



PREDICCIÓN DEL FALLO EN EL CONFORMADO PLÁSTICO DE CHAPA MEDIANTE CRITERIOS DE FRACTURA DÚCTIL

C. VALLELLANO, J. J. ERCE, F. J. GARCÍA-LOMAS

Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros
Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España

(Recibido 7 de abril de 2004, para publicación 30 de julio de 2004)

Resumen – La industria moderna demanda un diseño y una fabricación más eficiente de sus productos. Actualmente existe una tendencia generalizada hacia la simulación y optimización numérica de los procesos industriales, entre los que se encuentran los procesos de conformado plástico. Este trabajo presenta un estudio crítico sobre la capacidad de diferentes criterios de fractura dúctil para predecir el fallo en los procesos de conformado plástico de chapa. Para ello, se analiza no sólo su bondad para predecir el instante y zona de fallo, sino también su capacidad para reproducir el proceso físico de fallo de acuerdo con la evidencia experimental. Entre los criterios explorados están los propuestos por Cockcroft y Latham, Brozzo *et al.*, Oyane *et al.* y Chaouadi *et al.*. Asimismo, se propone un nuevo criterio que surge como una modificación del criterio de Freudenthal para incluir el efecto de la presión hidrostática en el fallo. Usando el MEF se realiza la simulación de un proceso de embutición axilimétrico y se implementan numéricamente los distintos criterios de fallo. Las predicciones obtenidas se comparan con resultados experimentales.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años las industrias del automóvil, aeronáutica y de electrodomésticos, principalmente, han contribuido decisivamente al desarrollo e innovación de los procesos de conformado plástico de chapa. La creciente demanda por fabricar nuevos productos con diseños geométricos cada vez más complejos y el uso de materiales cada vez más exigentes, *e.g.* materiales más resistentes y/o ligeros, ha traído un renovado interés por el conocimiento de los fundamentos científicos y tecnológicos de dichos procesos.

En términos generales, el factor limitante de todo proceso de conformado de chapa es el fallo del material, entendiéndose por fallo cualquier evento que inutilice la chapa. Entre los tipos de fallo más comunes se encuentran el desgarro localizado, la fractura dúctil y el arrugamiento por pandeo local de la chapa. De entre estos, el más usualmente observado es el desgarro de la chapa, el cual ocurre como resultado de la inestabilidad plástica que acontece en zonas de la chapa en las que se produce una estricción o adelgazamiento localizado del espesor. La Figura 1 representa esquemáticamente la forma típica del conocido Diagrama Limite de Conformado (DLC). Dicho diagrama muestra las condiciones límite de deformación que se pueden alcanzar en un punto de la chapa para producir el fallo de ésta. En otras palabras, define la zona del plano de deformaciones principales dentro de la cual es posible conformar una pieza sin que se llegue al fallo en ningún punto de la misma. El DLC, por tanto, es una herramienta esencial para el diseño y/o comprobación en procesos de conformado de chapa.

Tradicionalmente la determinación de este diagrama ha sido experimental. No obstante, la industria moderna tiende paulatinamente a sustituir su tradicional enfoque de una fase de diseño basada exclusivamente en la costosa experimentación, por aquellos fundamentados preferentemente en la simulación y optimización numérica de los distintos procesos de fabricación. Así, la tendencia actual está encaminada hacia la puesta a punto de herramientas y métodos que permitan la estimación numérica de los DLC para distintos materiales. En este sentido, comienza a ser habitual el empleo de criterios de fractura dúctil en conjunción con el uso del Método de los Elementos Finitos (MEF) para simular numéricamente el proceso de conformado y predecir el eventual fallo de la chapa [1-4].

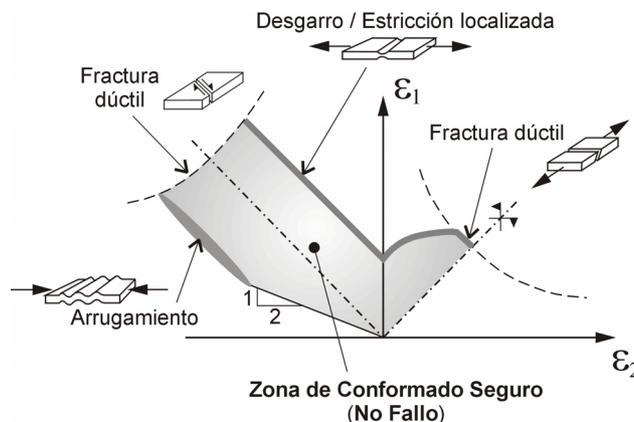


Fig. 1. Diagrama límite de conformado genérico indicando los diferentes tipos de fallo en chapas.

En términos estrictos, el empleo de criterios de fractura dúctil para predecir el fallo de la chapa es apropiado en aquellas zonas de la pieza en las que este modo de fallo aparezca (véase Fig. 1). No obstante, su uso no está claramente justificado cuando el mecanismo de fallo es el desgarro local de la chapa. En el presente trabajo se examina la capacidad de varios criterios de fractura dúctil para predecir y reproducir el proceso físico del fallo en procesos de conformado plástico de chapas. Así mismo se propone y se analiza un criterio alternativo de fallo. Dicho criterio surge de modificar el conocido criterio de Freudenthal para incluir el efecto de la tensión hidrostática en el proceso de fractura. Para centrar el estudio se ha realizado un modelo de Elementos Finitos (EF) de un proceso de embutición cilíndrica de chapa, empleando el paquete comercial de elementos finitos ANSYS. Se han implementado numéricamente los distintos criterios de fractura dúctil, analizándose en el producto embutido el lugar donde se predice el fallo, el estado tenso-deformacional en dicha zona, la Relación Límite de Embutición (RLE) predicha, etc. Los resultados de las simulaciones se han contrastado con los datos experimentales obtenidos por Takuda *et al.* [1] para chapas de diferentes aceros.

