

**EVALUACIÓN MECÁNICA MEDIANTE TÉCNICAS DE
INDENTACIÓN DE SOLDADURAS POR FRICCIÓN LINEAL
EN ALEACIONES DE TITANIO**

**MECHANICAL EVALUATION OF LINEAR FRICTION
WELDS IN TITANIUM ALLOYS THROUGH INDENTATION
EXPERIMENTS**

M. Corzo, O. Casals, J. Alcalá, A. Mateo, M. Anglada

**Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica
Av. Diagonal 647, Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya**

Resumen. Este artículo presenta los resultados de un proyecto cuyo objetivo es evaluar la integridad estructural de soldaduras por fricción lineal entre diferentes aleaciones de titanio de aplicación aeronáutica. Concretamente se han estudiado dos uniones: Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo con Ti-6Al-4V, y Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo con Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo. El límite elástico y el coeficiente de endurecimiento por deformación de las uniones soldadas y del metal base son inferidos mediante una novedosa metodología de indentación. En los metales base, los resultados experimentales de indentación son confrontados con los obtenidos mediante ensayos convencionales de tracción. Las variaciones en propiedades mecánicas sugieren que la fina microestructura en la zona afectada térmicamente mejora las propiedades con respecto al metal base.

Palabras Clave: aleaciones de titanio, *blisk*, soldadura por fricción, indentación, zona afectada térmicamente (ZAT).

Abstract. This article shows the results of a project that focuses on the characterization of the weld interface region of dissimilar joints between titanium alloys for aeronautical applications, specifically Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo with Ti-6Al-4V, and Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo with Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo. The uniaxial flow stress and hardening response of the material containing the weld were analyzed following the finite elements simulations and mathematical formulations to correlate hardness and the amount of pile-up and sinking-in phenomena around sharp indenters with uniaxial mechanical properties. This allows to accurately establishing the influence that welding process has on the mechanical response of the parts. Tests performed on these friction-welded specimens showed that the fine grained microstructures in the welds exhibited better properties than the base materials.

Keywords: titanium alloys, *blisk*, linear friction welding, indentation experiments, heat affected zone (HAZ).

1. INTRODUCCIÓN

La soldadura por fricción es un proceso en estado sólido que permite unir materiales similares y disímiles mediante el contacto de una interfase que ha plastificado. Bajo condiciones normales, la temperatura máxima en la unión queda justo por debajo del punto de fusión, con lo cual los defectos de soldadura comúnmente asociados a los fenómenos de fusión y solidificación no ocurren, pudiendo obtenerse uniones soldadas con mejores propiedades que los metales base.^[1]

La técnica de soldadura por fricción lineal es relativamente reciente y permite extender las aplicaciones de la clásica soldadura por fricción rotativa a componentes no axisimétricos. Así, en la actualidad este proceso de soldadura es considerado como una alternativa de fabricación y reparación de componentes en los motores de turbina.^[2]

Normalmente las turbinas se construyen mediante la unión mecánica de los álabes al disco. Sin embargo, con este nuevo método de producción se puede obtener un único componente denominado *blisk* (blade + disk), con un peso notablemente menor, lo que resulta favorable para su aplicación en la industria aeronáutica.

Un detalle característico de las piezas soldadas por fricción lineal es la presencia de una rebaba, llamada “flash”, formada por material que ha sido expulsado debido a la presión, ya que la unión entre los metales se logra a través de un efecto combinado entre fuerza de forja y el movimiento relativo de las piezas.^[3] Frecuencia y amplitud de oscilación, junto con las fuerzas de forja y de fricción, son los principales parámetros del proceso y condicionan las propiedades mecánicas de las uniones producidas.^[4]

En consecuencia, encontrar un rango de parámetros óptimo para cada caso concreto es de gran importancia práctica.

