



FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Efecto de la geometría de la probeta en un ensayo de estirado con punzón hemiesférico

Claudia Campos ⁽¹⁾, Mariano Serenelli ⁽²⁾, Elena Brandaleze ⁽³⁾, Graciela Mansilla ⁽⁴⁾,
Pablo Turner ⁽⁵⁾, Javier Signorelli, ⁽⁶⁾

^{*1,3,4} Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás
Colón 332 San Nicolás Argentina

^{2,5,6} Instituto de Física de Rosario – Universidad Nacional de Rosario
Bv. 27 de Febrero 210 bis Rosario Argentina
e-mail: clauc23@yahoo.com.ar

RESUMEN

Durante los procesos de conformado de chapas metálicas, destinadas a la fabricación de partes o componentes estructurales, el material es sometido a grandes deformaciones. Si la deformación supera un cierto límite, aparece la estricción, resultando en piezas con defectos consideradas no aptas para su utilización. El límite de la deformación que puede ser alcanzado de forma segura, se denomina diagrama límite de conformado (*Forming Limit Diagram*, FLD). La determinación precisa de dicho diagrama es importante a los fines de optimizar las etapas de producción. Se han propuesto y utilizan diferentes ensayos para la obtención de las curvas FLD. Uno de los métodos más frecuentemente empleados consiste en el estirado por punzonado, el cual puede realizarse sobre probetas de diferentes geometrías. Es ampliamente conocido, que la medida de la FLD conlleva a cuestionar la exactitud y precisión con la cual cada punto del diagrama es determinado.

El objetivo del presente trabajo, es evaluar la influencia de la geometría de probeta en el ensayo de punzonado. A tal fin, se analizan probetas de diferentes anchos con borde plano (tipo Nakazima) o curvo (tipo Hasek). Las deformaciones límite son cuantificadas por medio de la imposición de una grilla de elementos circulares de 2.5 mm de diámetro, a partir de la cual es posible evaluar las deformaciones principales, una vez que el material es deformado. En este estudio se incluyen, además, probetas planas con diferentes geometrías de entalla para ser ensayadas por tracción uniaxial para determinar la rama de tracción - compresión (parte izquierda) del FLD.

Palabras Claves: Geometrías de probetas, Diagrama límite de conformado, Caminos de deformación.

1. INTRODUCCIÓN

Las chapas de acero de bajo carbono tienen amplias aplicaciones en la industria, principalmente la automotriz. Es por ello que el estudio y conocimiento de la formabilidad de estos materiales son críticos en los procesos de elaboración y conformado. El objetivo se orienta a conformar una chapa para un determinado diseño a un nivel de deformación tal que no se alcance la estricción y/o rotura del material, que involucre descarte o defectos superficiales en las piezas finales.

El diagrama límite de conformado (Forming Limit Diagram, FLD) es una herramienta de gran utilidad al momento de estudiar la conformabilidad aceros de bajo carbono, aleaciones de aluminio, magnesio entre otras de similares características para embutido profundo. Keeler y Backofen [1] introdujeron el primer concepto de FLD. El método consiste en usar una chapa con una grilla de círculos la cual, posteriormente, se estampa. El resultado del ensayo provee una chapa en la cual los círculos originales se transforman en elipses. Las deformaciones se obtienen a partir de las mediciones de los ejes mayores y menores de las mencionadas elipses. Estos mismos autores desarrollaron el lado derecho de la FLD, correspondiente con la zona de deformaciones positivas y Goodwin [2] extendió el diagrama límite de conformado incluyendo el lado de deformaciones negativas. El lado izquierdo de la FLD esta integrado por las deformaciones menores (ϵ_1) negativas y las deformaciones mayores (ϵ_2) positivas, en el cual se representan los caminos de deformación desde tracción hasta ensayos de deformación plana. En el lado derecho de la FLD, se definen las deformaciones menores (ϵ_1) positivas y las deformaciones mayores (ϵ_2) positivas.