2. CRITERIOS DE FRACTURA DÚCTIL ANALIZADOS

Existen en la literatura científica numerosos criterios y modelos para predecir el fallo por fractura dúctil en materiales metálicos. Dependiendo de los fundamentos que lo sustentan, dichos criterios se pueden agrupar en tres categorías. La primera está formada por criterios esencialmente fenomenológicos, es decir, basados en reglas empíricas y/o semi-empíricas. La segunda categoría recoge aquellos métodos obtenidos de modelizar el proceso físico de fractura observado experimentalmente, simulándose así las fases de nucleación, crecimiento y posterior coalescencia de huecos que ocurre durante la fractura dúctil de los metales. Por último, el tercer grupo incluye aquellos criterios que predicen el fallo del material como resultado de la aparición de una inestabilidad o bifurcación en el proceso de deformación plástica del material.

En este trabajo se van a explorar cuatro criterios de fractura dúctil ampliamente conocidos y empleados en la práctica. Estos son: los clásicos criterios de Cockcroft y Latham [5] y Brozzo *et al.* [6], incluidos en la primera categoría, y los criterios de Oyane *et al.* [7] y Chaouadi *et al.* [8], pertenecientes al segundo grupo descrito.

El criterio de Cockcroft y Latham [5] considera que la fractura está controlada fundamentalmente por el trabajo plástico realizado por la tensión principal máxima a lo largo de la historia de carga del material. Según dicho modelo el fallo se produce cuando:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} \sigma_I d\bar{\epsilon}^p = C_1 \quad (1)$$

donde $\bar{\epsilon}^p$ representa la deformación plástica equivalente, $\bar{\epsilon}_f^p$ es la deformación plástica equivalente en el instante de la fractura, σ_I es la tensión principal máxima y C_1 es una constante del material a determinar experimentalmente. En una línea muy similar, Brozzo *et al.* [6] plantean un criterio parecido al anterior pero incluyendo de manera explícita la dependencia de la fractura dúctil con la tensión hidrostática (σ_h), esto es,

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} \frac{2}{3} \left(1 - \frac{\sigma_h}{\sigma_I} \right) d\bar{\epsilon}^p = C_2 \quad (2)$$

Por otro lado, Oyane *et al.* [7] han desarrollado un modelo de fractura dúctil obtenido de la aplicación de la teoría de la plasticidad a materiales porosos. Estos autores suponen que durante la fase de crecimiento de huecos el material se comporta como un medio poroso, reduciéndose, por tanto, la densidad del material al aumentar la deformación. Se propone como posible parámetro para cuantificar el daño ocasionado en el material la variación en la densidad del mismo, o lo que es lo mismo, la deformación volumétrica sufrida por material. Así, se establece finalmente que la fractura se produce cuando la deformación volumétrica alcanza un cierto valor característico del material. El criterio toma la forma siguiente:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} + C_3 \right) d\bar{\epsilon}^p = C_4 \quad (3)$$

donde $\bar{\sigma}$ representa la tensión equivalente. Más recientemente Chaouadi *et al.* [8] argumentan que la fractura dúctil puede entenderse como un proceso en el que compiten básicamente dos mecanismos: la deformación plástica y el crecimiento de cavidades. Así, la fractura se produce cuando el trabajo total de deformación (denominado por los propios autores "damage work") alcanza un valor crítico que depende del material. Dada la existencia de huecos en el material al inicio de la fractura dúctil, el trabajo total de deformación será la suma del trabajo de deformación plástica más el trabajo de variación de volumen. Haciendo uso de las expresiones de Rice y Tracey [9] para describir el proceso de crecimiento de huecos, el criterio propuesto queda finalmente de la forma:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} \left(\bar{\sigma} + C_5 \sigma_h e^{\frac{3\sigma_h}{2\bar{\sigma}}} \right) d\bar{\epsilon}^p = C_6 \quad (4)$$

La correcta aplicación práctica de los criterios anteriores requiere conocer con suficiente aproximación la historia de carga y de deformaciones que sufre el material durante todo el proceso. Dicha historia puede obtenerse por ejemplo simulando numéricamente el proceso completo de conformado. Para mayor comodidad en la implementación numérica de estos criterios es usual expresarlos de la siguiente manera:

(Cockcroft y Latham)
$$\frac{1}{C_1} \int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} \sigma_I d\bar{\epsilon}^p = 1 \quad (5)$$

(Brozzo *et al.*)
$$\frac{1}{C_2} \int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} \frac{2}{3} \left(1 - \frac{\sigma_h}{\sigma_I} \right) d\bar{\epsilon}^p = 1 \quad (6)$$

(Oyane *et al.*)
$$\frac{1}{C_4} \int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} + C_3 \right) d\bar{\epsilon}^p = 1 \quad (7)$$

(Chaouadi *et al.*)
$$\frac{1}{C_6} \int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} \left(\bar{\sigma} + C_5 \sigma_h e^{\frac{3\sigma_h}{2\bar{\sigma}}} \right) d\bar{\epsilon}^p = 1 \quad (8)$$