La optimización de los parámetros del proceso de soldadura por fricción lineal y la predicción de las variaciones de temperatura en el proceso han sido en los últimos años objeto de estudio debido a su complejidad.^[5] En virtud de lo anterior, el objetivo de este trabajo fue aplicar una nueva metodología, que se basa en técnicas de modelización por elementos finitos, a fin de obtener correlaciones entre la dureza y propiedades mecánicas tales como el límite elástico, el módulo de Young y el coeficiente de endurecimiento por deformación.^[6,7] La evolución de dichas propiedades es analizada en función de los cambios microestructurales en la zona afectada térmicamente (ZAT) de uniones realizadas en aleaciones de titanio.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

La aleación seleccionada para la fabricación del disco fue Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (Ti-6246). Fue colada en forma de disco (\varnothing 400 mm x 50 mm) y posteriormente forjada en la región β (β -transus de 945 °C). A continuación se sometió a un recocido a 900 °C durante 1 hora, enfriamiento a 50 °C/min, y por último se efectuó un envejecimiento a 585 °C durante 8 horas. Las aleaciones utilizadas como álabes fueron la Ti-6Al-4V (Ti-64) y Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti-6242) forjadas en $\alpha+\beta$ con un recocido posterior a 950-960 °C, 2 horas. Mientras que la Ti-64 fue envejecida a 700 °C, 2 horas, la Ti-6242 lo fue a 595 °C, 8 horas.

Las soldaduras por fricción lineal fueron efectuadas por TWI (The Welding Institute). Todas las uniones fueron sometidas a un tratamiento de alivio de tensiones en vacío o en atmósfera controlada de argón.

Un aspecto a destacar de estas uniones es la reducida extensión de la ZAT. La exposición a temperaturas elevadas y altas velocidades de enfriamiento, conlleva la presencia de acusadas variaciones microestructurales a lo largo de esta reducida ZAT.

La variación microestructural fue observada mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), mientras que para caracterizar la ZAT se extrajeron láminas delgadas para Microscopía Electrónica de Transmisión (MET) en una sección transversal de la unión.

2.2 Metodología de ensayos de indentación y modelización por elementos finitos

Para estudiar la variación de las propiedades mecánicas en función de la distancia a la unión, se llevaron a cabo ensayos de indentación Vickers con un durómetro Frank 532 a una carga máxima de 10 Kg en el metal base, y con un microindentador Akashi a una carga 1 Kg en la ZAT. El valor de la carga máxima aplicada permite asegurar que el ensayo se realiza en el rango de indentación en que la dureza se mantiene constante para cualquier profundidad de penetración. Este valor de carga hace que la huella cubra una amplia zona del material donde existen suficientes granos como para asegurar que se mide la dureza de un sólido continuo.

Se utilizó la metodología descrita en la referencia [6] a fin de obtener el límite elástico σ_{ys} y el coeficiente de endurecimiento por deformación n a partir de ensayos de indentación. Además de la dureza, un parámetro indispensable en esta caracterización es la distribución de la deformación plástica existente en la superficie del material, pues condiciona el área de contacto teórica. La deformación puede ser de dos tipos: los materiales que exhiben un n bajo desarrollan apilamiento (*pile-up*) alrededor de la superficie de contacto, mientras que aquellos con un elevado valor de n presentan hundimiento (*sink-in*). Este efecto se introduce en el análisis a través del parámetro α ,

definido como el cuadrado del cociente entre la distancia vertical desde el fondo de la huella al material situado en el límite de la zona de contacto (h_s) y el máximo desplazamiento (h), tal y como se describe en la figura 1.

La simulación del proceso por elementos finitos proporciona una relación entre α , σ_{ys} y n , para un material que responda a una ley:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (1)$$

En particular, en el caso de las aleaciones de titanio estudiadas se estableció que los lados de las huellas de indentación eran relativamente rectos, con lo que se optó por considerar que no experimentaban efectos de apilamiento ni de hundimiento en la periferia del contacto. De esta forma, se fijó $\alpha = 1$ y, con la dureza medida experimentalmente (H), se calculó la tensión característica o representativa σ_r del material mediante la fórmula (2):

$$\frac{H}{\sigma_r} = -0.023 \left(\ln \left(\frac{E}{\sigma_r} \right) \right)^4 + 0.0647 \left(\ln \left(\frac{E}{\sigma_r} \right) \right)^3 - 0.6817 \left(\ln \left(\frac{E}{\sigma_r} \right) \right)^2 + 3.1968 \left(\ln \left(\frac{E}{\sigma_r} \right) \right) - 2.9261 \quad (2)$$

Dicha tensión σ_r es la que corresponde a una deformación de 0.1.^[6]

