

TENACIDAD A LA FRACTURA DE UNIONES SOLDADAS DE CHAPAS GRUESAS DE TITANIO DE PUREZA COMERCIAL.

A.M Irisarri, I. Eizaguirre, F. Santamaría y L.M. Plaza

INASMET c. Portuetxe 12. 20009 San Sebastián

Resumen. Se ha analizado el comportamiento frente a la fractura de las uniones soldadas de chapas de 12 mm de espesor de titanio de pureza comercial por los procesos de soldadura por arco bajo gas de protección, soldadura por plasma-arco o soldadura por haz de electrones. La máxima tenacidad se consigue en la unión por haz de electrones con valores que superan claramente a los del metal base. También la soldadura por plasma-arco conduce a unos valores superiores a los del base aunque inferiores a los de la unión por haz de electrones. Por el contrario, las uniones por arco bajo gas presentan una tenacidad ligeramente inferior a la del material base.

Abstract. The fracture behaviour of 12 mm thick plates of commercially pure titanium welded by gas tungsten arc welding, plasma arc welding or electron beam welding has been studied. Maximum toughness was achieved in the joints carried out by electron beam welding with values which are even clearly higher than those measured in base material. Plasma arc weld metal also exhibits toughness values higher than those of the base material but lower than electron beam weld metal ones. On the other hand, gas tungsten arc weldments possess a toughness slightly lower than base material.

1.- INTRODUCCION

El titanio de pureza comercial se ha hallado disponible en forma de productos laminados desde los años 50 en que se desarrolló debido a la demanda de la industria aerospacial de un material que fuera más ligero que el acero pero más resistente al calor que las aleaciones de aluminio. En muchas aplicaciones aeronáuticas se ha visto superado por sus aleaciones que poseen una mayor resistencia mecánica o un mejor comportamiento frente a la fluencia aunque continúa teniendo una cierta aplicación en componentes no estructurales. Sin embargo, su uso se ha incrementado notablemente en otros campos tales como industria química, aplicaciones marinas, cambiadores de calor, recipientes criogénicos, componentes para procesado químico y equipo de desalinización, tubos de condensadores, cestas para el decapado, ánodos, ejes, bombas, vasijas y sistemas de tubería o simplemente, dado su tono brillante y excelente comportamiento frente a la corrosión con fines ornamentales [1].

El titanio de pureza comercial se suele clasificar en cuatro grados en función de su contenido en elementos residuales y, fundamentalmente, en oxígeno. Un aumento de estos elementos incrementa la resistencia mecánica del material tanto a temperatura ambiente como elevada pero con la contrapartida de una menor ductilidad. Los grados de menor resistencia mecánica se usan en aquellas aplicaciones donde el buen comportamiento frente a la corrosión y la óptima capacidad deban primar sobre las características mecánicas. Por el contrario, cuando se prevén

solicitaciones más fuertes sobre la pieza y se puede aceptar un ligero sacrificio de ductilidad se optará por aquellos otros grados que poseen una mayor resistencia [2]. De todos estos materiales es sin duda el denominado titanio grado 2 que ofrece un compromiso entre las propiedades arriba mencionadas el más ampliamente utilizado.

El titanio de pureza comercial resulta relativamente fácil de soldar siempre y cuando se adopten las oportunas precauciones. Dado el breve periodo de tiempo que las uniones soldadas permanecen dentro del margen de temperaturas de fragilización en el curso del enfriamiento éstas resultan prácticamente inmunes a un proceso de agrietamiento en caliente [3]. Tampoco la segregación de elementos, inherente a cualquier estructura de solidificación como es el caso de las uniones soldadas, resulta muy acentuada en el caso de las aleaciones de titanio y ejerce un efecto mínimo sobre las propiedades mecánicas [4].

Sin embargo, el titanio es un metal altamente reactivo a temperaturas superiores a 300° C, lo cual supone un fuerte riesgo de captación de oxígeno, nitrógeno o hidrógeno de la atmósfera circundante durante el proceso de soldadura. Estos elementos se disuelven intersticialmente en el metal alterando de forma sustancial sus propiedades. La entrada de pequeñas cantidades de oxígeno y nitrógeno elevan la dureza del metal notablemente en tanto que la disolución de hidrógeno reduce acentuadamente la tenacidad y aumenta la sensibilidad a la entalla de la aleación [5].

