

## OBSERVACIONES SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS A TRACCIÓN DE PROBETAS PM DE BASE ALUMINIO ALEADO MECÁNICAMENTE

J.M. GALLARDO, J.A. RODRÍGUEZ Y E.J. HERRERA

Universidad de Sevilla  
Grupo de Metalurgia e Ingeniería de los Materiales  
E.T.S.I. Industriales, Avda. Reina Mercedes s/n, 41012 Sevilla.

**Resumen.** Un nuevo procedimiento de consolidación de polvos de base aluminio aleados mecánicamente, consistente en un doble ciclo de prensado en frío y sinterización en vacío, se está desarrollando en nuestro laboratorio. La necesidad de utilizar altas presiones de compactación (1300 MPa) ha llevado al uso de probetas de tracción más pequeñas que las normalizadas. Dos tipos de probetas, en las que la forma queda determinada por los punzones o la matriz, respectivamente, se han usado. En el presente trabajo se describen algunas dificultades encontradas en los ensayos de tracción, especialmente roturas fuera de la zona calibrada. Con la ayuda de estudios fractográficos y otros se ha tratado de interpretar estos fallos.

**Abstract.** A new processing route to consolidate mechanically alloyed Al-base materials, consisting of a double cycle of cold pressing and vacuum sintering, is developed in our laboratory. The high compaction pressure required (1300 MPa) has led to the use of tension testing specimens smaller than the standard ones. Two types of such specimens, shaped by the forming action of punches or die, respectively, have been employed. In the present work some difficulties encountered in tension testing these samples, specially breaking out of the gauge zone, are described. Fractographic and other studies have helped to know the cause of these failures.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la investigación del procesado pulvimetalúrgico de aleaciones de base aluminio aleadas mecánicamente es frecuente determinar las propiedades mecánicas. En nuestro laboratorio se está desarrollando un nuevo procedimiento de consolidación de polvos de base aluminio (Al y Al-10Ti) aleados mecánicamente, consistente en la utilización de un ciclo doble de prensado en frío seguido de sinterización [1]. Existen normas y recomendaciones acerca del tamaño y forma de las probetas, realización de los ensayos, etc [2 y 3].

Sin embargo, las aleaciones de aluminio aleadas mecánicamente tienen una elevada dureza relativa (120-170 HV0.02), debiendo emplearse elevadas presiones de compactación para el procesado del polvo por esta ruta (1300 MPa para obtener una densidad en verde del 90-94%). En las condiciones anteriores, las cargas necesarias para la compactación de las probetas normalizadas (Fig.1) son del orden de 900 kN. Al no

disponer en nuestros laboratorios de prensas de tal capacidad, se hace aconsejable la utilización de probetas de pequeño tamaño. A este respecto, se han preparado dos tipos de probetas de tracción de distinto tamaño, en las que la forma queda determinada por los punzones o por la matriz, respectivamente.

El objeto de este trabajo es presentar los resultados obtenidos con cada una de las probetas y discutir las roturas anómalas encontradas en algunos de los ensayos realizados.

## 2. PROBETAS OBTENIDAS POR COMPACTACIÓN CON PUNZÓN CONFORMANTE

Las probetas de tracción de pequeño tamaño se prepararon, inicialmente, mediante una sencilla adaptación de los punzones empleados en la compactación de probetas de flexión. En realidad, se

trataba de una solución temporal, adoptada para poder ensayar lo antes posible probetas de tracción. Para ello, los punzones fueron suplementados para la obtención de una zona más estrecha (zona calibrada) en el centro de la probeta (Fig.2).

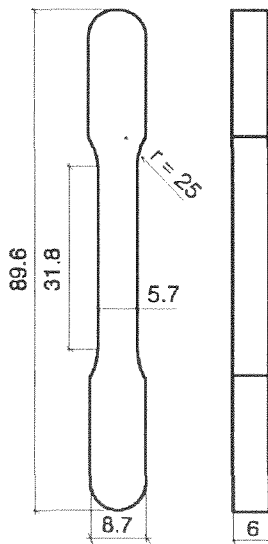


Fig. 1. Esquema de la probeta de tracción normalizada (MPIF y ASTM) para productos pulvimetalúrgicos.

