

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁSCARA ELÍPTICA PARA ENSAYOS DE ACOPADO BIAxIAL

Guillermo Bergé*¹, Alberto Lucaioli², Daniel Ziegler³, Jorge Insausti⁴, Lucio Iurman⁵

*Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253. (8000) Bahía Blanca. e-mail: lgberge@criba.edu.ar*

RESUMEN

Para determinar la aptitud de las chapas de acero frente a procesos de conformado, se confeccionan, a través de distintos ensayos a la rotura, diagramas que muestran las capacidades de las chapas para deformarse cuando son sometidas a diferentes caminos de deformación. Estos diagramas se conocen como Diagramas Límites de Conformado (DLC). Para graficar cada punto del diagrama, se miden las deformaciones sufridas por las chapas, en las dos direcciones principales, en puntos cercanos a la zona de rotura. Las mediciones se realizan sobre celdas de origen circular grabadas en la superficie de la chapa con el método conocido como grillado. Para determinar una nube de puntos completa, es necesario realizar mediciones que correspondan a distintos caminos de deformación. La zona de deformaciones positiva - negativa es una función lineal y se obtiene, sin mayores dificultades, con ensayos de tracción uniaxial utilizando probetas de diferente ancho. La zona de deformaciones positivas en ambas direcciones, en cambio, no responde linealmente por lo que es necesario determinar varios puntos con deformaciones positivas variadas. Esto se cumple en parte utilizando el acopado biaxial equilibrado pero es necesario encontrar puntos con otros caminos de deformación intermedios correspondientes a esa zona.

En este trabajo se describe el diseño, la construcción y puesta a punto de una matriz elíptica para el equipo de acopado biaxial existente en el Laboratorio de Metalurgia de la U.N.S. para obtener una relación de deformaciones que permita obtener puntos experimentales sobre el DLC en la zona intermedia de deformaciones positivas.

Palabras Claves: Acopado hidráulico, Diagrama límite de conformado, Chapas de acero, Conformado.

1. INTRODUCCIÓN

Las operaciones de conformado de chapas someten al material a estados diferentes y complejos de tensiones. A los efectos de evaluar la aptitud de las chapas para que las operaciones se lleven a cabo exitosamente, se debe en lo posible reproducir las solicitaciones a las que el material estará expuesto. En este sentido, se puede hablar de esfuerzos de tracción-compresión en operaciones de embutido, tracción biaxial en estirado, y condiciones de doblado en muchos casos combinadas con las anteriores.

Una manera de evaluar la aptitud mencionada es mediante los llamados Diagramas Límites de Conformado (DLC) en los cuales se grafican las deformaciones principales naturales ε_1 y ε_2 que sufre la chapa con diferentes trayectorias de deformación. En los mismos se conviene que ε_1 es siempre la deformación mayor. La trayectoria se identifica con la relación de deformaciones β definida por la Ecuación (1) [1].

$$\beta = \varepsilon_1 / \varepsilon_2 \quad (1)$$

En esos diagramas existe una zona de deformaciones que da lugar a piezas sanas y otra en la que las chapas fallan. En la Figura 1 se ve un diagrama de estas características.

