

## EFFECTO DE LA TEMPERATURA, LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN Y LA MICROESTRUCTURA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE INTERMETÁLICOS $\gamma$ -TiAl

Francisco Gálvez<sup>1</sup>, María Jesús Pérez<sup>1</sup>, Borja Erice<sup>1</sup>, Vicente Sánchez-Gálvez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciencia de Materiales, CISDEM, Universidad Politécnica de Madrid.  
c/ Profesor Aranguren s/n. 28040 Madrid  
E-mail: fgalvez@mater.upm.es

### RESUMEN

Los aluminuros de titanio aparecen como una alternativa al empleo de aleaciones base níquel en trabajos a elevada temperatura, debido a que en estas condiciones son capaces de retener sus propiedades mecánicas, presentando además un mejor comportamiento a corrosión, oxidación y fluencia. En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos en la investigación llevada a cabo para determinar el comportamiento de una aleación  $\gamma$ -TiAl en condiciones de alta temperatura y analizar el efecto de la velocidad de deformación. Para ello, se realizaron ensayos estáticos de tracción de referencia a baja velocidad de deformación y ensayos de tracción a alta velocidad de deformación mediante el dispositivo experimental de la barra Hopkinson, a temperaturas comprendidas entre los 25°C y los 850°C. Para ayudar a explicar el comportamiento mecánico obtenido, se hizo un estudio de las superficies de fractura mediante microscopía electrónica de barrido, en el que se observó una doble tipología microestructural del material, laminar y dúplex. Los resultados obtenidos en los ensayos muestran una influencia clara de la velocidad de deformación en la tensión máxima, pero no así de la temperatura; además se ha observado que la deformación máxima obtenida depende del tipo de microestructura predominante.

### ABSTRACT

Titanium aluminides are becoming an alternative to the use of nickel-based alloys in high temperature applications due their ability to retain their mechanical properties and presents better corrosion, oxidation and creep performance. This paper describes the results of the research carried out to determine the behaviour of a  $\gamma$ -TiAl alloy at high temperature and analyze the effect of strain rate. For that purpose, performed at static tensile tests at low strain rate and tensile tests at high strain rate were realized between 25°C and 850°C by a static machine and a Hopkinson bar, respectively. To explain the mechanical behaviour obtained, a study of the fracture surfaces by scanning electron microscopy was made, showing a double microstructure in the material. The results exhibit a clear influence of strain rate on maximum stress. However, the maximum stress does not show a marked variation with the temperature. Also, have shown that the maximum strain obtained depends on the predominant type of microstructure.

**PALABRAS CLAVE:** Intermetálicos, temperatura, alta velocidad de deformación.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los aluminuros de titanio presentan grandes posibilidades en aplicaciones como material estructural en vehículos aeroespaciales, automoción y aeromotores. Sus propiedades mecánicas específicas son superiores al resto de aleaciones habitualmente utilizadas en estos campos. Ésta es la verdadera fuerza motriz que impulsa el desarrollo de estos compuestos cuando las aleaciones de titanio y las de base níquel empiezan a estar limitadas por la temperatura. Presentan un potencial interesante para utilizarse en elementos rotatorios de turborreactores debido a su baja densidad y buena resistencia frente a la temperatura. También encuentran aplicación en la industria del automóvil debido a su ligereza (reduciendo el consumo de combustible) y

elevada conductividad térmica, por lo que son empleados en álabes, rotores de turbina o válvulas de escape.

Los aluminuros de titanio basados en los compuestos intermetálicos TiAl ( $\gamma$ ) y Ti<sub>3</sub>Al ( $\alpha_2$ ), surgen como unos materiales revolucionarios para alta temperatura. Mediante el desarrollo de aleaciones bifásicas se puede obtener una serie de aleaciones con unas composiciones adecuadas para los procesos de fabricación y aplicaciones que se demandan.

