



## TRACCIÓN BIAxIAL NO EQUILIBRADA CON UNA MÁQUINA DE ACOPADO HIDRÁULICO

GUILLERMO BERGÉ, JORGE INSAUSTI, MAURO PUCCINELLI, ALBERTO LUCAIOLI, DANIEL ZIEGLER, LUCIO IURMAN

Universidad Nacional del Sur  
Departamento de Ingeniería  
Av. Alem 1253 - (8000) Bahía Blanca - Argentina

*(Recibido 8 de julio de 2011, para publicación 25 de agosto de 2011)*

**Resumen** – Existen diagramas que muestran las deformaciones límites que pueden soportar las chapas de acero en su plano cuando son conformadas. Los límites indicados por ellos están en correspondencia con las distintas aptitudes para estampado que exhibe cada material. Estos diagramas se conocen como Diagramas Límites de Conformado (DLC). Para la confección de estos diagramas mediante ensayos, se reproducen distintos caminos de deformación que permitan obtener datos para su trazado. En el Laboratorio de Metalurgia de la U.N.S. se cuenta con un equipo de acopado hidráulico diseñado originalmente para lograr la tracción biaxial equilibrada de una probeta, empleando para ello una máscara de abertura circular. Mediante ensayos de acopado hidráulico es factible reproducir caminos de deformación ubicados en el cuadrante derecho de dicho diagrama (ambas deformaciones positivas), es decir, tracción biaxial equilibrada y no equilibrada. En este trabajo, se buscó la manera de adaptar dicho equipo para la obtención de trayectorias de tracción biaxial no equilibradas. Para alcanzar este objetivo, se diseñaron máscaras de sujeción de la probeta con abertura elíptica. El camino de deformación queda así supeditado a la relación de los semiejes de la elipse. Como con el primer diseño de la máscara, la probeta se deformaba fuera del área de la elipse, se modificó el sistema de anclaje de la misma para lograr que la deformación quedara circunscripta al área de la abertura elíptica.

**Palabras clave** – Acopado hidráulico, chapas de acero, diagrama límite de conformado, tracción biaxial no equilibrada.

### 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 sollicitaciones 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  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  que sufre la chapa con diferentes trayectorias de deformación. En los mismos se conviene que  $\varepsilon_1$  es siempre la deformación mayor. La trayectoria se identifica con la relación de deformaciones  $\beta$  definida por (1), [1].

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

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

A los efectos de determinar el DLC de una chapa metálica, se realizan diferentes ensayos con 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 localizada. 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 ( $\varepsilon_1$ ) y menor ( $\varepsilon_2$ ) que se registran en el diagrama [2-4].

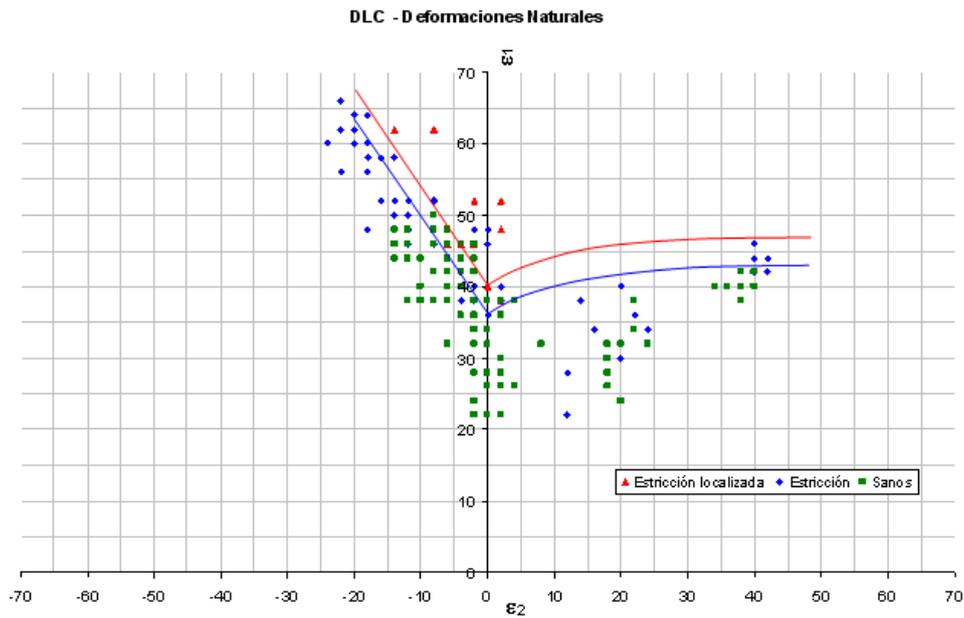


Fig. 1. Diagrama DLC.