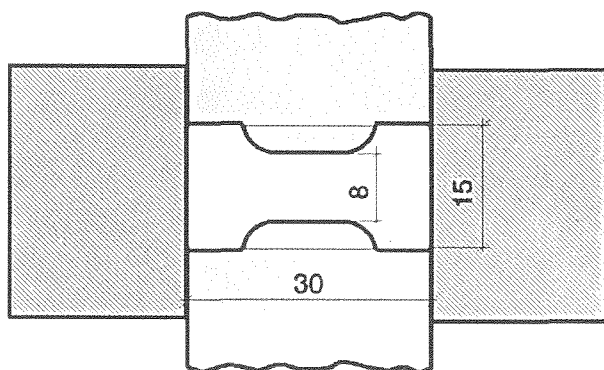


Fig. 2. Esquema de la matriz y los punzones conformantes para la obtención de probetas de tracción.

Una parte importante de las probetas de tracción muestran roturas anómalas por la cabeza de las mismas (Fig.3). En algunos casos, la rotura comienza en el hombro de la probeta y se extiende en forma de media luna por la cabeza. Las marcas de las mordazas se encuentran, en varios casos, en el camino de la rotura. También se producen roturas paralelas al eje de la probeta, es decir, perpendicularmente a la dirección de compactación. Las roturas no válidas se producen con distinta incidencia en función del tipo de polvo

empleado (diversa compresibilidad y dureza).

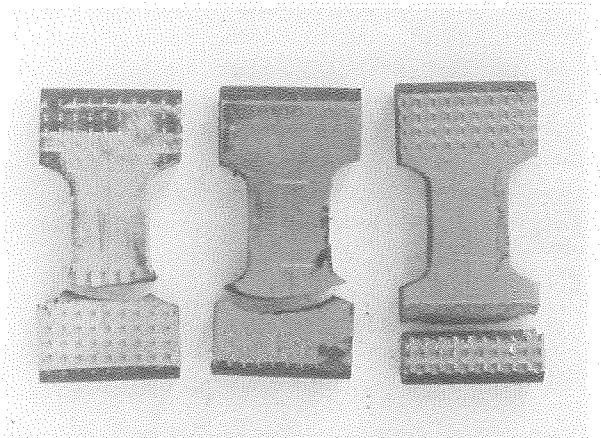


Fig. 3. Aspecto de las roturas anómalas en probetas obtenidas mediante punzón conformante.

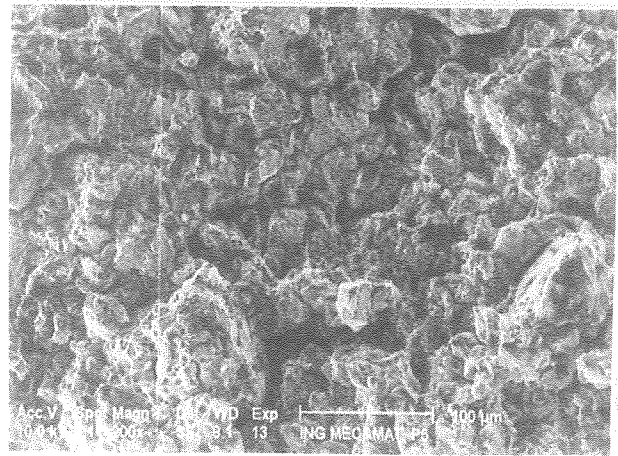


Fig. 4. Fractografía SEM de una probeta preparada con punzón conformante, rota por la cabeza.

Se ha observado por SEM que la adhesión es muy baja en las cabezas de las probetas, con abundantes grietas que marcan los límites interpartículas (Fig.4). Por otra parte, se ha comprobado experimentalmente que la densidad es menor en las cabezas que en el cuerpo calibrado de la probeta. Así por ejemplo, en probetas obtenidas a partir de polvo de aluminio aleado mecánicamente, no desgasificado, la cabeza tiene una densidad del 96.8%, mientras que en la zona calibrada la densidad es del 98.5%. Por último, se han observado ocasionalmente grietas perpendiculares a la dirección de compactación, incluso antes del ensayo de tracción (Fig.5).

