

7. CONCLUSIONES

7.1 Comparación con otros datos experimentales

En este capítulo se observarán los resultados obtenidos estableciendo comparaciones con otros resultados conocidos con la finalidad de comprobar la coherencia entre resultados obtenidos en distintos trabajos.

Finalmente se exponen también una serie de desarrollos futuros que sería interesante realizar en esta misma línea de trabajo con el fin de lograr datos más completos así como de corroborar los ya obtenidos.

7.1.1 Tracción

A continuación se van a comparar los resultados obtenidos con otros procedentes de bibliografía. En la siguiente tabla se indican las propiedades mecánicas de la aleación en columnas según diferentes autores junto a las obtenidas para facilitar la comparación, siendo la primera columna la correspondiente a los resultados obtenidos en este proyecto.

Tabla 7.1.1-1. Comparativa de valores característicos de tracción.

Referencias		T651	T6[1]	T6[2]
Límite elástico	σ_y	508 MPa	503 MPa	505 MPa
Límite de rotura	σ_u	556 MPa	572 MPa	570 MPa
Módulo de Young	E	69.4 GPa	71 GPa	70 GPa

Con carácter general se puede observar que los resultados obtenidos son coherentes con otros encontrados en la bibliografía, si bien se aprecia un límite de rotura con valores ligeramente inferiores en los ensayos que se han estudiado respecto a los otros valores presentados.

Caso aparte sería la elongación en rotura que, a diferencia de los datos presentados en la tabla 7.1.1-1, presenta una mayor diferencia con los datos obtenidos de bibliografía donde se pueden encontrar valores del 11% [12] y 7% [13] de elongación en rotura. Sin embargo, en este punto la comparación de resultados se hace más difícil ya que la ésta se ve afectada tanto por la longitud de medida entre puntos (G) como por el área de la sección y la forma de la probeta. Aunque las probetas normalizadas guardan una relación que disminuyen estas diferencias no consiguen eliminarlas y por tanto la comparación de resultados obtenidos con diferentes probetas no resultaría rigurosa.

7.1.2 Vida a fatiga

Ahora se van a comparar los resultados obtenidos para la curva de vida a fatiga frente a resultados que se pueden encontrar en la bibliografía. En concreto se presentan los resultados obtenidos junto a otras curvas

obtenidas experimentalmente para la misma aleación tanto para el tratamiento térmico T651 como T6:

Tabla 7.1.2-1. Comparativa de valores característicos de vida a fatiga.

Referencias		T651	T651 [3]	T6 [4]	T6 [5]
Coeficiente de resistencia a fatiga	σ'_f	1671.07 MPa	1664 MPa	1090 MPa	1113.6 MPa
Exponente de resistencia a fatiga	b	-0.157	-0.149	-0.1122	-0.1294

Donde:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (7.1.2.1)$$

Los valores indicados en la primera columna son los correspondientes a los obtenidos en este proyecto una vez corregidos los datos de partida mediante la parábola de Gerber. A continuación se representan los cuatro casos conjuntamente.

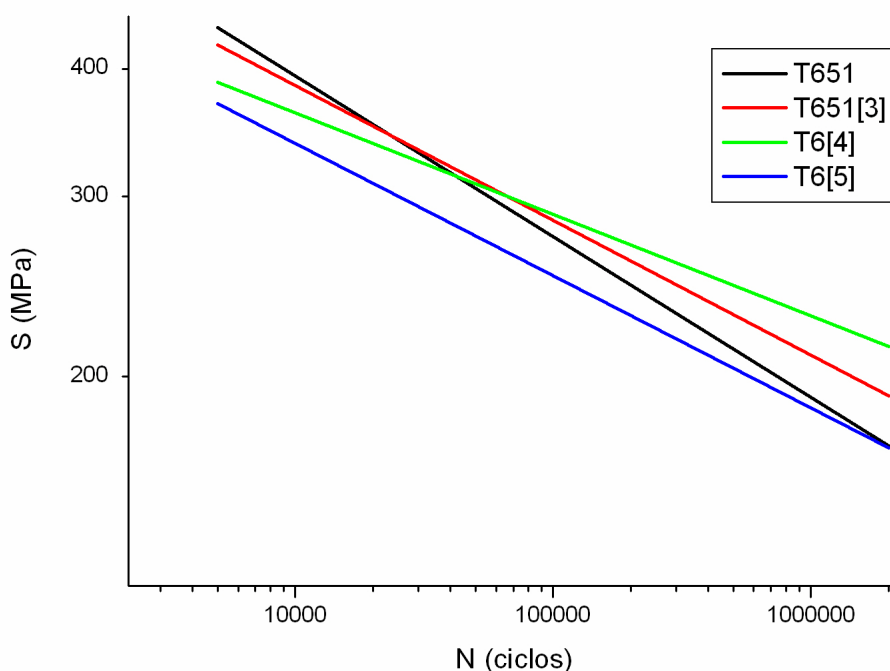


Fig. 7.1.2-1. Representación de las curvas de vida a fatiga referidas.