De esta forma, se predecirá el fallo por fractura dúctil en un punto cuando el término izquierdo de la igualdad del criterio considerado (ecuaciones (5)-(8)) alcance un valor igual o superior a la unidad. En

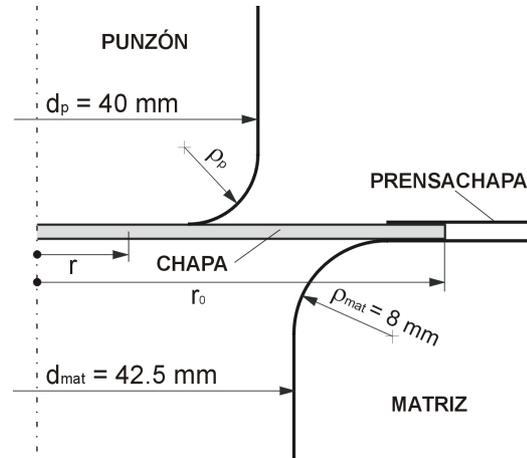


Fig. 2. Dimensiones y parámetros del modelo de embutición 2D axilsimétrico.

adelante, para un determinado criterio de fallo, dicho término izquierdo al completo será referido en el texto como “*integral del criterio*”.

Alternativamente a los modelos descritos, se propone en este trabajo un nuevo criterio semi-empírico basado en la modificación del clásico criterio Freudenthal. El modelo de Freudenthal establece que la fractura se inicia cuando el trabajo plástico por unidad de volumen en un determinado punto del material alcanza un cierto valor crítico. Este criterio ha sido empleado con éxito para predecir el fallo en procesos de deformación plástica global [10]. No obstante, cuando se aplica a procesos de conformado de chapa su comportamiento no ha sido nada satisfactorio [2]. Entre las causas argumentadas para explicar tales discrepancias, la aceptada es que el criterio original de Freudenthal no incluye el efecto de la tensión hidrostática en el proceso de fractura dúctil. En efecto, es bien conocido que mientras que la tensión hidrostática no tiene una repercusión apreciable en la plastificación, durante la fractura dúctil es todo lo contrario, favoreciendo decisivamente al crecimiento de cavidades y contribuyendo con ello a acelerar el proceso de fractura. Para tener en cuenta este efecto, se propone aquí incluir en la expresión del trabajo plástico un término extra que varíe apropiadamente con la tensión hidrostática. La forma más simple que a uno se le ocurre analizar es una dependencia lineal, quedando el criterio propuesto de la forma:

$$\frac{1}{C_8} \int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} (\bar{\sigma} + C_7 \sigma_h) d\bar{\epsilon}^p = 1 \quad (9)$$

donde C_7 y C_8 son constantes del material. En lo que sigue nos referiremos a este criterio como criterio del Trabajo Plástico Modificado (criterio TPM).

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN

Para analizar los distintos criterios de fallo descritos se ha realizado un modelo bidimensional de elementos finitos del proceso de embutición cilíndrica de chapa. Se ha empleado el programa de propósito general ANSYS [11]. A fin de poder comparar los resultados de las simulaciones con datos experimentales, el modelo propuesto se ha centrado en reproducir los ensayos realizados por Takuda *et al.* [2]. La Figura 2 muestra la geometría del punzón y de la matriz empleada por los citados autores. Se han modelado cuatro radios de redondeo del punzón (ρ_p) diferentes: 2, 4, 8 y 20 mm (semiesférico), manteniendo constantes el diámetro del punzón (d_p), el diámetro de la matriz (d_{mat}) y el radio de redondeo del borde de la matriz (ρ_{mat}). Las preformas de partida en las distintas simulaciones han sido chapas circulares con diferentes radios (r_0). En la Figura 2 se muestra la notación y los valores numéricos.

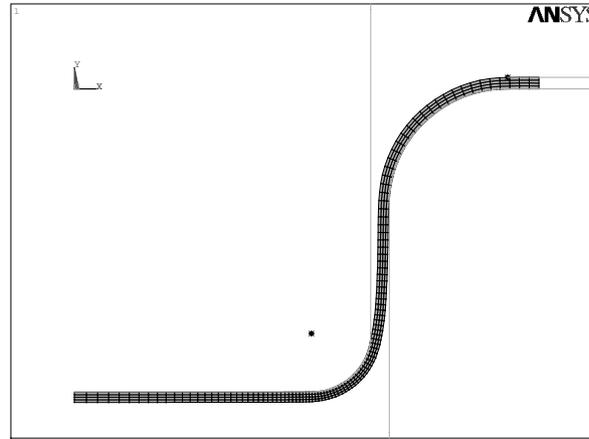


Fig. 3. Malla de elementos finitos (deformada genérica).

El modelo de EF usado realiza una descripción Lagrangiana del proceso. Así mismo, dada la fuerte no linealidad del problema, debida principalmente al comportamiento plástico del material y al contacto entre los diferentes elementos, se emplea una formulación de grandes deformaciones. La matriz, el punzón y el prensa-chapa se han considerado elementos rígidos. Mientras que para la chapa metálica se ha supuesto un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento por deformación de tipo isotrópico. En primera aproximación se ha supuesto un modelo de plasticidad asociativa isotrópico e independiente de la velocidad de deformación. Esta aproximación es apropiada siempre que la anisotropía de la chapa no sea muy elevada. El criterio de fluencia empleado ha sido el criterio de von Mises.