Los hechos descritos en el párrafo anterior pueden venir ocasionados por el procedimiento de compactación utilizado. Así, partiendo de una altura uniforme del polvo en el interior de la matriz, los punzones conformantes producirán una mayor densidad en la zona calibrada, por dificultad de fluencia del polvo hacia las

cabezas. Por tanto, la adhesión alcanzada entre las partículas en las cabezas es menor, y la resistencia de esta parte, a pesar de la mayor sección, es inferior a la de la parte calibrada. Las marcas de las mordazas disminuyen aún más la sección resistente de las cabezas, promoviendo la propagación de la rotura a través de las mismas. Por último, las roturas producidas en dirección perpendicular a la de compactación pueden atribuirse a grietas formadas en las cabezas por expansión elástica de los compactos a la salida de la matriz [4].

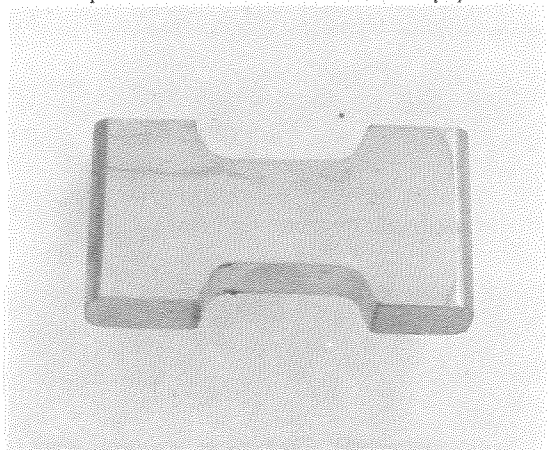


Fig. 5. Grietas previas al ensayo de tracción de probetas compactadas con punzones conformantes.

Las probetas preparadas a partir de polvos de menor dureza y mejor compresibilidad alcanzarán una adhesión suficiente en las cabezas rompiendo adecuadamente por la zona calibrada, como así ha sucedido.

### 3. PROBETAS PREPARADAS CON MATRIZ CONFORMANTE

En vista de la falta de homogeneidad de la densidad en las probetas anteriores, la no semejanza de las mismas con las normalizadas, así como los agrietamientos por expansión elástica a la salida de la matriz, se procedió al rediseño de la probeta de tracción y de la matriz correspondiente.

La nueva probeta de tracción es semejante a la normalizada, si bien de un tamaño ligeramente inferior al habersele reducido el tamaño de las cabezas y el espesor de la zona calibrada (Fig.6). La carga de compactación necesaria es del orden de los 420 kN. En esta ocasión, se construyó una matriz con la forma de la probeta, siendo plano el frente de los punzones. Con ello, se debe obtener una mejor homogeneidad de la densidad entre las cabezas y la parte calibrada. Simultáneamente, se reducen los problemas de agrietamiento por expansión elástica, al no estar los extremos de la cabeza en voladizo durante la expulsión del compacto de la matriz.

En ciertas series, las roturas de las probetas de tracción nuevas se producen en la cabeza o muy cerca de la cabeza, raramente en el tercio central de las mismas (Fig.7).

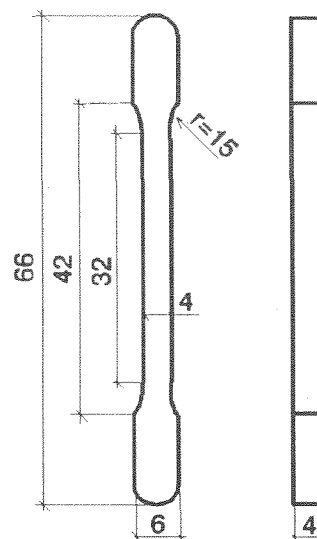


Fig. 6. Esquema de la probeta obtenida con matriz conformante.

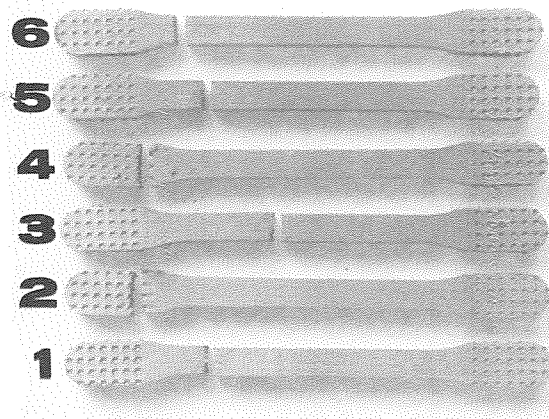
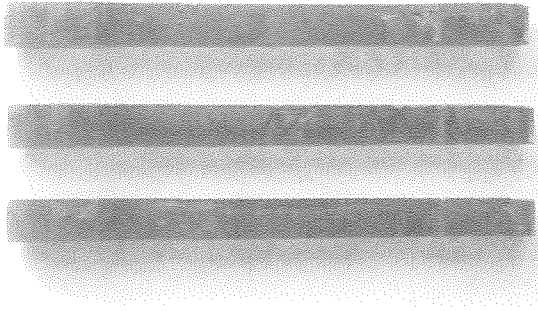


Fig. 7. Probetas de matriz conformante con roturas anómalas.