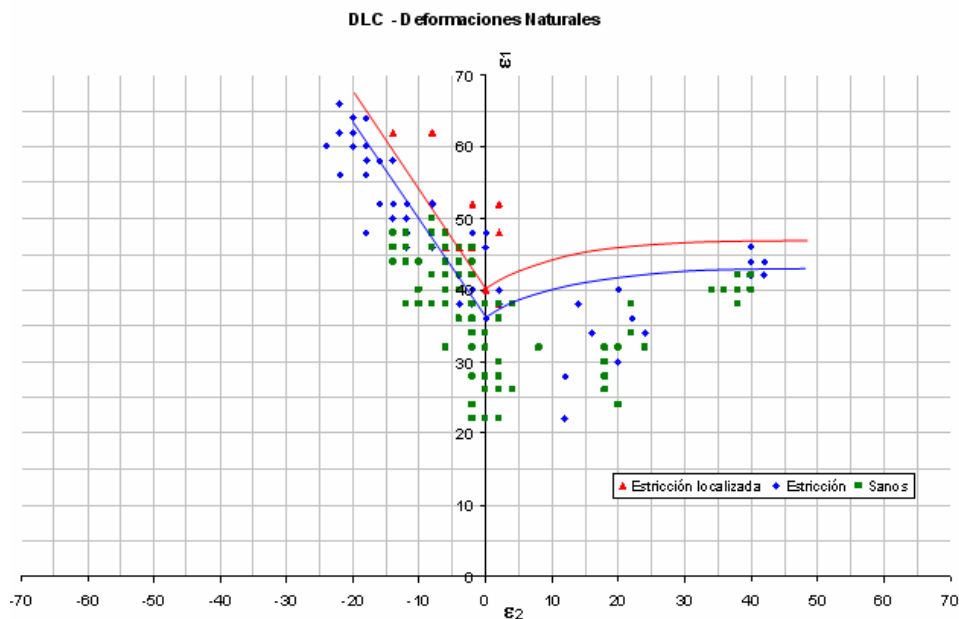


Figura 1 Diagrama DLC

A los efectos de determinar el DLC de una chapa metálica, se realizan diferentes ensayos en los que se obtienen trayectorias de deformaciones distintas, llevando al material hasta la rotura. Se miden las deformaciones en las proximidades de las fallas, considerándolas como las mayores deformaciones que es capaz de soportar el material antes de romperse o entrar en estricción. Para medir estas deformaciones, se imprime una grilla circular en la superficie de la

chapa, que al ser deformada la misma da lugar a elipses que indican las deformaciones mayor (ϵ_1) y menor (ϵ_2) que se registran en el diagrama.

En el cuadrante derecho del DLC, correspondientes a estados de deformación biaxial de tracción (estirado), es decir con trayectorias con relaciones β positivas, ya se contaba con un equipo diseñado y construido en el Laboratorio de Metalurgia, Figura 2, para hacer acopados hidráulicos con condiciones de tracción biaxial equilibrada ($\beta=1$) [2]



Figura 2 Equipo hidráulico de expansión biaxial

Para obtener otros puntos del diagrama en este cuadrante, era necesario poder contar con equipamiento apto para obtener deformaciones biaxiales de tracción con diferentes relaciones β . Para ello se construyeron dos máscaras elípticas para ser usadas en la máquina existente, que permiten realizar acopados con trayectorias de deformación con $\beta < 1$.

2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LAS MÁSCARAS ELÍPTICAS

Para permitir la utilización de la misma máquina de la Figura 2, el diámetro mayor máximo de la elipse queda limitado al diámetro de la máscara circular 125 [mm], siendo el diámetro de la placa de 190 [mm]. Figura 3

