

## PROBLEMATICA ASOCIADA A LA DETERMINACION DE LA TENACIDAD DE LAS ZONAS AFECTADAS TERMICAMENTE DE LAS UNIONES SOLDADAS

F.J.Belzunce, C.Rodríguez y M.J.Cotarelo

Instituto Tecnológico de Materiales  
Parque Tecnológico, 33428 Llanera, Asturias

**Resumen.** Se plantea la problemática que surge a la hora de comparar los resultados de tenacidad obtenidos tanto mediante el uso de ensayos de impacto sobre probetas entalladas como de ensayos de mecánica de la fractura elastoplástica sobre las zonas afectadas térmicamente de uniones soldadas de acero. Se ha determinado el perfil de durezas de una unión soldada mediante el procedimiento de arco sumergido de un acero microaleado al niobio-vanadio utilizado en aplicaciones "off-shore", la curva de transición de la tenacidad de la ZAT obtenida a partir de ensayos de impacto y los valores críticos del CTOD e integral J medidos a  $-10^{\circ}\text{C}$ .

**Abstract.** The problems derived from the correlation between toughness results obtained by means of notched specimens impact testing and elastoplastic fracture mechanics tests in the case of heat affected zones of welded samples is described. A niobium-vanadium microalloyed steel sheet used in off-shore applications has been welded using a submerged arc procedure. The hardness heat affected zone profile, the impact toughness transition and the critical values of CTOD and J at  $-10^{\circ}\text{C}$  have been obtained.

### 1. INTRODUCCION

El conocimiento de la tenacidad en presencia de grietas de las uniones soldadas es un tema de capital importancia en ingeniería ya que, por un lado, la utilización de este tipo de uniones es enorme (especialmente a la hora de realizar grandes estructuras como puentes, barcos, plataformas off-shore, recipientes a presión, etc.) y por otro, el propio proceso de unión introduce defectos que inevitablemente forman parte de la estructura final. Los métodos de inspección y control mediante ensayos no destructivos y destructivos permiten detectar los defectos más importantes y repararlos, pero no hay que olvidar que cualquier método de inspección empleado tiene una sensibilidad o límite de detección que nos impide asegurar la inexistencia de defectos inferiores al citado límite. Por otro lado las uniones soldadas dan lugar a unas microestructuras muy heterogéneas (especialmente en la zona afectada térmicamente) que dificultan enormemente la determinación de un valor característico de la tenacidad de la unión, de tal manera que no existe en la actualidad ningún método o ensayo normalizado que nos permita

determinar la tenacidad en presencia de grietas de una unión soldada. Sin embargo, algunos laboratorios de reconocido prestigio en este campo como The Welding Institute [1], el International Institute of Welding [2] o el American Petroleum Institute [3] han desarrollado documentos y recomendaciones para la determinación de la tenacidad de las uniones soldadas de aleaciones metálicas.

En el trabajo que se presenta a continuación se expone la problemática inherente a la caracterización de la tenacidad de uniones soldadas de acero de alto límite elástico y baja aleación.

### 2. MATERIAL Y PROCEDIMIENTO DE SOLDEO

El material utilizado en este trabajo ha sido una chapa de acero microaleado al niobio-vanadio de 30 mm de espesor obtenida por laminación convencional seguida de normalizado. Su composición química y propiedades a tracción se muestran en la Tabla 1.

constituida por barras de un diámetro determinado. La medida de la deformación es otra dificultad en estos ensayos, puesto que suele resultar muy complejo instrumentar las probetas con bandas extensométricas, debido al pequeño tamaño de la zona disponible.

Por todo lo anterior, son muy pocos los resultados que pueden encontrarse en la literatura sobre las propiedades dinámicas de este tipo de materiales compuestos con un contenido en fibra tan elevado. Los escasos resultados existentes se refieren fundamentalmente a materiales compuestos de fibra de vidrio o carbono [5 a 7], por lo que este trabajo puede aportar resultados interesantes para aquellos que realicen diseños con estos materiales compuestos de fibra de aramida o polietileno.