Otro riesgo que presenta la realización de uniones soldadas en estos materiales es la aparición de defectos de soldadura que reduzcan considerablemente las prestaciones de la junta. La porosidad es el defecto más acusado. Pese a los numerosos estudios que se han efectuado para encontrar el origen de estos defectos las opiniones son bastante contradictorias. La teoría más ampliamente admitida las atribuye a burbujas de gas siempre presentes en el metal de soldadura aunque su incorporación o no a la unión depende de su movilidad y, por tanto, de las condiciones de soldadura [3]. Sin embargo, en tanto que de acuerdo con ciertos trabajos la formación de estos poros se atribuye al hidrógeno que se halla disuelto en el metal base y que es refundido en el proceso de soldadura en otras publicaciones se niega que la presencia de este elemento sea la causa de la porosidad, siempre y cuando su contenido se mantenga por debajo de las 150 ppm [5].

En cualquier caso resulta evidente que se debe evitar la captación de elementos desde la atmósfera circundante en el curso de la soldadura. Esto obliga a proteger la unión mientras permanece caliente, labor que puede efectuarse soldando bajo vacío o mediante un gas inerte de alta pureza que aisle la pieza de la atmósfera aunque la posibilidad de utilizar un proceso de soldadura con arco sumergido ha sido indicada en algunos trabajos publicados [6]. En el caso de optar por una protección de gas inerte ésta se puede conseguir gracias al empleo de una cámara o en el caso de que la soldadura se realice al aire suministrando un adecuado flujo de gas por medio de un dispositivo móvil que acompaña a la antorcha durante el proceso de unión.

Los procesos de soldadura por arco utilizando un gas de protección han demostrado su eficacia para la consecución de uniones soldadas de titanio y sus aleaciones con la fiabilidad requerida. Los tres procesos normalmente empleados son el de electrodo de wolframio no consumible (GTAW), el de electrodo consumible (GMAW) y el plasma arco (PAW). Por su parte, el proceso de soldadura por haz de electrones (EBW) es muy apropiado para la soldadura de estos materiales puesto que el alto grado de vacío de la cámara donde se realiza la unión impide la contaminación del metal líquido o aún caliente.

Finalmente, conviene recordar que las prestaciones en servicio de las uniones soldadas depende de las estructuras de solidificación. Se han propuesto diferentes métodos para conseguir una microestructura más fina de la zona de fusión tales como agitación magnética, oscilación del arco, pulsos de alta y baja frecuencia, inoculaciones, chorros de gas inertes o combinaciones de los mismos. En general, todas estas técnicas han fallado en la consecución de un grano más fino. El único método que ha logrado un cierto éxito es

el minimizar el tamaño de la zona de fusión y el tiempo de crecimiento de grano en la zona afectada térmicamente mediante el empleo de un menor aporte térmico [4]. Sin embargo, no se debe olvidar que es necesario que este aporte térmico ha de ser suficientemente elevado para conseguir una penetración total [7].

El objetivo del presente trabajo es la consecución de unas uniones soldadas de chapas gruesas de 12 mm de espesor de titanio de pureza comercial por diferentes procesos de unión con unos adecuados niveles de tenacidad.

2.- TECNICA EXPERIMENTAL

El material elegido para el presente estudio consistió en una chapa de titanio de pureza comercial, correspondiente al Grado 2 según la norma ASTM B265 [8]. La composición química y las características mecánicas de esta chapa en sus direcciones longitudinal y transversal se ofrecen en las tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1.- Composición química de la chapa de titanio de pureza comercial estudiada

| Refer. | C | O | N | H | Fe | Ti |
|--------|------|------|-------|--------|------|-------|
| Gr 2 | 0.02 | 0.14 | 0.014 | 0.0020 | 0.12 | Resto |

Tabla 2.- Características mecánicas de la chapa en las direcciones longitudinal y transversal

| Orient. | L.E (MPa) | C.R (MPa) | Alarg.(%) |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| Long. | 383 | 480 | 26.6 |
| Trans. | 480 | 529 | 26.9 |

Sobre muestras extraídas de esta chapa se realizaron diversas uniones soldadas en su dirección transversal. La soldadura por arco bajo argón (GTAW) se efectuó en posición horizontal, con corriente continua y polaridad directa. El principal suministro de gas se efectuó a través de una boquilla de 19 mm de diámetro, utilizando argón de alta pureza. Por su parte, el metal depositado recién solidificado, y aún caliente, y la raíz de la unión también fueron adecuadamente protegidos. En el primer caso, el gas se insufló a través de un dispositivo construido especialmente con este fin que sigue a la antorcha en su desplazamiento. La protección de la raíz de la unión y del metal base adyacente se logró gracias a un suministro adicional de argón de alta pureza. De esta forma se garantiza que el metal caliente se halla protegido hasta que se ha enfriado hasta una temperatura por debajo de los 300° C.

