pequeños (3 y 2%).
- Para $K_t=2,3$, las desviaciones en todos los casos de aleación y tratamiento, están comprendidas entre 10% y 45% con algunos casos aislados fuera de este intervalo (tres casos <10% y uno >45%) y son

claramente mayores en las dos aleaciones Al-Cu que en las dos de Al-Mg-Si. Los valores de σ_a obtenidas de la recta están por debajo (lado de la seguridad) del experimental directo en las cuatro aleaciones y diferentes tratamientos consideradas excepto en el tratamiento B de la aleación L-3431, si bien las desviaciones en este caso son pequeñas (8% y 3%).

5.- CONCLUSIONES

En el caso de las cuatro aleaciones ligeras y variantes de tratamiento térmico estudiados puede concluirse que:

- a) La ley de Coffin-Mason simplificada, es decir considerando sólo el término correspondiente a alargamiento elástico, es representativa y puede aplicarse para definir el comportamiento a fatiga en flexión rotativa entre 10^4 y $2 \cdot 10^7$ ciclos, tanto en probetas lisas ($K_t=1$) como en entalladas ($K_t > 1$) y esto no sólo para expresar los valores medianos de vida (50% de probabilidades de supervivencia) a un determinado nivel de esfuerzos, sino también para los valores del 89% de supervivencia tal como se obtienen ensayando seis probetas en cada nivel de esfuerzos.

Sin embargo, en el caso de la aleación L-3140, en probeta entallada $K_t=2,3$ y tratamientos B, C y D, la representación más correcta para $\log \sigma_a = f(\log N)$ será dos rectas de distinta pendiente (menor pendiente la correspondiente a la zona de número de ciclos más elevado) que se cortarían en un punto situado entre $4 \cdot 10^6$ y $2 \cdot 10^7$ ciclos. Esta situación de mejor representación, en el caso de probetas entalladas, por dos rectas en vez de una sola se haría probablemente extensiva a las demás aleaciones y tratamientos si el número de ciclos considerados fuese mayor que $2 \cdot 10^7$.

- b) Los dos parámetros de la ley de Coffin-Mason que definirían la recta $\log \sigma_a = f(\log N)$, es decir, la ordenada en el origen y la pendiente b de la recta, muestran una clara dependencia del tipo de aleación, tratamiento térmico y valor de K_t y los valores experimentales encontrados en este trabajo indican que no pueden tomarse, sin cometer un apreciable error, los valores medios mencionados en el texto ($(\sigma_a(N=1)/R)=1,75$ y $b=-0,12$) como valores constantes.
- c) La aplicación de los parámetros experimentales de la ley de Coffin-Mason, definidos a base de ensayos realizados en un intervalo determinado de número de ciclos, al comportamiento del material a un número de ciclos mucho mayor, produce errores, sobre todo en el caso de probetas entalladas. La cuantía y sentido de las desviaciones son las indicadas en el apartado 4.f).
- d) El comportamiento básico a fatiga de estas aleaciones puede expresarse, para cada aleación y tratamiento, por los parámetros

(($\sigma_a(N=1)/R$ y b) de la ley de Coffin-Mason correspondientes a los valores de $K_t=1$ y de $K_t>1$ escogiendo un valor de K_t en este último caso que sea representativo de los valores que se espere utilizar en la aplicación práctica del material.

6.- REFERENCIAS

- [1] R.E. Peterson, "Stress Concentration Design Factors". John Wiley and Sons. N.Y.
- [2] ASTM STP 91-A. "A Tentative Guide for Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data". American Society for Testing and Materials.