Fig. 2. Equipo hidráulico de expansión biaxial.

En el cuadrante derecho del DLC, correspondiente a estados de deformación biaxial de tracción (estirado), es decir con trayectorias con relaciones  $\beta$  positivas, ya se contaba con un equipo diseñado y construido en el Laboratorio de Metalurgia, Fig. 2, para hacer acopados hidráulicos con condiciones de tracción biaxial equilibrada ( $\beta=1$ ) [5].

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  $\beta$ . 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 Fig. 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] (Fig. 3).

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,

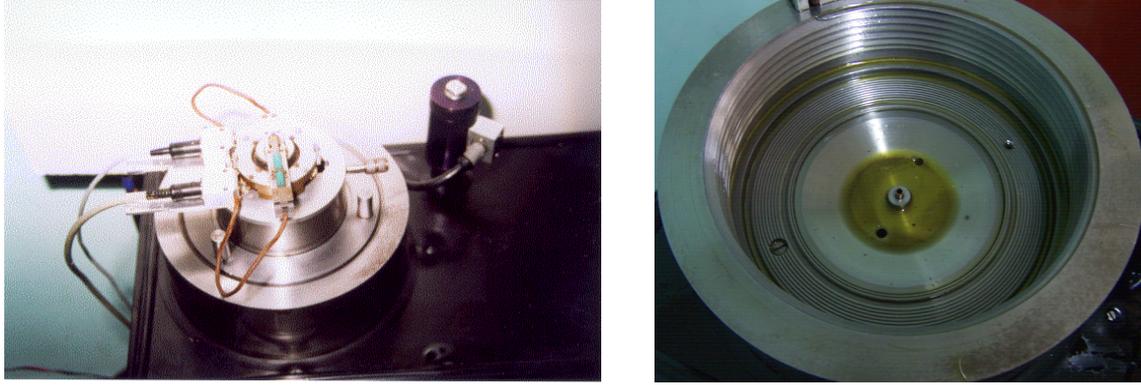


Fig. 3. Cabezal máquina actual.

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]

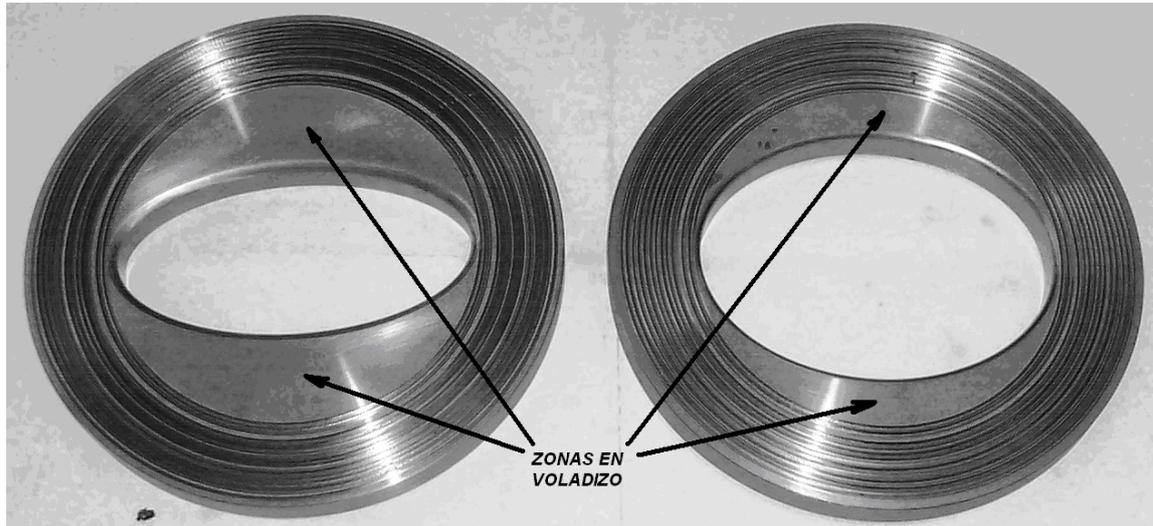


Fig. 4. Máscaras elípticas.

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.

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, Fig. 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.