Generalmente se utilizan, para el trazado de las FLD, los métodos de ensayo de embutido propuestos por Nakazima y Marciniak [3], en los cuales las diferencias consisten en la geometría del punzón (hemiesférico y plano, respectivamente). Ozturk y col. [4] realizan ensayos con punzón hemiesférico y comparan los resultados experimentales con las predicciones numéricas, las cuales representan de manera aceptable ambos lados de la FLD, también se ocupan en analizar la importancia de las condiciones de lubricación sobre el diagrama. Campos y col. [5] proponen la determinación teórica y experimental de los gráficos FLD para AISI 304 sometido a diferentes caminos de deformación lineal, empleando el método de acopado hidráulico sobre diferentes geometrías de probetas. Observaron una buena correlación entre los datos experimentales y los límites de deformación simulados empleando el enfoque de Marciniak-Kuczynski.

De acuerdo a lo propuesto en [6], variando la geometría de las probetas y las condiciones de lubricación entre el punzón y la muestra, se han alcanzado estados de deformación entre uniaxial y biaxial balanceada. Dicho estudio es realizado en chapas galvanizadas obteniéndose los valores límites de deformación y los coeficientes de Lankford.

En el presente trabajo se estudia el trazado de caminos de deformación a partir de diferentes geometrías de probetas.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Caracterización del material

Las probetas empleadas se extrajeron de una chapa de acero de bajo carbono galvanizada de uso automotriz, cuya composición se muestra en la tabla 1.

C. Campos, M. Serenelli, E. Brandaleze, G. Mansilla, P. Turner, J. Signorelli.

Tabla 1 Composición química del material estudiado.

C %	P%	S%	Mn%	Si%	Cr%	Ni%	Cu%	Mo%	Al%	V%	Sn%	Ti%	Ca	N
0.01	0.030	0.007	0.60	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.036	0.001	0.002	0.026	---	39
													ppm	ppm

Se realizó mediante microscopía óptica, utilizando un microscopio óptico Olympus GX51, el estudio de la microestructura. Se comprobó que la misma se caracteriza por estar constituida por granos ferríticos deformados en la dirección de laminación. El tamaño de grano determinado aplicando la técnica de comparación, arroja un valor de tamaño de grano promedio de 10.7 μm , Figura 1.

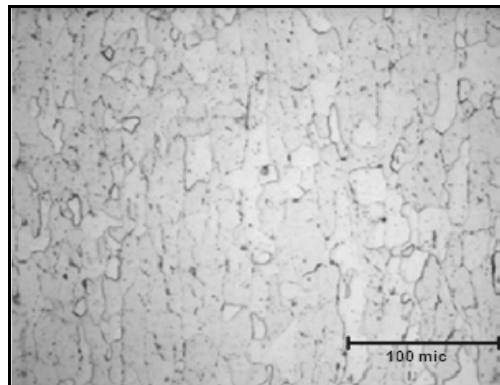
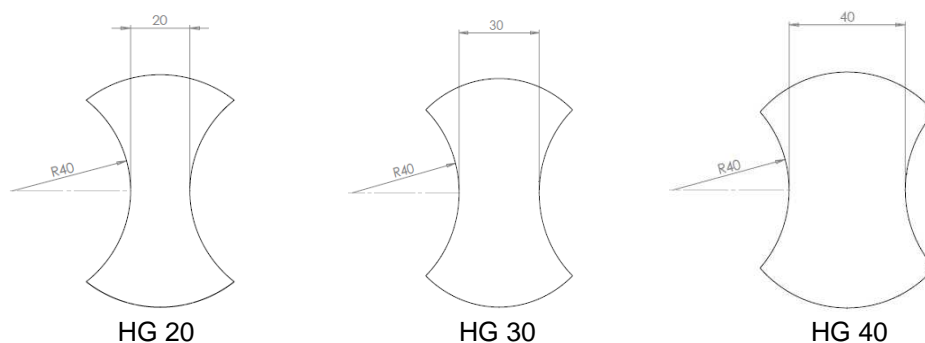


Figura 1 Estructura general

Además, mediante un microdurómetro Leco LM 300AT se determinó la microdureza Vickers, obteniéndose como valor promedio de 5 determinaciones 107,6 Hv.