A partir del valor de α y de σ_r , se aplicó la ecuación propuesta a fin de evaluar el coeficiente n , que está expresado en la ecuación (3).

$$\sqrt{\alpha} = A + B e^{-\left(\frac{\sigma_r}{E} \right)^D} \quad (3)$$

$$A = 8.7760n^3 - 6.7180n^2 + 1.0478n + 0.8148$$

$$B = -7.7892n^3 + 6.8690n^2 - 2.073n + 0.4790$$

$$D = -0.35359n^3 + 0.40038n^2 - 0.05926n + 0.01426$$

En los cálculos descritos se asumió un valor del módulo de Young E de 110 GPa, de acuerdo al valor esperado en aleaciones de titanio. El límite elástico (σ_{ys}) que caracteriza por completo la respuesta uniaxial del material se puede evaluar a partir de

la ecuación constitutiva ecuación (1) una vez conocidos el coeficiente de endurecimiento, el módulo de Young y la tensión representativa σ_r . Operando con dicha ecuación y asumiendo continuidad entre la zona elástica y la zona plástica de la curva uniaxial se llega a la siguiente expresión:

$$\sigma_{ys} = \sigma_r^{1/(1-n)} (0,1E)^{n/(n-1)} \quad (4)$$

Finalmente, se utilizó la metodología descrita en [8] a fin de establecer la influencia del coeficiente de fricción μ sobre las propiedades obtenidas anteriormente. Para ello, se empleó el método iterativo propuesto en ese trabajo que permite extraer los valores de dureza H_o y α_o que se esperarían si el material hubiese sido sometido a indentación sin fricción.

2.3 Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se llevaron a cabo en una máquina universal a una velocidad de desplazamiento de 2 mm/min. Se mecanizaron probetas planas a partir del bloque soldado, el cual media 15 x 36 mm y 60 mm de longitud. El límite elástico, la resistencia máxima y la deformación a rotura se calcularon a partir de las curvas esfuerzo-deformación reales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización microscópica de la unión

En las figuras 2 y 3 pueden observarse las microestructuras de los metales base caracterizadas mediante MEB. De acuerdo con la metalurgia del titanio^[9] y como resultado de la forja en la región β de la aleación Ti-6246, se produce una

microestructura con grandes granos de fase β . En el enfriamiento desde la región β se forman agujas de α y también precipita fase α discontinua a lo largo de los límites de grano (Fig. 2). Durante el envejecimiento aparece una gran cantidad de placas finas de α secundaria.

La microestructura de las aleaciones Ti-64 y Ti-6242 tiene una distribución bi-modal de nódulos de fase α -primaria y colonias tipo Windmanstätten de $\alpha+\beta$ (Fig. 3). Para el Ti-64 los nódulos de α -primaria tienen un tamaño medio de 20 μm y suponen una fracción en volumen de aproximadamente 45% (Fig. 3a). Esta fase se encuentra en mayor proporción ($\approx 60\%$) en el Ti-6242 (Fig. 3b).

Los factores que permiten evaluar la integridad de una unión por fricción lineal son: tipo y espesor de “flash”, presencia de defectos, extensión de la ZAT y cambios microestructurales a lo largo de la misma, siendo en los dos últimos aspectos en los que se centra el interés de este estudio.

El tamaño de la ZAT, evaluada a partir de la observación de cambios microestructurales con respecto a los materiales base, es similar en las dos uniones, con un valor de 1,27 mm para el Ti-64 y 1,52 mm para el Ti-6242. Es preciso especificar que dichas mediciones fueron hechas a un tercio del espesor de la probeta, puesto que en las zonas próximas a los bordes se produce un notable ensanchamiento, tal y como se aprecia en la figura 4.

La figura 5 muestra la micrografía de la sección transversal en una unión soldada entre Ti-6246 y Ti-6242. Siguiendo la misma notación utilizada en trabajos previos^[10], se pueden distinguir tres regiones diferentes: región de transformación de fase, región con deformación (en la que se observa claramente la fase α -primaria alargada por efecto de la fricción) y región de metal base sin cambios.