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  $p$

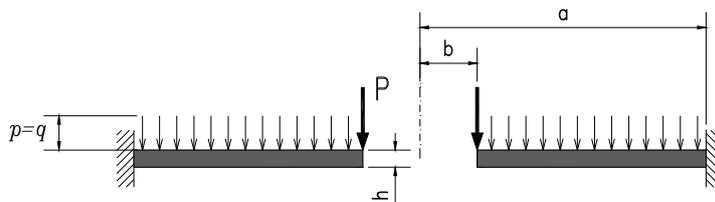
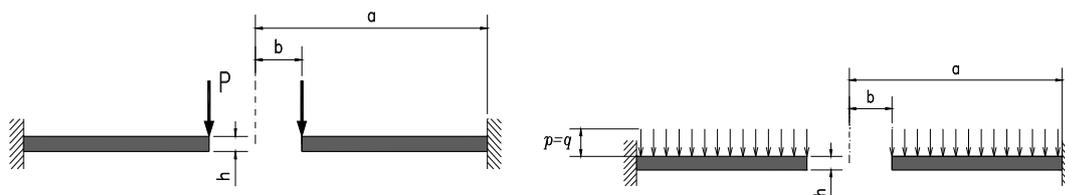


Fig. 5. Esquema de cargas actuantes sobre la placa.



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

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

Fig. 6. Casos considerados de cargas actuantes sobre la placa.

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

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

Tabla 3. Valores del factor *K*.

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

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 Fig. 5 [6].

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

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

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.

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 fabricaron 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. Estas máscaras pueden apreciarse en la Fig. 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  $\beta$ .

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, [2].

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

Se ensayaron dos probetas para cada alineación de la dirección de laminación 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 inmediaciones de la zona de fractura, que se encuentra en la cima de copa y alineada con el eje mayor de la elipse como puede apreciarse en la Fig. 7, en la que se han marcados los puntos medidos.

Los valores de las deformaciones  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  correspondientes a una determinada máscara y dirección fueron representados en un gráfico.

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

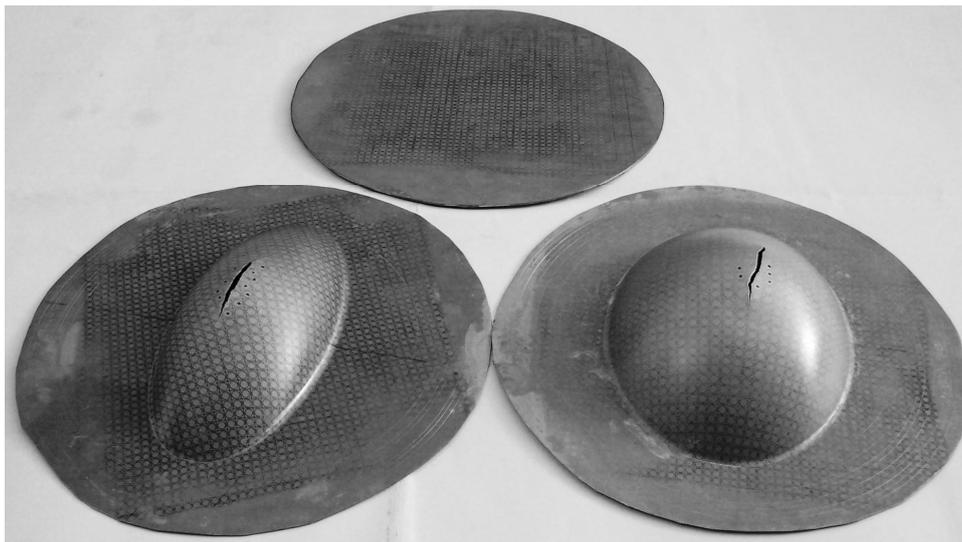


Fig. 7. Probetas ensayadas con máscaras 1 y 2.

