

3.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES DE MURAKAMI et al.

3.2.1 Descripción de los ensayos experimentales

Detalles experimentales

De todos los materiales sometidos a ensayo por Murakami y sus colaboradores han sido seleccionados para este análisis dos aceros, una aleación de aluminio y un latón. En la tabla 3.7 se recogen las propiedades mecánicas de estos materiales.

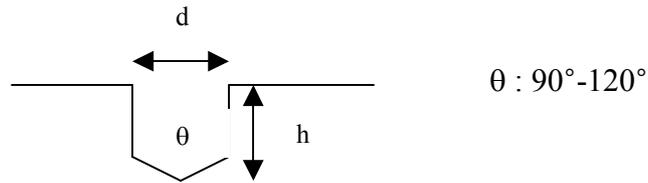
Tabla 3.7: Características mecánicas de los materiales.

Material	$\sigma_s, \sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	σ_T (MPa)	Ψ (%)
S10C	206	353	801	83.0
S45C	284	543	889	48.7
2017-T4 Al	368.7	524.7	645.3	20.8
70-30 brass	103.0	318.7	1060.1	78.8

σ_s : límite elástico; $\sigma_{0.2}$: tensión de prueba 0.2%; σ_B : tensión última de tracción; σ_T : tensión de rotura; Ψ : reducción de área

Los especímenes utilizados para los ensayos tienen forma cilíndrica y han sido electropulidos tras el mecanizado. Después de este tratamiento los especímenes han sido taladrados empleando una herramienta especial, que realiza defectos artificiales cilíndricos con ángulos rectos en la superficie del espécimen. Los diámetros de estos taladros se encuentran entre 40 y 200 μm para los aceros y entre 40 y 500 μm para la aleación de aluminio y el latón.

En los ensayos realizados con los aceros, la profundidad h de los agujeros no es fija mostrando una relación con el diámetro entre $h/d = 0.3$ y $h/d = 2.0$ (ver figura adjunta). Sin embargo los ensayos estudiados en este apartado se limitan a taladros con profundidad igual a su diámetro, para todos los materiales.



Después del tratamiento superficial final, el acero S10C presenta un tamaño de grano medio de ferrita de $34\mu\text{m}$, una longitud de intersección media de $37\mu\text{m}$, un tamaño de grano de perlita de $9.7\mu\text{m}$ y una distancia interperlítica de $125\mu\text{m}$. El acero S45 posee un tamaño de grano medio de ferrita de $19\mu\text{m}$, una longitud de intersección media de $39\mu\text{m}$, un tamaño de grano de perlita de $17\mu\text{m}$ y una distancia interperlítica de $34\mu\text{m}$. El tamaño de grano del latón 70-30 es $45\mu\text{m}$. La aleación de aluminio 2017-T4 tiene un tamaño de grano en la dirección transversal de aproximadamente $89\mu\text{m}$ y alrededor de 3 a 5mm en la dirección longitudinal.

Los ensayos son realizados con una máquina de ensayos de fatiga de flexión rotativa ($R = -1$) proporcionando un momento de flexión uniforme. La resistencia a fatiga determinada corresponde al valor nominal de la tensión de flexión rotativa bajo la cual los especímenes de acero duran más de 10^7 ciclos y los de las aleaciones más de $3 \cdot 10^7$ ciclos.

Resultados experimentales

Los límites de fatiga obtenidos para los especímenes sin entallas son los siguientes: acero S10C, 181MPa; acero S45C, 245MPa; Al 2017-T4, 156.9MPa y 70-30 brass, 122.6MPa.

En especímenes sin entallas sometidos a tensiones del orden del límite de fatiga se observaron grietas no-propagantes de $100\mu\text{m}$ (S10C) y de $50\mu\text{m}$ (S45C). Según estos

resultados es posible pensar que la existencia de pequeños agujeros artificiales, menores de $100\mu\text{m}$, no influya sustancialmente en el límite de fatiga del material.

El límite de fatiga del acero S10C con taladros pequeños ($40\text{-}50\mu\text{m}$ de diámetro) tiene el mismo valor que el correspondiente al material y el límite de fatiga de S45C con agujeros de $40\mu\text{m}$ es menor que el límite de fatiga del espécimen sin defectos. Por consiguiente, han sido considerados como diámetros críticos $d_c \cong 70\mu\text{m}$ para S10C y $d_c \cong 35\mu\text{m}$ para el acero S45C.

Analizando los resultados experimentales de la aleación de aluminio 2017-T4 y del latón 70-30, en ambos casos, un agujero de $40\mu\text{m}$ de diámetro no altera el valor del límite de fatiga del espécimen.