2.2. Geometrías diferentes

Para la construcción del diagrama límite de conformado se cortaron muestras del tipo "reloj de arena", con distintos anchos a (20, 30, 40, 45, 50, 60, 70 y 80 mm), Figura 2.



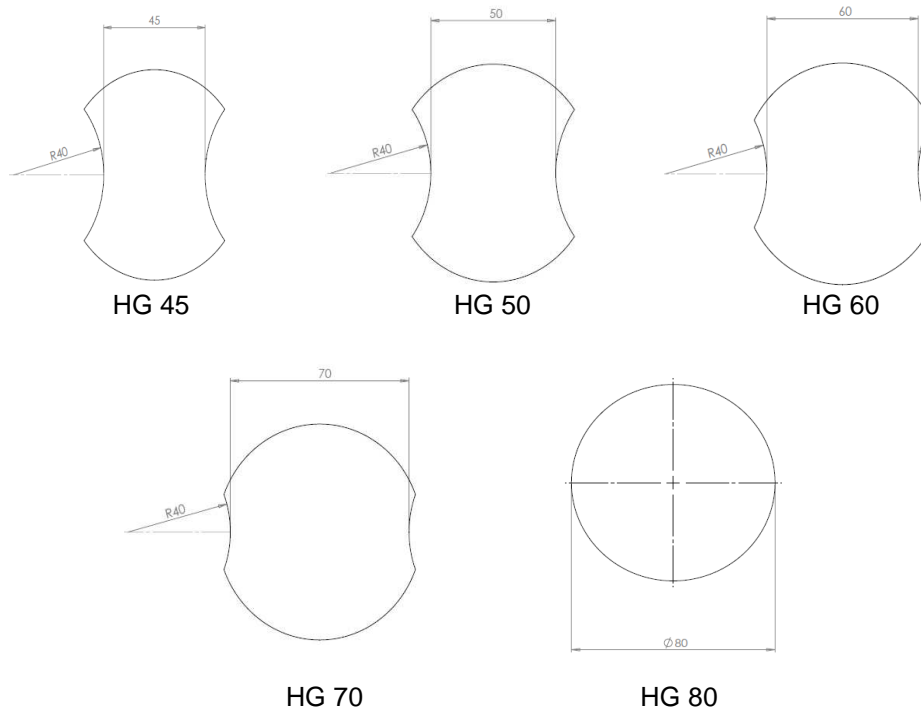


Figura 2 Probetas reloj de arena

En la determinación de la parte izquierda de la FLD, se someten a tracción uniaxial un conjunto de probetas planas con diferentes geometrías, acorde con los valores de la entalla adoptados ($b = 5, 10, 50$), Figura 4.

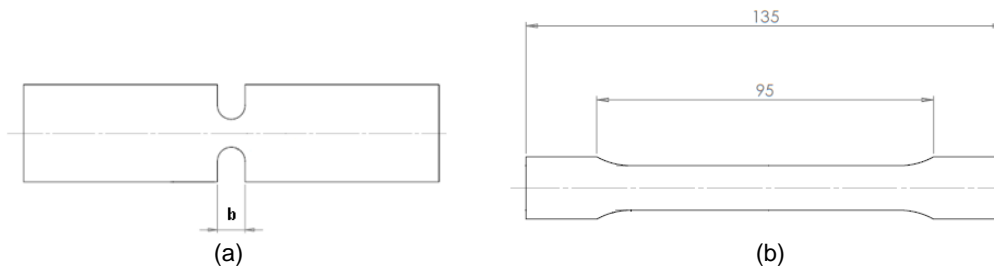


Figura 4 a) Probeta de tracción con $r = 10$. b) Probetas de tracción ISO

2.3. Ensayos de embutido y tracción

Los ensayos de embutido se llevaron a cabo en una Máquina Universal de Ensayos INSTRON modelo 3382 con una capacidad de carga de 100 kN y una velocidad de 2 mm/min trabajando en compresión, en la que se montó una matriz con un punzón hemiesférico tipo Nakazima de 40 mm de diámetro. Para dar fin al ensayo, la máquina se detiene en el momento que la misma indica una caída de carga, que manifiesta el inicio de la etapa de estricción, evitando de esta manera la presencia de grietas.