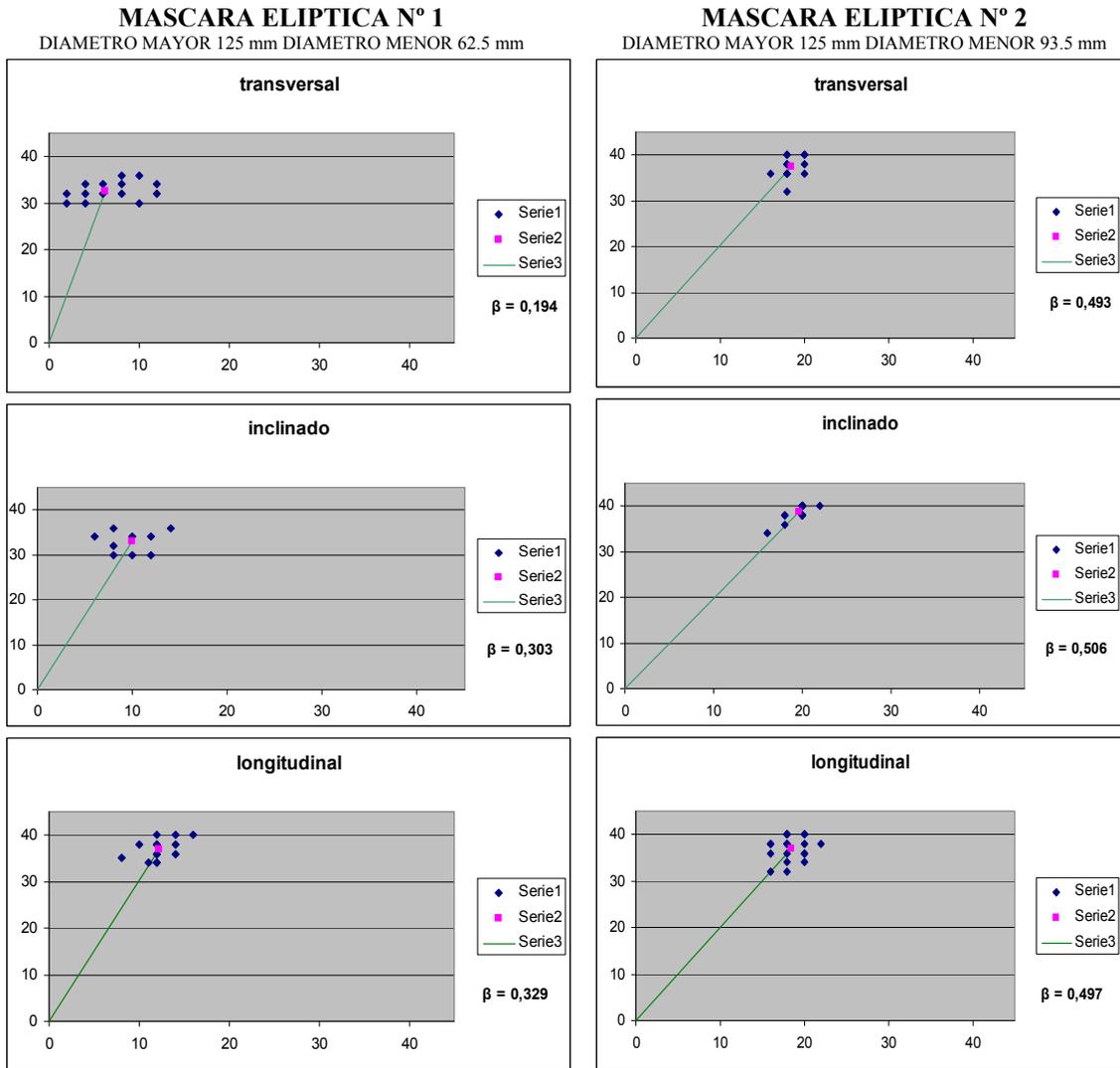


Fig. 8. Resultados obtenidos para máscaras 1 y 2.

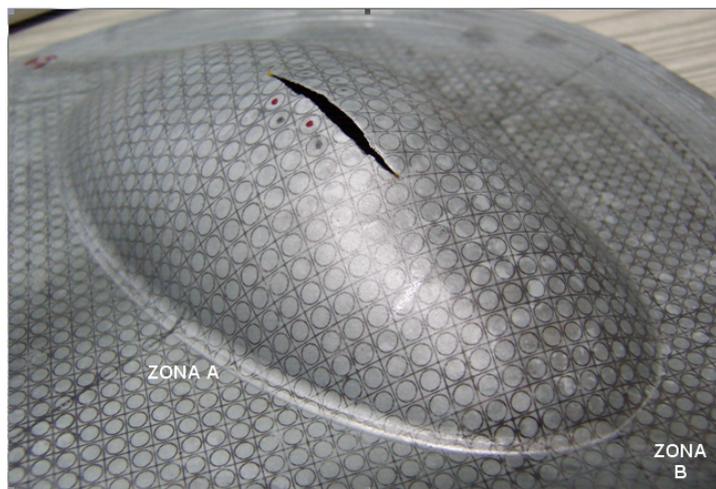


Fig. 9. Probeta ensayada con máscaras.

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  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$ ) 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  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$ . 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  $\beta$ .

En la probeta ensayada mostrada en la Fig. 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.

La existencia de este deslizamiento supone una deformación de la probeta desde el anclaje hasta el borde del orificio elíptico, esto influye en la altura de la copa en el momento de la ruptura y en la distribución de las deformaciones sobre el borde de anclaje.

Como se aprecia en la Fig. 4, esta situación es mucho más marcada en la máscara de diámetro menor de elipse más chico, que es la que deja mayor cantidad de chapa sin amarrar.

Con el objeto de mejorar esta situación se modificó el sistema de anclaje de la chapa de dicha máscara elíptica y se verificó la efectividad de este cambio comprobando la ausencia de deslizamiento y deformaciones en zonas no deseadas.

## 5. MODIFICACIÓN DEL SISTEMA DE ANCLAJE DE LA MÁSCARA ELÍPTICA

Para lograr el anclaje de la probeta en el borde del orificio elíptico se requirió agregar una nueva máscara.