La microestructura de los aluminuros de titanio se clasifica en cuatro grupos en función de la composición de la aleación y del tratamiento térmico sufrido, los cuales son: near-gamma (NG), duplex (DP), near-

lamellar (NL) y fully-lamellar (FL), siendo las microestructuras laminares las que mejores propiedades mecánicas alcanzan.

En concreto, las aleaciones  $\gamma$ -TiAl, como es la del presente estudio, tienen un interés especial debido a su mayor rigidez específica, resistencia a la oxidación, estabilidad térmica y el hecho de que muestren cierta plasticidad a elevadas temperaturas. Cabe destacar que las propiedades mecánicas de estas aleaciones son función de la composición, la microestructura, de los modos de deformación de cada fase ( $\alpha_2$  y  $\gamma$ ) y la posible continuidad de planos de deslizamiento entre estas fases.

El objetivo principal del presente trabajo es el estudio del efecto de la temperatura, la velocidad de deformación y la microestructura de una determinada aleación  $\gamma$ -TiAl. Debido a lo cual, se han contrastado los resultados obtenidos con los estudiados por otros autores sobre aluminuros de titanio ensayados a elevada velocidad de deformación, para aleaciones con diferente microestructura.

En el caso de una aleación con estructura completamente laminar [1], los resultados obtenidos por autores presentan una dependencia de la tensión de rotura con la velocidad de deformación, siendo ésta y la deformación a rotura casi lineal con el logaritmo de la velocidad de deformación. Para aleaciones con estructura dúplex [2] [3], el límite elástico disminuye con la temperatura pero de manera mucho más apreciable a elevadas velocidades de deformación, siendo la dependencia del límite elástico con la velocidad de deformación prácticamente lineal. Para estructuras casi-laminar [4], se demuestra la naturaleza frágil de estas aleaciones, existiendo también una fuerte dependencia del límite elástico con la velocidad de deformación. En cualquiera de los casos, se observa que la variación del límite elástico con la temperatura es despreciable entre las temperaturas ambiente y 400°C, apareciendo señales del ablandamiento térmico entre los 600°C y los 800°C y sufriendo una fuerte caída del límite elástico entre los 800°C y los 900°C, posiblemente debido a que la temperatura de transición frágil-dúctil se encuentre entre ellas.

El estudio del comportamiento de este tipo de aleaciones variando el tamaño de grano y la relación de fracción volumétrica de estructura dúplex [5], demuestra que hay un aumento del límite elástico conforme aumenta la fracción de granos laminares. Sin embargo si se aumenta esta fracción se disminuye la deformación máxima.

En cuanto a cómo afecta el procesado en la microestructura final resultante [6], se ha observado que tras un tratamiento HIP (compresión isostática en caliente) se revelaban dos tipos de microestructuras: una exterior completamente laminar (FL) y otra interior dúplex (DP); mientras que las probetas sin tratamiento HIP, es decir, aquellas obtenidas directamente de la colada, sólo mostraban microestructura laminar.

## 2. MATERIAL DE ENSAYO

El material de estudio ha sido un compuesto intermetálico  $\gamma$ -TiAl, suministrado por ITP, con la siguiente composición: Ti-45Al-2Mn-2Nb+0.8%TiB<sub>2</sub>. En la figura 1 se muestran algunas propiedades mecánicas de la aleación objeto de estudio y el procedimiento de fabricación.

### TiAl

XD Gamma tial, Titanium Aluminide inoculated with 0,8% Titanium Di-boride. Ti-45Al2Mn2Nb0.8%TiB2 (at %)  
Material is triple vacuum arc melted and vacuum cast or induction skull melted to produce castings.  
Preparation of TiB2 in an aluminium matrix is known as the XD process (Exothermic decomposition).

