

ESTUDIO Y SIMULACION, MEDIANTE ENSAYOS DE RASGADURA, DEL MODO DE APERTURA DE TAPAS DENOMINADAS "DE FACIL APERTURA".

A. Monsalve, M. M. Petite, I. Gutiérrez, J.J. Urcola
ETSII y CEIT. Pº de Manuel de Lardizábal 15, 20009 San Sebastián.

J.M. Llano y J.I. Larburu
Altos Hornos de Vizcaya (AHV) C/ Carmen 2, 48901 Baracaldo

Resumen. Se ha evaluado la facilidad de apertura real de tapas comerciales denominadas de "fácil apertura" ó EOE, fabricadas con acero de bajo carbono y con aluminio. Se ha simulado la apertura de tapas "EOE", mediante ensayos de rasgadura que se han diseñado a tal efecto. Los resultados de estos ensayos permiten predecir el comportamiento del material para dicha aplicación, en un paso previo a la fabricación de las tapas. El estudio fractográfico ha permitido establecer los mecanismos que intervienen en este tipo de fractura, gobernada fundamentalmente por un modo III.

Abstract. The openability of commercial easy-open ends, EOE, has been determined for ends made of mild steel and aluminium. The EO End opening has been simulated through tearing tests which have been specially outlined. The results coming from these tests allow to predict the material behaviour for this application before the ends have been made. The fractographic work leads to the understanding of the mechanisms which operate during this type of fracture, mainly governed by a mode III.

INTRODUCCION.

Dentro del grupo de tapas denominadas de "fácil apertura", EOE, hay que distinguir dos grupos. Las de apertura parcial, utilizadas para envases que contienen productos líquidos y las de apertura total aplicadas al envasado de productos más sólidos. De las primeras, la mayor parte se viene fabricando con aluminio, habiéndose incorporado la hojalata a este mercado sólo desde fechas muy recientes. En el caso de las tapas de apertura total se utilizan tanto el aluminio como el acero, [1].

En la selección de los materiales que intervienen en la fabricación de estas tapas deben considerarse varios factores. Algunos de ellos afectan a la fabricación de la tapa, como la textura. Esta debe asegurar un mínimo de embutibilidad que facilite la estampación en prensa y la formación del botón que sujeta la anilla. Otros afectan a la seguridad del envase, entre ellos la resistencia frente a la corrosión y las propiedades mecánicas. Una resistencia mecánica elevada, en el caso del acero, permite minimizar el peso del envase sin peligro de que se deteriore su estanqueidad. En el caso del aluminio, una menor resistencia mecánica se compensa con mayores espesores que si bien pueden aceptarse desde el punto de vista del peso del envase llevan a un mayor precio.

Por último, hay que tener en cuenta que la carga necesaria para la apertura es uno de los factores que

determinan la calidad de las tapas EOE y que normalmente no se llega a conocer hasta el final del proceso de fabricación de las tapas.

El presente trabajo se ha concentrado en el estudio del comportamiento frente a la fractura de tipo III y de los mecanismos de fractura actuantes en cada uno de los dos materiales utilizados tradicionalmente en la fabricación de tapas de apertura total: aluminio y hojalata. Se han diseñado, además, unos ensayos de rasgadura que permiten evaluar el comportamiento del material frente a este tipo de fractura. Los resultados de estos ensayos se han comparado con los procedentes de ensayos de apertura realizados sobre tapas producidas comercialmente.

EXPERIMENTAL.

Se ha utilizado en el presente estudio un acero en forma de hojalata de 218µm de espesor y cuya composición es la siguiente: 0.05%C-0.26%Mn-0.015%P-0.038%Al-0.004%N. Este material ha sido producido por Altos Hornos de Vizcaya (AHV). También se ha utilizado una aleación de aluminio del tipo 5052 con un espesor de 257µm. De los citados materiales se ha contado con chapa y con tapas de diferentes formas. Concretamente, en el caso del acero, las tapas han sido de dos tipos, redondas y rectangulares, como las que se muestran en la Fig. 1. De la aleación de aluminio, arriba mencionada, se ha contado, únicamente, con tapas de tipo rectangular.

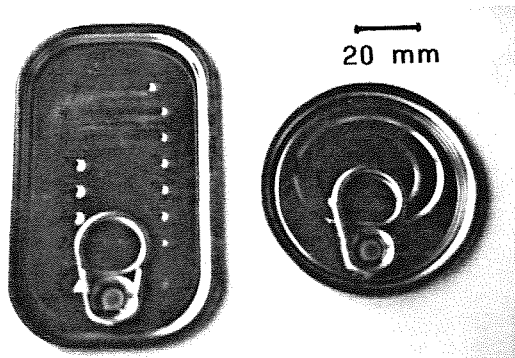


Fig. 1. Tapas comerciales estudiadas en el presente trabajo.

Las citadas tapas fueron fabricadas, todas ellas, por la empresa CMB (Vigo), a partir de los mismos materiales arriba mencionados. Para completar el presente estudio se eligió una tapa de aluminio de forma redonda, de las que se encuentran en el mercado, cuya composición es: 1.9%Mg-0.1%Mn-0.13%Cr-0.28%Fe-0.12%Si y de la que no se conoce su procedencia.