### 5.1. Adopción del espesor de la nueva máscara

Para realizar una fijación más efectiva de la probeta se pensó en colocar la chapa a ensayar entre dos placas elípticas que poseyeran un dentado que actuara hasta el borde de la máscara impidiendo la aparición de zonas liberadas. Este dentado debe ser elíptico para cumplir con dicha función.

Como durante el ensayo la cámara debe mantenerse estanca, se decidió colocar la máscara anterior de forma que en la parte inferior se enfrenten los dentados circulares y sobre la cara superior de dicha máscara mecanizar los dentados elípticos. La segunda placa, colocada encima de ésta es la que posee la abertura para realizar el acopado elíptico. En esta placa, en la cara enfrentada con la máscara anterior se mecanizó el dentado con forma elíptica para conseguir el amarre hasta el borde.

Para ello se adoptó una placa con el mismo espesor y material que las ya empleadas, que habían sido calculadas y ensayadas con éxito desde el punto de vista resistivo.

Se mantuvo para el borde de la elipse el radio de empalme de 3 mm ya empleado en la máscara anterior.

### 5.2. Verificación de la resistencia del cabezal

El hecho de intercalar una placa adicional modifica la altura de roscado del sujetador, por lo que debió verificarse si la nueva altura de roscado disponible tenía la resistencia necesaria para soportar la fuerza que la presión de aceite desarrolla en el ensayo.

En el esquema de la Fig. 10 se puede apreciar que el uso de una segunda placa, genera un paquete (placas + probeta + sello inferior) cuya altura máxima es de 34 mm para un espesor de chapa a ensayar de hasta 2,3 mm (muy superior al máximo permitido por la capacidad del equipo). La chapa utilizada como sello inferior es un aro de chapa de aluminio recocido de 1 mm de espesor.

Dado que la altura total de la rosca original del cabezal es de 74 mm, esta nueva situación permite al sujetador roscar en una altura  $h = 40$  mm.

Si se tiene en cuenta que la presión máxima  $P$  que se puede desarrollar en el cabezal es de  $300 \text{ Kg/cm}^2$ , la fuerza  $F$  que debe soportar el sujetador resulta

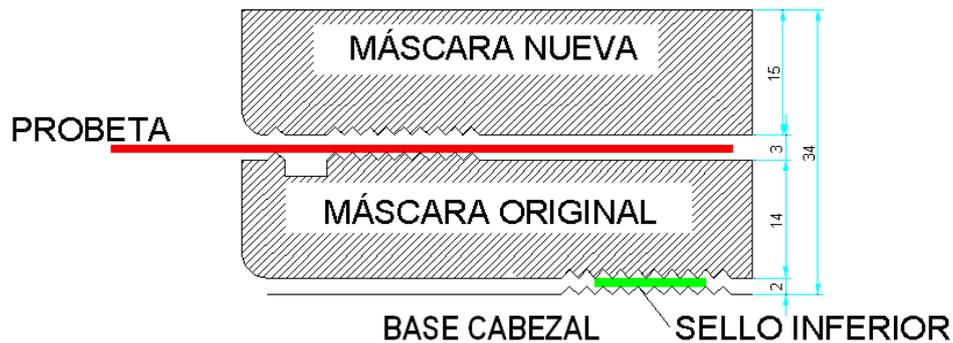


Fig. 10. Esquema del montaje de las máscaras elípticas original y nueva en el cabezal.

$$F = P \cdot S \quad (2)$$

En esta ecuación,  $S$  es el área circular en la que actúa la presión del aceite sobre el sujetador, que coincide con el área de la chapa expuesta a deformación biaxial con matriz circular. De acuerdo al esquema de la Fig. 4 resulta:

$$S = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot 6,5^2 = 131,72 \text{ cm}^2 \quad (3)$$

es decir, la fuerza  $F$  que actúa sobre el sujetador es:

$$F = P \cdot S = 300 \cdot 132,72 = 39818 \text{ Kg} \quad (4)$$

La superficie de corte  $S_c$  de los filetes de la rosca que contiene al sujetador puede calcularse como:

$$S_c = D \cdot \pi \cdot h \cdot \eta \quad (5)$$

donde:  $D$  es el diámetro de la rosca

$h$  es la altura de roscado

$\eta$  es un coeficiente menor que uno para tener en cuenta la porción del filete que presenta sección al corte.