Para estos dos materiales no se posee ninguna información acerca de los valores de las longitudes de grietas no-propagantes en componentes sin entallas.

La tabla 3.8 muestra los datos geométricos y los resultados experimentales de los límites de fatiga para los especímenes entallados.

Tabla 3.8: Límites de fatiga experimentales

MATERIAL	R	ρ (μm)	K_t	σ_{FL} (exp.) (MPa)
S10C	-1	20	3	181
		25	3	181
		40	3	172
		50	3	172
		100	3	147
S45C	-1	20	3	235
		25	3	226
		40	3	211
		50	3	201
		100	3	181
70-30brass	-1	20	3	122.6
		50	3	117.7
		100	3	107.9
		250	3	98.1
Al 2017-T4	-1	20	3	156.9
		50	3	147.1
		100	3	122.6

3.2.2 Aplicación y comparación de los modelos

Modelo de Lukas et al.

Para aplicar el modelo de Lukas debemos emplear de nuevo las expresiones (2.16) y tener conocimiento de las longitudes de grietas no-propagantes y radios críticos de entalla no-dañinas.

Recordando, el acero S10C presentaba una longitud de grieta no-propagante l_0 de $100\mu\text{m}$ y un diámetro crítico d_c de $70\mu\text{m}$, y el acero S45C poseía a su vez l_0 en torno a $50\mu\text{m}$ y d_c de $35\mu\text{m}$.

Para la aleación de aluminio 2017-T4 se estimó un diámetro de entalla no-dañina entre 40 y $50\mu\text{m}$ y en el caso de 70-30 brass un diámetro aproximado de $60\mu\text{m}$. Debido a que se desconocen las longitudes de grietas no-propagantes para estos dos últimos materiales, éstas han sido estimadas a partir de diferentes hipótesis, aplicando el modelo de Lukas a cada uno de los valores estimados con el fin de analizar todos los casos posibles.

La primera estimación ha sido realizada a partir de la expresión que proporciona Lukas et al., que relaciona el radio crítico de entalla no-dañina y la longitud de grieta no propagante, $(K_t^2 - 1) \rho_0 = 4.5 l_0$. Se considera que el factor de concentración de tensiones tiene en todos los casos un valor de 3 (entallas circulares).

La segunda estimación se basa en la relación de la longitud de grieta no-propagante y el tamaño de grano del material, l_0 / D . Tras analizar esta relación en los materiales de los cuales poseemos ambos datos experimentales, es posible considerar para los aceros una relación $l_0 \sim 3D$ y para el caso del cobre $l_0 \sim 2D$. Al ser el latón una aleación de cobre parece lógico suponer la misma relación, $l_0 \sim 2D$, para el latón 70-30. La relación elegida para el aluminio 2017-T4 corresponde a la de los aceros, a falta de tener datos específicos para los aluminios.

Se ha realizado una tercera estimación para la aleación de aluminio. El tamaño de entalla no-dañina para ésta (40 - $50\mu\text{m}$) es menor que el tamaño de grano del material ($89\mu\text{m}$), por lo que se puede suponer que la longitud de grieta no-propagante sea del mismo orden que el tamaño de grano, $l_0 \sim D$.

En el anexo A se pueden observar el valor l_0 para las estimaciones realizadas.

La tabla 3.9 muestra los resultados experimentales en comparación con los valores predichos y el error cometido. Como se puede ver en dicha tabla, los errores cometidos por las predicciones en los aceros no superan el 20%, mientras que en los otros dos materiales son muy dispersos, dependiendo de la estimación realizada. Por lo general, son muy altos, a excepción del aluminio con $l_0 \sim D$, donde no se supera el 10%.

Tabla 3.9: datos del espécimen entallado y predicciones

MATERIAL					LUKAS et al.					
S10C	R	ρ (μm)	K_t	$\sigma_{FL}(\text{exp.})$ (MPa)	$\sigma_{FL}(\text{pred.})$ (MPa)		$E^{(\%)}$ (%)			
		-1	20	3	181	181		0.0		
		25	3	181	181		0.0			
		40	3	172	211.1		-16.6			
		50	3	172	190.8		-10.9			
		100	3	147	141.5		3.7			
S45C	-1	20	3	235	280		-19.1			
		25	3	226	258.3		-14.3			
		40	3	211	210.2		0.4			
		50	3	201	191.5		4.7			
		100	3	181	147.2		19.7			
Brass 70/30	-1	20	3	122.6	σ_{FL} l_0 (1)	$E^{(\%)}$ (%)	σ_{FL} $l_0 = 2D$		$E^{(\%)}$ (%)	
		50	3	117.7	122.6	0.0	122.6		0.0	
		100	3	107.9	98.4	16.4	123.3		-4.7	
		250	3	98.1	75.4	30.2	91.8		14.9	
					57.2	41.7	66.2		32.5	
Aluminio 2017-T4	R	ρ (μm)	K_t	$\sigma_{FL}(\text{exp.})$ (MPa)	σ_{FL} (1)	$E^{(\%)}$ (%)	σ_{FL} (2)	$E^{(\%)}$ (%)	σ_{FL} (3)	$E^{(\%)}$ (%)
	-1	20	3	156.9	156.9	0.0	156.9	0.0	156.9	0.0
		50	3	147.1	112.2	17	157.0	-6.7	261	-77.4
		100	3	122.6	87.5	28.6	117	4.6	188.7	-53.9