3.2 Propiedades Mecánicas

3.2.1 Ensayos de dureza

La figura 6 recoge los valores obtenidos en una unión Ti-6246/Ti-64 en una línea de medición que abarca los dos metales base, así como la parte central de la ZAT. Para la otra unión el perfil es muy similar. De estos perfiles se deduce que la extensión de la ZAT es mayor a la medida realizada considerando los cambios microestructurales, cuyos valores se dieron en el apartado 3.1. Por ejemplo para la unión mostrada en la figura 6, el perfil de durezas muestra que la ZAT alcanza un valor aproximado de 2 mm, con 1 mm a cada lado de la línea de unión.

Puede apreciarse el crecimiento de la dureza en la ZAT, siendo más pronunciado y uniforme en el lado que corresponde a la aleación Ti-6246. La evolución de las durezas en la zona central de la unión se muestra con más detalle en las figuras 7 y 8. En general, los mayores valores de dureza se presentan en la zona de transformación y decrecen con la distancia desde la interfase hacia los extremos. Para el caso de la ZAT en los metales base con microestructura bi-modal (Ti-64 y Ti-6242), esta disminución es contundente, mientras que el Ti-6246 presenta un perfil de dureza más homogéneo.

En la tabla I se indican los valores de las propiedades mecánicas (σ_{ys} y n) estimados a partir de los datos experimentales obtenidos con las indentaciones, tanto en los metales base como en la unión. Como era de esperar, los altos valores de dureza en la unión se traducen en una predicción de un límite elástico muy elevado.

3.2.2 Ensayos de tracción

De cada unión se extrajeron dos probetas con su eje principal orientado transversalmente a la soldadura. A partir de los resultados estimados para las estructuras

bimodal y laminar (Tabla I), se podía deducir que la rotura tendría lugar en la primera, ya que presenta un menor σ_{ys} y un n similar. Esta predicción se confirmó con los ensayos de tracción. La Tabla II presenta las tensiones de rotura de las uniones, las cuales se situaron entre 1030 y 1090 MPa, valores bastante próximos a los de los metales base por los que se produjo la fractura, también incorporados en la misma tabla. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Mohandas et al.^[11] y Wisbey et al.^[12] en aleaciones de titanio $\alpha+\beta$ en las que la unión superaba las propiedades del metal base.

Con objeto de comprobar el grado de ajuste entre datos experimentales y las estimaciones de la metodología de indentación, se compararon la curva esfuerzo-deformación obtenida en un ensayo de tracción en la aleación Ti-64 y la trazada con las modelizaciones por elementos finitos (Fig. 9). Como se puede observar, la metodología de indentación asume siempre un comportamiento potencial perfecto con un valor constante del coeficiente de endurecimiento. Sin embargo, en la realidad muchos materiales presentan diferentes coeficientes de endurecimiento, por lo que, según el tipo de comportamiento, la metodología de indentación captura mejor el comportamiento uniaxial a bajas deformaciones (cerca del límite elástico) o en otros casos a deformaciones mayores, desajustándose entonces la predicción del límite elástico.

Por otra parte, en materiales con tendencia a desarrollar apilamiento la fricción entre el indentador y el material indentado puede tener un efecto considerable en los valores experimentales de dureza. En el caso de las aleaciones de titanio objeto del presente estudio, la combinación de límites elásticos elevados, junto a coeficientes de endurecimiento por deformación muy bajos, da lugar a deformaciones superficiales no muy acusadas, pero que a pesar de eso pueden verse afectadas de forma apreciable por la fricción. La valoración del efecto de la fricción entre el indentador y el material

aporta una predicción más precisa de las propiedades mecánicas, ya que la fricción entre las caras del indentador distorsiona la deformación superficial y por tanto el valor de dureza obtenido. Tal como se muestra en la Tabla III, los nuevos valores de propiedades mecánicas obtenidos con este método iterativo, son más cercanos a aquellos medidos experimentalmente.

4. CONCLUSIONES

La metodología de indentación utilizada para evaluar las propiedades uniaxiales de uniones soldadas por fricción lineal de aleaciones de titanio solicitadas a tracción supone una herramienta muy útil, ya que muestra una correspondencia razonable entre los resultados numéricos y los experimentales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Olaf Roder de la empresa MTU Aero Engines y a The Welding Institute por el suministro del material que ha sido utilizado en este proyecto. A la Comunidad Europea por la financiación del proyecto DUTIFRISK ref. G4RD-CT-2001-00631 y al Ministerio de Educación y Ciencia por el proyecto MAT03-01685. A la Dra. M. Marsal y al Dr. J.M. Manero por la colaboración prestada en el estudio por microscopía electrónica.