Cuadro nº 1 - Características mecánicas según aleación y tratamiento

Aleación y tratamiento	Dureza HB	Conductividad m/Ωmm ²	Carga de rotura R Kgr/mm ²	Limite elástico al 0,2% R _{P0,2} Kgr/mm ²	Alargamiento A % (l ₀ = 5,65 √S)	Estricción Z %	K _t = 1		K _t = 2,3	
							$\frac{\sigma_a [N\cdot11]}{R}$	b	$\frac{\sigma_a [N\cdot11]}{R}$	b
L-3431-A	68	30	23	16	20	60	2	-0,082	-2,88	-0,126
L-3431-B	84	32	24	23	11	50	2,5	-0,107	-3,27	-0,139
L-3431-C	61	34	22	19	15	63	2,98	-0,119	-2,58	-0,125
L-3420-A	103	27	28	24	30	65	2,01	-0,073	1,89	-0,118
L-3420-B	108	27	28	26	29	68	2,56	-0,101	1,85	-0,107
L-3420-C	102	28	29	29	17	64	2,69	-0,108	2,92	-0,146
L-3420-D							2,89	-0,113		
L-3130-A	119	20	45	33	23	29	2,70	-0,112	2,63	-0,153
L-3130-B	135	21	48	35	20	28	2,59	-0,119	2,90	-0,171
L-3130-C	147	22	49	45	14	27	2,25	-0,108	1,98	-0,138
L-3130-D	136	23	46	39	14	26	1,88	-0,096	2,68	-0,158
L-3140-A	130	17	50	33	20	27	2,43	-0,106	3,6	-0,169
L-3140-B	129	17	51	33	21	26	1,90	-0,092	3,29	-0,173
L-3140-C	134	14	51	33	21	25	1,96	-0,099	2,29	-0,131
L-3140-D	129	17	50	33	20	20	1,85	-0,089	3,04	-0,152

CUADRO N° II RESULTADO DE ANALISIS DE REGRESION LINEAL DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE FATIGA.

ALEACION L-3431 (0,46 Si, 0,57 Mg, 0,01 Mn, 9,16 Fe)

PROBETAS TORICAS
SIN ENTALLA
 $K_t = 1$

Tratamiento térmico	1 de super vibración	N° de valores por ajuste (U)	Coeficiente de correlación	Pendiente	$\bar{\sigma}_a$ en Kgf/mm ² para N ciclos				$\bar{\sigma}_a(N=1)/\bar{\sigma}_u$
					N=10 ⁵	N=10 ⁶	N=2·10 ⁷	N=2·10 ⁷ (2)	
A Solubilización(*) y maduración 2 h a 189°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9931	- 0,082	17,6	14,6	11,4	11,01	2,00
		4	0,9997	- 0,072	17,5	14,8	12,0		1,78
	89	5 ⁽¹⁾	0,9871	- 0,080	16,5	13,7	10,8	10,4	1,85
		4	0,9995	- 0,072	16,9	14,3	11,6		1,72
B Solubilización(*) y maduración 6 h a 189°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9968	- 0,107	17,7	13,8	10,0	10,3	2,50
		4	0,9984	- 0,115	17,8	13,6	9,7		2,76
	89	5 ⁽¹⁾	0,9982	- 0,104	17,0	14,0	9,8	9,9	2,34
		4	0,9971	- 0,111	17,0	13,1	9,4		2,52
C Solubilización(*) y maduración 6 h a 225°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9995	- 0,119	16,6	12,6	8,8	8,8	2,98
		4	0,9995	- 0,114	16,4	12,6	9,0		2,88
	89	5 ⁽¹⁾	0,9925	- 0,116	15,2	11,6	8,2	8,2	2,65
		4	0,9683	- 0,098	14,5	11,5	8,6		2,05

(1) El quinto valor utilizado en el ajuste está obtenido de la curva de respuesta a $N = 2 \cdot 10^7$.

(2) Valor experimental obtenido de la curva de respuesta a $N = 2 \cdot 10^7$ (ASTM Special Techn. Publ. n° 91-A 1958).

(3) En este caso al ser $C < 0,3$ (ver texto) el valor de $\bar{\sigma}_a (N = 2 \cdot 10^7)$ se ha obtenido a partir de una desviación típica igual al valor medio de las desviaciones típicas del resto de los lotes.