Cuando se calcula la resistencia al corte de roscas efectuadas en aceros al carbono la verificación se realiza con un  $\tau$  admisible de  $800 \text{ Kg/cm}^2$ . Este valor resulta muy conservativo respecto de la resistencia que posee un acero SAE 2335, que fue el empleado en la construcción del cabezal y al cual le corresponde una tensión de rotura de  $6690 \text{ Kg/cm}^2$  [5]. Realizando el cálculo con la tensión de corte correspondiente a un acero al carbono resulta un valor de la fuerza admisible  $F_{ad}$

$$F_{ad} = S_c \cdot \tau_{ad} = D \cdot \pi \cdot h \cdot \eta \cdot \tau_{ad} \quad (6)$$

Adoptando un coeficiente de seguridad  $\eta = 0,8$ , resulta:

$$F_{ad} = 19,3 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 0,8 \cdot 800 = 155215 \text{ Kg} \quad (7)$$

El valor de la fuerza admisible de resistencia de la rosca, calculada por defecto, cubre ampliamente los requerimientos de  $F = 39818 \text{ Kg}$ . Con esto la resistencia del cabezal queda verificada.

### 5.3. Diseño del sello de la nueva máscara elíptica

Para la ejecución de este trabajo se construyó en la nueva máscara 1 (la de relación de diámetros de 0,50 siendo el diámetro mayor de 125 mm y el menor de 62,5 mm) un nuevo sistema de anclaje.

La estanqueidad entre la máscara anterior y la base de la cámara de ensayo se logró intercalando entre ambas una chapa de aluminio A5"O" de 1 mm de espesor. De esta forma, dicha chapa, de baja dureza, permite un sello estanco.

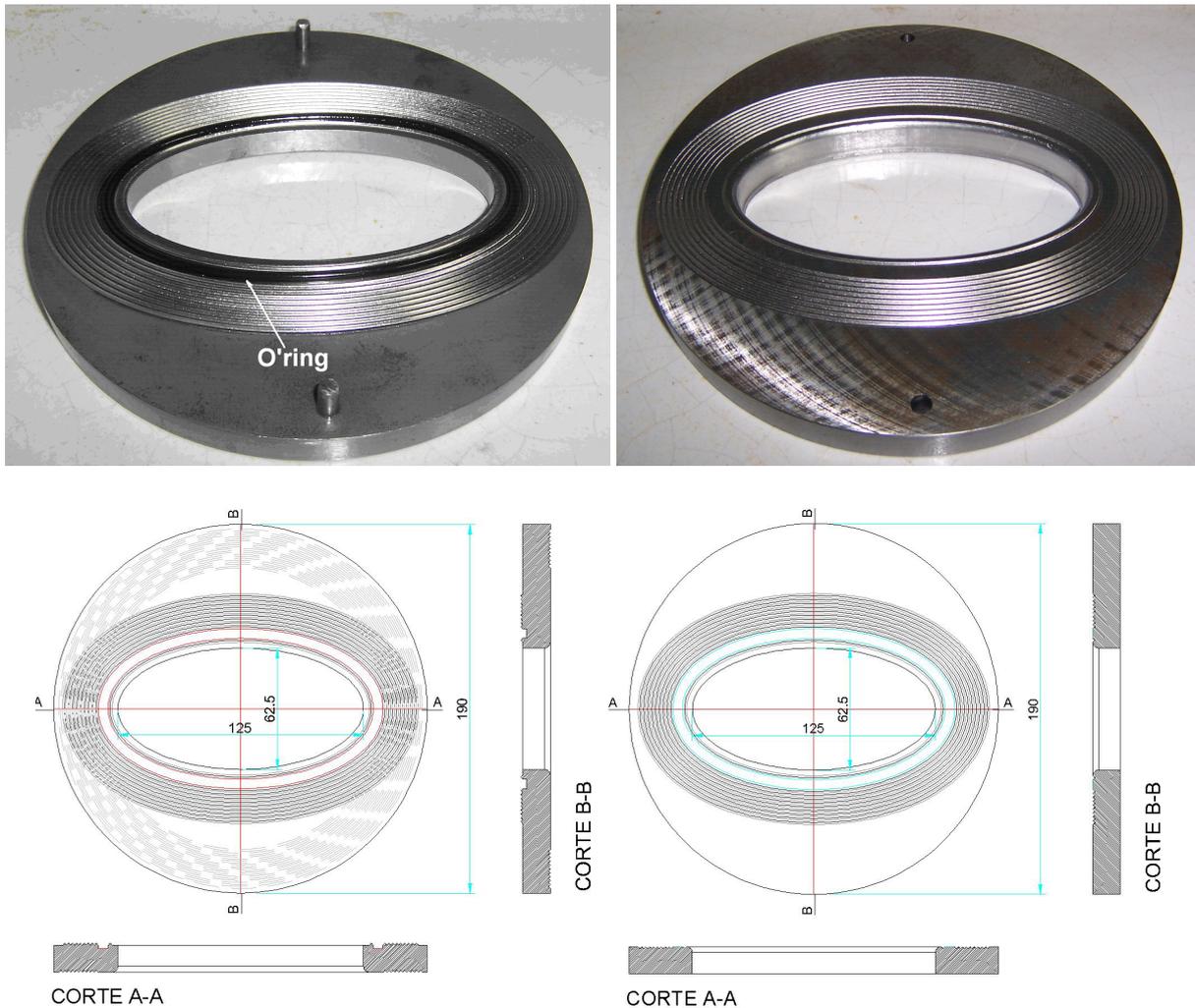


Fig. 11. Fotos y planos de las máscaras 1 anterior y nueva.