Las curvas carga desplazamiento para la apertura de las citadas tapas se han obtenido mediante una máquina Instron de tracción uniaxial, con la ayuda de un montaje como el que se ilustra en la Fig.2.

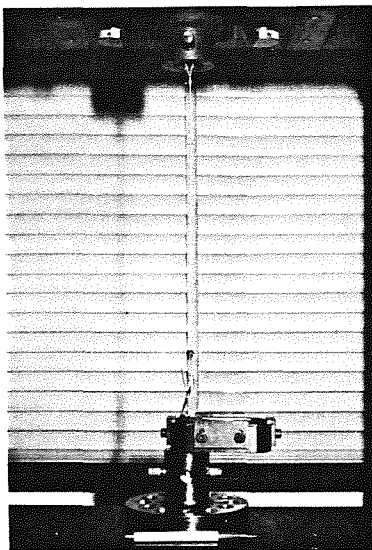


Fig. 2. Dispositivo utilizado en la realización de los ensayos de apertura de tapas.

Se han diseñado unos ensayos sencillos de rasgadura, sobre probetas entalladas, que permiten evaluar el comportamiento, frente a la fractura de tipo III, de una lámina de Al o de acero. En la Fig. 3 se muestra el dispositivo utilizado para la producción de las entallas y la probeta resultante.

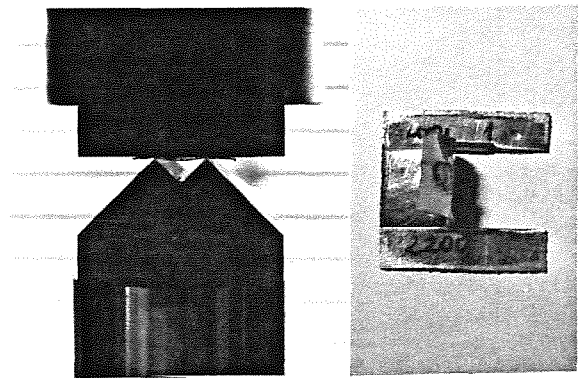


Fig. 3. a) Dispositivo utilizado en la fabricación de las entallas y b) probeta ensayada en rasgadura.

En la Fig. 4 se muestra el ensayo de rasgadura propiamente dicho. Para la realización de las entallas y la obtención de las curvas del ensayo de rasgadura se ha utilizado la misma máquina de tracción uniaxial citada anteriormente.

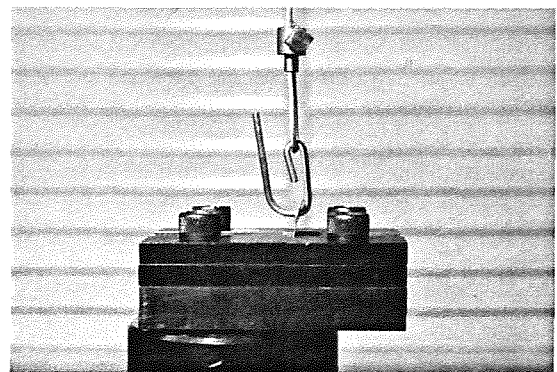


Fig. 4. Dispositivo utilizado en la realización de los ensayos de rasgadura.

La medida de los espesores residuales en el fondo de la entalla se ha realizado mediante un perfilómetro y utilizando un reloj comparador, para el que se ha construido un palpador especial en forma de aguja. En todos los casos, se han contrastado los resultados obtenidos por ambos métodos.

La observación microestructural de los materiales se ha realizado en un equipo STEM CM12 de Philips. El estudio fractográfico se ha realizado en un SEM 501B de Philips.

RESULTADOS Y DISCUSION.

Todas las curvas obtenidas en los ensayos de apertura de tapas tienen la forma mostrada en la Fig. 5. En general, dichas curvas presentan dos picos, el primero de ellos, se forma cuando la anilla alcanza a perforar la tapa y el segundo, más elevado está vinculado con la fuerza necesaria para producir la apertura [2].

