

## TRAYECTORIA DE DEFORMACIÓN DE LOS PUNTOS UBICADOS SOBRE LA DIAGONAL MAYOR DE UNA PROBETA DE ACOBADO HIDRÁULICO CON MÁSCARA ELÍPTICA

G. Bergé, J. Insausti, A. Lucaioli, D. Ziegler, M. Puccinelli y L. Iurman

Laboratorio de Metalurgia, Departamento de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur, ARGENTINA.

E-mail: [insausti@criba.edu.ar](mailto:insausti@criba.edu.ar)

### RESUMEN

*Para la determinación de las curvas de conformado límite de chapas en la zona de estirado, se ensayan probetas traccionándolas hasta la rotura, siguiendo distintas trayectorias de deformación. Luego de los ensayos se miden los estados de deformación de puntos cercanos a la rotura y se grafican, pero no se conocen los caminos de deformación seguidos por esos puntos hasta su estado final.*

*En este trabajo se analiza la trayectoria de deformación que siguen los puntos ubicados sobre la diagonal mayor de una probeta de acobado hidráulico biaxial con máscara elíptica mientras se ensaya hasta la rotura. La metodología de trabajo consiste en interrumpir el ensayo para distintos grados de deformación y medir las deformaciones correspondientes con el objeto de obtener la trayectoria de cada punto y las relaciones de deformación. Luego se grafican estos datos para mostrar el camino de deformación de los puntos elegidos.*

*Las relaciones de deformaciones de los puntos de la diagonal mayor se extienden a ambos lados de la relación geométrica de la máscara empleada, dependiendo su valor del punto medido.*

*Las relaciones de deformaciones durante el incremento de deformaciones totales se mantiene constante para cada punto. Esto indica que las trayectorias de los distintos puntos obtenidos con este ensayo son lineales, sin embargo, para los puntos que llegan a la fractura, se aprecia que hacia el final de la trayectoria, luego de la estricción difusa,  $\beta$  tiende hacia un valor nulo porque se estabiliza el valor de  $\epsilon_2$ .*

*A medida que los puntos se alejan del centro de la probeta, las relaciones de deformaciones disminuyen.*

*No se aprecia que el valor de  $\beta$  sea afectado por la anisotropía.*

**Tópico:** 2 Materiales Metálicos

**Palabras clave:** Conformado de chapas de acero, Diagrama límite de conformado, Acobado hidráulico con máscara elíptica.

### 1. INTRODUCCIÓN

La determinación del Diagrama Límite de Conformado (DLC) en el cual se grafican las deformaciones principales naturales  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$  finales que sufre la chapa con diferentes trayectorias de deformación, provee una forma de determinar la conformabilidad de chapas metálicas. La relación de deformaciones  $\beta$ , definida por la Ecuación (1), permite identificar las trayectorias seguidas por los distintos puntos [1-3].

$$\beta = \epsilon_2 / \epsilon_1 \quad (1)$$

En la figura 1, se muestra un DLC típico de una chapa metálica de acero, donde se ven las zonas correspondientes a piezas sanas y aquellas que producen la falla.

La obtención de estos diagramas obliga a realizar ensayos que produzcan diferentes trayectorias de deformación  $\beta$ , y obtener las condiciones límites de cada una de ellas. La determinación del DLC para el cuadrante correspondiente a tracción biaxial puede realizarse mediante acobado hidráulico con máscaras elípticas y circulares. Las máscaras elípticas se emplean para obtener trayectorias de deformación con  $\beta$  mayores que cero y

menores que uno. La relación de dimensiones de los diámetros principales de la elipse influye en los valores de  $\beta$  de cada uno de los puntos, sin embargo, la trayectoria de cada punto depende de la ubicación del mismo dentro de la zona de la probeta deformada. Es decir, las deformaciones de todos los puntos corresponden a una tracción biaxial no equilibrada pero con distinto valor de  $\beta$ . Es normal suponer en la práctica, que el valor de  $\beta$  se mantiene constante, o sea que los pasos de deformación son lineales. Debe tenerse especial cuidado en determinar si esta hipótesis es razonable. Por tal motivo es de interés también saber si la trayectoria de deformación se mantiene durante el ensayo y además si es afectada por la anisotropía del material [2].