Se puede observar claramente una diferencia importante entre las distintas curvas. Esta representación sirve además para mostrar el carácter fuertemente estadístico de la fatiga, pudiendo comprobarse que en distintos estudios para un mismo material se obtienen resultados notablemente diferentes frente a la caracterización a tracción en la que lo habitual es la obtención de resultados mucho más uniformes.

7.1.3 Velocidad de crecimiento de grieta

A continuación se van a presentar los resultados obtenidos para velocidad de crecimiento de grieta junto a otros obtenidos de bibliografía. Todos estos resultados han sido ajustados mediante la ecuación de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n$$

Por lo que se pueden describir dando los valores de los parámetros C y n. Estos valores se muestran en la tabla 7.1.3-1, correspondiendo la primera columna a los valores obtenidos en este proyecto.

Tabla 7.1.3-1. Comparativa de valores característicos de la curva de velocidad de crecimiento de grieta.

Referencias		T651, R=0.01	T651, R=0.02 [6]	T651, R=0.02 [7]	T6, R=0 [5]
Coeficiente	C	$1.874 \cdot 10^{-11}$	$3.299 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$8.831 \cdot 10^{-11}$
Exponente	n	3.8785	3.641	3	3.322

En la siguiente figura se muestran los cuatro casos conjuntamente.

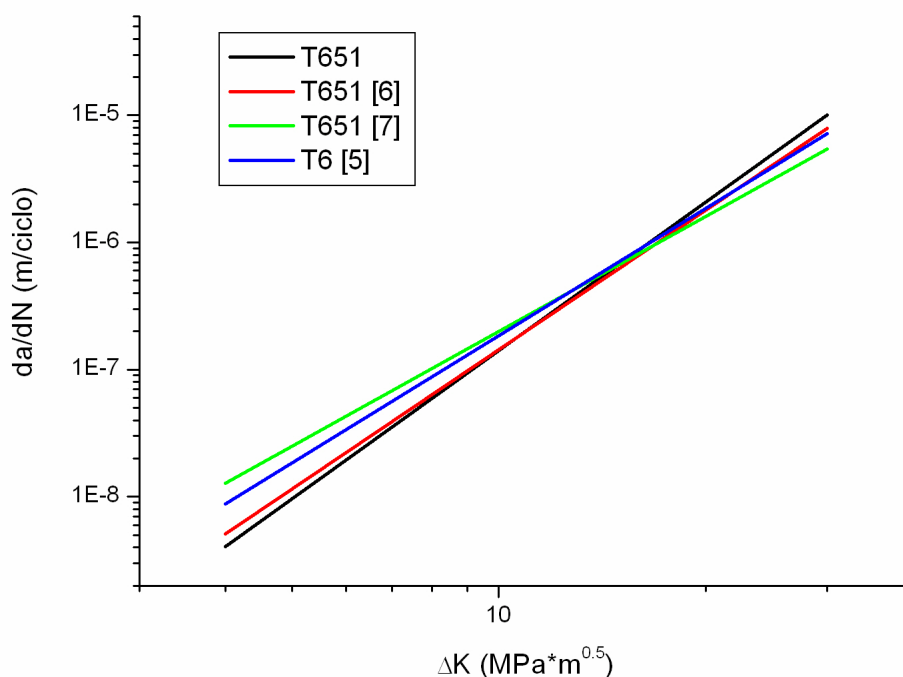


Fig. 7.1.3-1. Representación de las curvas de velocidad de crecimiento de grieta referidas.

En la figura anterior se puede observar que existen dos rectas con mayor pendiente (la obtenida en este proyecto y la referida en primer lugar en la tabla 7.1.3-1) y otras dos con menor pendiente. Estas últimas pronostican una velocidad de crecimiento de grieta mayor para valores bajos del factor de intensidad en tensiones frente a las dos primeras.

Esta diferencia en los resultados puede deberse nuevamente al carácter fuertemente estadístico del daño por fatiga y por tanto también de la velocidad de crecimiento de grietas generadas y en crecimiento bajo este régimen de cargas. A esto hay que añadir la dificultad en medir la longitud de grieta con cierta exactitud y que hay que hacer aproximaciones matemáticas de ésta y operar con dichas aproximaciones por lo que cualquier error de medida se propaga rápidamente.