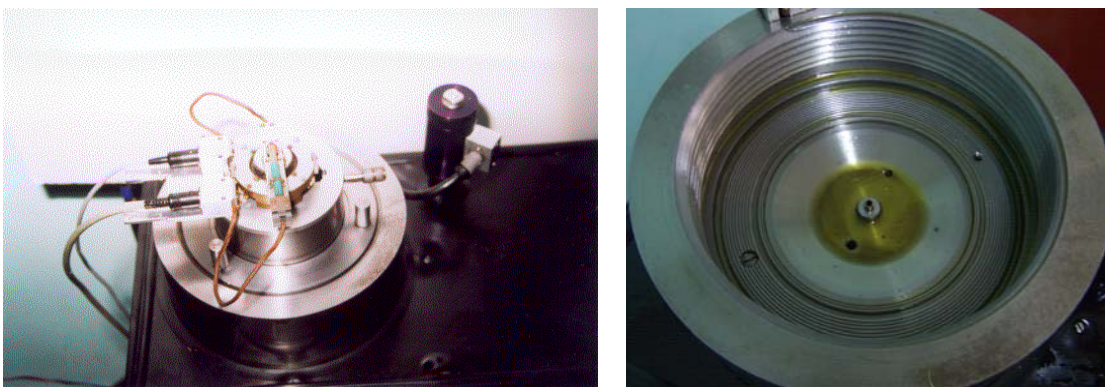


Figura 3 Cabezal máquina actual

El anclaje de las chapas para ser deformadas con la máscara elíptica involucra la inserción de una placa entre el asiento de la probeta y el aro roscado de fijación.- Las características geométricas del cabezal, permiten emplear para las máscaras elípticas placas de 15 [mm] de

espesor. Se adoptaron para las elipses las relaciones entre diámetro menor y diámetro mayor indicadas en la Tabla 1

Tabla 1 Dimensiones de las máscaras elípticas.

Máscara	Relación de Diámetros	Diámetro Mayor	Diámetro Menor
1	0.50	125 [mm]	62.5 [mm]
2	0.75	125 [mm]	93.5 [mm]

Cuando se realiza un acopado hidráulico con máscara circular, la chapa queda soportada entre el asiento y la máscara, que es presionada por el aro roscado, quedando anclada entre estas dos superficies coincidentes.- Al utilizar máscaras elípticas, aparecen zonas de las mismas en voladizo, Figura 4. Sobre estas zonas en voladizo actúan por un lado la presión p existente en la cámara durante el ensayo (carga uniformemente distribuida) y por otro una fuerza normal distribuida en todo su perímetro producida por la chapa que se está deformando. El valor de esta fuerza normal P es igual a la superficie de la elipse por la presión de ensayo en la cámara.

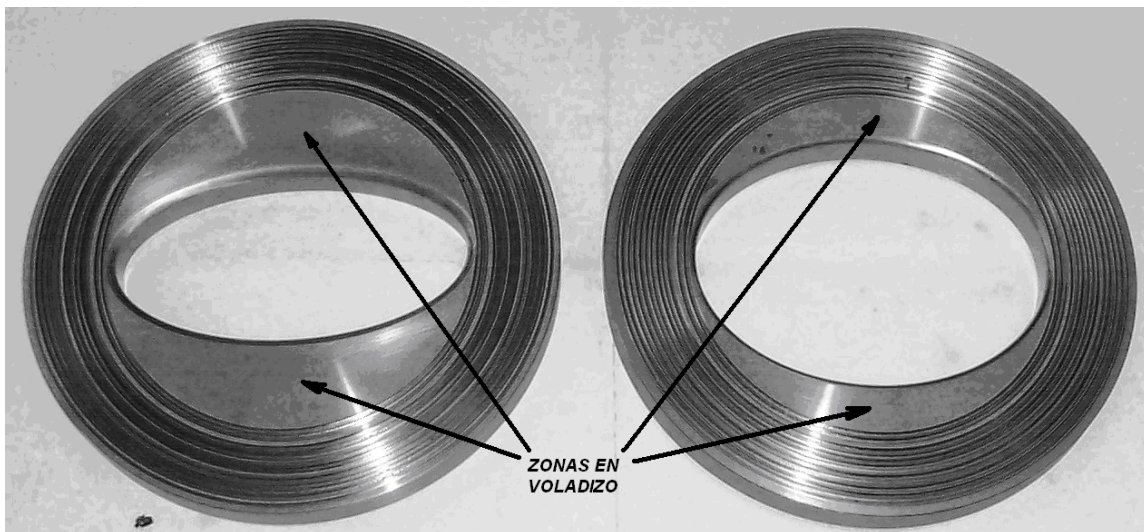


Figura 4 Máscaras elípticas

Se verificó que el espesor adoptado permanece en período elástico para el acero utilizado y la presión máxima que puede otorgar la bomba. Para este cálculo se consideró el modelo de una placa empotrada con un orificio central circular de diámetro igual al diámetro menor de la elipse, sometida a una carga p distribuida en el área llena de la placa más una carga P uniformemente repartida en el perímetro del orificio circular. Los esquemas de apoyo y carga de las placas se muestran en la Figura 5 [3].