**2. MATERIALES.**

Los materiales ensayados en este trabajo han sido: tres tejidos de fibra de aramida (A/PP, A/PET1 y A/PET2) y dos de fibra de polietileno (tejido SK66 y compuesto unidireccional UD66). En la tabla 1 se recogen las características de los materiales ensayados, mientras que la tabla 2 da cuenta de los procedimientos de fabricación de cada material.

**3. TECNICA EXPERIMENTAL.**

Se han realizado ensayos de tracción a tres velocidades de deformación diferentes (aproximadamente  $10^{-3}$ , 1 y  $10^3$  s<sup>-1</sup>). Para los ensayos estáticos y los de velocidad intermedia se ha empleado una máquina convencional de ensayos INSTRON 8501, en la que se registró la fuerza mediante una célula de carga de 5 kN, y el desplazamiento relativo del cabezal de la máquina. Las velocidades de toma de datos fueron 1 dato/s y 1000 datos/s para los ensayos lentos e intermedios, respectivamente. Los ensayos a alta velocidad de deformación se realizaron en una barra de Hopkinson. La probeta del material a ensayar se une a dos barras de acero según indica la figura 1. En esta situación se genera una onda de tracción mediante el impacto de un proyectil, que se propaga por la primera barra hasta que alcanza la probeta, donde se ve parcialmente reflejada en esa misma barra y parcialmente transmitida a la segunda. Midiendo mediante bandas extensométricas las ondas de tensión incidente, reflejada, y transmitida puede determinarse la tensión y deformación en la probeta suponiendo condiciones de equilibrio, deformación uniforme y propagación unidimensional de ondas de tensión [8].

Material	Matriz	Fibra	Tipo de refuerzo	Densidad areal (kg/m <sup>2</sup> )	Contenido en fibra (% en peso)	Porosidad (% en volumen)
A/PP	Polipropileno (PP)	Aramida 336 tex (*)	Tejido 0 # 90	2.31	76	5.2
A/PET1	Polietilentereftanato (PET)	Aramida 336 tex (*)	Tejido 0 # 90	2.15	81	17
A/PET2	Polietilentereftanato (PET)	Aramida 336 tex (*)	Tejido 0 # 90	2.53	67	4.6
SK/66	Polietileno (PE)	Polietileno 0.97 g/cm <sup>3</sup>	Tejido 0 # 90	0.71		
UD/66	Polietileno (PE)	Polietileno 0.97 g/cm <sup>3</sup>	Unidireccional 0 // 90	0.61		

(\*) El número de tex es el peso en g de 1000 m de hilo.

**Tabla 1.** Características principales de los materiales ensayados.

Material	Proceso de fabricación
A/PP	1) Bolsa de vacío a 300 Pa absolutos 2) Autoclave. Curado: 2 horas a 110 °C y 5 bares 3) Autoclave. Estabilizado: 5 min. a 195°C y 19 bares
A/PET1	1) Bolsa de vacío a 300 Pa absolutos 2) Autoclave. Curado: 1 hora a 150 °C y 5 bares 3) Autoclave. Estabilizado: 5 min. a 280°C y 10 bares
A/PET2	1) Bolsa de vacío a 300 Pa absolutos 2) Autoclave. Curado: 2 horas a 150 °C y 5 bares 3) Autoclave. Estabilizado: 5 min. a 280°C y 19 bares
SK/66	Presado con platos calientes durante 20 min. a 120 °C Y 25 kg/cm <sup>2</sup>
UD/66	Presado con platos calientes durante 20 min. a 120 °C Y 25 kg/cm <sup>2</sup>