Por otra parte conviene hacer notar un efecto que aparece en las curvas estudiadas y que puede afectar a los parámetros de la ecuación de Paris. Dicho efecto se observa en la siguiente figura donde se aprecia una variación importante de la velocidad de crecimiento de grieta, aumentando ésta muy rápidamente entre $\Delta K = 6$ y $\Delta K = 9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$.

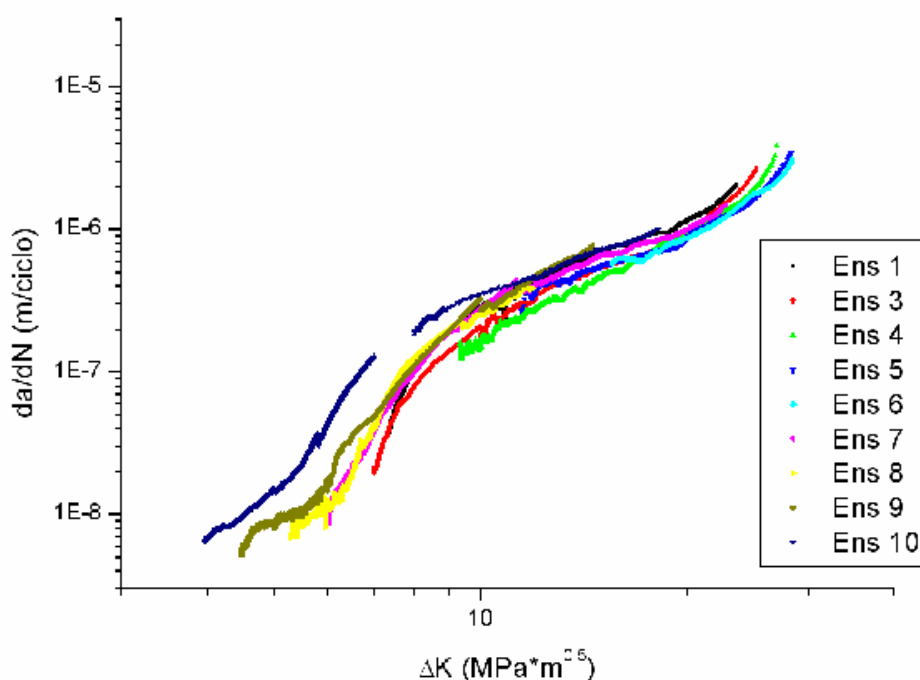


Fig. 7.1.3-2. Velocidad de crecimiento de grieta obtenida de los ensayos.

De hecho, en el punto dedicado a los cálculos para obtener la recta de regresión esto se hizo de dos modos: con una sola recta para todo el rango de valores de ΔK y con dos, aproximando de manera diferente la curva en función del valor de ΔK .

Para la comparación con otras curvas se ha usado la regresión en una sola recta dado que las curvas con las que se desea comparar están dadas de esta forma.

Observando estas curvas resulta evidente que si se aproxima la velocidad de crecimiento de grieta por una sola recta, los parámetros que la definen dependerán de manera importante del rango de valores de ΔK considerado.

Por tanto para comparar curvas de velocidad de crecimiento de grieta para este material no sólo sería necesario definir los parámetros de la ecuación de Paris sino también indicar el rango de valores del factor de intensidad en tensiones (ΔK) que se ha tenido en cuenta.

En el caso de las referencias con las que han sido comparados los resultados obtenidos en este proyecto, únicamente se tienen datos claros sobre el rango de valores de ΔK cubiertos para el caso T651, $R = 0.02$ [6], esto es, la curva cuyos parámetros son más similares a los aquí presentados. En este caso el rango de valor de ΔK recorrido durante los ensayos va desde aproximadamente $\Delta K = 4$ hasta unos $40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, coincidiendo aproximadamente con los ensayos que se están estudiando.

En los otros casos referidos en la comparación sería interesante comprobar el rango de valores de ΔK considerado. Si dicho rango tomase por valor mínimo de ΔK valores más elevados de los considerados en estos ensayos esto podría explicar la menor pendiente de las curvas. Sería posible incluso obtener una nueva regresión a partir de los ensayos realizados limitándose al rango de ΔK empleado en los otros casos de manera que si se obtuvieran resultados similares se podría atribuir las diferencias actuales en su mayor parte precisamente al factor que estamos comentando.

7.2 Trabajos futuros

Comportamiento a tracción

El trabajo que aquí se está presentando tiene un amplio abanico de posibles caminos por los que desarrollarse buscando una caracterización en más aspectos y con mayor detalle del material. En lo tocante al comportamiento a tracción poco más puede hacerse. El comportamiento del material a este tipo de sollicitaciones es sencillo y ha sido ampliamente estudiado.

