

## **CAPÍTULO 3. CONTRASTACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES**

Este tercer capítulo recoge la aplicación de los modelos descritos en el capítulo anterior, a ensayos experimentales realizados por Murakami et al.[3,4,5,6], Lukas et al.[1,2] y DuQuesnay et al.[7,8]. Este estudio experimental comprende ocho materiales diferentes: cuatro tipos de acero, 2.25Cr-1Mo, S10C, S45C y SAE-1045; dos aleaciones de aluminio, Al 2017-T4 y Al 2024-T351; electrolytic copper (99.98% Cu) y una latón 70-30 brass, y diferentes geometrías y tamaños de entallas pequeñas, variando desde los 10 $\mu$ m a los 2.5mm.

### **3.1 ENSAYOS EXPERIMENTALES DE LUKAS et al.**

#### **3.1.1 Descripción de los ensayos experimentales**

##### **Detalles experimentales**

Los ensayos experimentales de Lukas et al. han sido realizados sobre dos materiales distintos: electrolytic copper (99.98% Cu) y 2.25Cr-1Mo steel.

El cobre electrolítico presenta una resistencia a la tracción de 220MPa, tensión de prueba 0.2% de 40MPa y un tamaño de grano (longitud media de intersección) de 50 $\mu$ m. El acero 2.25Cr-1Mo posee una resistencia a la tracción de 530MPa, su límite elástico es 380 MPa y el tamaño de grano de bainita es 30 $\mu$ m.

Las curvas S-N han sido obtenidas a partir de especímenes cilíndricos con una sección circular de medida de 5mm de diámetro. Las entallas analizadas eran circunferenciales de geometría semicircular de radios comprendidos entre 10 y 800 $\mu$ m, situadas en el centro del espécimen. Los factores de concentración de tensiones se encuentran entre 1.83 y 3.04 obtenidos del manual de Peterson [13]. Después del mecanizado de las entallas, todas las probetas recibieron un tratamiento térmico de relajación de tensiones residuales.

Los especímenes fueron ensayados en máquinas de fatiga de resonancia, bajo condiciones de carga simétricas ( $R = -1$ ).

Los factores de intensidad de tensiones umbrales  $K_{ath}$  y  $\Delta K_{eff}$  para grietas grandes fueron determinados experimentalmente por el procedimiento load-shedding.

### Resultados experimentales

Los límites de fatiga han sido determinados a  $1 \cdot 10^7$  ciclos (140Hz) para el acero y a  $1 \cdot 10^7$  ciclos (20Hz) para el caso del cobre. En los especímenes libres de entallas, el límite de fatiga del cobre es 73MPa y el acero presenta 220MPa.

La longitud de grieta no-propagante justo en el límite de fatiga  $l_0$  fue obtenida de la siguiente manera: a partir del valor del límite de fatiga obtenido experimentalmente, se calcula un grupo de curvas utilizando la ecuación  $\sigma_{cn} = \frac{\sigma_c}{K_t} \sqrt{1 + 4.5(l_0/\rho)}$  para varios valores de  $l_0$ . Estas curvas han sido superpuestas a los datos experimentales, eligiendo el valor de  $l_0$  cuya curva se aproxime más a los valores experimentales.

En la siguiente tabla se recogen estos valores de  $l_0$  y el correspondiente valor del radio de entalla crítico  $\rho_0$ , obtenido de la aplicación de la ecuación  $(K_t^2 - 1) \rho \leq 4.5 l_0$ .

Tabla 3.2: Longitud y radio críticos

	$l_0$ ( $\mu\text{m}$ )	$\rho_0$ ( $\mu\text{m}$ )
<b>Steel</b>	100	60
<b>Copper</b>	90	52

Los valores medidos del factor de intensidad de tensiones umbral para grietas grandes nominal y efectivo están listados en la tabla 3.3. El ciclo realizado es simétrico.