Figura 1. Diagrama Límite de Conformado

## 2. MATERIAL Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este trabajo se estudia cómo varían las relaciones de deformación seguidas por puntos ubicados a lo largo del eje mayor de una probeta elíptica de acopado hidráulico mientras se realiza el ensayo hasta la rotura. Estos puntos son los que sufren la mayor deformación. Esto queda confirmado por cuanto como se aprecia en la Figura 2 (foto probetas rotas), la fractura se extiende en la dirección indicada por dicha diagonal, independientemente de la dirección de laminación. Para estudiar la influencia de la anisotropía del material se realizan ensayos ubicando el eje menor de la probeta en la dirección de laminación de la chapa y en la dirección transversal a la misma.

El material empleado para realizar las experiencias es una chapa electrocincada de 0,67 mm de espesor. La composición química de este material se indica en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química en peso de la chapa de acero

Elemento	% en peso
C (% w)	0,030
Mn (% w)	0,180
Si(% w)	0,028
P (% w)	0,013
S (% w)	0,090
Al (% w)	0,050

Las propiedades mecánicas de la chapa se presentan en la tabla 2.

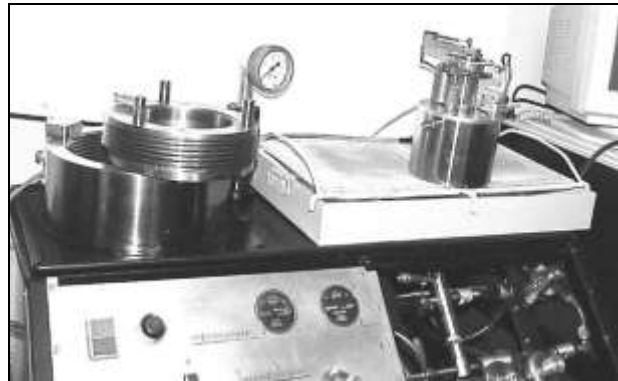
Tabla 2. Propiedades mecánicas

Propiedad	Valores
Rotura [MPa]	306
Fluencia [MPa]	178
Alargamiento [%]	40,3
Coefficiente n	0,21
Coefficiente R	1,92

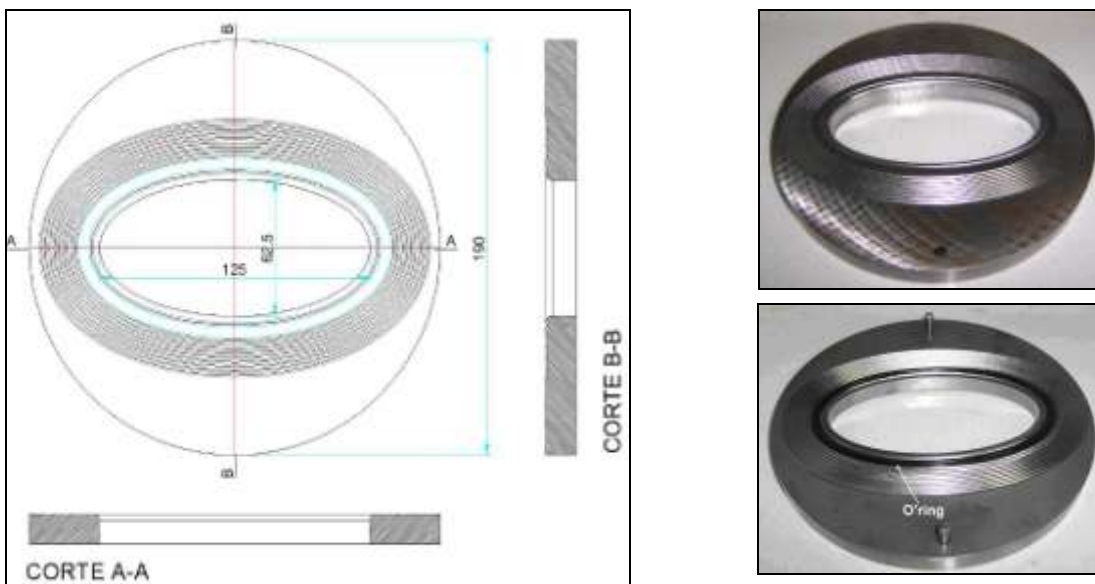
La máscara adoptada posee un dentado elíptico que permite amarrar la chapa hasta el borde de la elipse. La

misma hace que la chapa se deforme en una zona elíptica cuyo diámetro mayor es de 125 mm y su diámetro menor de 62,5 mm [4].