Sin embargo hay un aspecto que no está totalmente definido en la realización de ensayos de tracción. La elongación en rotura y reducción de área son medidas de la ductilidad del material que en principio tampoco deberían variar de unos ensayos a otros y sin embargo sí existe una variación. Resultaría interesante estudiar las variaciones de estos parámetros al ensayar probetas diferentes de un mismo material y establecer una relación ente el cambio en determinadas dimensiones de la probeta y el aumento o disminución de la elongación en rotura y reducción de área.

Por otra parte, aunque no se trate de comportamiento a tracción, sí se podría determinar la curva de comportamiento cíclico y monotónico. La curva que aquí se ha obtenido mediante ajuste a la ecuación de Ramberg-Osgood se basa sólo en ensayos de tracción y por tanto no tiene en cuenta comportamiento cíclico. Como ya se ha dicho, no se trata de ensayos de tracción pero se ha incluido aquí por su relación con datos obtenidos mediante estos ensayos.

Vida a fatiga

Sobre el comportamiento a fatiga se podrían realizar series de ensayos en las que todas las condiciones tanto de la probeta como de la realización del ensayo permaneciesen constantes, salvo uno de ellos. Esto permite determinar la influencia de determinados factores sobre la vida a fatiga del material estudiado. Esto es importante dado que los materiales con usados son distintas rugosidades superficiales, con entallas de distinto tipo, piezas de mayor o menor tamaño, en presencia de tensiones medias... Si se conoce la influencia de dichos factores sobre la vida a fatiga, es posible alcanzar resultados más próximos a la realidad.

Cabe destacar que, dado que la fatiga tiene un carácter fuertemente estadístico, por mucho que se consiga determinar la influencia de los distintos factores habrá que aplicar coeficientes de seguridad, especialmente en el caso de piezas complejas cuyo comportamiento es más impredecible. En cualquier caso el conocer con mayor detalle el comportamiento a fatiga del material permitirá reducir estos coeficientes manteniendo un diseño seguro.

Velocidad de crecimiento de grieta

Es en este punto donde más hay por hacer y puesto que es el comportamiento menos estudiado de los tres, también será el que tenga resultados más interesantes. Un estudio en profundidad de la generación y crecimiento de grietas así como de su comportamiento es importante para determinar el proceso que sigue el daño por fatiga.

El primer punto en que se pueden mejorar los resultados obtenidos es en la determinación de la velocidad de crecimiento de grieta para valores del factor de intensidad en tensiones (ΔK) por debajo de los conseguidos hasta el momento, llegando a determinar el umbral de crecimiento por fatiga. Esto supone realizar ensayos a una frecuencia mucho mayor de la que se ha podido conseguir en los ensayos estudiados ya que en caso contrario la duración del ensayo sería excesiva.

Por lo que se puede observar en los ensayos parece probable que para valores por debajo de los alcanzados para ΔK aparezca otro tramo de modo que la curva podría aproximarse por tres juegos de valores para la ecuación de Paris dando el comportamiento en detalle de la velocidad de crecimiento de grieta en el material.

También sería interesante la validación de los resultados obtenidos realizando ensayos con otros sistemas de medidas o variando algunos parámetros de los ensayos determinando así su influencia en caso de presentarla.

Para comprobar la validez de los sistemas de medida de la longitud de grieta se pueden simultanear la medida a través de extensómetro con la

medición realizada con ACPD, ayudando a detectar errores en la medida que sean debidos no al ensayo sino al propio sistema de medida.

Otros factores que sería interesante hacer variar son el espesor de la probeta y su tamaño. Si bien no es de esperar que los resultados varíen respecto a los obtenidos siempre que las dimensiones se atengan a lo explicitado por la normativa de ensayo, si se podría determinar un rango para dichos valores en el que los resultados sean más claros.

En el caso que nos ocupa las probetas empleadas fueron de muy reducido tamaño y un espesor importante en comparación con el tamaño de la misma. Esto pudo complicar la realización de los ensayos o, mejor dicho, el análisis de los mismos. El uso de probetas de pequeño tamaño y gran espesor provoca que la medida dada por el extensómetro sea mucho menor que para probetas de mayor tamaño o menor espesor. Esto provocó que el nivel de ruido alcanzase valores del orden de la medida obligando a introducir una serie de filtros y dificultando aun así el análisis de los resultados especialmente en el caso de valores reducidos de ΔK .

Por tanto, para ensayos posteriores se recomendaría el uso de probetas de mayor tamaño y con espesores alejados del máximo permitido. Otro cambio interesante en este sentido sería utilizar probetas con el punto de apoyo para el extensómetro mecanizado en la propia pieza evitando usar piezas adicionales adheridas a la probeta, lo que introduce un error presumiblemente mayor en la posición inicial del extensómetro y una cierta incertidumbre por las propiedades de la unión entre las probetas y las piezas que proporcionan los puntos de apoyo.