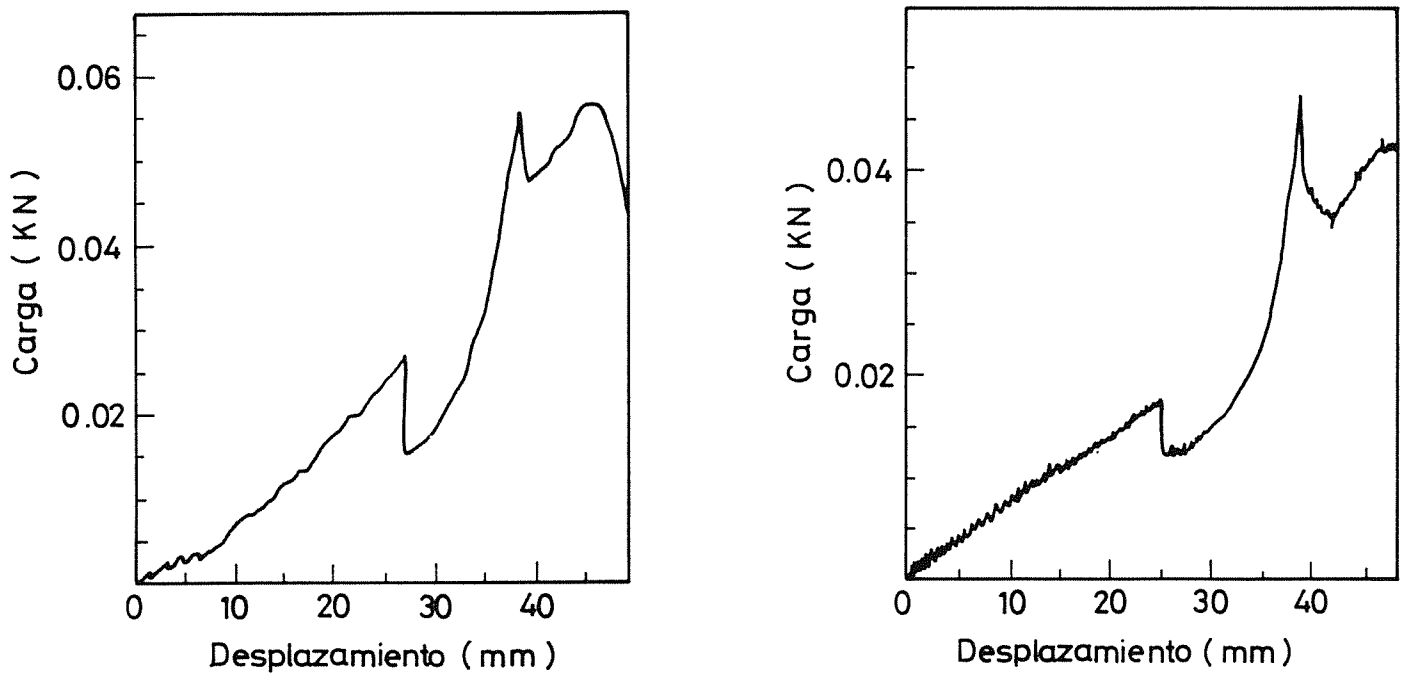


Fig. 5. Curvas resultantes de los ensayos de apertura de tapas de a) acero y b) aluminio.

Estas curvas son muy similares a las obtenidas por Arai y Col. [3] en tapas de apertura parcial. Estos autores obtienen un tercer pico exclusivo del tipo de tapa que estudian y que está asociado no con la apertura, sino con el arranque final de la lengüeta.

A partir de los máximos de los picos se han definido las fuerzas de perforación y de apertura respectivamente. Los resultados de los ensayos realizados sobre diferentes tapas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1.

	FUERZA DE PERFORACION (Kg)	FUERZA DE APERTURA (Kg)
TAPA DE ACERO REDONDA	1.7	5.2
TAPA DE ACERO RECTANGULAR	2	5.2
TAPA DE AI REDONDA	1.8	5.7
TAPA DE AI RECTANGULAR	1.8	4.9

Es de notar que el presente acero tiene un comportamiento, frente a la apertura, muy similar al del aluminio. Sin embargo, no se debe perder de vista

que los espesores residuales del acero, utilizado en la fabricación de las tapas (~86µm), son menores que los del aluminio(~110µm). Por otro lado, no parece que la forma de la tapa haga variar sensiblemente el esfuerzo necesario para su apertura. Esto está sujeto, por supuesto, a un diseño adecuado de la tapa, en cada caso, capaz de resolver otro tipo de problemas geométricos y de distribución de cargas.

CARGA DE RASGADURA VS ESPESOR RESIDUAL Material AHV

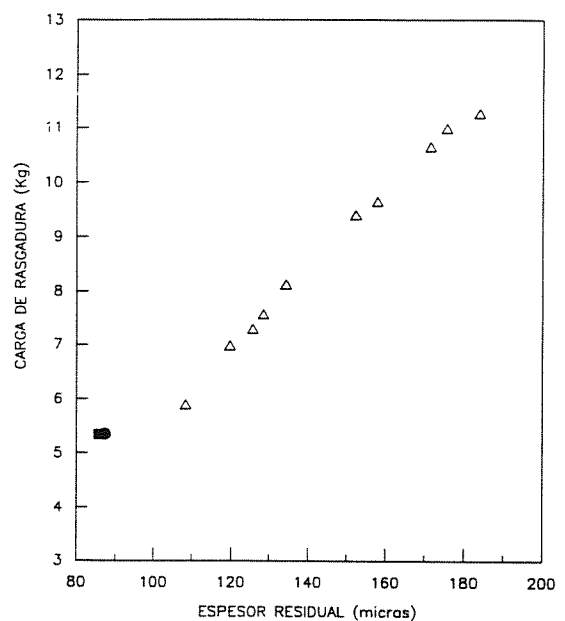


Fig. 6. Carga de rasgadura frente a espesor residual en hojalata. Los puntos negros corresponden a la fuerza de apertura de tapas.