La máquina de acopado biaxial utilizada se muestra en la figura 2 [5] y la máscara elíptica en la figura 3



**Figura 2.** Máquina de acopado biaxial



**Figura 3.** Dimensiones de la máscara de acopado y fotografías de la parte superior e inferior

Las probetas empleadas fueron grilladas por ataque electroquímico empleando una solución acuosa al 10 % de ácido oxálico como reactivo. El estencil empleado posee un modelo de grilla con círculos de 2,5 mm de diámetro. Cada círculo está inscripto en una malla cuadrada de 3,125 mm de lado.

Se realizaron ensayos para distintas deformaciones finales tratando de que las mismas fueran iguales para ambos sentidos de laminación. Para controlar las deformaciones finales se midió la flecha en el vértice de la copa. Los puntos adoptados para realizar las mediciones se ubicaron en dirección paralela al eje mayor de la elipse.

Se cortaron en total ocho probetas. De ellas, se tomaron cuatro probetas para ser ensayadas de forma tal que la deformación mayor (ubicada en la dirección del diámetro menor de la elipse) coincidiera con la dirección de laminación. Las otras cuatro se ensayaron de forma tal que la deformación mayor coincidiese con la dirección transversal a la laminación.

Las probetas de cada grupo fueron ensayadas incrementando la cantidad de deformación hasta el punto de conseguir la fractura. Para controlar las cantidades de deformaciones menores de aquellas que producen la

fractura se controló la altura del domo producido por el acopado.

Probetas Longitudinales: Ensayadas hasta 16 mm, 20 mm, 22 mm. y fractura.

Probetas Transversales: Ensayadas hasta 17 mm., 18mm., 20 mm. y fractura.

Se analizaron las trayectorias de 5 puntos ubicados sobre diagonal mayor. Estos puntos están ubicados a distancias crecientes del centro de la máscara como se indica en la tabla 3.

**Tabla 3.** Ubicación de los puntos analizados sobre la diagonal mayor

Punto	Distancia del Punto al Centro de la Probeta [mm]
1	0
2	12
3	19
4	28
5	35

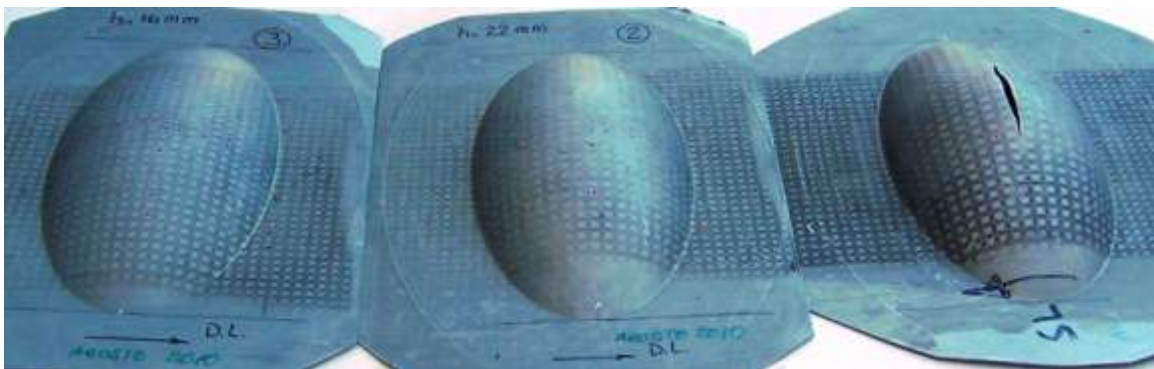
Para la selección de ellos, se ha tenido en cuenta que los puntos 2 y 3 se corresponden con los extremos de la zona fracturada.-

En la zona de fractura los puntos se ubicaron sobre el círculo entero de la grilla más próximo a la diagonal mayor, mientras que en la zona no fracturada se adoptó el círculo más próximo a la diagonal mayor [6].