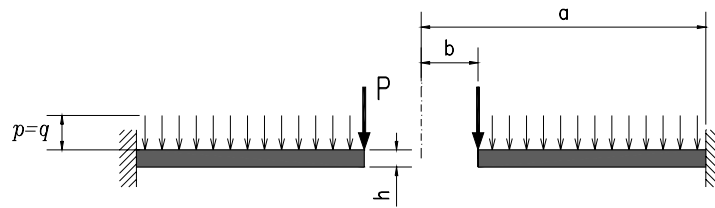
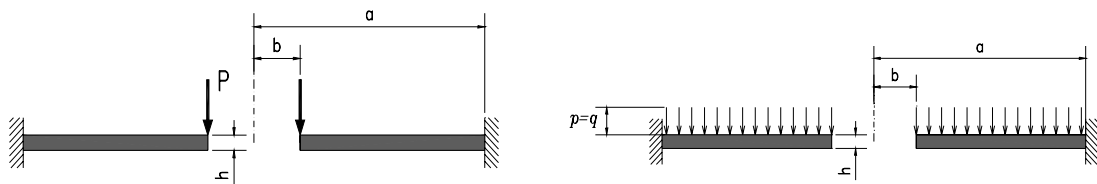


Figura 5 Esquema cargas actuantes sobre la placa

En los esquemas de la Figura 6, se indican las variables tenidas en cuenta en el cálculo.-



Caso 9
 $\sigma_{\text{máx}} = k P/h^2$

Caso 10
 $\sigma_{\text{máx}} = k qa^2/h^2$

Figura 6 Casos considerados de cargas actuantes sobre la placa

Para calcular la tensión máxima actuante en cada caso se aplicaron las fórmulas indicadas en la Figura 6 con los valores de los parámetros indicados en la Tabla 2.

Tabla 2 Valores de los parámetros empleados en la verificación de la resistencia de las placas.

Máscara	Parámetro	Valor
1 y 2	a	62.5 [mm]
1	b	31.25 [mm]
.2	b	46.75 [mm]
1 y 2	h	15 [mm]
1 y 2	Presión Máxima(p)	12 [MPa]

Los valores del factor k están tabulados en función de las relaciones a/b para cada uno de los casos definidos por tipo de apoyos y cargas actuantes. Para las condiciones de trabajo de estas placas, casos 9 y 10, se adoptaron los valores de k indicados en la Tabla 3.

Tabla 3 Valores del factor K

Máscara	Caso	K adoptado
1	9	0.454
	10	0.48
2	9	0.25
	10	0.20

La tensión máxima, suma de los casos 9 y 10, resultó de 250 MPa para la Máscara 1 y de 170 MPa para la Máscara 2.

Si se tiene en cuenta que el acero empleado para la placa es un SAE 4140 templado y revenido, con una dureza de 30 HRc, el valor de la tensión proporcional de fluencia es de 800 MPa ($R_{p0.2} = 800$ MPa). Para éste valor de fluencia resulta más que seguro adoptar un $\sigma_{adm} = 400$ MPa, valor que excede las tensiones máximas originadas en las máscaras.

Las máscaras se mecanizaron en un centro de mecanizado CNC. La cara que apoya sobre la chapa para sujetarla tiene labrados los dientes para asegurar el amarre. El borde de la elipse se construyó con un radio de empalme de 3 mm a 5 mm. Estas máscaras pueden apreciarse en la Figura 4.