El factor de intensidad de tensiones umbral efectivo es calculado mediante la relación

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{cl}$$

Tabla 3.3: Valores experimentales de los factores de intensidad de tensiones umbrales para grietas grandes

	$K_{ath}$	$K_{cl}$	$\Delta K_{th, eff}$
<b>Steel</b>	6.0	2.2	3.8
<b>Copper</b>	2.5	1.0	1.5

### 3.1.2 Aplicación y comparación de los modelos

#### Modelo de Lukas et al.

Los valores predichos de los límites de fatiga de los especímenes entallados son calculados empleando las ecuaciones (2.16) descritas en el capítulo anterior, éstas son:

$$\sigma_{c, notch} = \sigma_c \quad \rho \leq \rho_0$$

$$\sigma_{c, notch} = \sigma_c \frac{\sqrt{1 + 4.5(l_0/\rho)}}{K_t} \quad \rho > \rho_0$$

Empleando los valores experimentales del límite de fatiga del material, de la longitud de grieta no-propagante y del radio crítico no queda más que sustituir en la expresión superior para obtener el límite de fatiga para los diferentes tamaños de entallas. La tabla (3.4) presenta los datos experimentales y los valores predichos por el modelo de Lukas et al.

El radio crítico de entalla del acero 2.25Cr-1Mo era 60 $\mu$ m, por lo que el modelo predice que las tres entallas menores(10, 30 y 50 $\mu$ m) serán entallas no-dañinas, no reduciéndose el valor del límite de fatiga para ellas. En el caso del cobre, el radio crítico obtenido era 52 $\mu$ m, encontrándose únicamente un tamaño de entalla inferior a él (50 $\mu$ m).

Tabla 3.4: Datos del espécimen entallado y predicciones

MATERIAL				LUKAS et al.		
	R	$\rho$ ( $\mu\text{m}$ )	$K_t$ ( <sup>†</sup> )	$\sigma_{FL}$ (exp.) (MPa) <sup>(†)</sup>	$\sigma_{FL}$ (pred.) (MPa) <sup>(†)</sup>	$E$ ( <sup>□</sup> ) (%)
<b>2.25Cr-1Mo</b>	-1	10	3.04	222.5	220	1.12
		30	2.99	221	220	0.005
		50	2.95	211	220	-4.09
		70	2.92	165	205.3	-24.4
		200	2.67	140.5	148.5	-5.7
		410	2.32	150	137.33	8.4
		760	1.87	160	148.4	7.25
<b>Electrolytic Copper</b>	-1	50	2.95	72	73	-1.39
		100	2.87	56	57.16	-2.07
		150	2.76	47.3	50.87	-7.55
		200	2.67	49	47.55	2.96
		300	2.51	47	44.58	5.15
		500	2.19	46	44.85	2.5
		800	1.83	49	48.96	0.08

□ Error(%): (exp.-pred.)/exp. ×100

† Referido a la sección neta

Analizando los errores cometidos en la predicción sobre los datos experimentales se observa que, a excepción de un valor, todos los errores se encuentran situados por debajo del 10%. Para los dos materiales en estudio el modelo produce unos valores razonables y dentro de la dispersión esperada en este tipo de ensayos.

### Modelo de Murakami et al.

A continuación se presenta el resultado de la aplicación del modelo de Murakami et al. a los ensayos experimentales de Lukas.

Recodemos las expresiones de este modelo para el cálculo del límite de fatiga (2.21) y del factor de intensidad de tensiones  $\Delta K_{th}$  (2.20),

$$\Delta K_{th} = 3.3 \cdot 10^{-3} (H_V + 120)(\sqrt{\text{area}})^{1/3} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (2.20)$$

$$\sigma_w = 1.43 (H_V + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \quad (\text{MPa}) \quad (2.21)$$

$\sqrt{\text{área}}$  : es la raíz área del defecto a grieta proyectada en el plano perpendicular a la máxima tensión.

Para el caso de entallas superficiales alargadas el modelo considera que el área no corresponde al total del área proyectada, sino al área de una entalla de profundidad la profundidad real ( p.e.  $\rho$ ) y de longitud diez veces la profundidad de la entalla ( $10\rho$ ). El área sería por tanto  $10\rho^2$ .

La dureza Vickers  $H_V$  del cobre electrolítico es proporcionada por el autor e igual a 46, mientras que para el acero ha sido necesario estimarla a partir de la expresión  $H_V=0.5\sigma_U/1.6$  (ASTM E-48-43T), obteniendo un valor de 165.6.