Una vez rotas, se comprueba que la mitad más pequeña es siempre menos densa. La diferencia de densidades es mayor cuanto más diferentes en tamaño son los dos trozos. Por ejemplo, la probeta 2 de la figura 7 tiene densidades del 98,6 y 92,6 en el trozo mayor y menor, respectivamente.

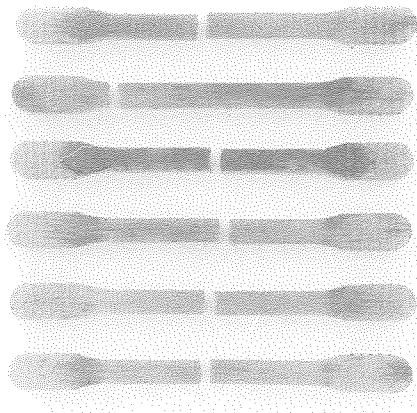
Las observaciones anteriores pueden explicarse bien porque (a) las cabezas sean menos densas como ocurría en las probetas de punzón conformante, bien porque (b) la densidad disminuya progresivamente desde una

cabeza a la otra. Se ha observado que en las muestras preparadas en verde (y también después del reprensado) las caras perpendiculares a la dirección de prensado no son paralelas entre sí (Fig.8), siendo necesario rectificar una de las caras para obtener probetas apropiadas para ensayar.



**Fig. 8.** Probetas de matriz conformante mostrando falta de paralelismo entre caras perpendiculares a la dirección de compactación.

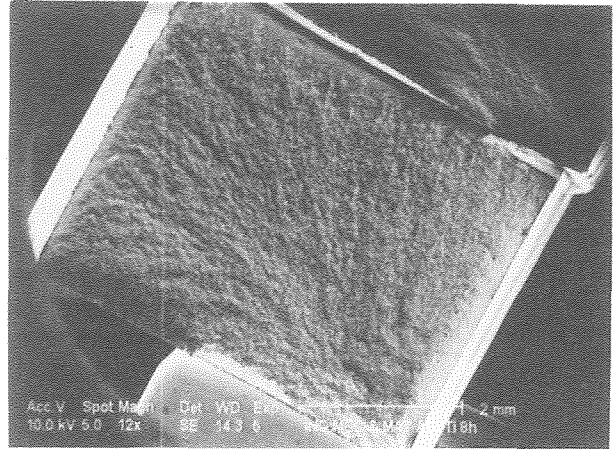
La observación anterior hace pensar en una incorrecta distribución del polvo dentro de la matriz, de forma que en la cabeza que tenga más polvo se obtendrá más altura y densidad, variables que disminuirán progresivamente hacia la otra cabeza.



**Fig. 9.** Probetas de matriz conformante preparadas con enrasado del polvo previo a la compactación.

Se han preparado nuevas muestras, comprobando que la distribución del polvo sea uniforme dentro de la matriz (técnica similar a la empleada en producción industrial, enrasando el polvo con la matriz, mientras se mantiene el punzón inferior levantado). También se ha rotado el sistema punzones-matriz-prensa para comprobar el posible efecto de compresión no uniforme, resultando todas las muestras con caras paralelas

independientemente de la orientación punzones-matriz-prensa, tanto en el primer prensado como en el reprensado.



**Fig. 10.** Fractografía SEM de una probeta de matriz conformante, preparada con enrasado del polvo, rota por la cabeza.

La rotura de las probetas anteriores se produce mayoritariamente en el tercio central (Fig.9). La medida de la densidad de los dos trozos en que resultan rotas estas probetas indica diferencias de densidad entre ambas partes inferiores al 1%, típicamente del 0,5%. En las probetas que han roto por la cabeza se ha detectado por microscopía electrónica de barrido la presencia de diversas contaminaciones en el origen de la rotura (Fig.10). Las contaminaciones más frecuentes son restos carbonáceos, probablemente resultantes de la combustión incompleta de trozos de cerda de brocha, y cloruros, en particular cloruro sódico.