Para evitar el rozamiento excesivo entre punzón y chapa se utilizó como lubricantes politetrafluoretileno (PTFE) y MoS_2 . La lámina de teflón se corta con las mismas geometrías de las chapas a ensayar. El MoS_2

C. Campos, M. Serenelli, E. Brandaleze, G. Mansilla, P. Turner, J. Signorelli.

se coloca directamente sobre la chapa mediante spray, quedando el mismo intercalado entre la chapa y la lámina de teflón. En el caso de las deformaciones biaxiales, se empleó lubricante polimérico sólido. Los ensayos de tracción se realizaron con una velocidad del barral de 0,2 mm/min. Para los cálculos del coeficiente de Lankford, la probeta se deformó hasta un 20% tomando la probeta sólo en la dirección de la laminación.

2.4. Método de selección de puntos

En el presente trabajo el método de selección de círculos deformados se basa en el criterio utilizado por Ziegler y col. [9], en el cual se introduce una variante en la codificación, indicando a las elipses rojas (estricción localizada), azules (estricción difusa) y verdes (puntos sanos), con cruces, triángulos y círculos, respectivamente, Tabla 2.

Tabla 2 Método de selección de puntos.

Símbolo	Denominación
✖	Estricción localizada
▲	1º vecinos a la estricción
●	2º vecinos a la estricción

En la figura 5 se aprecia el detalle de la identificación de las elipses sobre una probeta deformada.

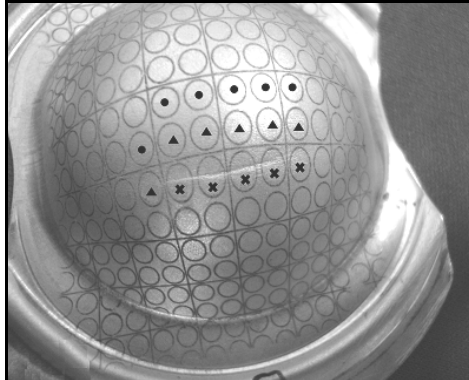


Figura 5 Elipses identificadas con símbolos

La determinación de las longitudes principales (mayor y menor) de las elipses se efectuó mediante un Proyector Óptico de Perfiles PRAZIS PO-360-VT, de disposición vertical adecuado para controlar piezas pequeñas, Figura 6.

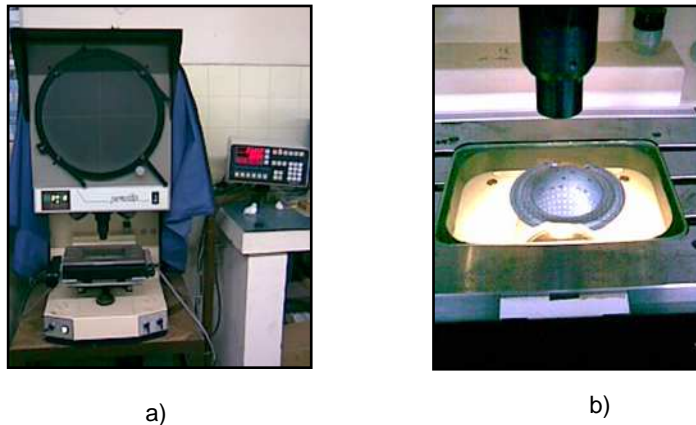


Figura 6 Proyector Óptico de Perfiles: a) Equipo, b) Mesa de coordenadas

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La construcción de la FLD se efectúa teniendo en cuenta las deformaciones verdaderas y tomando al eje de las abscisas el de deformaciones menores y al eje de ordenadas como el de deformaciones mayores. Las deformaciones menores pueden ser negativas o positivas mientras que las mayores son siempre positivas. De esta manera en el diagrama quedan regiones determinadas, de acuerdo con el tipo de sollicitación sufrida por el material, como tensión uniaxial, deformación plana y deformación biaxial.