5. REFERENCIAS

- [1] W.A. Baeslack III, D.W. Becker y F.H. Froes, *J. Metals* (1984) 47-58.
- [2] P. F. Mendez y T. W. Eagar, *Adv. Mater. & Proc.* 159, 5 (2001) 39-43.
- [3] L. D'Alvise, E. Massoni y S.J. Walloe, *J. Mater. Process. Tech.* 125-126 (2002) 387-391.
- [4] A. Varis y M. Frost, *Wear* 217 (1998)117-131.
- [5] A. Varis y M. Frost, *Mat. Sci. Eng. A292* (2000) 8-17.
- [6] M. Mata y J. Alcalá, *J. Mater. Res.*18 (2003) 1705-1709.
- [7] M. Garrido, A.J. López, J. Rodríguez, *Rev. Metal. Madrid*, 40 (2004) 380-383.
- [8] M. Mata y J. Alcalá, *J. Mech. Phys. Solids*, 52 (2004) 145-165.
- [9] P. Tarín, *Rev. Metal. Madrid* 26 (1990) 395-409.
- [10] S. Daquian, R. Zhenan, Z. Zhenfeng, T. North, Z. Yang y S. Sathian, *J. Mater. Sci. Tech.* Vol. 16 No. 1 (2000) 59-62.
- [11] T. Mohandas, D. Banerjee y V.V. Kutumba Rao, *Mater. Sci. Eng A289* (2000) 70-82.
- [12] A. Wisbey, IC. Wallis, H.S. Ubhi, P. Sketchley, CM. Ward-Close y PL. Threadgill.W.A. *Proc. Titanium'99*, vol. 3, Saint-Petersburg, Russia 1999, I.V. Gorynin, S.S. Ushkov (Eds.), pp. 1718-1725.

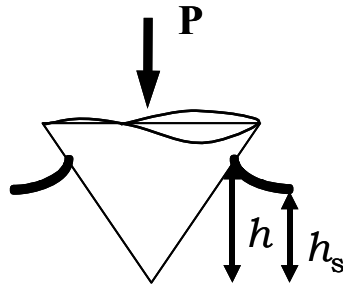


Fig. 1. Parámetros para la evaluación de la deformación en torno a la indentación.

Fig. 1. Parameters for evaluation of the deformation around the indentation.

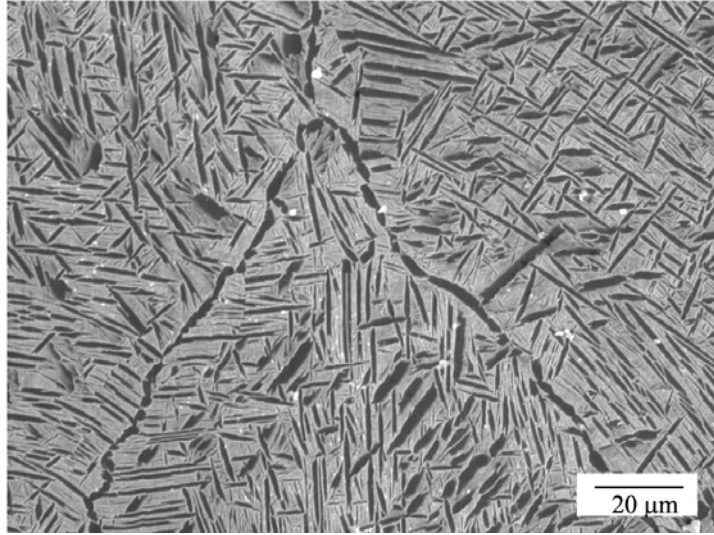
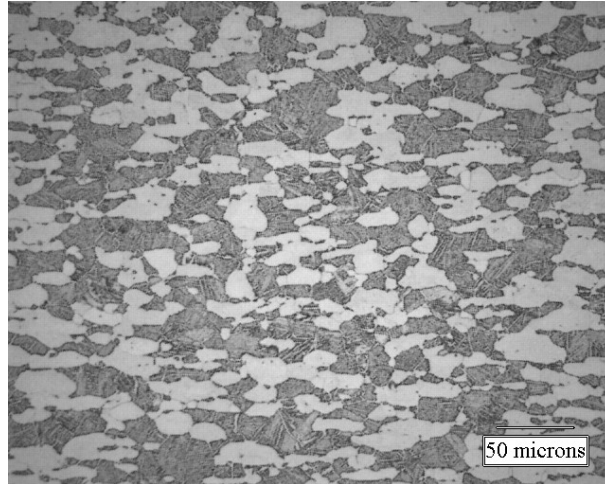
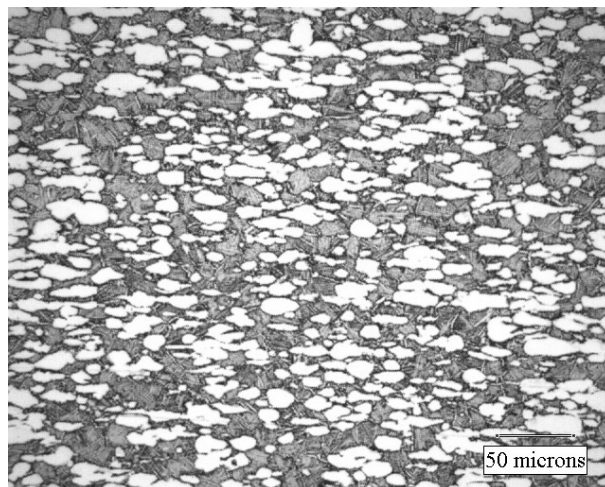