Property: DUCTILITY	
Unit:	%
DUCT_TYPE	ELONGATION
20.0	1.60
600.0	3.0

Property: PROOF_STRESS	
Unit:	MPa
BASIS	TYPICAL
LOADING	TENSION
	0.20
25.0	562.0
600.0	485.0

Property: ULT_STRENGTH	
Unit:	MPa
CONC_FACTOR	1.0
BASIS	TYPICAL
LOADING	TENSION
20.0	690.0
600.0	687.0

Property: FRACT TOUGH	
Unit:	MPa.m0.5
BASIS	TYPICAL
F_T_ASSESS	VALID
20.0	20.40
600.0	22.80

Property: IMPACT	
Unit:	kJ
BASIS	TYPICAL
TEST_TYPE	CHARPY
NOTCH_TYPE	V
20.0	0.0020
600.0	0.0030

Property: MODULUS	
Unit:	GPa
BASIS	TYPICAL
LOADING	TENSION
LOAD_MODE	STATIC
20.0	165.0
600.0	146.0
600.0	148.0
800.0	141.0

Figura 1. Información referente al material de estudio

Para poder situar la aleación en el diagrama de fase Ti-Al, se decidió medir la densidad del material proporcionado, comprobando así que efectivamente se trataba de una aleación  $\gamma$ -TiAl. Esta medida de la densidad se llevó a cabo mediante un densímetro por inmersión en etanol.

El material fue suministrado en su geometría de ensayo, en probetas de tracción cilíndricas roscadas, fabricadas y mecanizadas por GKN Aerospace, según la geometría mostrada en la Figura 2.



Figura 2. Probeta de tracción de TiAl

## 3. ENSAYOS ESTÁTICOS

Los ensayos a baja velocidad de deformación se llevaron a cabo a 25, 500 y 650°C. Se realizaron en una máquina universal de ensayos modelo Instron 8803 con control de desplazamiento a una velocidad de 0.1mm/min, proporcionando una velocidad de

deformación constante de  $4.63 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$ . Para la medida de la carga aplicada se empleó una célula de carga de 25kN con una resolución de 0.1%. Además, la medida de la deformación se realizó mediante un sistema de extensometría óptica sin contacto, el cual es especialmente útil para ensayos de elevada temperatura. Este sistema de videoextensometría usa dos cámaras con objetivo Nikon de 75mm, un foco de iluminación y un software de adquisición de imágenes. Previamente se pintaron marcas en las probetas con una pintura resistente a la temperatura con el fin de proporcionar un fuerte contraste y así facilitar al programa el seguimiento de los píxeles. Para programar la temperatura de ensayo se empleó un horno gestionado por un controlador Eurotherm 2416 en el que la temperatura se controló a través de un termopar tipo K en contacto directo con la probeta. El horno, de fabricación casera, consta de dos ventanas de cuarzo para poder filmar e iluminar la probeta durante el ensayo a temperatura. Todo este montaje experimental puede observarse en la Figura 3.



Figura 3. Dispositivo para los ensayos a baja velocidad de deformación

En la Figura 4 se muestran dos imágenes registradas durante uno de los ensayos.

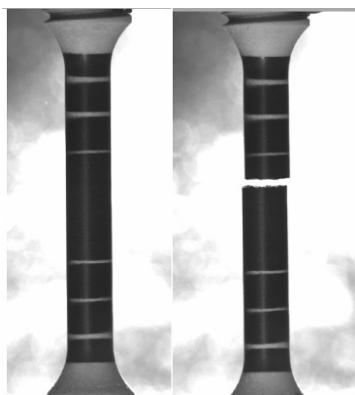


Figura 4. Imágenes del inicio y el final de un ensayo estático.

Las curvas tensión-deformación resultantes de estos ensayos realizados a baja velocidad de deformación se muestran en la Figura 5.

Las curvas tensión-deformación de los ensayos realizados a temperatura ambiente muestran una ausencia de deformación plástica a temperatura ambiente. El comportamiento a 500°C y a 650°C es similar al de temperatura ambiente, aunque el material presenta un ligero aumento plástico (mayor para 650°C). Puede apreciarse que la tensión de rotura es prácticamente la misma (en torno a 540MPa) en el caso de los ensayos a temperatura, 500°C y 650°C; y que la deformación máxima aumenta con la temperatura, siendo del 0.5% a temperatura ambiente y aumentando hasta el 1.3% a 650°C.