PROBETAS ESCALONADAS
 $K_t = 2,3$

Tratamiento térmico	1 de super vibración	N° de valores por ajuste (U)	Coeficiente de correlación	Pendiente	$\bar{\sigma}_a$ en Kgf/mm ² para N ciclos				$\bar{\sigma}_a(N=1)/\bar{\sigma}_u$
					N=10 ⁵	N=10 ⁶	N=2·10 ⁷	N=2·10 ⁷ (2)	
A Solubilización(*) y maduración 3 h a 189°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9886	- 0,126	15,1	11,3	7,8	8,1	2,88
		4	0,9880	- 0,143	15,2	10,5	7,1		3,51
	89	5 ⁽¹⁾	0,9863	- 0,127	14,1	10,5	7,2	7,5 (3)	2,70
		4	0,9888	- 0,154	14,0	9,8	6,2		3,67
B Solubilización(*) y maduración 6 h a 189°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9922	- 0,139	16,0	11,6	7,6	7,9	3,27
		4	0,9902	- 0,150	16,1	11,4	7,3		3,69
	89	5 ⁽¹⁾	0,9974	- 0,124	14,2	10,7	7,4	7,3	2,45
		4	0,9955	- 0,1203	14,3	10,8	7,5		2,36
C Solubilización(*) y maduración 6 h a 225°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9792	- 0,125	13,4	10,1	6,9	7,5	2,58
		4	0,9993	- 0,156	13,6	9,5	6,0		3,73
	89	5 ⁽¹⁾	0,9862	- 0,128	12,7	9,5	6,5	6,8	2,55
		4	0,9905	- 0,150	12,8	9,0	5,8		3,29

(*) 45 minutos a 520 °C

CUADRO M° III RESULTADO DE ANALISIS DE REGRESION LINEAL DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE FATIGA.
ALEACION L-3420 (0,48 Si, 0,27 Cu, 0,81 Mg, 0,21 Mn, 0,24 Pb)

PROBETAS
TORICAS
SIN ENTALLA
 $K_t = 1$

Tratamiento térmico	t de sur- perficie (h)	N° valores ajustados (n)	Coeficiente de correlación	Pendiente	$\bar{\sigma}_a$ en Kgf/mm ² para N ciclos				$\bar{\sigma}_a(N=1)/\bar{\sigma}_U$
					N=10 ⁵	N=10 ⁶	N=210 ⁷	N=210 ⁷ (2)	
A Solubilización(*) y maduración 3 h a 184°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9959	- 0,073	24,5	20,8	16,7	16,4	2,01
		4	0,9997	- 0,066	24,4	21,0	17,2		1,85
	89	5 ⁽¹⁾	0,9948	- 0,073	23,3	19,7	15,8	15,8	1,97
		4	0,9861	- 0,073	23,3	19,7	15,8		1,96
B Solubilización(*) y maduración 8 h a 184°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9957	- 0,101	22,2	17,6	13,0	12,6	2,56
		4	0,9995	- 0,092	22,0	12,8	13,5		2,28
	89	5 ⁽¹⁾	0,9834	- 0,106	21,0	16,5	12,00	11,4	2,54
		4	0,9869	- 0,087	20,9	17,1	13,1		2,04
C Solubilización(*) y maduración 6 h a 210°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9996	- 0,108	22,5	17,6	12,7	12,6	2,69
		4	0,9997	- 0,105	22,4	17,6	12,9		2,60
	89	5 ⁽¹⁾	0,9925	- 0,100	20,9	16,6	12,3	11,9	2,29
		4	0,9950	- 0,087	20,9	17,1	13,2		(3)
D Solubilización(*) y maduración 6 h a 225°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9993	- 0,113	21,8	16,8	12,0	11,9	2,49
		4	0,9995	- 0,109	21,8	16,9	12,2		2,78
	89	5 ⁽¹⁾	0,9976	- 0,119	21,6	16,4	11,5	11,4	3,09
		4	0,9954	- 0,116	21,6	16,5	11,7		2,99

- (1) El quinto valor utilizado en el ajuste está obtenido de la curva de respuesta a $N = 210^7$.
 (2) Valor experimental obtenido de la curva de respuesta a $N = 210^7$ (ASTM Special Techn. Publ. n° 91-A 1958).
 (3) En este caso al ser $C < 0,3$ (ver texto) el valor de $\bar{\sigma}_a (N = 2.10^7)$ se ha obtenido a partir de una desviación típica igual al valor medio de las desviaciones típicas del resto de los lotes.