Como estas máscaras amordazan la chapa sobre la base del cabezal construido para deformar chapa con máscara cilíndrica, la zona real de anclaje de la chapa no está ubicada sobre la periferia de la máscara elíptica. Es decir que durante la formación de la cúpula por estirado, existen zonas de material entre la zona circular y la elíptica que no quedan amarradas y pueden aportar material. En cada máscara, la distancia entre la zona de anclaje y el borde de la elipse, es mayor sobre el diámetro menor de la elipse. El área de la zona sin anclaje, se incrementa a medida que disminuye el valor del diámetro menor de la elipse. (Figura 4)

3. MATERIAL Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para realizar las experiencias se empleó una chapa electrocincada de 0,67 mm de espesor.

Los ensayos se realizaron empleando las dos máscaras descritas con el objeto de obtener trayectorias con distinto valor de β .

A los efectos de medir las deformaciones en el plano de la chapa, se imprimieron grillas sobre la superficie de la misma, por medio de ataque electroquímico. Se empleó un stencil con un modelo de grilla de disposición cuadrada de círculos en contacto de 2,5 mm de diámetro y se empleó, como reactivo, una solución acuosa al 10% de ácido oxálico.- [4]

Los círculos deformados se midieron usando una reglilla flexible de plástico transparente y con el apoyo de una lupa.

Se ensayaron 2 probetas para cada dirección de ubicación de la chapa con respecto a la dirección de los ejes de la elipse. Los ensayos se realizaron en la dirección longitudinal, transversal e inclinada a 45° respecto de la dirección de laminación. Las direcciones de ensayo se hicieron coincidir con la dirección del diámetro menor de la elipse a los efectos de aplicar en la dirección considerada la mayor deformación.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Todas las probetas ensayadas fueron medidas en la región ubicada en el polo de cada cúpula obtenida, como puede apreciarse en la Figura 7, en la que observan marcados los puntos medidos.

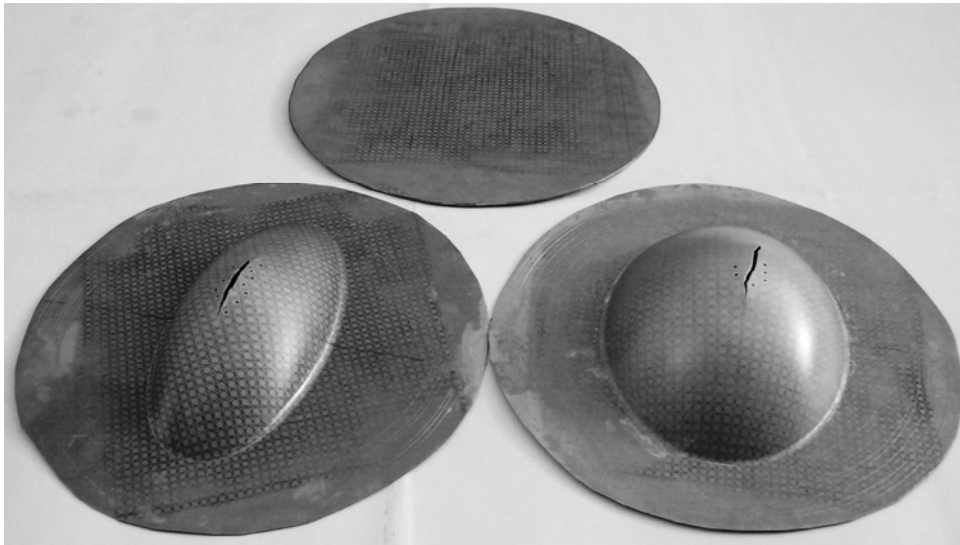


Figura 7 Probetas ensayadas con máscaras 1 y 2

Los valores de las deformaciones ϵ_1 y ϵ_2 correspondientes a una determinada máscara y dirección fueron representados en un gráfico.

En la Figura 8 se han representado los resultados correspondientes a las máscaras n° 1 y n° 2. para las tres direcciones de la chapa analizadas.