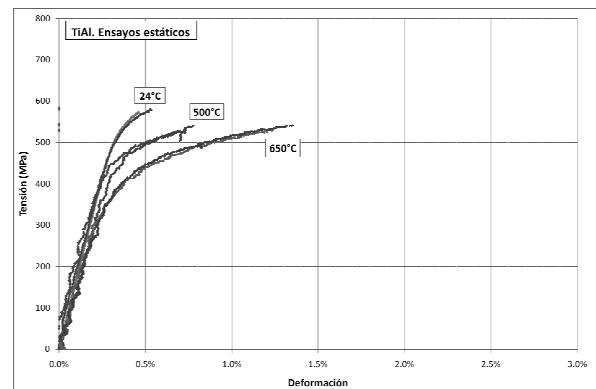


Figura 5. Curvas tensión-deformación obtenidas en los ensayos estáticos.

#### 4. ENSAYOS DINÁMICOS

Los ensayos a alta velocidad de deformación se llevaron a cabo a 25, 550, 650, 750 y 850°C, empleando el dispositivo experimental de la barra Hopkinson. Tanto la descripción del equipo utilizado como el método de ensayo se han explicado con anterioridad en otros trabajos realizados [7], por lo que aquí no se entra en detalle. El sistema experimental se completó con una cámara de alta velocidad Vision Research, modelo Phantom V12 con velocidad de adquisición variable hasta 1.000.000 de imágenes por segundo. La velocidad de filmación ha permitido seguir el proceso de deformación durante el ensayo, en particular la evolución de la probeta y su rotura.

En la Figura 6 se muestran diferentes instantes de uno de los ensayos captados con dicha cámara. Se aprecia que la rotura es perpendicular al eje de la probeta sin deformación plástica apreciable en las imágenes. Todas las probetas ensayadas a alta velocidad de deformación, independientemente de la temperatura de ensayo, han presentado este tipo de rotura.

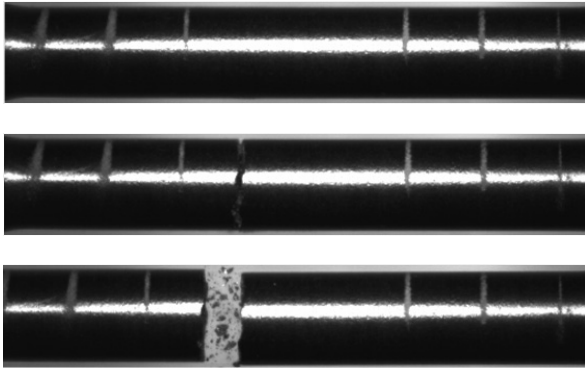


Figura 6. Diferentes instantes en un ensayo dinámico: 42μs, 60.26μs y 288μs, respectivamente

Cabe destacar que, independientemente de la temperatura de ensayo, se aprecian dos comportamientos claramente diferenciados, como pueden verse en la Figura 7: mientras que algunas probetas rompen sin presentar plasticidad alguna, otras presentan un comportamiento con una zona plástica más relevante. Este comportamiento no es apreciable en las imágenes aunque sí en los datos experimentales obtenidos. El análisis microestructural realizado con posterioridad da una explicación a estos resultados obtenidos.