La Figura 3 muestra la malla de EF usada en una configuración deformada genérica. Los elementos empleados han sido cuadriláteros de 8 nodos (PLANE82). Para chapas con espesor inferior a 1 mm se han dispuesto 4 capas de elementos en el espesor, mientras que para las chapas de 1 mm se han usado 5 capas. Las superficies en contacto se han mallado usando los pares de elementos CONTA172 y TARGE169 de ANSYS. Como suele ser habitual en el conformado de chapa, se ha supuesto que la fricción entre las superficies sigue un modelo de Coulomb. El coeficiente de fricción se considera constante e igual a 0.1, de acuerdo con lo indicado por los autores de los ensayos. La fuerza inicial que ejerce el prensa-chapa sobre la chapa se ha estimado a partir de la conocida expresión de Siebel. Por último, se ha considerado la embutición como un proceso cuasi-estático, resolviéndose el problema de manera incremental. El criterio de convergencia establecido supone que ésta se alcanza cuando el módulo (norma Euclídea) del vector de los residuos es inferior a un 0.5% del módulo del vector de cargas exteriores.

4. ANÁLISIS DE LAS PREDICCIONES DE FALLO. DISCUSIÓN

Como se ha mencionado en el apartado anterior, las simulaciones realizadas se han centrado en reproducir los ensayos de embutición de Takuda *et al.* [1]. Dichos ensayos se efectuaron empleando tres chapas de aceros especiales: chapa de acero inoxidable 430 con espesor de 0.78 mm (de aquí en adelante referida como Material 1), chapa de acero de alta resistencia con espesor de 1 mm (Material 2) y chapa de acero cincado de 0.7 mm de espesor (Material 3). La composición química de estos materiales se encuentra recogida en la referencia [1]. Las propiedades mecánicas de interés para el presente trabajo se resumen en la Tabla 1.

Como se puede observar en la Tabla 1, el coeficiente de anisotropía normal (\bar{r}) de las distintas chapas es suficientemente próximo a la unidad como para considerar aceptable, desde un punto de vista práctico, la hipótesis de que el comportamiento del material es aproximadamente isotrópico.

Siguiendo el mismo procedimiento que los citados autores en sus ensayos, se han simulado diferentes casos de embutición para los tres materiales, partiendo de chapas circulares. Los diámetros iniciales de las

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales (modelo $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$, \bar{r} coeficiente de anisotropía normal).

Material	E (GPa)	σ_U (MPa)	K (Mpa)	n	\bar{r}	$\epsilon_{I,f}$ (uniaxial)	$\epsilon_{I,f}$ (def. plana)
1	210	488	829	0.20	0.81	0.595	0.336
2		672	1020	0.14	0.91	0.634	0.285
3		748	858	0.03	0.87	0.303	0.130

Tabla 2. Constantes del material para los distintos criterios.

	C_1 (MPa)	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6 (MPa)	C_7	C_8 (MPa)
Material 1	313.3	0.556	0.124	0.272	1.480	670.87	32.69	4407.54
Material 2	411.6	0.536	-0.070	0.167	5.240	2065.65	-8.78	-1026.06
Material 3	189.9	0.252	-0.094	0.073	4.430	836.24	-9.67	-541.13

sucesivas preformas se fueron variando de milímetro en milímetro. En cada caso se ha evaluado el fallo o no de la pieza embutida con los distintos criterios de fractura propuestos.

Un paso básico para la aplicación de los criterios de fallo es la determinación de las diferentes constantes del material. Dichas constantes se han calculado a partir de los dos valores de $\epsilon_{I,f}$ mostrados en la Tabla 1, los cuales representan la deformación principal máxima de fractura obtenida, respectivamente, para un ensayo de tracción uniaxial pura y para un ensayo de tracción bajo condiciones de deformación plana. Así, para determinar las constantes basta con particularizar cada uno de los criterios anteriores para ambos ensayos y despejar sus valores. En el caso de que el criterio tenga una única constante, como ocurre con los de Cockcroft y Latham y Brozzo *et al.*, el valor de dicha constante se corresponde con el valor medio de los obtenidos al particularizar el criterio para los dos ensayos. La Tabla 2 muestra las distintas C_i ($i = 1 \dots 8$) obtenidos.

En cuanto a la implementación numérica de los criterios, ésta ha sido como sigue. Para cada nodo del modelo de EF se ha evaluado la integral de cada criterio (término izquierdo completo de las ecuaciones (5)-(9)). A continuación se ha obtenido el valor medio de esta integral en el espesor de la chapa. Finalmente, se propone que el fallo de la chapa se produce cuando dicho valor medio se haga igual o superior a la unidad en un determinado punto.