El metal de aporte usado en estas uniones consistió en una varilla de 2.5 mm de diámetro de titanio grado 2. Se emplearon dos procedimientos de soldadura diferentes. En el primero de ellos, designado como S.F. se utilizó un perfil en doble V, introduciendo un inserto de varilla en la raíz de la junta. En el segundo, referencia H.I, se efectuó una unión a tope con chaflanes formando ángulos de 90°, con un mayor aporte térmico, y no utilizando ningún tipo de inserto en la raíz. En ambos casos la unión se ha realizado en varias pasadas; 8 en el caso del procedimiento S.F y 6 en el del H.I.

La soldadura por plasma - arco (PAW) se diferencia del proceso anterior en el uso de una boquilla constrictora que rodea al electrodo de wolframio empleado para crear el necesario arco eléctrico. El denominado gas de orificio, que se suministra a través de esta boquilla constrictora se ioniza para formar el plasma que fluye a través del pequeño orificio de salida de la misma para formar una columna de plasma. Esta columna de plasma, de forma cilíndrica, a causa de su estrechez concentra una gran densidad de energía, lo que se traduce en una temperatura más elevada y un mayor poder de penetración. Ello permite unir en una sola pasada las mismas chapas que por el proceso GTAW requería numerosas pasadas, sin necesidad de preparar ningún tipo de chaflán sino que las uniones se realizaron a tope, sin separación, con bordes mecanizados por fresado a 90°. Las probetas unidas por este proceso se referenciaron como PAW.

La unión por el proceso de soldadura por haz de electrones también se ha efectuado utilizando dos procedimientos diferentes. El aclor suministrado a la junta se controla a través de cuatro parámetros: corriente del haz, voltaje de aceleración, tamaño del haz y velocidad de soldadura. En ambos casos la unión se realizó en una sola pasada con la única diferencia de que en el procedimiento de referencia Ti-1 el enfoque del haz se hizo en la superficie de la chapa en tanto que en el Ti-2 este enfoque se efectuó a 2mm de la superficie.

De las muestras testigo soldadas por los diversos procedimientos se extrajeron probetas prismáticas mecanizadas en la dirección longitudinal de la chapa, de dimensiones 110x24x12 y situada la entalla de tal forma que la fractura progrese en la dirección del cordón, esto es poseen la orientación L-T. En las uniones de referencia PAW la entalla de las probetas se situó en el metal depositado o en la zona afectada térmicamente. Esta fue también la técnica empleada en el caso de las uniones S.F o H.I pero dada la forma de la unión soldada (doble V) resulta evidente la imposibilidad de situar la totalidad de la entalla en la zona afectada térmicamente y, en parte, se hallará sobre el metal depositado. En las uniones por haz de electrones, dada

la estrechez de la zona afectada térmicamente, resultó prácticamente imposible lograr probetas en que la entalla, y sobre todo la posterior grieta generada por fatiga en el fondo de la misma, se mantuvieran dentro de esta zona afectada térmicamente, motivo por el cual los resultados registrados no se consideran validos y no han sido incluidos en el presente trabajo.

Estas probetas fueron sometidas a esfuerzos alternados de fatiga con el fin de crear una grieta aguda en el fondo de la entalla mecanizada. Los ensayos por doblado en tres puntos de las probetas así preagrietadas se realizaron a temperaturas comprendidas en el margen de temperaturas entre - 60 y + 20° C conforme a las indicaciones de la norma BS 7448 Part 1 [9].

3.- RESULTADOS Y DISCUSION

Las figuras 1 a 3 presentan los resultados obtenidos en los ensayos de las probetas que han sido extraídas de las uniones por GTAW, PAW y EBW, respectivamente. En esta última se han incluido también los valores registrados en el ensayo de las probetas de material base, con orientación L-T, para permitir establecer las oportunas comparaciones.

Se aprecia claramente que los mejores resultados se obtienen en las probetas soldadas por haz de electrones y, más concretamente, por el procedimiento Ti-1, llegando a triplicar, en algunos casos, los registrados en el material base. La tenacidad no parece verse afectada por la temperatura de ensayo puesto que la posible disminución en el valor registrado a temperaturas más bajas es sensiblemente inferior a la fuerte dispersión existente. Esta dispersión constituye el más serio inconveniente de las uniones efectuadas por este procedimiento.