En la Fig. 6 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de rasgadura en hojalata en función del espesor residual de las entallas practicadas. En la misma figura los puntos negros corresponden a la fuerza de apertura de las correspondientes latas. Como se ve, la relación entre carga de rasgadura y espesor residual es aproximadamente lineal, en el rango estudiado. Además, la predicción que se obtiene para el valor de la carga de apertura a partir de los ensayos de rasgadura es razonable. Estos ensayos permiten evaluar, de forma sencilla, una de las propiedades exigibles a un acero en su aplicación a la fabricación de tapas de fácil apertura. Algo que en otro caso no se puede conocer hasta después de que las tapas estén fabricadas. Un estudio similar se está llevando a cabo para el caso del aluminio.

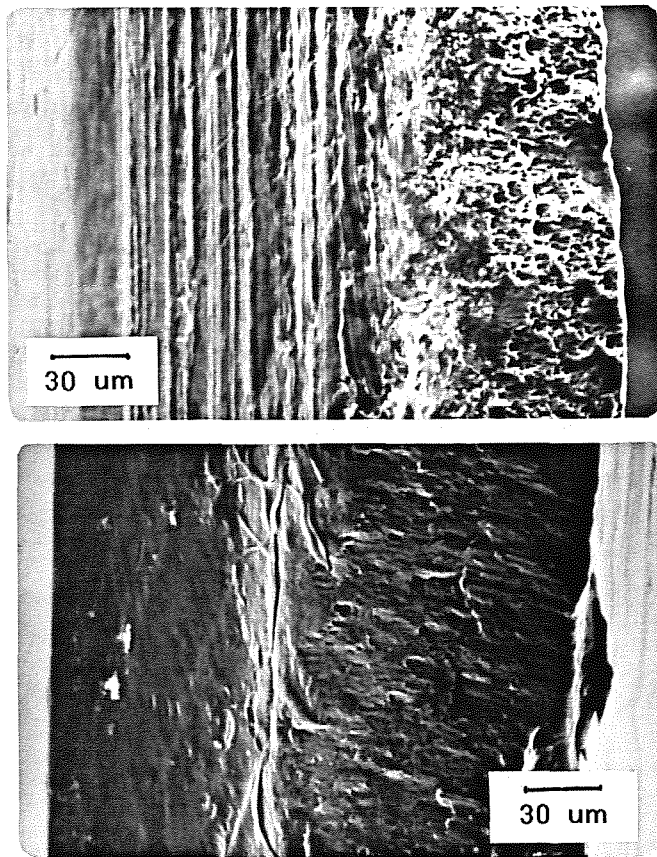


Fig. 7. Imagen de SEM correspondiente al borde de las tapas tras la apertura, a) acero y b) aluminio.

La observación, a través de microscopía electrónica de barrido (SEM), de uno de los bordes que quedan tras la apertura de las tapas, revela la presencia de dos zonas perfectamente definidas. La primera de ellas corresponde a la entalla (izquierda), y la segunda a la superficie de fractura propiamente dicha (derecha), tal como se muestra en la Fig. 7. Es de notar una sensible diferencia entre las superficies de fractura del acero y del aluminio. Dicha diferencia se comenta con mayor detalle a continuación.

Las micrografías de la Fig. 8 muestran las superficies de fractura del acero tras un ensayo de rasgadura y uno de apertura de tapa, respectivamente. Puede verse que ambos ensayos producen superficies de fractura similares. El acero presenta una fractura dúctil con un importante número de cavidades en la superficie de fractura.

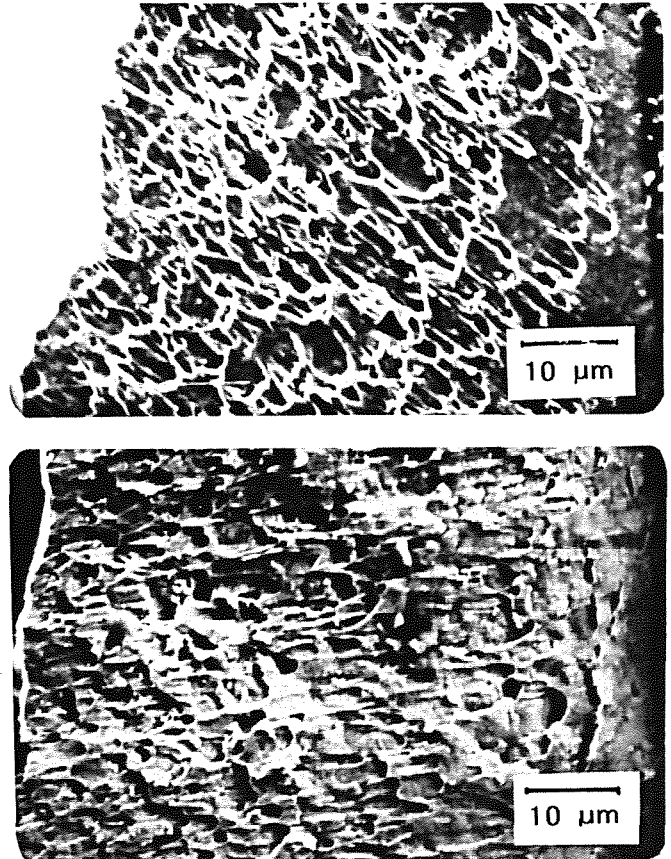


Fig. 8. Superficies de fractura en el acero tras un ensayo a) de rasgadura y b) de apertura.