**Tabla 2.** Procedimientos de fabricación de cada material de los utilizados

Por otra parte, la probeta utilizada en los ensayos se representa en la figura 2. Partiendo de una placa inicial se fabricaron las probetas mediante corte de chorro de agua a presión. Finalmente, en la figura 3 pueden apreciarse los detalles de las mordazas empleadas para la unión de las probetas a la máquina de ensayos y a la barra de Hopkinson. Puesto que el tamaño de las

probetas es relativamente pequeño se realizó una serie de ensayos estáticos con probetas estándar, cuatro veces mayores, con la intención de comparar los resultados. En esta última serie de ensayos las probetas se fijaron a la máquina con mordazas tradicionales y no se observó un cambio sustancial en los resultados.

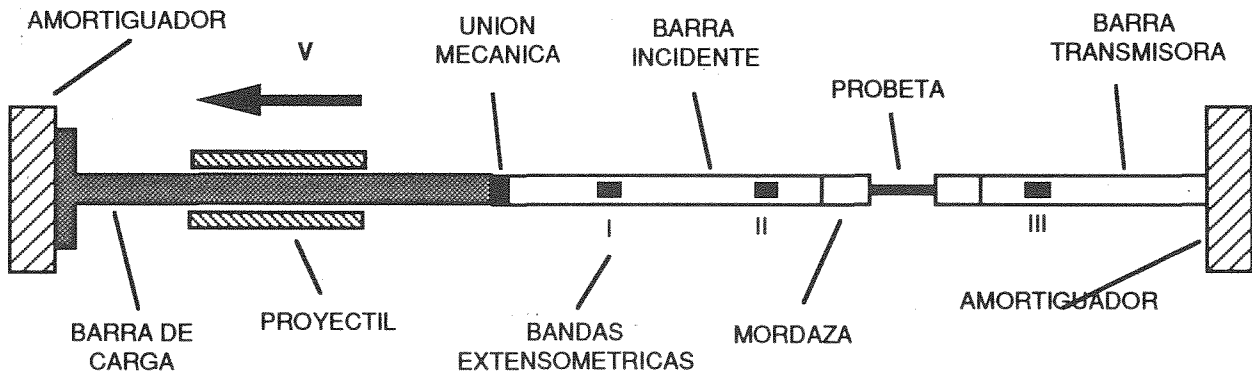


Figura 1. Dispositivo experimental para ensayos dinámicos.

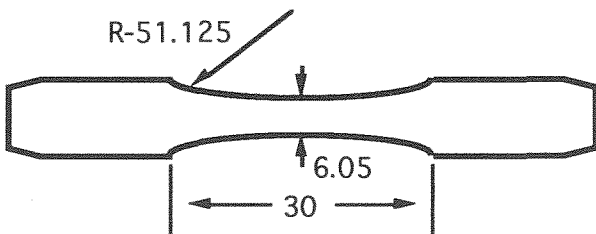


Figura 2. Esquema de la probeta utilizada (dimensiones en mm).