PROBETAS
ESCALONADAS
 $K_t = 2,3$

(*) 45 minutos
a 525 °C

Tratamiento térmico	t de sur- perficie (h)	N° valores ajustados (n)	Coeficiente de correlación	Pendiente	$\bar{\sigma}_a$ en Kgf/mm ² para N ciclos				$\bar{\sigma}_a(N=1)/\bar{\sigma}_U$
					N=10 ⁵	N=10 ⁶	N=210 ⁷	N=210 ⁷ (2)	
A Solubilización(*) y maduración 3 h a 184°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9517	- 0,118	13,7	10,5	7,4	8,5	1,89
		4	0,9955	- 0,151	13,7	9,7	6,2		2,76
	89	5 ⁽¹⁾	0,9497	- 0,120	13,1	9,9	6,9	C < 0,3 (3) 7,9	2,98
		4	0,9945	- 0,161	12,9	8,9	5,5		2,99
B Solubilización(*) y maduración 8 h a 184°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9938	- 0,107	15,1	11,8	8,6	9,0	1,85
		4	0,9991	- 0,117	15,2	11,6	8,2		2,08
	89	5 ⁽¹⁾	0,9935	- 0,110	14,4	11,2	8,1	C < 0,3 (3) 8,4	1,83
		4	0,9989	- 0,122	14,4	10,9	7,6		2,10
C Solubilización(*) y maduración 6 h a 210°C	30	5 ⁽¹⁾	0,9937	- 0,146	15,7	11,2	7,2	7,7	2,92
		4	0,9997	- 0,162	15,7	10,8	6,7		3,52
	89	5 ⁽¹⁾	0,9951	- 0,145	14,6	10,5	6,8	7,1	2,70
		4	0,9966	- 0,157	14,6	10,2	6,4		3,09

CUADRO N° IV RESULTADO DE ANALISIS DE REGRESION LINEAL DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE FATIGA.

ALEACION L-3130 (0,96 Si, 4,27 Cu, 0,33 Mg, 0,58 Mn, 0,19 Zn, 0,23 Fe)

PROBETAS
TORICAS
SIN ENTALLA
 $K_t = 1$

Tratamiento térmico	N° de probetas	Coeficiente de correlación	Pendiente	σ_a en Kgf/mm ² para N ciclos				$\sigma_a(N=1) / \sigma_u$	
				N=10 ⁵	N=10 ⁶	N=210 ⁷	N=210 ⁷ (2)		
A T 451 (Estado de recepción)	50	5 ⁽¹⁾	0,9993	- 0,123	29,6	22,3	15,4	15,3	2,70
		4	0,9997	- 0,119	29,6	22,5	15,7		2,57
	89	5 ⁽¹⁾	0,9997	- 0,126	28,9	21,6	14,8	14,7	2,74
		4	0,9997	- 0,124	28,9	21,7	15,0		2,65
B Solubilización(*) y maduración 10 h a 170°C.	50	5 ⁽¹⁾	0,9856	- 0,119	33,2	25,2	17,7	18,2	2,59
		4	0,9790	- 0,125	33,2	24,9	17,1		2,78
	89	5 ⁽¹⁾	0,9199	- 0,123	29,2	22,0	15,2	17,4	2,40
		4	0,9997	- 0,236	27,7	16,1	7,9		8,35
C Solubilización(*) y maduración 4 h a 170°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9958	- 0,108	32,0	25,0	18,1	18,6	2,25
		4	0,8536	- 0,104	30,0	23,6	17,3		2,01
	89	5 ⁽¹⁾	0,9709	- 0,109	30,3	23,6	17,0	17,9	2,17
		4	0,9701	- 0,129	30,5	22,6	15,3		2,75
D Solubilización y maduración 8 h a 200°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9959	- 0,096	28,6	23,0	17,2	17,3	1,88
		4	0,9926	- 0,096	28,6	22,9	17,2		1,89
	89	5 ⁽¹⁾	0,9789	- 0,089	26,5	21,6	16,6	16,9	1,60
		4	0,9644	- 0,096	26,4	21,2	15,9		(3) 1,73

(1) El quinto valor utilizado en el ajuste está obtenido de la curva de respuesta a $N = 210^7$.