Estas cavidades son similares a las que se producen en un ensayo de tracción a fractura del mismo material, Figura 9.

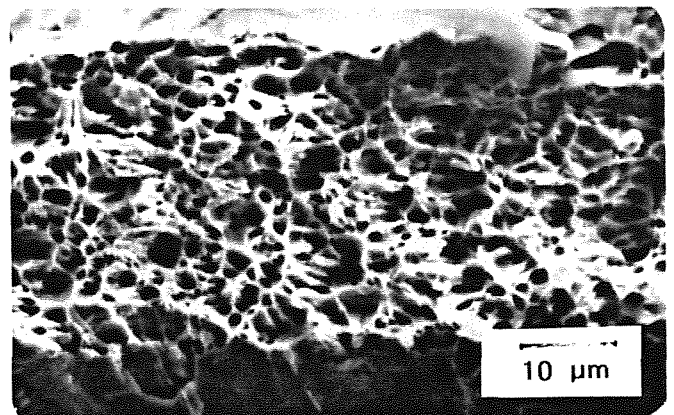


Fig. 9. Superficie de fractura en el mismo acero tras un ensayo de tracción a fractura.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que al ser diferente el modo de fractura en ambos ensayos cambia la forma con la que se observan las cavidades sobre la superficie de fractura.

En el caso del ensayo de rasgadura/apertura las cavidades, de acuerdo con el modo III de fractura aparecen alargadas, lo que indica que ha tenido lugar una importante deformación a cortadura de la matriz antes de llegar a producirse la fractura. Las cavidades presentes en la superficie de fractura del acero están asociadas a partículas de segunda fase con tamaños menores de aproximadamente $1\mu\text{m}$.

Los estudios realizados en microscopía electrónica de transmisión han puesto de manifiesto que estas partículas corresponden a cementitas de forma globular que se encuentran en el acero tal como puede observarse en la Fig. 10.

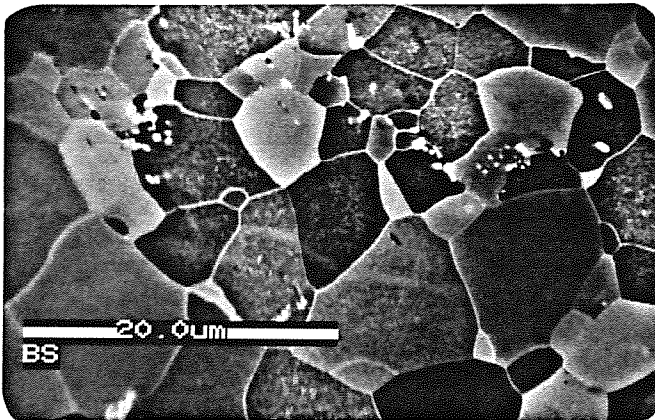


Fig. 10. Micrografía obtenida en modo de barrido en STEM, con electrones primarios, que muestra la microestructura del acero.

Estas partículas actúan como punto de partida para la nucleación de cavidades y en este sentido son beneficiosas en facilitar la apertura, de acuerdo con lo publicado por otros autores [4].

La fractura dúctil se caracteriza por la nucleación, crecimiento y coalescencia de cavidades originadas por la descohesión de partículas de segunda fase. En tracción se han establecido relaciones entre la profundidad o anchura de la cavidad, el tamaño de partícula y la deformación sufrida [5,6].

En el presente caso, se ha determinado la deformación local, a cortadura, de la matriz en la superficie de fractura a partir de la medida del tamaño de las partículas de segunda fase y del de las cavidades, según la siguiente fórmula:

$$\gamma \cong \frac{l}{\phi} \quad (1)$$

l y ϕ se definen en el esquema de la Fig. 11. Según esto, la deformación local a cortadura en la superficie de fractura del presente acero sometido al modo III de fractura puede estimarse en 3.3.

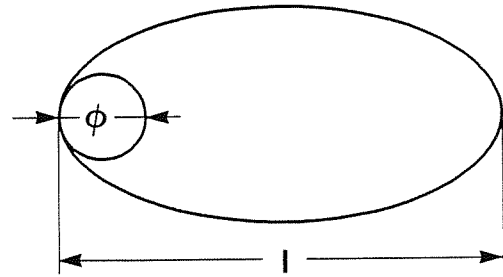


Fig. 11. Esquema en el que se muestra una cavidad producida por cortadura.