Fig. 2 Microestructura de la aleación Ti-6246, metalografía mediante MEB

Fig. 2 Microstructure of Ti-6246 alloy, scanning electron micrograph.



(a)



(b)

Fig. 3 Microestructura mediante MEB de las aleaciones correspondientes a los álabes.

(a) Ti-64 (b) Ti-6242

Fig. 3 SEM micrographs of blade titanium alloys microstructure.

(a) Ti-64 (b) Ti-6242

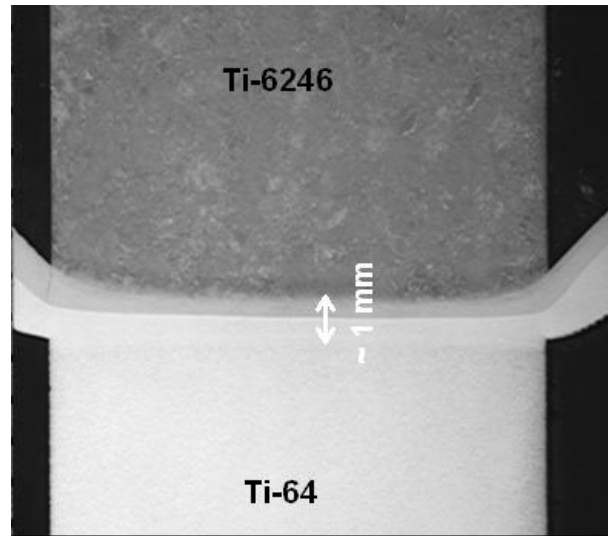


Fig. 4 Macrografía de la unión soldada Ti-6246 + Ti-64

Fig. 4 Macrograph of the cross section of welded joint Ti-6246+Ti-64

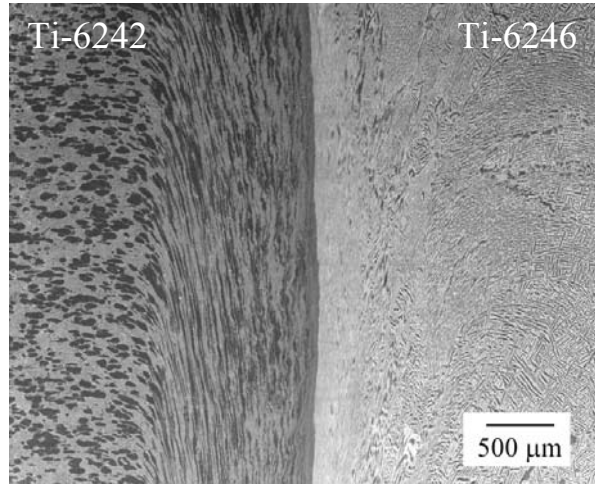


Fig. 5 Micrografía de la unión soldada Ti-6246+Ti-6242

Fig. 5 Micrographs of the cross section of welded joint Ti-6246+Ti-6242

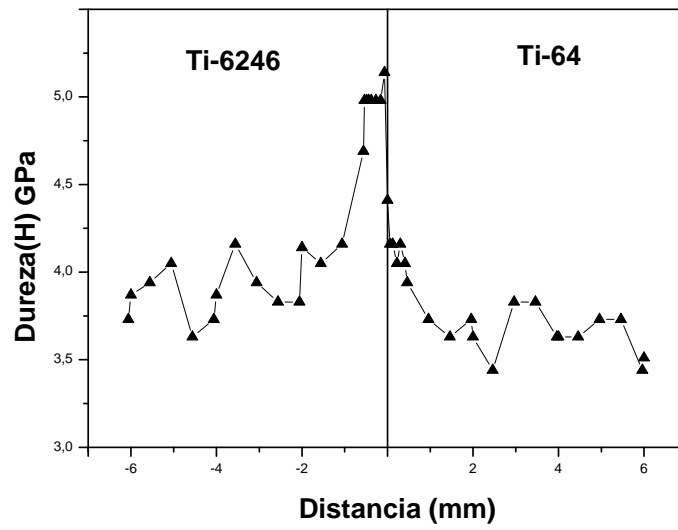


Fig. 6. Perfil de durezas en la soldadura Ti-6246 + Ti-64

Fig. 6. Hardness distribution for the weld Ti-6246 + Ti-64

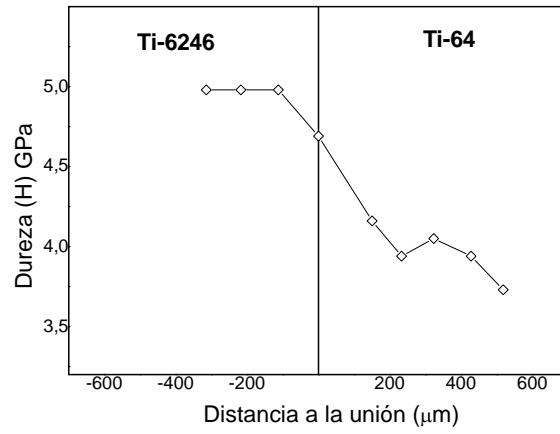


Fig. 7. Evolución de la dureza a lo largo de la ZAT de la unión Ti-6246 +Ti-64

Fig. 7. Hardness evolution across the HAZ for joint Ti-6246 +Ti-64

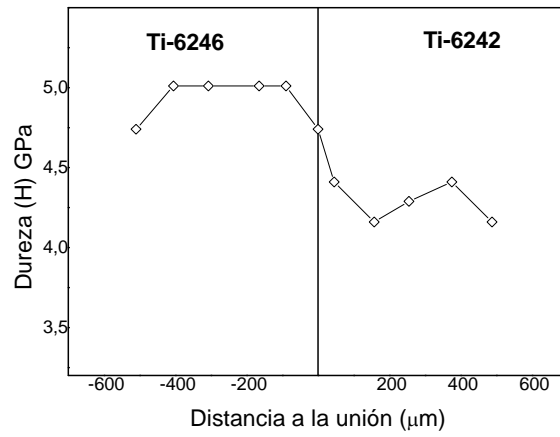


Fig. 8. Evolución de la dureza a lo largo de la ZAT de la unión Ti-6246 +Ti-6242

Fig. 8. Evolution of hardness in the HAZ for joint Ti-6246 +Ti-6242

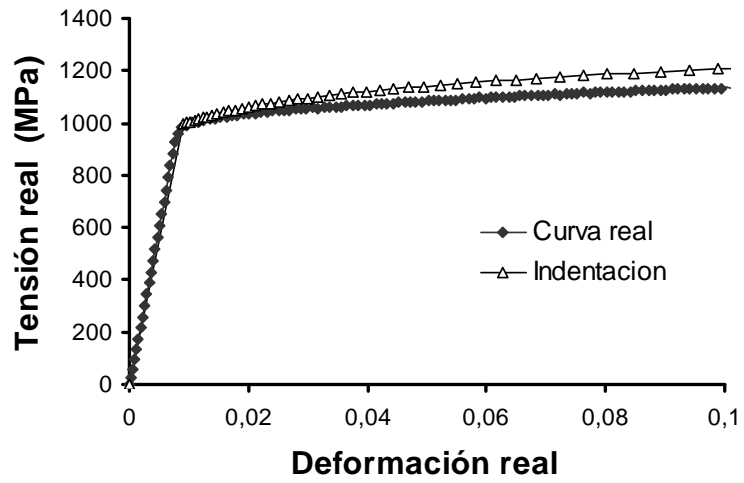


Fig. 9. Curvas esfuerzo-deformación experimental y numérica para la aleación Ti-64

Fig. 9 Stress–Strain plot showing the comparison between experimental and numerical results for alloy Ti-64