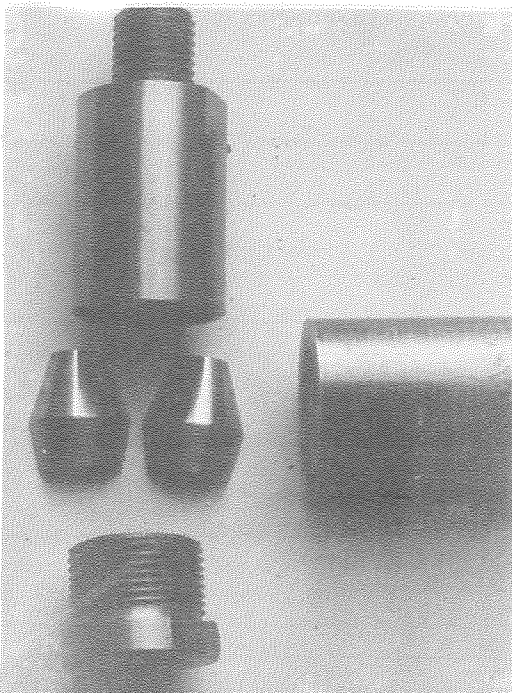


Figura 3. Imagen de las mordazas utilizadas

#### 4. RESULTADOS.

En la tabla 3 se presentan los resultados medios de la tensión de rotura, deformación de rotura y velocidad de deformación para los distintos materiales y condiciones. Así mismo, se añaden las dispersiones que afectan a estos valores medios en cada condición. No se aportan resultados a  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  para el material UD/66 porque resultó imposible romper las probetas a esta velocidad de deformación. Durante estos ensayos las capas internas resbalaron respecto de las externas unidas a las mordazas.

Las gráficas de las figuras 4 y 5 muestran las variaciones de la tensión de rotura y deformación de rotura con la velocidad de deformación, respectivamente.

En la figura 6 se comparan, como ejemplo, las curvas tensión-deformación a las tres velocidades de deformación para el material A/PET1.

#### 5. DISCUSION.

Antes de entrar en discusión sobre los resultados obtenidos debe hacerse notar que en la tabla 3 se han incluido únicamente aquellos datos que corresponden a ensayos en los que el proceso de rotura es claramente de tracción. No están, por tanto, incluidos los ensayos donde el aspecto final de las probetas sugiere un proceso de rotura mezcla de tracción y lo que se conoce como "pull out" (rotura de parte de algunas fibras y deslizamiento de las restantes).

Las variaciones de la tensión de rotura con la velocidad de deformación tienen tendencias similares a las encontradas en materiales más tradicionales, si bien el aumento de la tensión de rotura en condiciones dinámicas es espectacular para la mayoría de los materiales ensayados (Figura 4) Es de destacar el aumento de aproximadamente el 75 % observado en los materiales compuestos de fibra de polietileno. La situación intermedia de los valores encontrados para los ensayos a velocidades de deformación medias aportan confianza sobre los resultados dinámicos determinados en la barra de Hopkinson. Por otra parte, este aumento con la velocidad de deformación está en la línea de lo encontrado por otros investigadores en materiales compuestos distintos (menor contenido en fibra), pero utilizando las mismas técnicas experimentales [4 a 7].

Desafortunadamente, las variaciones de la deformación de rotura con la velocidad de deformación resultan mucho menos fiables, dado que el proceso de medida de esta magnitud es indirecto a través del desplazamiento del cabezal de la máquina o del desplazamiento relativo de las barras de carga dinámica. En cualquier caso, aunque sólo sea de modo cualitativo, se observa una tendencia general al descenso de esta magnitud con el aumento de la velocidad de deformación. Obviamente, la instrumentalización de las probetas con bandas extensométricas sería la solución a adoptar para aumentar el grado de confianza de los resultados de la deformación, aunque debe recordarse que el pequeño tamaño de las probetas dificulta en gran medida esta alternativa. En cualquier caso, es en esta dirección en la que deben centrarse los esfuerzos de mejora, salvo que

Velocidad de deformación	10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>		1 s <sup>-1</sup>		10 <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	
	Tensión (MPa)	Deformación	Tensión (MPa)	Deformación	Tensión (MPa)	Deformación
A/PP	495 S = 6%	0,069 S = 12%	518 S = 16%	0,068 S = 9%	575 S = 12%	0,039 S = 21%
A/PET1	270 S = 3%	0,047 S = 12%	331 S = 7%	0,050 S = 4%	405 S = 4%	0,009 S = 15%
A/PET2	377 S = 1%	0,066 S = 11%	474 S = 4%	0,058 S = 5%	510 S = 19%	0,029 S = 21%
SK/66	405 S = 6%	0,102 S = 8%	460 S = 7%	0,064 S = 4%	631 S = 14%	0,025 S = 15%
UD/66	-----	-----	372 S = 9%	0,053 S = 19%	654 S = 7%	0,016 S = 21%

Tabla 3. Resultados medios obtenidos en los ensayos de tracción a diferentes velocidades de deformación.