(2) Valor experimental obtenido de la curva de respuesta a $N = 210^7$ (ASTM Special Techn. Publ. n° 91-A 1958).

(3) En este caso al ser $C < 0,3$ (ver texto) el valor de σ_a ($N = 2.10^7$) se ha obtenido a partir de una desviación típica igual al valor medio de las desviaciones típicas del resto de los

PROBETAS
ESCALONADAS
 $K_t = 2,3$

Tratamiento térmico	N° de probetas	Coeficiente de correlación	Pendiente	σ_a en Kgf/mm ² para N ciclos				$\sigma_a(N=1) / \sigma_u$	
				N=10 ⁵	N=10 ⁶	N=210 ⁷	N=210 ⁷ (2)		
A T 451 (Estado de recepción)	50	5 ⁽¹⁾	0,9612	- 0,153	20,4	14,3	9,0	10,2	2,63
		4	0,9960	- 0,204	20,9	13,1	7,1		4,83
	89	5 ⁽¹⁾	0,9436	- 0,160	19,2	13,3	8,2	9,3	2,67
		4	0,9888	- 0,245	19,7	11,3	5,4		7,27
B Solubilización(*) y maduración 10 h a 170°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9918	- 0,171	20,3	13,7	8,2	8,8	2,90
		4	0,9995	- 0,196	20,4	13,0	7,2		3,87
	89	5 ⁽¹⁾	0,9969	- 0,181	18,5	12,2	7,1	7,2	2,97
		4	0,9944	- 0,189	18,5	12,0	6,8		3,24
C Solubilización(*) y maduración 4 h a 170°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9902	- 0,138	19,8	14,4	9,5	10,0	1,98
		4	0,9949	- 0,156	19,9	13,9	8,7		2,44
	89	5 ⁽¹⁾	0,9874	- 0,145	19,0	13,6	8,8	9,4	2,06
		4	0,9954	- 0,173	19,0	12,8	7,6		2,83
D Solubilización(*) y maduración 8 h a 200°C	50	5 ⁽¹⁾	0,9684	- 0,158	19,8	13,8	8,6	9,8	2,68
		4	0,9895	- 0,189	19,9	12,9	7,3		3,83
	89	5 ⁽¹⁾	0,9226	- 0,155	17,6	12,3	7,8	9,3	2,28
		4	0,9892	- 0,233	17,4	10,2	5,1		5,57

(*) 45 minutos
a 500 °C

CUADRO N° Y RESULTADO DE ANALISIS DE REGRESION LINEAL DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE FATIGA.

ALEACION L-3140 (0,19 Si, 4,16 Cu, 1,30 Mg, 0,52 Mn, 0,16 Zn, 0,26 Fe) .