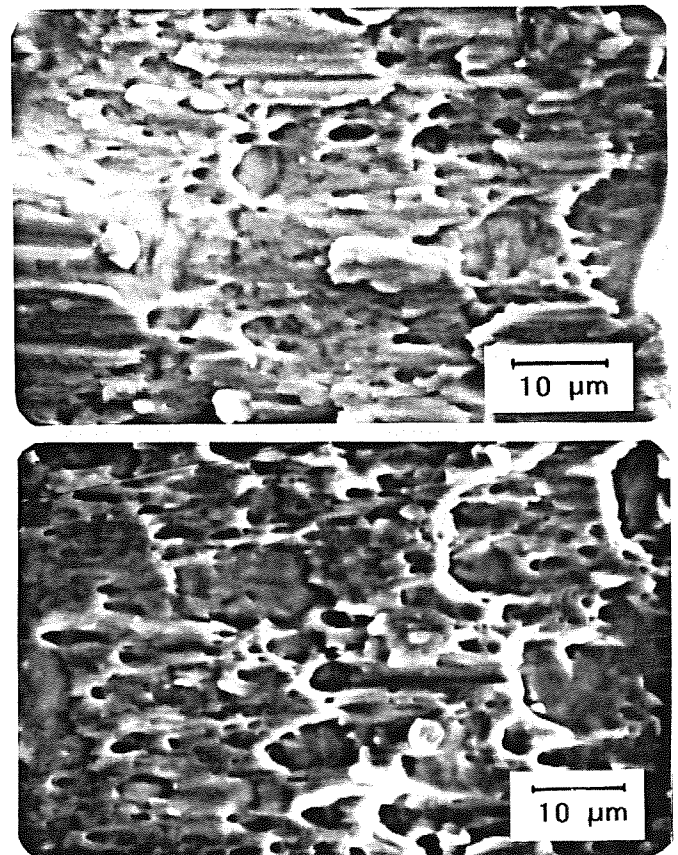


Fig. 12. Superficies de fractura en el aluminio tras un ensayo a) de rasgadura y b) de apertura.

Las fractografías de la Fig. 12 corresponden a las superficies de fractura del aluminio tras un ensayo de rasgadura y uno de apertura de tapa, respectivamente. De nuevo, el aspecto de las superficies de fractura

generadas por ambos ensayos es muy similar. Al igual que en el caso del acero, se observan cavidades formadas en la superficie de fractura, sin embargo, su número es más reducido en el caso del aluminio. La matriz presenta una mayor deformación plástica a cortadura, localizada en la superficie de fractura que puede estimarse de acuerdo con la ecuación (1) en un 5.5. El tamaño de las partículas observadas en la superficie de fractura, con las que se ha efectuado el cálculo anterior, se encuentra entre aproximadamente 0.6 y 1.5 μm .

La micrografía de la Fig. 13 muestra la superficie de fractura obtenida por tracción en el mismo material. En ella se aprecian con mayor claridad, que las cavidades están asociadas con partículas de segunda fase de tamaños que pueden llegar, aproximadamente, a las 3 μm .

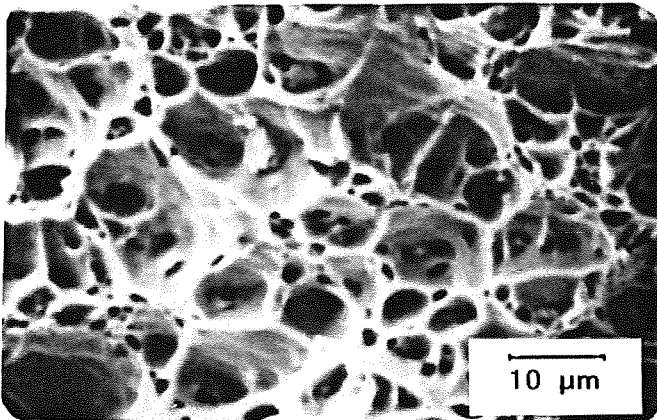


Fig. 13. Superficie de fractura en el mismo aluminio tras un ensayo de tracción a fractura.

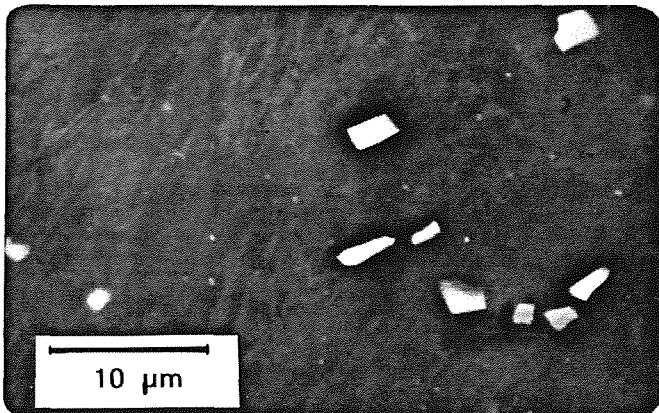


Fig. 14. Micrografía obtenida en modo de barrido en STEM, con electrones primarios, que muestra la microestructura del aluminio.

Las cavidades producidas por tracción a fractura en el aluminio son sensiblemente mayores que las que se observan en el caso del acero. Las partículas que se encuentran en dichas cavidades corresponden con las

observadas en modo STEM en el aluminio, Fig.14, y que adoptan tamaños comprendidos entre aproximadamente 0.5 y 3 μm [7].