A continuación se presenta una gráfica con los resultados de todas las probetas que se usan en la construcción de la FLD. En la misma se indica con cruces los puntos con estricción, correspondiente a una zona no utilizable para el material. Los triángulos representan la región próxima a la estricción. Esto se interpreta como aquella zona en la que se debe tener precauciones en el momento de conformar la chapa. Finalmente, los círculos determinan los puntos sanos, es decir, la zona en la cual la chapa puede trabajarse de forma segura. Al representar las deformaciones de las probetas reloj de arena con los anchos mencionados, Figura 7, se aprecia que existe un espacio sin datos definido entre los valores 0,1 y 0,2 de deformación menor.

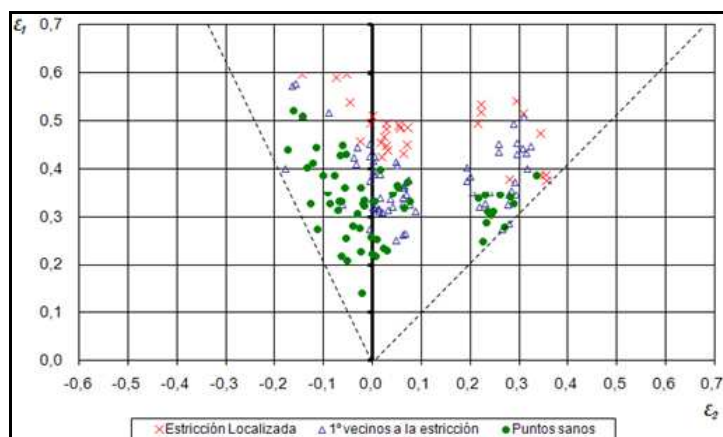


Figura 7 FLD utilizando probetas con distintos valores de a

Con intención de cubrir este espacio, se ensayaron nuevas geometrías de probetas tipo reloj de arena y de bordes rectos ensayadas con punzón hemisférico ($a = 55$ y 65). El resultado es visible en la Figura 8.

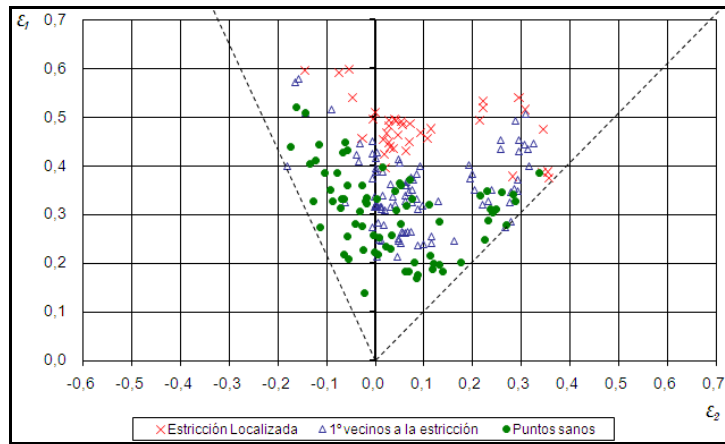


Figura 8 FLD utilizando probetas con diferentes a , incluyendo nuevas geometrías

El objetivo de mejorar la nube de puntos introduciendo las nuevas geometrías seleccionadas en este caso, no arrojaron resultados significativos. Sin embargo, a pesar de que el espacio se reduce, no se logra completar. Por esta razón, resulta conveniente presentar un diagrama indicando el estado de deformación final de cada una de las probetas. El valor promedio del conjunto de elipses medidas de cada probeta es representativo del estado de deformación de la probeta al final del ensayo de estirado. Los datos se elaboraron considerando el concepto de camino de deformación lineal, tal como lo presentan Campos y col. [7] y se muestra en la Figura 9.