Debe tenerse en cuenta que en los dos ensayos realizados para cada dirección y máscara se han medido entre 16 y 19 puntos. Como varios de estos puntos tienen las mismas coordenadas (Deformaciones ϵ_1 y ϵ_2) la representación de los mismos se superpone y no se puede ponderar visualmente dónde está ubicado el punto que correspondería a los valores medios de ϵ_1 y ϵ_2 . Se calcularon para los valores correspondientes a cada gráfico dichos valores medios y este valor baricéntrico se representó en el diagrama. La línea que une el origen del diagrama con dicho baricentro indica la trayectoria de deformación y permite calcular el valor de β .

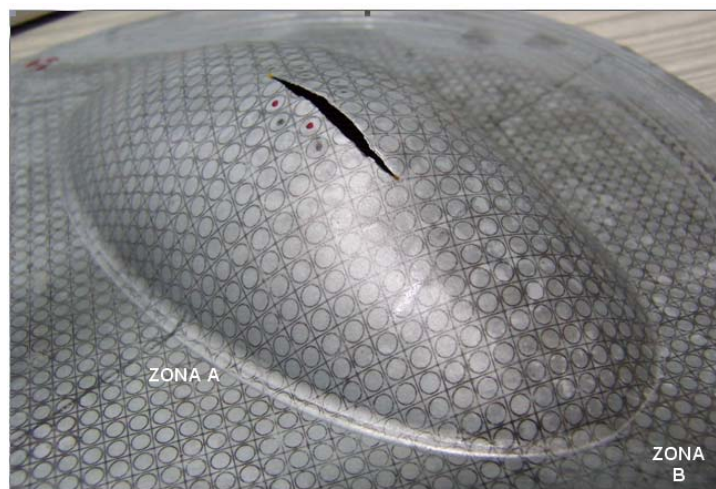


Figura 9 Probeta ensayada con máscaras

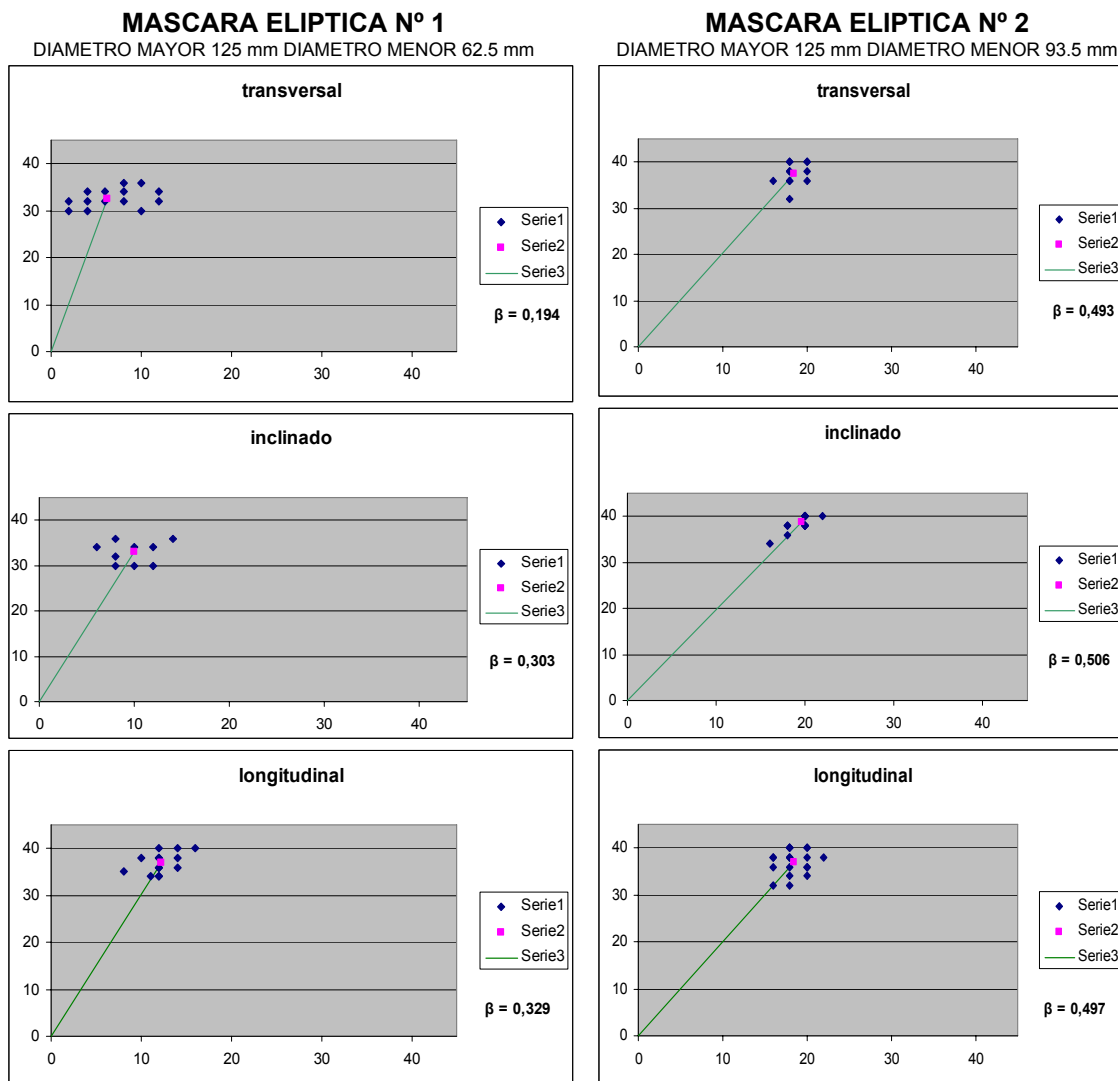


Figura 8 Resultados obtenidos para máscaras 1 y 2

En la probeta ensayada mostrada en la Figura 9 puede apreciarse que en la zona A ubicada en el borde de la máscara elíptica, ha existido deslizamiento y planchado más acentuado que en la zona B. El borde de la máscara en la zona A es el que se encuentra más alejado del anclaje.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Se han obtenido los valores de β para ambas máscaras.
- Estos valores que indican la trayectoria muestran una acentuada dependencia de la dirección de ensayo de la probeta con la máscara 1. Esa dependencia casi desaparece con la máscara 2.
- Las causas de estos apartamientos podrían deberse a la acción conjunta del sistema de anclaje y la anisotropía del material.