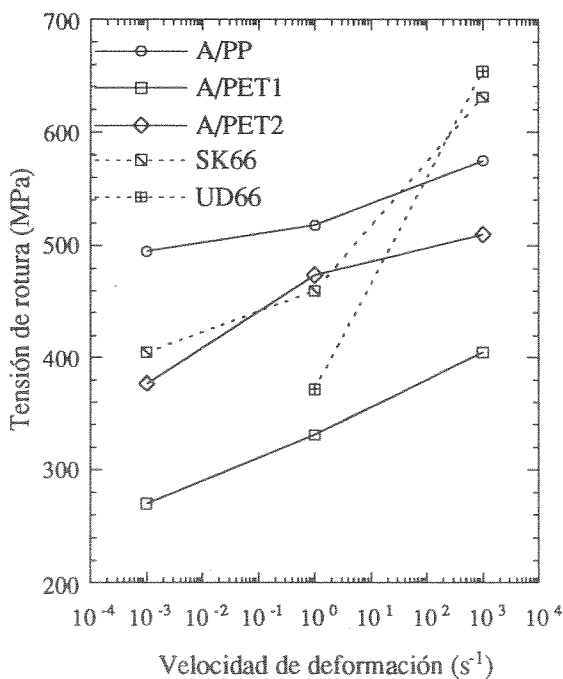


Figura 4. Variación de la tensión de rotura con la velocidad de deformación.

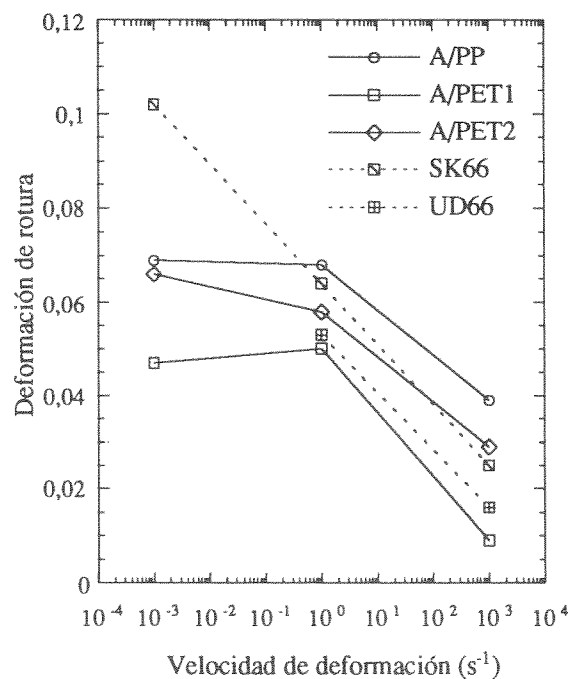


Figura 5. Variación de la deformación de rotura con la velocidad de deformación.

podieran incorporarse técnicas ópticas con la rapidez adecuada para seguir el proceso de deformación a altas velocidades.

Por otra parte, debe llamarse la atención sobre el comportamiento no lineal de estos materiales compuestos. Como ponen de manifiesto las curvas tensión-deformación mostradas en la figura 6, existe una zona inicial en la que el tejido parece estar "colocándose" en la posición adecuada para soportar un mayor nivel de la fuerza exterior aplicada. Una vez superada esta fase la respuesta del material es bastante lineal. La fase inicial solo esta presente en los ensayos estáticos e intermedios y esta circunstancia explicaría el descenso de la deformación de rotura

Por último, en cuanto a los valores de la velocidad de deformación debe aclararse que el valor presentado en las tablas de resultados corresponde al valor medio en el momento de la rotura del material. El tipo de comportamiento de estos materiales (Figura 6) tiene como consecuencia un aumento continuo de la velocidad de deformación durante el ensayo. Este hecho introduce una nueva incógnita en los resultados, puesto que no puede asignarse un valor a la velocidad de deformación del ensayo en su conjunto.