La Figura 4 muestra la Relación Limite de Embutición (RLE) predicha con los diferentes criterios para los tres materiales analizados y los cuatro radios de punzón ensayados. El valor de la RLE se define como:

$$RLE = \frac{r_{0,\max}}{r_p} \quad (10)$$

donde $r_{0,\max}$ es el mayor radio de preforma que puede embutirse sin fallo y r_p es el radio del punzón ($r_p = d_p / 2 = 20$ mm). Como se puede comprobar en la citada figura, las estimaciones obtenidas se encuentran en razonable acuerdo con los resultados experimentales. En términos generales, se observa que los resultados numéricos sobrestiman ligeramente los resultados experimentales, siendo las máximas diferencias inferiores al 10%. Esta tendencia era de esperar, dado que es consecuencia directa de no haber considerado la anisotropía del material en las simulaciones. No obstante, las pequeñas diferencias encon-

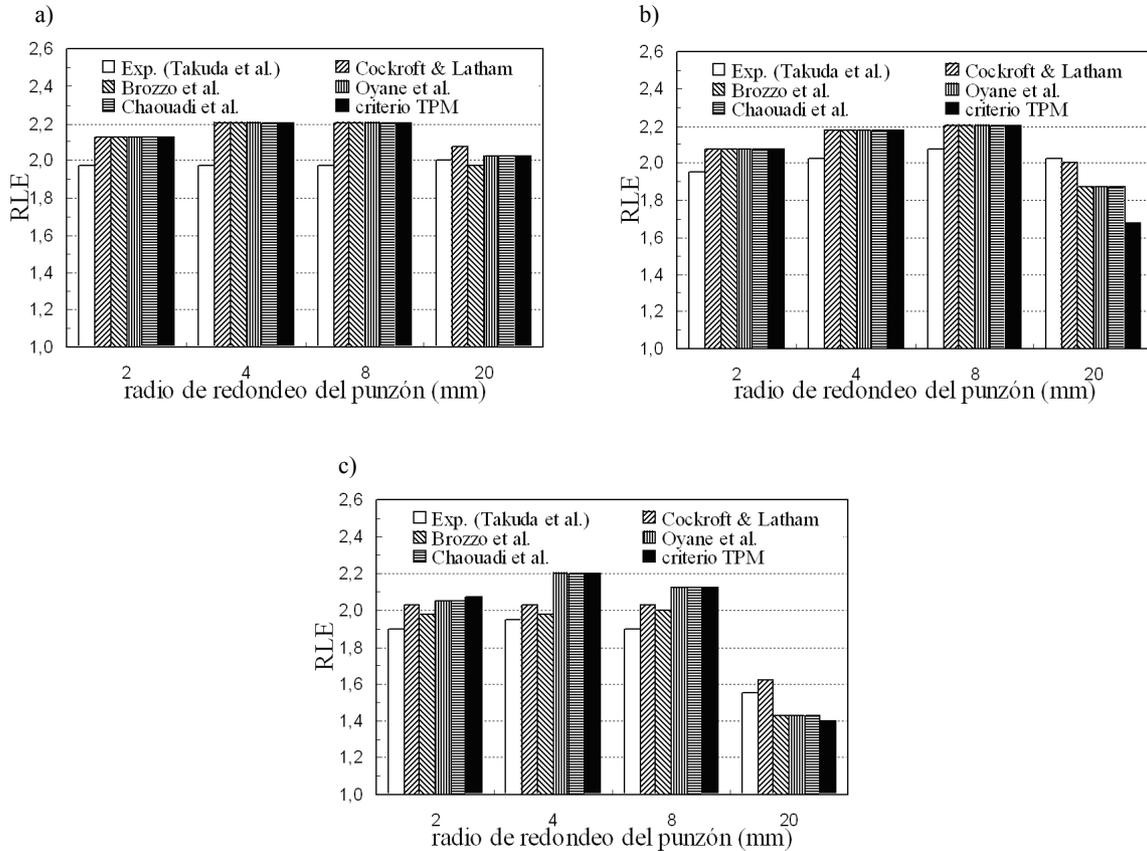


Fig. 4. Relación Límite de Embutición (LRE) predicho por los criterios analizados en función del radio de redondeo del punzón (ρ_p) para el **Material 1** (a), **Material 2** (b) y **Material 3** (c).

tradas entre valores predichos y observados, para estos materiales, justifican el uso de un modelo isótropo, como ya se había apuntado.

Una vez analizada la capacidad predictiva de los modelos propuestos, la pregunta que surge de manera natural es si dichos criterios reproducen adecuadamente el proceso físico de fallo de acuerdo con la evidencia experimental. Los ensayos de Takuda *et al.* muestran que, para todos los casos y materiales analizados, el fallo de la pieza embutida se produce en la zona del radio del punzón, es decir, en el acuerdo entre la base y la pared de la pieza. En esta zona, se observa inicialmente una concentración de la deformación en una banda del orden del espesor de la chapa, lo que se conoce como estricción localizada. Dicha estricción conduce finalmente al desgarro del material. Este hecho está en perfecto acuerdo con las predicciones obtenidas por los modelos analizados en los casos de materiales más dúctiles, el Material 1 y el Material 2.

La Figura 5 muestra dos de las simulaciones realizadas, una para el Material 1, empleando un punzón de 4 mm de radio de redondeo, y otra para el Material 2, correspondiente al punzón de radio de redondeo 2 mm. En la citada figura se representa la evolución del valor de las integrales de los criterios (valor medio en el espesor de la chapa) en el instante del fallo frente al radio indeformado adimensional (r/r_0) (véase Figura 2 para la notación). Como se puede observar, las integrales de todos los criterios presentan invariablemente un valor igual o superior a la unidad, esto es, predicen el fallo de la chapa, en la zona donde se produce el adelgazamiento localizado del espesor de la chapa. Además, esta estricción se sitúa en la zona del radio de acuerdo del punzón, como se indica en el gráfico aclaratorio incluido en la figura.