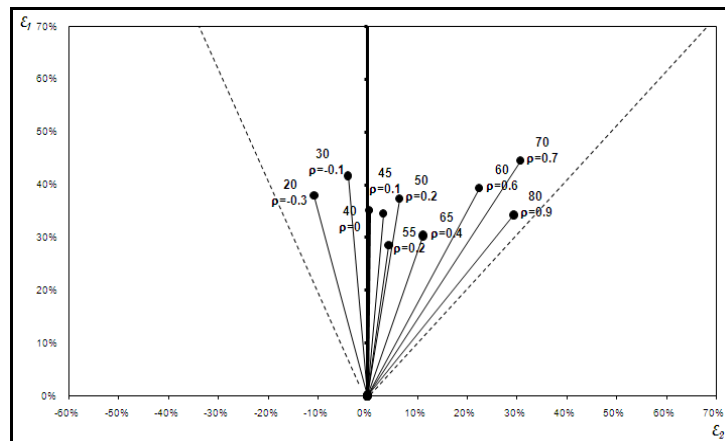


Figura 9 Estado de deformación expresado en base a caminos de deformación

Para materiales isotrópicos, la relación entre deformación menor sobre deformación mayor (ρ) varía entre $-0,5$ y 1 . Los valores de los caminos de deformación obtenidos a partir de probetas de tipo reloj de arena de menor ancho, que representan estados de deformación lineal, se asemejan a un comportamiento isotrópico. En un diagrama separado, Figura 9, se presentan los caminos de deformación obtenidos a partir de ensayos de tracción uniaxial. En esta situación no se refleja isotropía del material a través de los caminos

de deformación correspondientes a la rama izquierda de la FLD, ya que dicha probeta presenta un valor $\rho = -0,6$. Esto se explica teniendo en cuenta en primera instancia que el material empleado no es isotrópico, hecho que se corrobora a partir de los valores de los coeficientes de anisotropía planar y de Lankford ($R' = 2.018$ y $\Delta R = 0.2$, respectivamente).

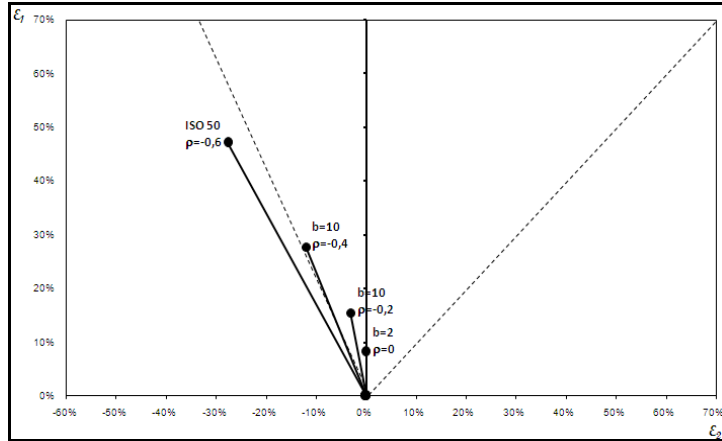


Figura 10 Caminos de deformación mediante ensayos uniaxiales

Se debe destacar que, los caminos de deformación lineales dan una simple aproximación acerca del estado de la probeta al final del ensayo. Por esta razón, resulta conveniente determinar la región definida por cada geometría en particular, Figura 11.