Para evitar la fuga de aceite entre la cara superior de la máscara 1 original y la cara inferior de la nueva máscara 1 se diseñaron dentados con forma elíptica como se muestra en la Fig. 11.

Ante la posibilidad de que el aceite a presión pudiera ingresar entre ambas máscaras permitiendo el deslizamiento de la chapa, se utilizó un *o'ring* ubicado lo más cercano posible al perímetro interior de la elipse de la máscara 1 original. El alojamiento de este *o'ring* fue tallado sobre la cara superior de dicha máscara.

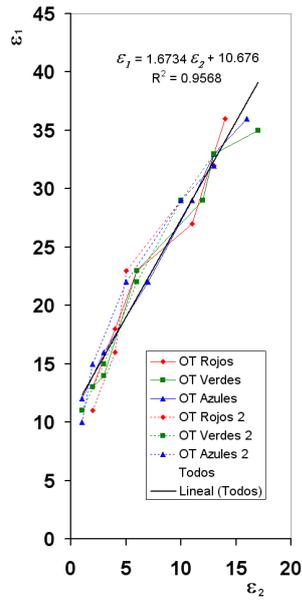
Las espigas removibles que se aprecian en la Fig. 11 tienen por objeto alinear las dos máscaras de forma tal que los dentados de ambas coincidan.

Para dimensionar los dientes de la zona de contacto entre ambas máscaras, se emplearon las mismas dimensiones que en el anclaje original, de probada efectividad.

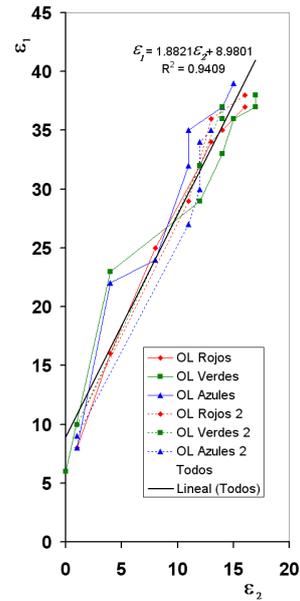
Teniendo en cuenta la altura del diente, el espacio disponible y las dimensiones del alojamiento para el *o'ring*, se consideró un diámetro de cordón de 3,53 mm como el más apropiado ya que con este valor no resulta un canal de alojamiento demasiado ancho y el sello permite ser apretado.

Las dimensiones del alojamiento de este *o'ring* se adoptaron de acuerdo a lo indicado en el catálogo de Parker para el correcto funcionamiento del mismo en lo que hace a profundidad y ancho del canal, y se buscó en el catálogo la medida más adecuada de diámetro. Esta acanaladura se posicionó de forma tal de dejar un primer diente al borde del orificio, seguido del alojamiento del sello y luego el resto de los dientes de anclaje. [7]



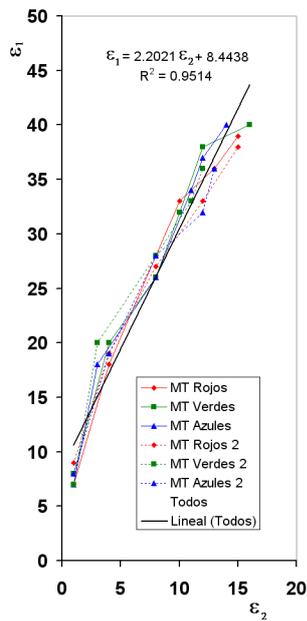


ENSAYO EN LA DIRECCIÓN TRANSVERSAL CON LA MÁSCARA 1 ORIGINAL

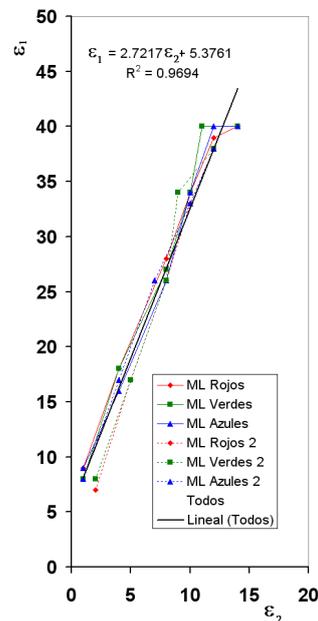


ENSAYO EN LA DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON LA MÁSCARA 1 ORIGINAL

Fig. 13. Deformación final de puntos ubicados a distintas distancias del borde y en la dirección del eje menor sobre las tres líneas adoptadas para la medición de las probetas ensayadas con máscara original.