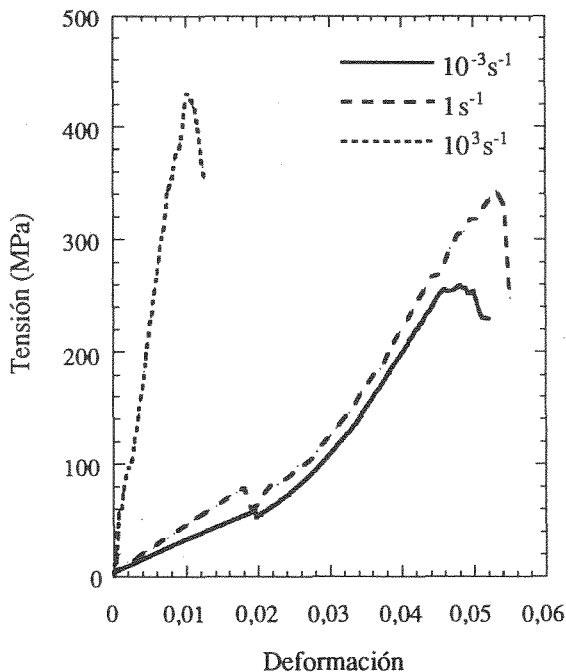


Figura 6. Curvas tensión deformación para el A/PET1 a diferentes velocidades de deformación.

## 6. CONCLUSIONES.

A la vista de los resultados obtenidos en este trabajo pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- La velocidad de deformación tiene una influencia notable en el comportamiento de los materiales

compuestos ensayados. La tensión de rotura aumenta con la velocidad de deformación y la deformación de rotura parece reducirse considerablemente.

- Las curvas tensión-deformación dinámicas suelen ser mucho más lineales que las correspondientes a menores velocidades de deformación.

- Los materiales compuestos de fibra de polietileno presentan una mayor dependencia de sus propiedades con la velocidad de deformación que los de fibra de aramida.

- Dentro de los materiales reforzados con fibra de aramida, los mejores resultados se obtienen cuando se utiliza matriz de polipropileno (mayores tensión y deformación de rotura).

**Agradecimientos.** Este trabajo se ha realizado gracias al apoyo económico recibido de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (proyecto MAT92-1022-C02-02) y de la Universidad Politécnica de Madrid (proyecto A94-22).

## 7. REFERENCIAS.

- [1] Abrate S., "Impact on laminated composite materials". Appl. Mech. Rev. 44, 4, 155-186. (1991).
- [2] Dorey G. " An overview of impact damage in composites". Int. Conf. Mech. Prop. Materials at High Rates of Strain. Oxford 395-401 (1989)
- [3] H. Kolsky , "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading". Proc. R. Soc. B.,62, 676.(1949)
- [4] Rodríguez J., Martínez M.A., Cortés R., Sánchez Gálvez V. "Criterios para la realización de ensayos de tracción en metales a altas velocidades de deformación". Anales de mecanica de la Fractura 11 141-147 (1994).
- [5] Lataillade J.L., Delaet M., Collombet F., "Damage testing of crossply laminates under high strain rates". ICCM9, 5 (1993) 358-365.
- [6] Harding J., "Impact of composite structures". Lecture notes for a Short Course on Mech. Prop. Materials at High Rates of Strain. Universidad de Oxford (1992).
- [7] Staab G.H., Gilat A., "High strain rate characterization of angle-ply glass/epoxy laminates". ICCM9, 5 (1993) 278-285.
- [8] J. Harding, E.D. Wood y J.D. Campbell (1960), "Tensile Testing of Materials at Impact Rates of Strain", J. Mech. Eng. Sci., Vol 2, pp 88 to 96.