Según lo anterior es claro que los modelos analizados predicen correctamente el lugar donde experimentalmente se produce el fallo. No obstante, la evidencia experimental pone de manifiesto otro hecho de interés. Se observa que cuando el tipo de fallo de la chapa es el desgarro del material, éste ocurre como

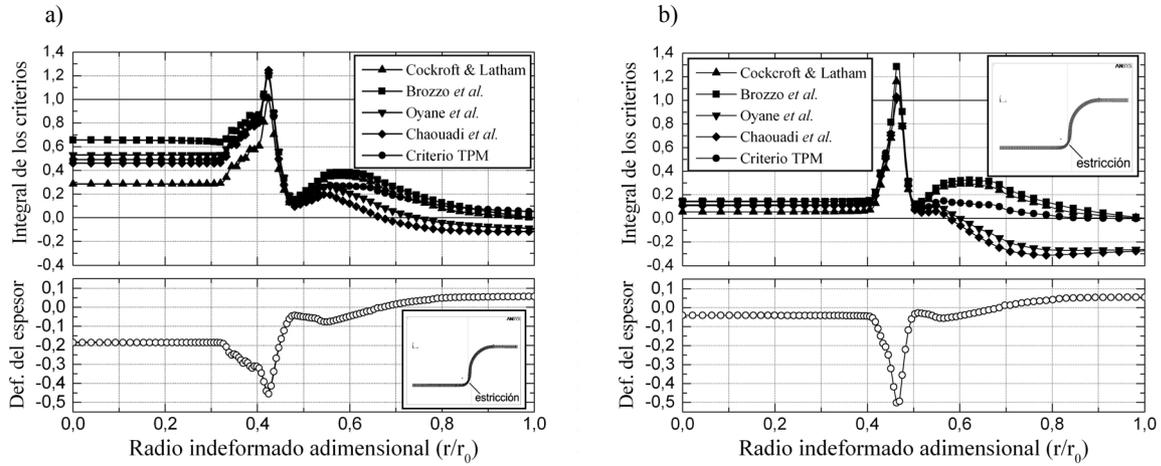


Fig. 5. Evolución de las integrales de los criterios y la deformación en el espesor: a) **Material 1** ($r_0 = 44.5$ mm y $\rho_p = 4$ mm) y b) **Material 2** ($r_0 = 42$ mm y $\rho_p = 2$ mm).

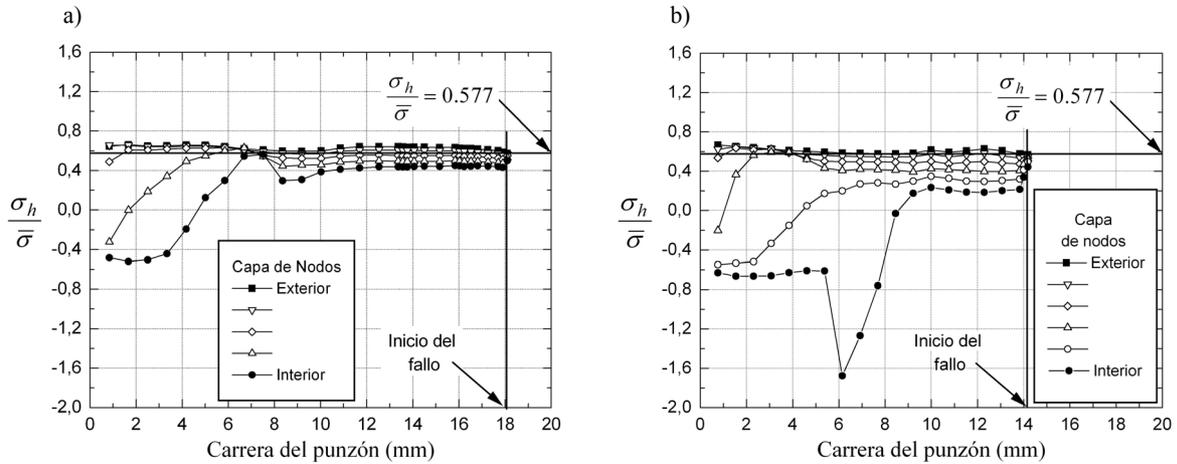


Fig. 6. Distribución de las tensiones en la zona de la estricción en cada capa de nodos: a) **Material 1** ($r_0 = 44.5$ mm y $\rho_p = 4$ mm) y b) **Material 2** ($r_0 = 42$ mm y $\rho_p = 2$ mm).

consecuencia de una inestabilidad plástica, que aparece cuando las condiciones locales de deformación en la estricción son de deformación plana, independientemente del estado global de tensiones en el resto del componente (véase por ejemplo la referencia [12]). Para comprobar esto se ha analizado en las simulaciones realizadas el estado de tensiones y deformaciones en la zona donde se predice el fallo, justo en el instante en que este aparece.

La Figura 6 se representa la evolución de la relación $\sigma_h/\bar{\sigma}$ en la zona de fallo a medida que avanza el punzón. Se puede apreciar que al iniciarse el fallo el cociente $\sigma_h/\bar{\sigma}$ toma valores muy próximos a 0.577 ($\approx 1/\sqrt{3}$) en todos los nodos. Este valor corresponde con el valor teórico que tomaría $\sigma_h/\bar{\sigma}$ bajo condiciones de deformación plana (deformación nula en dirección circunferencial). Por tanto, se comprueba que el fallo por desgarro acontece en efecto cuando las condiciones tenso-deformacionales en la estricción son aproximadamente de deformación plana, de acuerdo con la evidencia experimental. Esto indica que, para materiales dúctiles con poca anisotropía y en el rango de deformaciones mínimas negativas ($\epsilon_2 \leq 0$, véase Figura 1), los modelos de fractura dúctil analizados aquí predicen apropiadamente el proceso físico macroscópico que conduce al fallo de la chapa.