Es de notar que en el caso del aluminio los tamaños de las partículas observadas en las cavidades producidas por rasgadura son menores que las presentes en la superficie de fractura a tracción. Esto indica, posiblemente, que en el caso de la fractura en modo III las partículas de mayor tamaño se han desprendido y no aparecen sobre la superficie de fractura.

Si se comparan las propiedades mecánicas a tracción de los presentes materiales resulta que el límite elástico del acero es aproximadamente el doble del correspondiente al aluminio, mientras que la relación entre las resistencias a la tracción es del orden de los 2/3. Sin embargo, el acero muestra una mayor ductilidad que el aluminio.

Tabla 2.

	n	σ_0 (MPa)
ACERO	0.18	629
ALUMINIO	0.10	334

En la Tabla 2 los coeficientes de las dos últimas columnas corresponden a los de la ecuación de Hollomon:

$$\sigma = \sigma_0 \epsilon^n \quad (2)$$

obtenidos a partir de los datos experimentales.

La deformación máxima a cortadura se puede expresar como $\gamma = \epsilon\sqrt{3}$. Calculando a partir de los datos de tracción las equivalentes deformaciones de cortadura necesarias para producir la fractura, se obtienen valores sensiblemente inferiores a los calculados para la deformación local en la superficie de fractura en modo III. Esto, sin embargo, parece lógico y está de acuerdo con lo observado por otros autores [6].

El trabajo total invertido en la etapa de rasgadura al abrir una tapa o en el ensayo de rasgadura sobre chapas se divide en tres componentes. La primera de ellas corresponde al trabajo necesario para producir la curvatura de la chapa. El trabajo necesario, W_1 , para curvar plásticamente una anchura B de chapa de espesor, e_t , hasta un radio de curvatura ρ es, por unidad de longitud [8]:

$$W_1 = \frac{\sigma_0 e_t^{n+1}}{(n+1)(n+2)} \frac{B}{\rho^{n+1}} \quad (3)$$

La segunda componente, W_2 , corresponde a la energía disipada por deformación a cortadura en la zona de la entalla. El volumen sobre el que se aplica será: $2s \cdot t$ por unidad de longitud en la dirección paralela a cada una de las entallas, siendo t el espesor residual y s la anchura de la zona que sufre la cortadura en cada uno de los bordes de la citada entalla. Luego, teniendo en cuenta las dos entallas presentes, resulta:

$$W_2 = 4 \frac{s \sigma_0 \gamma^{n+1}}{(n+1) 3^{\frac{n+1}{2}}} \quad (4)$$

Por último, la tercera componente, W_3 , corresponde a la energía invertida en la fractura, propiamente dicha [8]. De nuevo, dado que se tienen dos entallas, resulta:

$$W_3 = 2 \frac{\sigma_0}{2} \frac{t \gamma^n}{3^{\frac{n+1}{2}}} \quad (5)$$

El trabajo específico de fractura viene dado por la suma de las ecuaciones (4) y (5).

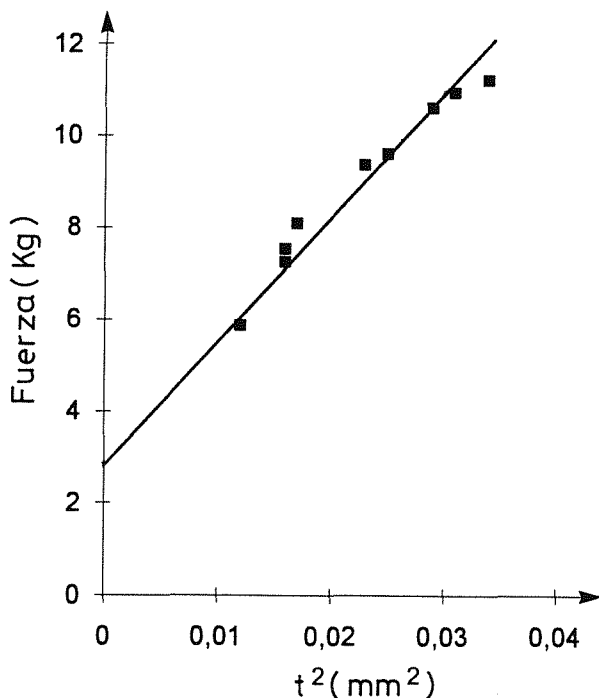


Fig. 15 Fuerza necesaria para la rasgadura en chapas de acero, frente al cuadrado del espesor residual en la entalla.

La fuerza total, P , que es preciso aplicar para producir la rasgadura/apertura puede expresarse como:

$$P = W_1 e_t + (W_2 + W_3) t \quad (6)$$

De acuerdo con la ecuación (5), W_3 es una función lineal de t . Por otro lado, la anchura de la zona afectada por cortadura en cada borde de la entalla, s , resulta difícil de medir, pero puede suponerse que es proporcional al espesor residual, luego W_2 también será una función lineal de t .