Las predicciones del presente modelo y los resultados experimentales se muestran en la tabla 3.5, junto con las diferencias entre ambos.

Tabla 3.5: Datos del espécimen entallado y predicciones

MATERIAL					MURAKAMI et al.		
	R	$\rho$ ( $\mu\text{m}$ )	$K_t$ ( $\dagger$ )	$\sqrt{\text{área}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_{FL}$ (exp.) MPa( $\dagger$ )	$\sigma_{FL}$ (pred.) MPa( $\dagger$ )	E <sup>(<math>\square</math>)</sup> (%)
<b>2.25Cr-1Mo</b>	-1	10	3.04	31.62	222.5	229.68	-3.2
		30	2.99	94.87	221	191.25	13.5
		50	2.95	158.11	211	175.65	16.8
		70	2.92	221.36	165	166.07	-0.65
		200	2.67	632.46	140.5	139.41	0.78
		410	2.32	1296.53	150	123.7*	17.5*
		760	1.87	2403.33	160	111.6*	30.3*
<b>Electrolytic Copper</b>	-1	50	2.95	158.11	72	102.1	-41.8
		100	2.87	316.23	56	90.94	-62.39
		150	2.76	474.34	47.3	85	-79.7
		200	2.67	632.46	49	81.02	-65.3
		300	2.51	948.68	47	75.73	-61.1
		500	2.19	1581.14	46	69.55*	-51.2*
		800	1.83	2529.82	49	64.31*	-31.2*

$\square$  Error(%): (exp.-pred.)/exp.  $\times 100$

$\dagger$  Referido a la sección neta

\*Fuera del rango de aplicación del modelo

El modelo no es aplicable a las entallas 410, 760, 500 y 800 $\mu\text{m}$  por ser en estos casos su  $\sqrt{\text{area}}$  superior a 1000 $\mu\text{m}$ , no obstante se recogen los resultados de la aplicación.

Como puede observarse en la tabla 3.5, las desviaciones de las predicciones para el cobre electrolítico son enorme, llegándose a casi doblar uno de los valores experimentales. En todos los casos, el valor predicho es superior al dato experimental, no pudiéndose considerar como estimaciones conservativas. Por otro lado, el modelo de Murakami proporciona mejores resultados para el acero 2.25Cr-1Mo, pudiéndose situar los datos en una banda de  $\pm 15\%$  de error, sin tener en cuenta los valores fuera del rango de aplicación, los cuales tienen errores muy superiores.

### Modelo Micromecánico

Para aplicar el modelo micromecánico a los ensayos de Lukas se necesitan las expresiones de la tensión axial  $\sigma_{Li}$  (2.30) para superar la barrera  $i$ -ésima en un espécimen plano y la tensión umbral axial  $\sigma_{Li}^N$  (2.31) para superar la barrera  $i$ -ésima en un espécimen entallado, las cuales se repiten aquí por claridad

$$\sigma_{Li} = \sigma_{FL} \frac{\sqrt{a_0}}{\left( (i D/2)^f + a_0^f - (D/2)^f \right)^{\frac{1}{2f}}}$$

$$\sigma_{Li}^N = \sigma_{Li} \frac{\sqrt{i D/2}}{K_t} \left[ \frac{1}{\lambda_i \sqrt{\alpha \rho}} + \frac{(K_t - 1)^2}{\alpha \sqrt{1 + \lambda_i^2}} \right]^{1/2}$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{K_{th\infty}}{Y \sigma_{FL}} \right]^2$$

Para cada entalla se obtiene el límite de fatiga calculando el máximo en  $i$  de todas las tensiones  $\sigma_{Li}^N$ ,  $\sigma_{FL}^N = \max_i (\sigma_{Li}^N)$ .