Para medir las deformaciones de cada punto se tomaron el promedio de las mediciones de tres círculos, el correspondiente a cada punto y los dos adyacentes sobre la diagonal mayor.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 4 muestra tres probetas ensayadas en la dirección longitudinal con distintas deformaciones finales. En las probetas se pueden observar los puntos medidos.



**Figura 4.** Probetas ensayadas en la dirección longitudinal con distinta deformación final

La evolución de las deformaciones de los cinco puntos adoptados a medida que crece la deformación final del ensayo se muestran en la figura 5, tanto para los ensayos realizados en la dirección longitudinal como para aquellos efectuados en la dirección transversal.

Las deformaciones de los distintos puntos analizados muestran que:

- Cuanto mayor es la distancia del punto al centro de la probeta, menores son las deformaciones  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$  finales alcanzadas por el mismo.
- Las deformaciones de cada punto se incrementan con la deformación final de la probeta.
- Para el mismo punto y distintas orientaciones de las probetas, en algunos casos, existen marcadas diferencias entre los valores de  $\epsilon_1$ . Esto se debe a que no se consiguieron deformaciones finales iguales en las probetas distintamente orientadas.
- El error absoluto de medición es el mismo para todos los puntos, sin embargo el error relativo es tanto mayor cuanto menores son las deformaciones. Esto se produce sobre todo para los puntos 4 y 5.