PROBETAS
TORICAS
SIN ENTALLA
 $K_t = 1$

Tratamiento térmico	N° de probetas	N° de lotes	Coeficiente de correlación	Pendiente	σ_a en Kgf/mm^2 para N ciclos				$\sigma_a(N=1)/\sigma_u$
					N=10 ⁵	N=10 ⁶	N=210 ⁷	N=210 ⁷ (2)	
A Solubilización y maduración natural	50	5 ⁽¹⁾	0,9937	- 0,106	35,6	27,9	20,3	20,7	2,43
		4	0,9910	- 0,112	35,7	27,6	19,7		2,59
	89	5 ⁽¹⁾	0,9887	- 0,111	34,7	26,9	19,3	20,1	2,49
		4	0,9924	- 0,127	24,8	25,9	17,7		3,03
B Solubilización (enfriamiento en aceite) y maduración natural	50	5 ⁽¹⁾	0,9952	- 0,092	33,7	27,2	20,6	21,1	1,90
		4	0,9972	- 0,100	33,8	26,9	19,9		2,08
	89	5 ⁽¹⁾	0,9923	- 0,092	32,4	26,2	19,8	20,5 (3)	1,83
		4	0,9990	- 0,103	32,4	25,5	18,6		2,13
C Aleación quemada a 510°C en la solubilización. Maduración natural	50	5 ⁽¹⁾	0,9985	- 0,099	32,4	25,8	19,2	19,4	1,96
		4	0,9980	- 0,101	32,4	25,7	19,0		2,02
	89	5 ⁽¹⁾	0,9600	- 0,096	30,0	24,1	18,1	18,8	1,76
		4	0,9422	- 0,112	30,0	23,2	16,6		2,14
D Solubilización y maduración natural (25 seg. al aire antes de enfriar en agua)	50	5 ⁽¹⁾	0,9913	- 0,089	33,6	27,3	20,9	21,1	1,85
		4	0,9885	- 0,092	33,5	27,2	20,6		1,91
	89	5 ⁽¹⁾	0,9774	- 0,092	31,6	25,6	19,4	20,7	2,34
		4	0,9999	- 0,115	31,6	24,2	17,2		2,35

- (1) El quinto valor utilizado en el ajuste está obtenido de la curva de respuesta a $N = 210^7$.
- (2) Valor experimental obtenido de la curva de respuesta a $N = 210^7$ (ASTM Special Techn. Publ. n° 91-A 1958).
- (3) En este caso al ser $C < 0,3$ (ver texto) el valor de σ_a ($N = 2.10^7$) se ha obtenido a partir de una desviación típica igual al valor medio de las desviaciones típicas del resto de los lotes.

PROBETAS
ESCALONADAS
 $K_t = 2,3$

Tratamiento térmico	N° de probetas	N° de lotes	Coeficiente de correlación	Pendiente	σ_a en Kgf/mm^2 para N ciclos				$\sigma_a(N=1)/\sigma_u$
					N=10 ⁵	N=10 ⁶	N=210 ⁷	N=210 ⁷ (2)	
A Solubilización y maduración natural	50	5 ⁽¹⁾	0,9851	- 0,169	25,6	17,3	10,4	11	3,6
		4	0,9826	- 0,192	25,9	16,7	9,3		4,74
	89	5 ⁽¹⁾	0,9561	- 0,158	22,6	15,7	9,8	10,2	2,79
		4	0,9124	- 0,179	22,5	14,9	8,7		3,55
B Solubilización (enfriamiento en aceite) y maduración natural	50	5 ⁽¹⁾	0,9650	- 0,173	23,0	15,4	9,2	10,6	3,29
		4	0,9983	- 0,226	23,2	13,8	7,0		6,10
	89	5 ⁽¹⁾	0,9714	- 0,170	21,4	14,5	8,7	9,8 (3)	2,96
		4	0,9967	- 0,215	21,3	13,0	6,8		4,98
C Aleación quemada a 510°C en la solubilización. Maduración natural.	50	5 ⁽¹⁾	0,9529	- 0,131	25,9	19,1	12,9	14,4	2,29
		4	0,9854	- 0,173	26,6	17,8	10,6		3,80
	89	5 ⁽¹⁾	0,9127	- 0,125	23,6	17,7	12,2	13,8	1,95
		4	0,9751	- 0,204	24,0	15,0	8,1		4,88
D Solubilización y maduración natural (25 seg. al aire antes de enfriar en agua)	50	5 ⁽¹⁾	0,9385	- 0,152	26,5	18,7	11,8	13,5	3,04
		4	0,9929	- 0,227	27,8	16,5	8,3		7,50
	89	5 ⁽¹⁾	0,9172	- 0,145	24,1	17,3	11,2	12,7	2,51
		4	0,9745	- 0,241	24,4	14,0	6,8		7,76