Tabla I. Propiedades mecánicas estimadas mediante indentación

Table I. Estimation of mechanical properties by indentation methodology

	Disco	Álabe		Unión	
	Ti-6246	Ti-64	Ti-6242	Ti-6246 + Ti-64	Ti-6246 + Ti-64
σ_{ys} (MPa)	1317	1079	1147	1968	1907
n	0,07	0,11	0,09	0,03	0,03

Tabla II. Resultados experimentales de los ensayos de tracción de uniones y metales base

Table II. Experimental results from tensile test of welds and base metals

	Límite Elástico σ_{ys} (MPa)	Resist. Máxima R_m (MPa)	Elongación (%)	Zona de Rotura
Ti-6246 + Ti-6242	1026	1093	12	Metal base Ti-6242
				$\sigma_{ys} = 1037$
Ti-6246 + Ti64	986	1032	14	Metal base Ti-64
				$\sigma_{ys} = 982$

Tabla III. Comparación de propiedades mecánicas uniaxiales para la aleación Ti-64

Table III. Correlation between uniaxial mechanical properties for alloy Ti-64

	Resultados Experimentales	Metodología de indentación	Metodología de indentación corregida por fricción
σ_{ys} (MPa)	982	1074	996
n	0,06	0,10	0,08

RELACIÓN PIE DE FIGURAS

Fig. 1. Parámetros para la evaluación de la deformación en torno a la indentación.

Fig. 1. Parameters for evaluation of the deformation around the indentation.

Fig. 2 Microestructura de la aleación Ti-6246, metalografía mediante MEB

Fig. 2 Microstructure of Ti-6246 alloy, scanning electron micrograph.

Fig. 3 Microestructura mediante MEB de las aleaciones correspondientes a los álabes.
(a) Ti-64 (b) Ti-6242