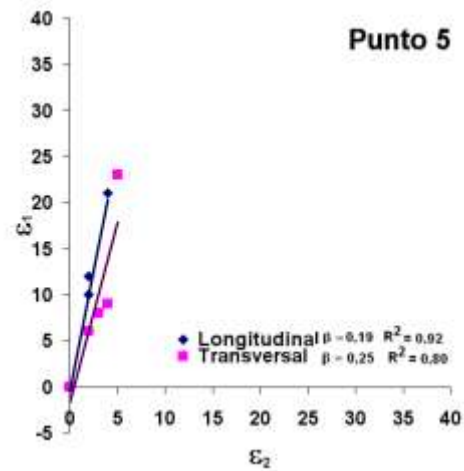
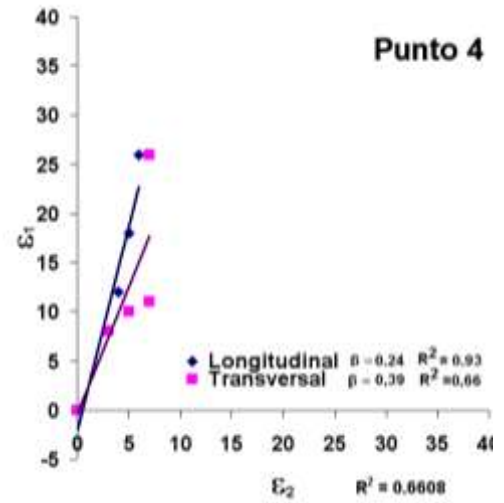
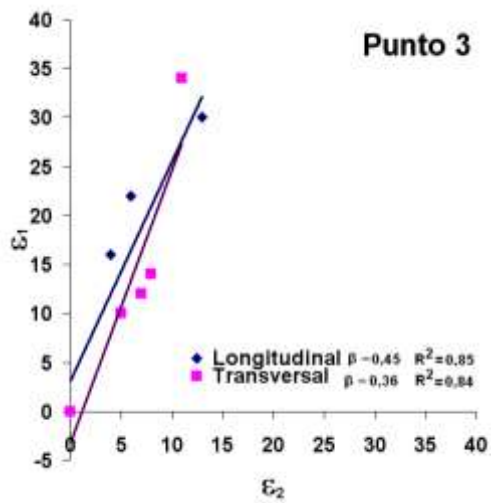
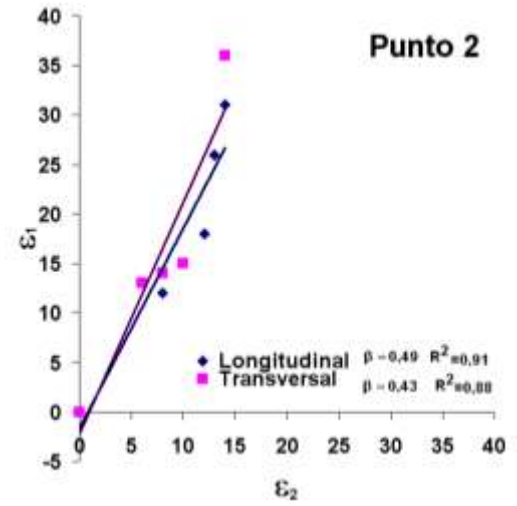
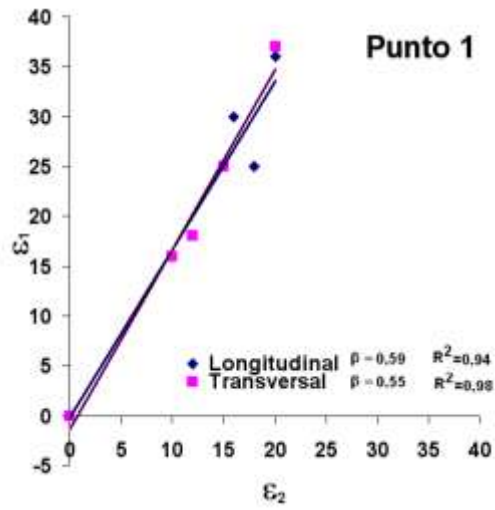
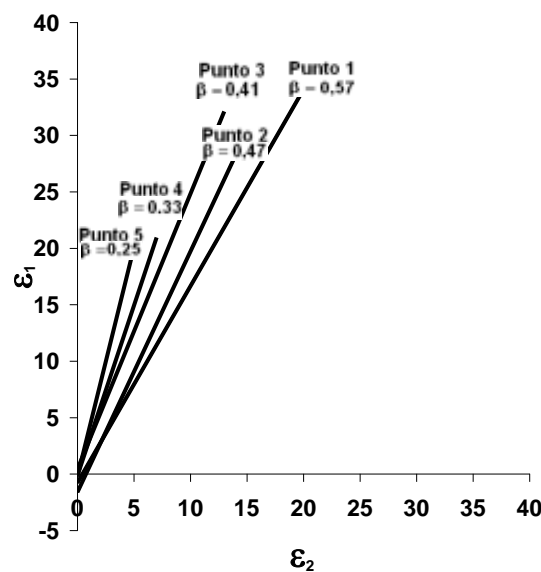


Figura 5. Evolución de las deformaciones de los puntos analizados

- Las deformaciones correspondientes a un mismo punto no muestran diferencias apreciables al considerar las distintas orientaciones de las probetas, por lo que se considera que la anisotropía no tiene mayor influencia en las deformaciones.
- Se han calculado las relaciones de deformaciones correspondientes a los distintos puntos incluyendo, para cada punto, todas las mediciones efectuadas. Los valores de  $\beta$  de cada punto son similares para las distintas direcciones pero varían con el mismo.
- Las evoluciones de los puntos 1, 2 y 3 llegan hasta la fractura. Se observa que para estos puntos, después de una trayectoria lineal con un determinado  $\beta$  hasta lograr el establecimiento de la estricción difusa, la relación  $\beta$  tiende a cero para llegar a la estricción localizada y producir la fractura.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se ha estimado oportuno representar las trayectorias de cada punto a través de su recta de ajuste de todas las mediciones efectuadas para el mismo y obtener un único valor de  $\beta$  sin hacer diferencias entre las deformaciones medidas para una y otra dirección de la probeta. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.