Con el fin de mejorar la uniformidad de resultados se modificaron las condiciones de soldadura en el procedimiento referenciado como Ti-2. Los resultados obtenidos en estas uniones resultan muchísimo más homogéneos que los del procedimiento anterior y aunque no se alcanzan unos valores tan elevados como los valores máximos de aquel se sitúan por encima de los valores mínimos y siempre por encima de los del material base. En este caso, tampoco se aprecia ningún efecto de la temperatura de ensayo sobre la tenacidad, aspecto muy favorable para aquellos equipos que hayan de operar en condiciones criogénicas.

Esta mayor tenacidad del metal fundido con respecto al material base ha sido atribuida a la microestructura acicular del primero frente a la equiaxial del segundo. La presencia de estas agujas obliga a la fractura a seguir un camino mucho más sinuoso en su propagación,

elevando la tenacidad de la unión. El examen de las superficies de fractura en el microscopio electrónico de barrido revela una topografía rugosa, con huellas evidentes de que la grieta ha contorneado muchas de las agujas existentes, especialmente aquellas que se encontraban en una orientación desfavorable con respecto a la dirección de propagación de la grieta.

El proceso de soldadura por haz de electrones conduce, por tanto, a unas uniones con una elevada tenacidad que se mantiene a bajas temperaturas. Sin embargo, este proceso presenta el serio inconveniente de requerir una cámara de alto vacío lo que lo convierte en inaplicable para soldaduras de campo. Por este motivo, parece lógico explorar otras alternativas.

La soldadura por plasma - arco también conduce a valores de tenacidad superiores a los del material base aunque inferiores a los de soldadura por haz de electrones. En este caso, se observa una ligera merma de la tenacidad del metal depositado conforme disminuye la temperatura de ensayo. El estudio metalográfico pone de manifiesto la microestructura acicular del metal depositado por este proceso que se asocia con la mejora de tenacidad con respecto al material base. Más conflictivo resulta el encontrar una explicación a la mayor tenacidad de las uniones por haz de electrones con respecto a la producida por plasma - arco ya que ambas poseen una microestructura acicular. Una posibilidad lógica se halla en la diferente morfología y, quizás, naturaleza de las agujas formadas en uno u otro caso. La medida de durezas Vickers con una carga de 10 Kg de carga (HV10) conduce a unos valores ligeramente superiores en las uniones por haz de electrones frente a las de plasma - arco (210 frente a 190 HV10) que apunta hacia la existencia de una cierta diferencia entre ambas uniones.

Así mismo, en la figura 2 se aprecia la existencia de un valor anormalmente bajo en la probeta que ha sido ensayada a -20°C . Este valor es el mínimo entre todos los registrados para cualquier procedimiento o temperatura de ensayo. El examen de la probeta correspondiente a este ensayo en el microscopio electrónico de barrido revela la existencia de un defecto de soldadura situado muy próximo a la grieta de fatiga, generada en el fondo de la entalla, que justifica el bajo valor de tenacidad registrado. Sin embargo, éste se debe considerar un fallo puntual que no debe afectar a la calificación global del procedimiento.

Los valores de tenacidad en la zona afectada son incluso ligeramente superiores a los del metal depositado, pudiéndose ofrecer una explicación similar ya que la microestructura de esta zona es también acicular.

Por el contrario, las probetas con la entalla situada en el metal depositado por el proceso de soldadura por arco bajo gas inerte exhiben una tenacidad ligeramente inferior a la registrada en el metal base, independientemente de cual sea el procedimiento de soldadura empleado. Parece detectarse una ligera disminución de la tenacidad conforme la temperatura de ensayo es más baja. Los valores medidos en las probetas de referencia H.I son menores que los de las uniones S.F. pero mucho más homogéneos. El uso de un mayor aporte térmico parece por tanto desfavorable desde el punto de vista de conseguir una mayor tenacidad pero permite lograr unas uniones mucho más homogéneas, con un menor contenido en defectos de soldadura. Este resultado se halla en total acuerdo con las conclusiones alcanzadas por otros investigadores [7] en el sentido de recomendar el uso del menor aporte térmico posible pero que sea a su vez capaz de garantizar que se logra una penetración total.