#### 4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS DOS TIPOS DE PROBETAS

Se han ensayado probetas de los dos tipos discutidos en los apartados anteriores preparadas en unas mismas condiciones de procesado (polvo de partida, presiones de compactación y temperaturas de sinterización), lo que, idealmente, debiera dar lugar a propiedades finales de los compactos idénticas entre si. En la tabla 1 se recogen los resultados relativos a la resistencia a la tracción y alargamiento.

En general, el alargamiento mostrado por las probetas de matriz conformante es inferior al de las de punzón conformante. Este fenómeno es consecuencia de la dependencia existente entre la longitud de calibración que se considere y los alargamientos obtenidos. La normas ASTM [5] y UNE [6] permiten calcular, en el caso de aceros suaves o inoxidables, la diferencia previsible entre los alargamientos obtenidos con diversos

tipos de probetas. La tendencia debe ser similar para el aluminio y consiste en que los alargamientos son mayores en las probetas de menor relación longitud de calibración/área transversal, tal como se ha observado aquí.

**Tabla 1.** Resistencia a la tracción y alargamiento de probetas de tracción obtenidas mediante punzón conformante y mediante matriz conformante, respectivamente.

Tipo de polvo procesado	R, MPa (A, %)	
	Punzón conformante	Matriz conformante
Al IJ, 10h	325 ( 7.0)	297 ( 5.2)
Al IJ, 10h, D500	345 ( 7.1)	306 ( 5.3)
Al EC, 10h	342 (16.3)	277 (12.5)
Al EC, 10h, D500	338 ( 5.5)	290 ( 6.8)
Al 99.94, 10h	303 (33.0)	232 (15.5)
Al 99.94, 10h, D500	285 ( 7.5)	217 ( 2.4)

Las probetas de punzón conformante tienen una resistencia superior a las de matriz conformante. Dichas diferencias no pueden explicarse con facilidad. Una razón que puede aducirse es la falta de homogeneidad en la densidad -y por tanto en las propiedades- que se ha medido en los distintos tipos de probetas de tracción. Las probetas de punzón conformante tienen mayor densidad en la parte calibrada, tal como se ha recogido en el apartado correspondiente. Las probetas de matriz conformante, por su parte, tienen una densidad variable a lo largo de la zona calibrada tendiendo a romper por la parte de menor densidad.

## 5. CONCLUSIONES

Las probetas de tracción preparadas mediante matriz conformante son preferibles a las de punzón conformante. En estas últimas existe una notable diferencia de densidad entre la zona calibrada y las cabezas, por lo que se producen roturas por los extremos.

En las probetas de matriz conformante, si bien existen diferencias progresivas de densidad de un extremo a otro de la probeta, esta falta de homogeneidad puede disminuirse o eliminarse mediante un cuidadoso llenado de las matrices. En estas circunstancias, la rotura cae dentro de la zona calibrada.

Por otra parte, incluso con las probetas conformadas por la matriz, existe el peligro de contaminaciones que pueden originar la invalidez del ensayo de tracción. Estas contaminaciones han sido caracterizadas (cerdas de

brocha, cloruro sódico), lo que permite adoptar las precauciones necesarias.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen la financiación recibida de la C.I.C.Y.T. a través del proyecto de investigación MAT92-0711.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Rodríguez, J.A., Gallardo, J.M. and Herrera, E.J., "Consolidation of mechanically alloyed aluminium by double cold pressing and sintering", in *Advances in Materials and Processing Technologies*, M.S.J. Hashmi, Ed., 241-249, Dublin City University (1993).
- [2] "Tension test specimen for pressed and sintered metal powders", MPIF Standard 10, Metal Powder Industries Federation (1963).
- [3] "Tension testing of metallic materials", ASTM Standard Method E8, American Society for Testing and Materials (1981).
- [4] Rodríguez, J.A., Gallardo, J.M. y Herrera, E.J., "Fenómenos de adhesión y agrietamiento durante la consolidación de polvo de aluminio aleado mecánicamente", *Anales de Mecánica de la Fractura*, **11**, 229-235 (1994).
- [5] "Mechanical testing of steel products", ASTM Standard Method A370, American Society for Testing and Materials (1977).
- [6] "Conversión de alargamientos en aceros", Norma UNE 7-264-72, IRANOR (1972).