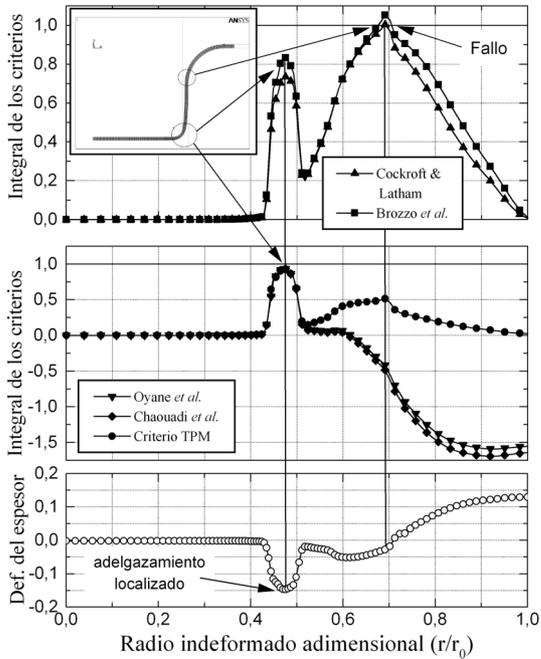


Fig. 7. Evolución de las integrales de los criterios y la deformación en el espesor para el **Material 3** ($r_0 = 41 \text{ mm}$ y $\rho_p = 2 \text{ mm}$).

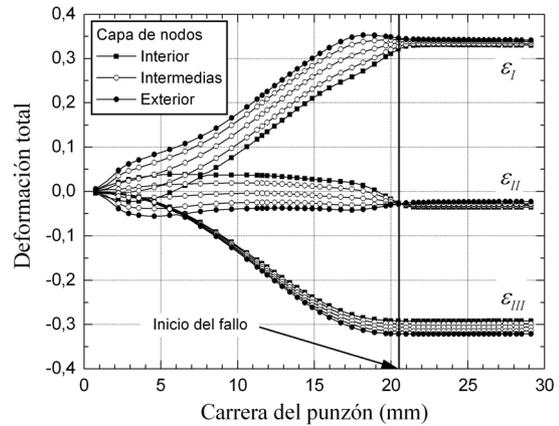


Fig. 8. Distribución de las deformaciones principales en la zona donde Cockcroft y Latham y Brozzo *et al* predicen el fallo en el **Material 3** ($r_0 = 41 \text{ mm}$ y $\rho_p = 2 \text{ mm}$).

Para el Material 3, cuya ductilidad es bastante baja, el comportamiento predicho depende del criterio empleado. Al igual que en los casos anteriores, los resultados experimentales de Takuda *et al.* sitúan nuevamente el fallo en la estricción localizada que se produce en la zona del radio del punzón. Los criterios de Oyane *et al.*, Chaouadi *et al.* y el criterio TPM predicen el fallo en perfecto acuerdo con estos resultados en todos los casos. De igual modo los modelos de Cockcroft y Latham y de Brozzo *et al.* proporcionan predicciones acordes con las observaciones para el punzón semiesférico. Sin embargo, para los punzones de 2, 4 y 8 mm de radio, estos dos últimos criterios predicen el fallo justo a la salida del radio de acuerdo de la matriz, esto es, en la transición entre la brida y la pared de la pieza. No obstante, se obtiene también que en la zona donde se produce el adelgazamiento de la chapa la integral de estos criterios toma asimismo valores muy elevados, siendo ésta por tanto una zona de alta probabilidad de fallo. La Figura 7 muestra la evolución de las integrales de los criterios para el caso del punzón de 2 mm de radio, donde se pueden observar las características descritas.

La Figura 8 muestra la evolución de la deformación donde los criterios de Cockcroft y Latham y de Brozzo *et al.* predicen el fallo. Como se puede observar, las condiciones de deformación en dicho punto evolucionan manteniendo el espesor de la chapa aproximadamente constante, esto es, $\epsilon_{II} \approx 0$. Además el fallo se predice cuando la deformación a través del espesor se homogeniza, indicando que las condiciones locales de deformación son básicamente de cortante puro en el plano de la chapa. Dichas condiciones provocan que el modo de fallo que se produce sea típicamente una fractura dúctil (véase Fig. 1, bisectriz del cuarto cuadrante). Este tipo y situación de fallo, aunque estrictamente no es la observada en los ensayos analizados, aparece con relativa frecuencia en algunas embuticiones con materiales poco dúctiles, como es el caso de ciertas aleaciones de aluminio [2].