El exponente  $f$ , que se precisa para reproducir el diagrama de Kitagawa-Takahashi, ha sido obtenido a partir de los datos experimentales, siendo su valor 2.5 para el acero y 1.65 para el cobre electrolítico [11] (véase figura 3.1). El factor geométrico  $Y$  depende de la forma de la grieta y de la geometría del espécimen. Dado que las grietas varían progresivamente su forma durante el proceso de crecimiento de la grieta, inicialmente pueden ser aproximadamente semicirculares ( $Y \approx 0.65$ ) y convertirse en pasantes cuando son suficientemente largas ( $Y \approx 1.12$ ), no se conoce la progresión real del factor  $Y$ , tomándose el valor representativo  $Y = 1$  para los cálculos [11].

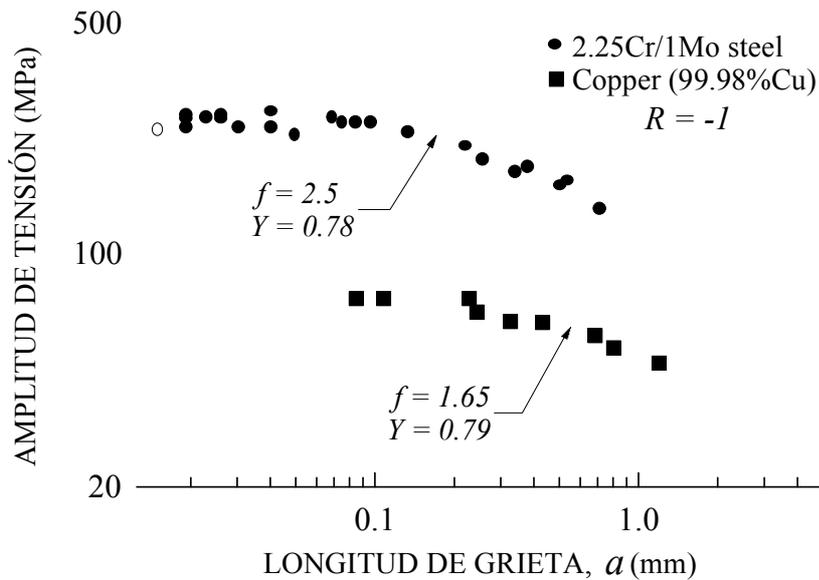


Figura 3.1: Diagrama de Kitagawa-Takahashi para el acero 2.25Cr-1Mo y el Cobre

La tabla 3.6 resume los resultados de la aplicación del modelo MM a los ensayos de Lukas et al.

Tabla 3.6: Datos del espécimen entallado y predicciones

MATERIAL				MM		
	R	$\rho$ ( $\mu\text{m}$ )	$K_t$ ( $\dagger$ )	$\sigma_{FL}$ (exp.) MPa( $\dagger$ )	$\sigma_{FL}$ (pred.) MPa( $\dagger$ )	E ( $\square$ ) (%)
<b>2.25Cr-1Mo</b>	-1	10	3.04	222.5	216.3	2.8
		30	2.99	221	199	9.9
		50	2.95	211	187.5	11
		70	2.92	165	176.5	-7
		200	2.67	140.5	141.2	-5
		410	2.32	150	120.8*	19.5*
		760	1.87	160	124.1*	22*
<b>Electrolytic Copper</b>	-1	50	2.95	72	61.8	14.2
		100	2.87	56	55.8	0.4
		150	2.76	47.3	51.6	-9.1
		200	2.67	49	48.5	1.0
		300	2.51	47	44.2	6.0
		500	2.19	46	39.1*	15*
		800	1.83	49	34.9*	28.8*

$\square$  Error(%): (exp.-pred.)/exp.  $\times 100$

$\dagger$  Referido a la sección neta

\*Fuera del rango de aplicación del modelo

Como se puede apreciar en esta tabla, la gran mayoría de los errores se sitúan por debajo del 10%. Dos de los valores que se colocan por encima presentan una relación  $\delta/\alpha \leq 5$ , existiendo una fuerte influencia del contorno del componente sobre la entalla, y no siendo apropiada, por tanto, la hipótesis de medio infinito ( o semi-infinito). En estos casos la aplicación del modelo es cuestionable como se discutió en el capítulo 2. Para el resto de valores la predicción es bastante razonable.

A continuación se presentan graficados los resultados experimentales y las predicciones de cada modelo para cada material de estos ensayos.