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

(1) $(K_t^2 - 1) \rho_0 = 4.5 l_0$

(2) $l_0 = D$

(3) $l_0 = 3D$

Modelo de Murakami et al.

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

Recordemos las expresiones de este modelo para el cálculo del límite de fatiga (2.21) y del factor de intensidad de tensiones ΔK_{th} (2.20)

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

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

Las durezas de los materiales en estudio se presentan en la tabla 3.10.

Tabla 3.10:Dureza Vickers

Material	S10C	S45C	Al 2017-T4	70-30 brass
H_V	120	170	117	70

La tabla 3.11 recoge los datos geométricos y los resultados experimentales y predichos por el modelo de Murakami et al. del límite de fatiga para cada material. Como puede observarse dichas predicciones se ajustan bastante bien a los resultados obtenidos experimentalmente. Los errores cometidos se encuentran en su mayoría en una banda del $\pm 10\%$.

Tabla 3.11: datos del espécimen entallado y predicciones

MATERIAL						MURAKAMI et al.	
	R	ρ (μm)	K_t	$\sqrt{\text{area}}$ (μm)	σ_{FL} (exp.) (MPa)	σ_{FL} (pred.) (MPa)	E ^(%) (%)
S10C	-1	20	3	37	181	188	-3.9
		25	3	46	181	174	3.9
		40	3	74	172	168	2.5
		50	3	93	172	162	6.0
		100	3	185	147	144	2.0
S45C	-1	20	3	37	235	228	3.2
		25	3	46	226	219	3.0
		40	3	74	211	203	3.9
		50	3	93	201	195	2.8
		100	3	185	181	174	3.9
70-30 brass	-1	20	3	74	122.6	132.6	-8.2
		50	3	93	117.7	128	-8.8
		100	3	185	107.9	114	-5.7
		250	3	463	98.1	98	0.01
Aluminio 2017-T4	-1	20	3	74	156.9	164	-4.5
		50	3	93	147.1	158	-7.4
		100	3	185	122.6	140	-14.2

[□] Error(%): (exp.-pred.)/exp. $\times 100$

Modelo Micromecánico.

Las ecuaciones (2.30) y (2.31), necesarias para aplicar este modelo, aparecían en el capítulo segundo.

Como datos se necesitan el factor de intensidad de tensiones umbral $K_{th\infty}$, el tamaño característico de grano D , el factor f y el factor geométrico Y . Los autores no proporcionan en sus trabajos los valores de $K_{th\infty}$, lo que hace preciso nuevamente una estimación de este dato.

Los valores de $K_{th\infty}$ para los aceros S10C y S45C han sido obtenidos a partir de datos experimentales de aceros con composición y propiedades mecánicas parecidas [15], adoptándose $K_{th\infty} = 6.5$ ($R = -1$) para S10C y $K_{th\infty} = 6$ ($R = -1$) para S45C.

En el caso de los otros dos materiales, Al 2017-T4 y 70-30 brass, se han estudiado las expresiones que proporcionan Murakami et al. y Lukas et al. para el factor de intensidad de tensiones umbral.

Recordando la expresión de Murakami, $\Delta K_{th} = 3.3 \cdot 10^{-3} (H_v + 120)(\sqrt{\text{area}})^{1/3}$, se ha realizado la hipótesis de que se obtendrá el valor umbral de grieta grande cuando $\sqrt{\text{area}}$ alcance el valor de $1000\mu\text{m}$ (límite de aplicación del modelo).

Lukas et al. proponían como expresión para el factor de intensidad de tensiones umbral justo en el límite de fatiga la siguiente $K_{ath}' = 1.12 \sigma_c \sqrt{\pi l_0}$. Además, proponían una relación experimental entre éste y el factor de intensidad de tensiones de grieta grande, $K_{ath}' = 0.6 K_{ath}$ ($R = -1$). Por tanto, podemos obtener una estimación del factor de intensidad de tensiones umbral según Lukas empleando simplemente la expresión, $K_{th\infty} = 1.12 / 0.6 \sigma_{FL} \sqrt{\pi l_0}$.