La menor tenacidad de estas uniones con respecto al material base pudiera resultar sorprendente si se tiene en cuenta que el examen metalográfico de las probetas revela que el metal depositado presenta también una microestructura acicular y la superficie de fractura de las probetas una topografía bastante similar a las anteriores. Este hecho parece contradecir la hipótesis formulada asociando los mayores valores de tenacidad con una microestructura acicular del material.

Sin embargo, la presencia de defectos de soldadura en estas uniones, especialmente en la de referencia S.F donde se aprecia una acusada falta de fusión en algunas probetas, facilita la propagación de la fractura y disminuye los valores de tenacidad registrados. En el estudio del comportamiento a fatiga de estas uniones también se observó un notable efecto de la presencia de estos defectos, duplicándose el valor del exponente de la ley de Paris [10] que indica la notable influencia de los mismos sobre las propiedades de las uniones que puede llegar a superar la ejercida por la microestructura acicular.

En una de las muestras soldadas por el procedimiento H.I. se produjo una falta momentánea en el suministro del gas de protección. Como consecuencia se produjo una cierta oxidación de las uniones soldadas, que fueron referenciadas como OX. Estas muestras presentan una tonalidad azulada, confirmando la oxidación del metal. Los ensayos realizados sobre probetas extraídas de esta chapa, con la entalla en el metal depositado condujeron a un valor de CTOD de 0.087 mm a temperatura ambiente, 0.105 a -20°C y 0.093 a -60°C . Es decir, los resultados no parecen verse afectados por la temperatura aunque se aprecia una disminución, del orden de un 40 % con respecto a los registrados en las uniones adecuadamente protegidas.

Por su parte, las probetas con entalla en la zona afectada térmicamente ofrecen unos valores similares a los del metal base. Sin embargo, conviene recordar que el perfil en doble V de la junta conducía a que la entalla se encontrara situada en parte fuera de la zona afectada térmicamente, penetrando en el material base en la parte central de la probeta y en el metal depositado en las proximidades de ambas superficies. Por tanto, los valores registrados no se pueden considerar como absolutamente representativos de la tenacidad de la zona afectada.

4.- CONCLUSIONES

a.- Las uniones por haz de electrones poseen la máxima tenacidad entre todas las analizadas superando los valores registrados en el material base. Una modificación en las condiciones de soldadura permite conseguir unos valores más homogéneos.

b.- Los valores de tenacidad medidos en las uniones por plasma - arco también superan a los del material base pero resultan inferiores a los de haz de electrones. Las uniones por plasma - arco o haz de electrones presentan una microestructura acicular a la que se ha atribuido la mayor tenacidad respecto al material base. Variaciones en la morfología y naturaleza de estas agujas pudiera justificar las diferencias existentes entre estas uniones.

c.- Las uniones por arco bajo gas inerte presentan unos valores de tenacidad ligeramente inferiores a los del material base. Este hecho que pudiera resultar sorprendente dada la microestructura acicular de estas uniones se considera que es debido a la presencia de defectos de soldadura que aceleran la fractura. El empleo de un mayor aporte térmico disminuye la tenacidad media de la unión pero permite la consecución de un mayor grado de homogeneidad en los resultados, gracias a un menor número de defectos de soldadura.

d.- Las probetas con entalla en la zona afectada térmicamente poseen una tenacidad ligeramente superior a los del material base. Sin embargo, en las uniones por el proceso GTAW los valores registrados en la zona afectada y material base son muy similares, debido en gran parte a la imposibilidad de situar la totalidad de la entalla en esta zona afectada térmicamente a causa del perfil de la junta.

e.- La oxidación accidental del metal depositado conduce a una merma de la tenacidad del orden del 40%. La tonalidad azulada de estas muestras constituye un "aviso" de la condición en que se encuentran las uniones.

5.- AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) por la ayuda prestada a los proyectos MAT 92-0078 y MAT 95-1963E de los cuales se ha extraído el presente trabajo así como el apoyo ofrecido por el Gobierno Vasco al mismo. Así mismo se debe destacar la contribución de G. Atxaga en la preparación de este documento.