Como se desprende del estudio realizado, los criterios de fractura dúctil analizados permiten predecir y reproducir adecuadamente el proceso físico del fallo en chapas conformadas plásticamente, incluso en situaciones en las que el tipo de fallo que realmente se origina no sea propiamente una fractura dúctil, sino que sea un desgarro del material producido por una inestabilidad plástica. Una explicación simple para este comportamiento puede encontrarse si se repasa en la esencia de ambos procesos de fallo (fractura dúctil y desgarro localizado) y en la forma de los criterios que lo materializan. En efecto, la fractura

dúctil se produce básicamente por la concentración de la deformación plástica en planos de deformación tangencial máxima, la cual provoca la iniciación, crecimiento y posterior coalescencia de huecos en el material que acaba por producir la rotura del material. El desgarro, por su parte, es producido asimismo por otro fenómeno de localización de la deformación. En este caso la deformación se concentra provocando una estricción o adelgazamiento local de la chapa que puede llegar a hacerse inestable y producir con ello el fallo del material. Como se puede ver ambos procesos de fallo necesitan que la deformación plástica se concentre en determinadas zonas, lo que se traduce en que el trabajo plástico en dichas zonas sea generalmente muy elevado. Dado que los criterios de fractura dúctil presentados aquí son básicamente criterios energéticos, esto es, proporcionales en cierta forma al trabajo plástico realizado, no es de extrañar que sea posible obtener predicciones razonables, desde un punto de vista práctico, para ambos tipos de fallo.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo analiza la capacidad para predecir el fallo en productos de chapa conformada de diferentes criterios de fallo por fractura dúctil. Para ello se ha modelado mediante el MEF un proceso de embutición axilsimétrica, implementándose numéricamente los criterios estudiados. Las simulaciones realizadas suponen un comportamiento isótropo de la chapa, lo cual es una aproximación razonable dado que la anisotropía de las chapas no es muy elevada. Las conclusiones se pueden resumir como sigue:

1. Las predicciones obtenidas con los diferentes modelos, expresadas en términos de la Relación Límite de Embutición, se ajustan muy razonablemente a los resultados experimentales obtenidos por Takuda *et al.* para diferentes aceros, aun cuando el tipo de fallo que acontece en realidad no sea estrictamente una fractura dúctil.
2. De acuerdo con la evidencia experimental, en situaciones de fallo por desgarro en el régimen de deformaciones principales mínimas negativas, los criterios predicen que éste se produce en la zona de estricción localizada cuando el estado local de tensiones alcanza las condiciones de Deformación Plana.
3. Para el material menos dúctil, los criterios de Cockcroft y Latham y de Brozzo *et al.* tienen una ligera tendencia a predecir el fallo en zonas de cortante puro (espesor constante), hecho experimentalmente observado también en algunas embuticiones realizadas con aleaciones de aluminio.
4. El criterio de Trabajo Plástico Modificado propuesto en este trabajo muestra predicciones en muy buena concordancia con resultados experimentales, así como con el resto de criterios analizados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA por la financiación de este trabajo a través del proyecto DPI2003-01688.

REFERENCIAS

- [1] H. Takuda, H. Fujimoto, Y. Kuroda, N. Hatta, "Finite element analysis of formability of a few kinds of special steel sheets", *Steel research* **68**, 9, 398-402 (1997).
- [2] H. Takuda, K. Mori, N. Hatta, "The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals", *J. Mater. Proc. Tech.* **95**, 116-121 (1999).
- [3] M. Jain, J. Allin, D. J. Lloyd, "Fracture limit prediction using ductile fracture criteria for forming of an automotive aluminum sheet", *International Journal of Mechanical Sciences* **41**, 1273-1288 (1999).
- [4] H. Takuda, K. Mori, N. Takakura, K. Yamaguchi, "Finite element analysis of limit strain in biaxial stretching of sheet metals allowing for ductile fracture", *Int. J. Mech. Sci.* **42**, 785-798 (2000).

- [5] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, "Ductility and the workability of metals", *J. Inst. Metals* **96**, 33 (1968).
- [6] P. Brozzo, B. de Luca, R. Rendina, "A New Method for the Prediction of the Formability Limits of Plastic Sheets", *Proc. 7th Biennial Congress of the IDDRG* (1972).
- [7] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima, "Criteria for Ductile Fracture and Their Application", *J. Mech. Working Tech.* **4**, 66-81 (1980).
- [8] R. Chaouadi, P. de Meester, W. Vandermeulen, "Damage work as ductile fracture criterion", *Int. Journal of Fracture* **66**, 155-164 (1994).
- [9] J. R. Rice, D. M. Tracey, "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields", *Journal of Applied Mechanics* **35**, 363 (1969).
- [10] S. E. Clift, P. Hartley, C. E. N. Sturges, G. W. Rowe, "Fracture Prediction in Plastic Deformation Processes", *Int. J. Mech. Sci.* **32**, 1-17 (1990).
- [11] ANSYS User's guide, Release 5.5, ANSYS Inc. (1998).
- [12] R. H. Wagoner, K. S. Chan, S. P. Keeler, *Forming Limit Diagram: Concepts, Methods and Application*, The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, Pennsylvania (1989).

PREDICTION OF FAILURE IN SHEET-METAL FORMING USING DUCTILE FRACTURE CRITERIA

Abstract – Modern industry demands a more efficient design and manufacturing of their products. The current trend of technology is oriented towards the numerical simulation and optimization of the industrial processes, such as metal forming processes. This paper presents a critical study about the capability of a number of ductile fracture criteria to predict the failure in sheet-metal forming processes. To this end, not only is the accuracy of the predictions analysed, but also the ability to reproduce the physical failure process according to the experimental evidence. The criteria explored are those proposed by Cockcroft and Latham, Brozzo et al., Oyane et al. and Chaouadi et al.. A modification of the Freudenthal's criterion taking into account the hydrostatic pressure effect is also analysed. Using MEF an axisymmetric deep drawing process is simulated, and the above criteria are numerically implemented. The predictions obtained are discussed and compared with experimental results.