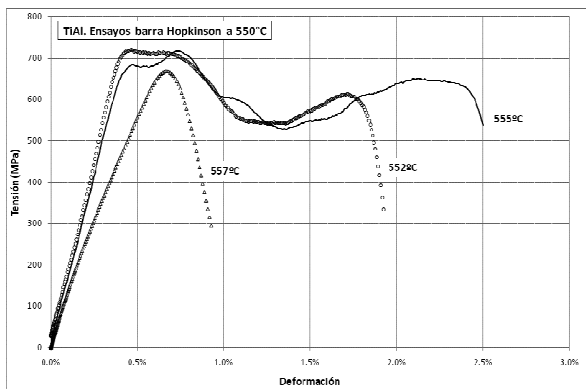


Figura 7. Curvas tensión-deformación obtenidas en los ensayos dinámicos a 550°C

### 5. MICROESTRUCTURA

El estudio de la microestructura se llevó a cabo sobre un corte transversal al eje de la probeta ya ensayada. Una vez cortadas las probetas en un plano transversal a su eje, fueron embutidas en resina y posteriormente se les realizó un desbaste y un pulido. El ataque químico para revelar la microestructura se realizó con una disolución al 1% de HF durante 30 segundos. La microestructura así revelada se observó en un banco metalográfico donde se tomaron imágenes gracias a una cámara digital acoplada a un microscopio óptico.

El estudio realizado reveló una doble microestructura, ya observada con anterioridad por otros autores [6] en una aleación  $\gamma$ -TiAl de la misma composición que la del presente trabajo. Esta doble microestructura se

representa en la Figura 8, y revela dos zonas claramente diferenciadas en la probeta: la zona exterior presenta una microestructura completamente laminar (FL) con granos formados por láminas de fase  $\gamma$  y láminas de fase  $\alpha_2$ ; mientras que la zona interior de una probeta a otra, presenta una microestructura dúplex (ND) en la que los granos laminares bifásicos ( $\alpha_2$  y  $\gamma$ ) se alternan con granos equiaxiales monofásicos de fase  $\gamma$ .

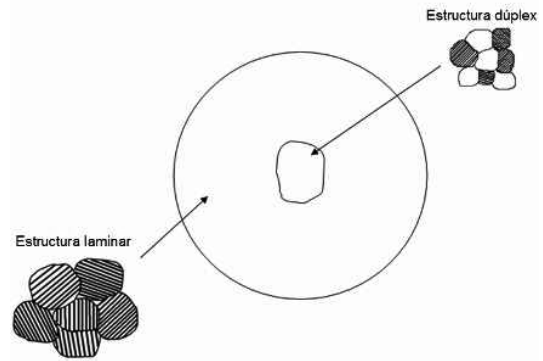
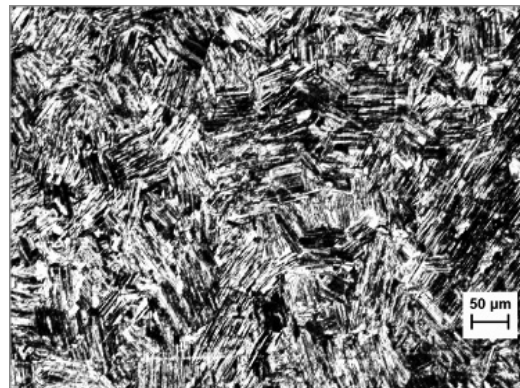
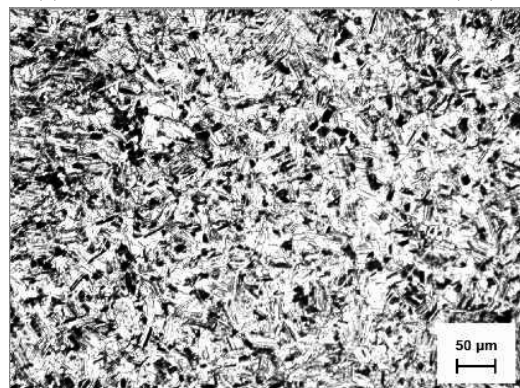


Figura 8. Esquema de la distribución de la microestructura en la probeta

Un ejemplo de esta doble microestructura se presenta en la Figura 9 en la que se observan dos micrografías que comparan la zona exterior y la interior de una de las probetas.