- Se ha podido apreciar que las zonas de la chapa ubicadas sobre el borde de la máscara elíptica, en las zonas más alejadas del anclaje, han sufrido mayores desplazamientos que aquellas ubicadas en las zonas más cercanas. Esto se debe al aporte del material no anclado.
- En todos los ensayos la rotura se propagó en dirección normal a la de la mayor deformación.

6. CONCLUSIONES

La construcción de estas máscaras hace que se cuente con equipamiento e instrumentación adecuados para obtener trayectorias diferentes de deformaciones de tracción biaxial sobre chapas metálicas. Estas facilidades, sumadas a las existentes previamente, permiten determinar Diagramas Límites de Conformado con mayor precisión.

7. REFERENCIAS

- [1] Marciniak Z., Duncan J. L., Hu S. J.. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Butterworth Heinemann, 2002.
- [2] A. Cariac, A. Lucaioli, F. Fernandez Long, L. Iurman, D. Ziegler , *Actas del IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. CIDIM'99, Volumen 3, "Diseño y Construcción de un Equipo Hidráulico Para Ensayo Biaxial de Chapas Metálicas"*, Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile, 23 al 26 de Noviembre de 1999.
- [3] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger. *Teoría de Placas y Láminas*, Urmo, 1970.
- [4] ISO/WD 12004. *Metallic Materials - Determination of Forming Limit Curves*. (2005)

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la SGCyT de la Universidad Nacional del Sur por subsidiar el proyecto en el que se enmarca el presente trabajo y al Sr. Marcio Yani Schlenker y al Ing. Mauro Puccinelli por su colaboración.