A fin de comprobar cual de las dos estimaciones proporciona mejores resultados se han aplicado a diferentes materiales de los que sí disponíamos todos los datos experimentales. El resultado obtenido fue que la ecuación de Lukas ha mostrado resultados acordes con los datos encontrados en handbook para los aceros S10C y S45C, y para el valor experimental del cobre electrolítico. Sin embargo, los valores obtenidos de la hipótesis realizada sobre el modelo de Murakami difiere de los experimentales a excepción del cobre electrolítico.

Tras este análisis, se ha decidido aplicar el modelo MM a la aleación de aluminio 2017-T4 con tres valores distintos de $K_{th\infty}$: 3.89(Murakami); 8.48(Lukas, $l_0 \sim 3D$) y 4.9(Lukas, $l_0 \sim D$), debido a la dificultad añadida de no poseer información acerca de la longitud de grieta no propagante de este material.

En el caso del latón 70-30 ambas expresiones proporcionan valores muy cercanos: 3.84 (Lukas, $l_0 \sim 2D$) y 3.13(Murakami). Se ha optado por aplicar el modelo con el valor 3.84.

El tamaño de grano D elegido para la aplicación del modelo en el caso de los aceros ha sido el tamaño de la ferrita. El modelo ha sido comprobado con la longitud de intersección media, con la distancia interperlítica, ..., presentándose bastante robusto y

no apareciendo diferencias sustanciales en el valor del límite de fatiga. Las diferencias máximas obtenidas son inferiores al 8 %.

En lo referente a los factores f e Y , ya se comentó para los ensayos de Lukas et al. los valores a tomar para estos dos datos: $f=2.5$ para aceros y aluminio, $f=1.65$ para 70-30 brass, e $Y=1$ para todos los casos.

En la tabla 3.12 se pueden observar los datos experimentales de Murakami junto a los valores predichos por el modelo MM.

Tabla 3.12: datos del espécimen entallado y predicciones.

MATERIAL					MM					
	R	ρ (μm)	K_t	$\sigma_{FL}(\text{exp.})$ (MPa)	$\sigma_{FL}(\text{pred.})$ (MPa)		$E^{(n)}$ (%)			
	S10C	-1	20	3	181	176.2		2.7		
25			3	181	173.9		3.9			
40			3	172	167.8		2.5			
50			3	172	164.2		4.5			
100			3	147	150.7		-2.5			
S45C	-1	20	3	235	225.7		4.0			
		25	3	226	220.6		2.4			
		40	3	211	208.4		1.2			
		50	3	201	201.7		-0.3			
		100	3	181	177.2		2.1			
70-30 brass	-1	20	3	122.6	111.0		9.5			
		50	3	117.7	99.6		18.2			
		100	3	107.9	88.4		18.1			
		250	3	98.1	71.4		27.2			
Aluminio 2017-T4	R	ρ (μm)	K_t	$\sigma_{FL}(\text{exp.})$ (MPa)	σ_{FL} (1)	$E^{(n)}$ (%)	σ_{FL} (2.1)	$E^{(n)}$ (%)	σ_{FL} (2.2)	$E^{(n)}$ (%)
	-1	20	3	156.9	144	8.2	158.1	-0.76	150.2	4.3
		50	3	147.1	129.8	11.7	151.5	-3.0	137.9	6.3
		100	3	122.6	112.6	8.2	144.1	-17.5	124.8	-1.8

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

(1) $\Delta K_{th\infty}$ Murakami

(2) $K_{th\infty}$ Lukas 2.1 $l_0=3D$
2.2 $l_0=D$

El modelo MM proporciona excelentes resultados en los aceros S10C Y S45C, para los cuales los errores no alcanzan el 5%. Además al ser la mayoría errores positivos (valor experimental superior al predicho), nos encontramos del lado de la seguridad.

En el caso del latón, los valores predichos se alejan de los datos experimentales, superándose el 15% de error en tres entallas.

Los errores cometidos con la aleación de aluminio, en los tres supuestos, pueden considerarse razonables, destacando los valores predichos bajo la hipótesis $l_0 \sim D$, como sucedía en la aplicación del modelo de Lukas para la misma suposición. Se debe reseñar una vez más la robustez que presenta el modelo micromecánico frente a las estimaciones de $K_{th\infty}$.

A continuación se presentan graficados los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos al conjunto de datos experimentales presentados en este apartado.