(a) Zona exterior con estructura laminar (FL)



(b) Zona interior con estructura dúplex (ND)

Figura 9. Micrografías de la zona exterior y la interior de una de las probetas

Tras estudiar todas las probetas, se observó que los granos de la zona interior presentan un tamaño de grano menor (unas  $10\mu\text{m}$ ) que los granos de la periferia (de unas  $50\mu\text{m}$ ); además, se trazaron los perfiles de las dos zonas de diferente microestructura y se midieron las respectivas áreas transversales, llegándose a la conclusión de que el tamaño de la zona interior no es constante para todas las probetas, variando entre un 1% y un 20% de la sección transversal y además ésta es de forma muy irregular. Esta última observación tiene cierta influencia en el comportamiento mecánico, ya que se pudo comprobar que la zona exterior (laminar) presenta una rotura más frágil que la zona interior (dúplex) que presenta una rotura más dúctil; lo cual da una explicación a la diferencia de comportamiento observada en las curvas tensión-deformación de los ensayos a elevada velocidad de deformación. En general, la tendencia parece ser que las probetas con microestructura predominante laminar, con contenidos bajos en zona dúplex ( $\text{ND}<8\%$ ), presentan una ausencia de plasticidad; por otro lado, las probetas con contenidos de microestructura dúplex mayor ( $\text{ND}>8\%$ ) presentan una cierta plasticidad.

### 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Tras el tratamiento de los valores experimentales obtenidos de los ensayos de tracción a baja, Tabla 1, y alta velocidad de deformación, Tabla 2, y el posterior estudio de la microestructura existente en cada probeta, caben destacar ciertas observaciones fruto de los resultados obtenidos.

Los resultados de la carga máxima en función de la temperatura, tal y como se pueden ver en la Figura 10, muestran que la tensión máxima aumenta con la velocidad de deformación, sin embargo la variación con la temperatura no tiene una tendencia clara, estando las variaciones dentro de la propia dispersión de los resultados.

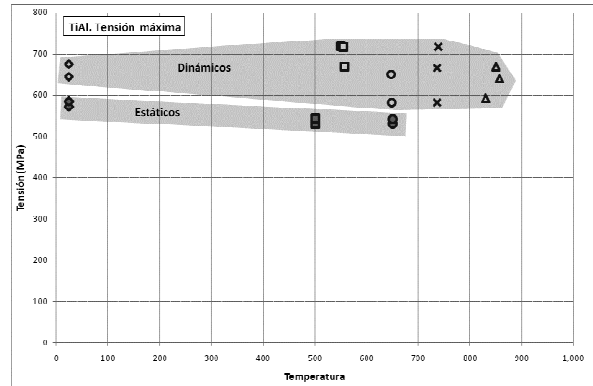


Figura 10. Tensión máxima en función de la temperatura

La variación de deformación máxima en función de la temperatura para los ensayos de alta velocidad está representada en la Figura 11, en la que se aprecia claramente el efecto de la microestructura.

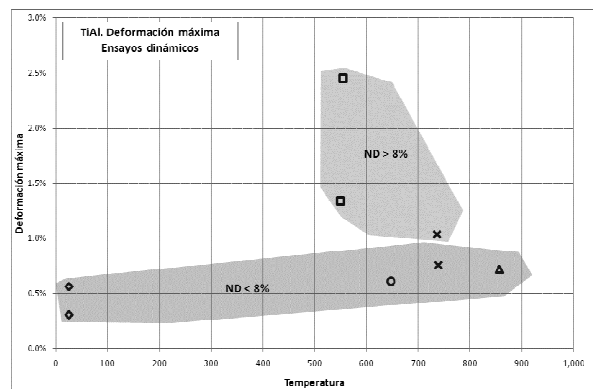


Figura 11. Deformación máxima en los ensayos de alta velocidad en función de la temperatura

Las probetas con microestructura predominantemente laminar ( $\text{ND}<8\%$ ) muestran un comportamiento con poca deformación a rotura, no siendo significativa su variación con la temperatura. En cambio, las probetas con microestructura combinada entre laminar y dúplex ( $\text{ND}>8\%$ ) muestran un comportamiento con mayor deformación a rotura y con una marcada dispersión.