Fig. 3 SEM micrographs of blade titanium alloys microstructure.

(a) Ti-64 (b) Ti-6242

Fig. 4 Macrografía de la unión soldada Ti-6246 + Ti-64

Fig. 4 Macrograph of the cross section of welded joint Ti-6246+Ti-64

Fig. 5 Micrografía de la unión soldada Ti-6246+Ti-6242

Fig. 5 Micrographs of the cross section of welded joint Ti-6246+Ti-6242

Fig. 6. Perfil de durezas en la soldadura Ti-6246 + Ti-64

Fig. 6. Hardness distribution for the weld Ti-6246 + Ti-64

Fig. 7. Evolución de la dureza a lo largo de la ZAT de la unión Ti-6246 +Ti-64

Fig. 7. Hardness evolution across the HAZ for joint Ti-6246 +Ti-64

Fig. 8. Evolución de la dureza a lo largo de la ZAT de la unión Ti-6246 +Ti-6242

Fig. 8. Evolution of hardness in the HAZ for joint Ti-6246 +Ti-6242

Fig. 9. Curvas esfuerzo-deformación experimental y numérica para la aleación Ti-64

Fig. 9 Stress–Strain plot showing the comparison between experimental and numerical results for alloy Ti-64

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla I. Propiedades mecánicas estimadas mediante indentación

Table I. Estimation of mechanical properties by indentation methodology

Tabla II. Resultados experimentales de los ensayos de tracción de uniones y metales base

Table II. Experimental results from tensile test of welds and base metals

Tabla III. Comparación de propiedades mecánicas uniaxiales para la aleación Ti-64

Table III. Correlation between uniaxial mechanical properties for alloy Ti-64