De acuerdo con esto último se puede suponer, en primera aproximación, una dependencia lineal entre la fuerza de rasgadura y t^2 , siempre que se mantengan aproximadamente constantes el resto de variables que intervienen en las ecuaciones anteriores. En la Fig. 15 se muestra la citada representación, para los datos de la fig.6 correspondientes a los ensayos de rasgadura efectuados sobre chapas de acero. Los puntos de la gráfica pueden ajustarse, por una recta de pendiente igual a 266 Kg/mm^2 y de ordenada en el origen igual a 2.83 Kg .

En la Tabla 3 se recogen los valores calculados a partir de las ecuaciones (3), (4) y (5) y de los resultados experimentales obtenidos a partir de los ensayos de tracción y que se muestran en la Tabla 1. La observación de las muestras ensayadas a rasgadura revela bordes poco deformados. Esto indica que la deformación a cortadura sufrida, en el presente caso, por el material durante la fractura en modo III está muy localizada. Por ello se han tomado como deformaciones de cortadura, γ , los valores obtenidos experimentalmente sobre la superficie de fractura.

Tabla 3.

		B/ ρ (mm)	W_1 (Kg/mm) Ec. (3)	W_2 (Kg/mm) Ec.(4)	W_3 (Kg/mm) Ec.(5)
ACERO	Rasgadura	10/3	11.3	465 S	41.6 t
	Apertura	54/14	9.96	465 S	3.57
ALUMINIO	Apertura	54/14	9.8	442 S	2.43

De todo ello resulta para el ensayo de rasgadura en chapa de acero un valor para el producto $W_1 e_t$ de 2.46 Kg . Este valor es muy próximo al obtenido para la ordenada en el origen de la recta de la Fig. 15. Por otro lado, a partir de la pendiente de la citada recta y de los valores para W_2 y W_3 que se muestran en la

Tabla 3 se puede deducir que $s \cong 0.5 t$. Con este valor de s , la ecuación (6) y los datos de la tabla 3 correspondientes al acero y al aluminio resultan unas fuerzas para la apertura de tapas de 4.2 y 5.5 Kg respectivamente. Estas fuerzas son próximas a las deducidas experimentalmente en los ensayos de apertura de tapas, ver Tabla 1.

Es de notar que el valor de s deducido en el presente trabajo es inferior al obtenido por otros autores [8] que encuentran que $s=2t$. Esto, sin embargo, es lógico al trabajarse en el presente caso con materiales que presentan una entalla previa. Esta entalla posibilita la concentración de tensiones y la localización de la deformación en una zona más estrecha. Es precisamente esta localización de la deformación en una zona muy pequeña la que hace, entre otros factores, que los bordes no presenten un aspecto cortante, tras la apertura/rasgadura.

CONCLUSIONES.

- Las tapas EOE de acero y de aluminio pueden presentar características similares de apertura, siempre que se elijan adecuadamente los materiales.
- Es posible, mediante un ensayo sencillo de rasgadura, efectuado sobre chapa, predecir el comportamiento frente a la apertura de las futuras tapas.
- El mecanismo actuante en la apertura de tapas, es análogo al que opera en el ensayo de rasgadura y consiste en nucleación y crecimiento de cavidades, de acuerdo con un modo dúctil de fractura.
- Las deformaciones locales en la superficie de fractura en modo III son superiores a las deformaciones macroscópicas alcanzadas en los ensayos de tracción.
- El cálculo teórico del trabajo necesario para producir la fractura en apertura/rasgadura muestra un buen ajuste con los datos deducidos de los ensayos de apertura/rasgadura.

AGRADECIMIENTOS.

Al personal de la empresa CMB de Vigo y en particular al Sr. T. Somohano por su amable colaboración.

REFERENCIAS.

- [1] E. Morgan "Tinplate and Modern Canmaking Technology" Pergamon Press, Oxford, (1985).
- [2] Informe CEIT del proyecto de investigación, "Optimización de Hojalata para Tapa de Fácil Apertura", en colaboración con AHV, Diciembre, (1992).
- [3] Arai N., Tsujumura S. y Asano H., "Steel for Easy-Open Ends of Pressure Cans", Nippon Steel technical Report, 30, 50-58, (1986).

[4] Arai N. y Asano H., "Improvement of Steel Structure for Easy Open End", Trans ISIJ, 24, B-216, (1984).

[5] Thompson A.W. y Ashby M.F., "Fracture Surface Micro-Roughness" Scripta Met., 18, 127-130, (1984).

[6] Viviente J.L., Rodríguez-Ibabe J.M., Martín A., Gil-Sevillano J. y Fuentes M., "Medida Local de la Deformación Crítica Necesaria para el Inicio de la Propagación Ductil de Grietas en un Acero A533B-1" Anales de Mecánica de la Fractura, 3, 179-189, (1986).

[7] Cavallini H., Tesis Master en curso, ETSII, San Sebastián.

[8] Mai Y.W. y Cotterell B., "The Essential Work of Fracture for Tearing of Ductile Metals", Int. J. of Fracture, 24, 229-236, (1984).