Tabla 1. Resultados obtenidos en los ensayos estáticos

Ensayo	Temperatura (°C)	Tamaño relativo de la zona dúplex	Velocidad de deformación ( $\text{s}^{-1}$ )	$\sigma_{\text{MAX}}$ (MPa)	$\epsilon_{\text{R}}$ (%)
L01	25	1.3%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	573	0.46
L02	25	0.3%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	586	0.54
L03	25		Rotura en rosca		
L04	500	3.9%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	531	0.70
L05	500	8.0%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	545	0.78
L06	650	0.8%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	532	1.24
L07	650	3.0%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	544	1.35

Tabla 2. Resultados obtenidos en los ensayos dinámicos

Ensayo	Temperatura (°C)	Tamaño relativo de la zona dúplex	Velocidad de deformación (s <sup>-1</sup> )	$\sigma_{MAX}$ (MPa)	$\epsilon_R$ (%)
H01	25	1.4%	246	645	0.56%
H02	25	5.2%	166	675	0.31%
H03	25	-	Rotura en rosca. Ensayo no válido.		
H04	552	19.7%	241	719	1.34%
H05	555	11.7%	261	717	2.46%
H06	557	5.1%	307	669	No video
H07	647	1.1%	278	650	0.61%
H08	649	10.6%	245	583	No video
H09	737	4.7%	258	666	1.04%
H10	739	3.1%	254	717	0.76%
H11	737	8.9%	316	582	No video
H12	857	10.5%	281	640	0.72%
H13	850	1.4%	280	670	No video
H14	830	5.9%	308	593	No video

## REFERENCIAS

Todas las probetas, independientemente de la temperatura de ensayo y de la velocidad de deformación muestran una rotura frágil.

Los resultados de los ensayos realizados muestran que la tensión máxima no presenta una variación significativa con la temperatura, esto demuestra la capacidad que tienen estas aleaciones para mantener sus propiedades a elevadas temperaturas. En cambio, el efecto de la velocidad de deformación sí es apreciable, pues la tensión máxima aumenta con ésta.

En los ensayos estáticos se ha observado un aumento de la deformación a rotura con la temperatura, no siendo tan clara esta tendencia en los ensayos dinámicos. Las probetas con mayor contenido de zona dúplex presentan mayor deformación a rotura, en cambio, en las probetas con poco contenido de zona dúplex la deformación a rotura es menor y sin variación apreciable con la temperatura.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación del proyecto a través del programa CONSOLIDER INGENIO 2010 y del proyecto BIA2008-06705-C02-01.

- [1] Y. Zhou, Y. Xia, *Tensile mechanical behaviour of TiAl (FL) at high strain rate*, Journal of Materials Science, (2000).
- [2] S. A. Maloy, G. T. Gray, *High strain rate deformation of Ti-48Al-2Nb-2Cr*, Elsevier Science Ltd, (1995).
- [3] X. Zan, Y. Wang, Y. Xia, Y. He, *Strain rate effect on the tensile behaviour of DuplexTi-46.5Al-2Nb-2Cr intermetallics at elevated temperature*, Elsevier, Materials Science & Engineering, (2008).
- [4] M. Shazly, D. Nathenson, V. Prakash, *Modeling of high-strain-rate deformation, fracture and impact behaviour of advanced gas turbine engine materials at low and elevated temperatures*, National Aeronautics and Space Administration, (2003).
- [5] R. T. Zheng, Y. G. Zhang, C. Q. Chen, G. A. Cheng, *The ambient temperature tensile behaviour of duplex  $\gamma$ -TiAl-based alloys*, Elsevier, Materials Science & Engineering, (2003).
- [6] J.H. Jeon, A.B. Godfrey, P.A. Blenkinsop, W. Voice, Y.D. Hahn, *Recrystallization in cast 45-2-2 XD<sup>TM</sup> titanium aluminide during hot isostatic pressing*, Elsevier, Materials Science & Engineering, (1999).
- [7] F. Gálvez, D. Cendón y V. Sánchez-Gálvez, *Ensayos mecánicos en materiales a elevada velocidad de deformación y alta temperatura*, Anales de Mecánica de la Fractura Vol.22, (2005), 508-513.