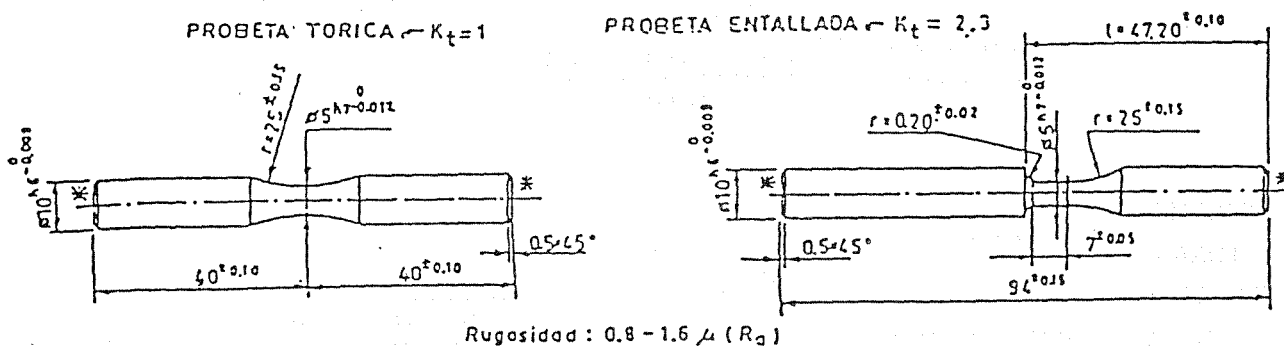


Fig.1.- Plano de las probetas

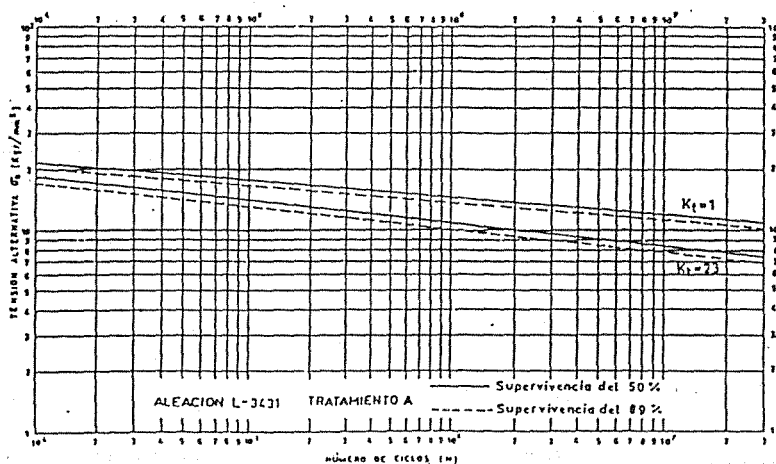
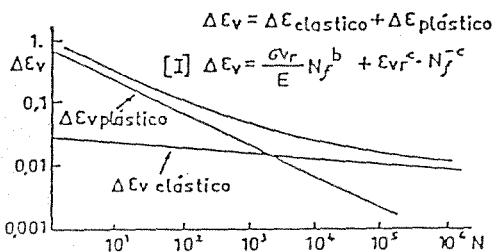


Fig.2.



[II] $N > 10^4$, $\epsilon_v \text{ plástico} \approx 0$; $\epsilon_v \text{ elástico} \approx \epsilon \text{ elástico}$
 [III] $\Delta \epsilon_e = \frac{2\sigma_a}{E} = \frac{\sigma_{vr}}{E} \cdot N^b$; $\log \sigma_a = \log (0,5 \sigma_{vr}) + b \cdot \log N$
 [IV] $\Delta \epsilon_e = \frac{3,5 \sigma_u}{E} \cdot N^{-0,12}$; $\log \sigma_a = \log (1,75 \sigma_u) - 0,12 \log N$

Nota: σ_u esfuerzo unitario maximo referido a la sección inicial (R en nuestro cuadro n° I)

Fig.3.- Fórmula de Coffin-Manson.- Representación en escalas logarítmicas