**Figura 6.** Relaciones de deformaciones de los distintos puntos.

La tabla 4 muestra los coeficientes de correlación de las líneas de tendencia para distintas trayectorias.

**Tabla 4.** Coeficientes de correlación de cada trayectoria

Punto	$\beta$	$R^2$
1	0,57	0,96
2	0,47	0,88
3	0,41	0,82
4	0,33	0,70
5	0,25	0,76

De estos resultados se infiere que:

- La relación de deformaciones se mantiene constante para cada punto analizado. El mayor valor de  $\beta$  corresponde al punto ubicado en el centro de la probeta. A medida que los puntos se apartan del centro hacia el borde este valor va decreciendo, tendiendo a un estado de deformación plana ( $\epsilon_2=0$ ) impuesto por las condiciones de anclaje.

- Los puntos ubicados entre los puntos 1 y 3 son los que brindan información para la estricción localizada que lleva a la fractura, mientras que los puntos 4 y 5 corresponderían a puntos cada vez más alejados de esta situación por cuanto en esa zona la probeta no ha fracturado.
- Lo anterior indica que esta máscara, con una relación geométrica diámetro mayor/diámetro menor =  $62,5/125 = 0,5$  para el material analizado permite obtener datos para trayectorias de deformación con valores de  $\beta$  comprendidos entre 0,57 y 0,41. Es decir, si bien los valores obtenidos están comprendidos entre 0 y 1 no guardan una relación fija con la relación geométrica de la máscara sino que se extienden a ambos lados de la misma.
- Los resultados obtenidos con un acopado hidráulico de una chapa empleando una máscara elíptica, corresponden a varios puntos siguiendo distintas trayectorias
- Los valores del coeficiente de correlación de cada punto van decreciendo a medida que nos alejamos del centro. Esto se debe a que el error absoluto de medición es el mismo para todos los puntos, sin embargo el error relativo es tanto mayor cuanto menores son las deformaciones. Esto se produce sobre todo para los puntos 4 y 5.

#### 4. CONCLUSIONES

- El acopado hidráulico con máscara elíptica permite obtener las deformaciones límites para distintas trayectorias correspondientes a puntos ubicados sobre la diagonal mayor. Las relaciones de deformaciones de estos puntos se extienden a ambos lados de la relación geométrica de la máscara empleada, dependiendo su valor del punto medido.
- La relación de deformaciones durante el incremento de deformaciones totales se mantiene constante para cada punto. Esto indica que las trayectorias de los distintos puntos obtenidos con este ensayo son lineales.
- Para los puntos que llegan a la fractura, se aprecia que hacia el final de la trayectoria, luego de la estricción difusa, el cambio de  $\beta$  hacia un valor nulo
- A medida que los puntos se alejan del centro de la probeta, las relaciones de deformaciones disminuyen.
- Las relaciones de deformaciones no se ven afectadas por la anisotropía.

#### REFERENCIAS

1. W. F. Oxford and J. L. Duncan. "Sheet Metal Forming: A Review". Journal JOM, 51(11)(1999), pp. 39-44.
2. Marciniak Z., Duncan J. L., Hu S. J., "Mechanics of Sheet Metal Forming", Butterworth Heinemann, 2002.
3. Jieshi Chen, Xianbin Zhou and Jun Chen. "Sheet Metal Forming Limit Prediction Based on Plastic Deformation Energy". Journal of Materials Processing Technology. 210(2010). p 315-332.
4. L.G. Bergé, J. Insausti, A. Lucaioli, D. Ziegler y L. Iurman. "Modificación del sistema de anclaje de la chapa en ensayos de acopado hidráulico con máscara elíptica". II CAIM 2010. San Juan. Nov 2010.
5. A. Cariac, A. Lucaioli, F. Fernandez Long, L. Iurman, D. Ziegler. "Diseño y Construcción de un Equipo Hidráulico Para Ensayo Biaxial de Chapas Metálicas". CIDIM'99, V.3. Santiago, Chile, 1999.
6. S. S. Hecker, "Simple technique for determining FLC", Sheet Metal Ind., 52(1975), p 671-675.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur por subsidiar el proyecto en el que se enmarca el presente trabajo.