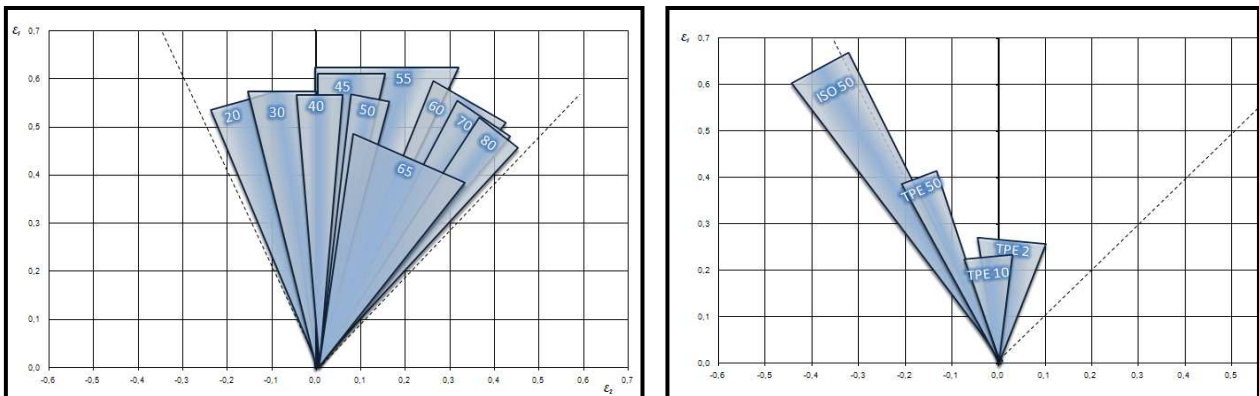


Figura 11 Región cubierta por cada geometría. a) Probetas "reloj de arena". b) Probetas de tracción.

Se puede inferir que con las diferentes geometrías empleadas en la Figura 6 es posible obtener la FLD, sin necesidad de requerir a una nueva geometría debido a que los resultados obtenidos en una primera aproximación resultan aceptables y nos permiten deducir el camino por el cual se deforma la probeta.

4. CONCLUSIÓN

En base a los resultados obtenidos a partir de los ensayos de punzón hemiesférico y de tracción se puede concluir que:

Los caminos de deformación brindan una buena aproximación acerca del estado final alcanzado por la probeta ensayada. Logrando a partir de este conocimiento obtener información acerca del comportamiento de deformación del material frente a diferentes tipos de sollicitaciones mecánicas.

Se considera que cada geometría permite definir el rango de los caminos de deformación seguidos por el material durante los ensayos, siendo esta información de gran utilidad en aplicaciones específicas del material.

En base al rango de valores de deformación definido por cada geometría en la Figura 11, es posible fijar un cierto grupo de probetas necesarias para estudiar la FLD de una chapa de acero de bajo carbono. En este sentido se sugieren las geometrías reloj de arena con valores de $a = 20, 30, 40, 45, 50, 60, 70$ y 80 , por considerarse suficientes para el estudio de conformado.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] S. P. Keeler, W. A. Backofen, Plastic Instability and Fracture in Steel Stretched Over Rigid Punches, *Trans. ASM*, 56, 25-48, 1963.
- [2] G. M. Goodwin, Application of Strain Analysis of Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop, *SAE*, 1968.
- [3] K. Janssens, F. Lambert, S. Vanrostenberghe, M. Vermeulen, Statistical Evaluation of the Uncertainty of Experimentally Characterized Forming Limits of Sheet Steel, *J. Mater. Process. Technol.* 112, 174-84, 2001.
- [4] F. Ozturk, D. Lee, Experimental and Numerical Analysis of Out-of-Plane Formability Test, *J. Mater. Process. Technol.* 170, 247-253, 2005
- [5] H. B. Campos, M. C. Butuc, J. J. Grácio, J.E. Rocha, J. M. Ferreira Duarte, Theoretical and Experimental Determination of the Forming Limit Diagram for the AISI 304 Stainless Steel, *J. Mater. Process. Technol.* 179, 56-60, 2006.
- [6] G. Charca, M. Stout, P. Turner, J. Signorelli, *2do Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales*, Estudio Experimental de la Deformabilidad de un Acero Galvanizado de Bajo Carbono para Embutido Profundo, Posadas – Misiones, 16-17 Octubre 2008.