6.- REFERENCIAS

- [1] Commercially Pure and Modified Titanium. Materials Properties Handbook. Titanium Alloys, 167 ASM International. Materials Park Ohio. 1994.
- [2] Irisarri A.M. Metalurgia del Titanio y sus Aleaciones. INASMET 1992.
- [3] V.N. Zamkow. Critical Review; Welding and Brazing of Titanium Alloys. Titanium Science and Technology Vol2, 771-782, DGM Oberursel, 1985.
- [4] Becker D.W, Messler R.W. y Baeslack III W.A. Titanium Welding - A Critical Review. Titanium '80 Science and Technology Vol1, 255-275 The Metallurgical Society of AIME. Warrendale, 1980.
- [5] Welding Handbook. 7th Edition. Vol.4, Metals and their Weldability, 434-473. American Welding Society, 1982.
- [6] Mayra S.K. Le Maitre F, Priem F y Frayret J.P. On the Submerged Arc Welding of Thick TA6V Plates using a New Welding Flux. Titanium Science and Technology Vol 2, 823-830, DGM Oberursel, 1985.
- [7] Mayra S.K. Elahonel A. y Le Maitre F. Effect of Process Parameters on GTA Welding of a Titanium TA6V Alloy. Proceedings of the Sixth World Conference on Titanium. Cannes. Vol II, 1221-1226. Societé Française de Metallurgie, 1988.
- [8] ASTM B265 Standard Specification for Titanium and Titanium Alloys Sheet Strip and Plates. Annual Book of Standards. Vol 02.04.
- [9] BS 7448. Part 1 Methods for Determination of K_{IC} , Critical CTOD and Critical J Values for Metallic Materials. British Standard Institution, Londres, 1991.
- [10] Plaza L.M e Irisarri A.M. Anales de Mecánica de Fractura Vol 10, 306-311, 1993.

Figura 1.- Efecto de la temperatura sobre la tenacidad de las uniones soldadas por el proceso GTAW.

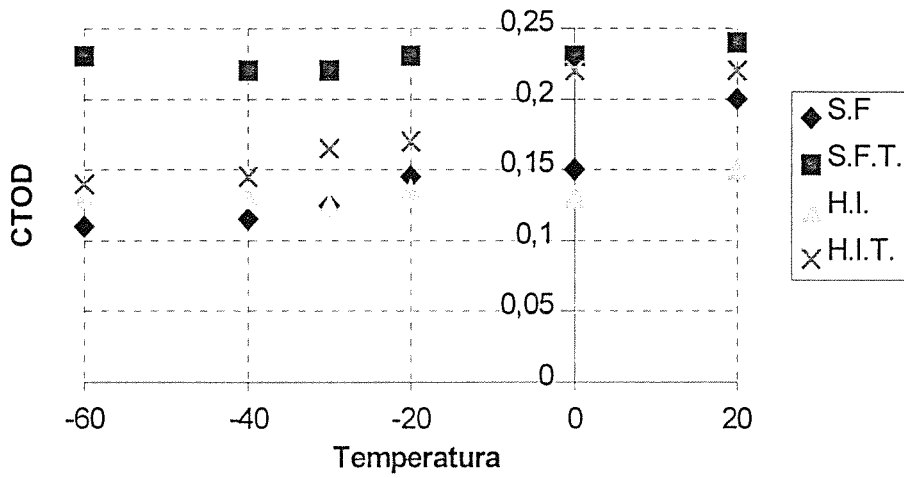


Figura 2.- Efecto de la temperatura sobre la tenacidad de las uniones soldadas por el proceso PAW.

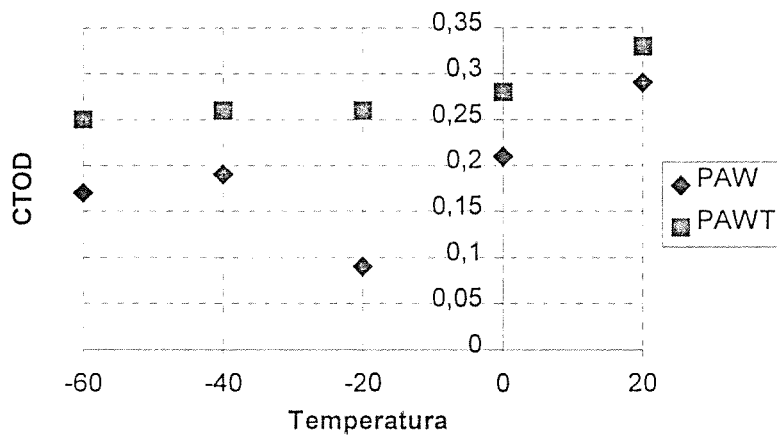


Figura 3.- Efecto de la temperatura sobre la tenacidad de las uniones soldadas por el proceso EBW. Se incluyen también los datos del material base en la orientación L-T para facilitar la comparación.