ENSAYO EN LA DIRECCIÓN TRANSVERSAL CON LA MÁSCARA 1 NUEVA



ENSAYO EN LA DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON LA MÁSCARA 1 NUEVA

Fig. 14. Deformación final de puntos ubicados a distintas distancias del borde y en la dirección del eje menor sobre las tres líneas adoptadas para la medición de las probetas ensayadas con máscara nueva.



Fig. 15. Ensayo con máscara original.

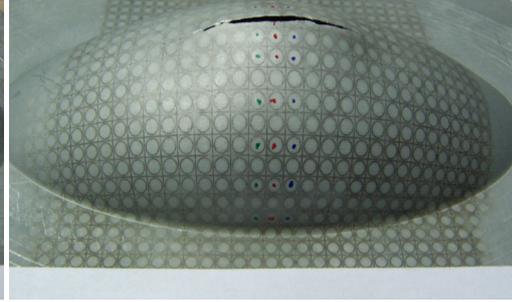


Fig. 16. Ensayo con máscara nueva.

Tabla 4. Valores de  $\beta$  promedio de los puntos más deformados.

Ensayo	Punto	Cantidad de Puntos	$\beta$ promedio
OT	6	3	0,44
	5	6	0,40
OL	7	3	0,42
	6	6	0,40
MT	6	3	0,38
	5	6	0,35
ML	6	3	0,35
	5	6	0,30

Los puntos elegidos para las mediciones fueron tomados de los círculos completos del grillado, por lo que, el primer punto no corresponde, en todos los casos, exactamente a la misma distancia del borde. Esto impide medir la deformación  $\varepsilon_2$  sobre el borde, la que debería ser nula de lograrse un anclaje perfecto.

De cualquier forma, a partir de la fractura, a medida que los puntos se acercan al borde, ambas deformaciones decrecen y el valor de  $\varepsilon_2$  tiende a un valor nulo.

La observación del grillado en la zona que no debe deformar pone de manifiesto el comportamiento del nuevo anclaje.-

En la fotografía de la Fig. 15, se aprecia que las líneas del grillado paralelas al eje mayor correspondientes al ala, en la zona adyacente al borde, muestran una curvatura índice del deslizamiento de la chapa en las zonas del borde no amarradas, mientras que esta deformación se mantiene ausente con el nuevo anclaje (Fig. 16).

Por otra parte, la observación visual de la superficie de las probetas con ambas máscaras, permite ver la mayor deformación producida por el deslizamiento de la chapa sobre el radio de la matriz original.

En la tabla 4 se resumen los valores de  $\beta$  promedio correspondientes a los puntos cercanos a la fractura.

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos realizados con la máscara original (Punto 4) se observa:

- Para cada máscara, se han obtenido deformaciones que corresponden a distintos valores de  $\beta$  que, como puede apreciarse en la Fig. 8 para cada máscara y dirección cubren un rango de valores de  $\varepsilon_2$ .
- Los valores de  $\beta$  allí indicados corresponden en cada caso analizado a un valor promedio.
- Estos valores muestran una acentuada dependencia del camino de la deformación respecto a la ubicación de la dirección de laminación con respecto al eje menor de la elipse para la máscara

1. Esa dependencia aparece muy atenuada en la máscara 2, es decir cuando el valor de  $\beta$  se incrementa.

- En todos los ensayos la rotura se propagó en dirección normal a la de la mayor deformación.

Considerando los resultados obtenidos en los ensayos realizados con la máscara con anclaje modificado (tabla 4) observamos:

- Si se comparan los  $\beta$  obtenidos con el anclaje original con los correspondientes al anclaje modificado, se puede apreciar la influencia del anclaje en el camino de deformación, que arroja valores de  $\beta$  menores que implican una tracción biaxial más desequilibrada.
- Los  $\beta$  correspondientes al nuevo anclaje presentan una dispersión menor que la que corresponde a los obtenidos con el anclaje original.

## 8. CONCLUSIONES

La fuerte dependencia de los resultados de los ensayos en función de la orientación de la dirección de laminación con respecto a los ejes de la elipse es producto de la anisotropía de la chapa.-

El nuevo anclaje permite conseguir la estanqueidad de la cámara requerida en el ensayo, y garantiza el amarre de la chapa en el borde de la elipse.

Los valores de la Tabla 4 muestran que el nuevo anclaje modifica la relación  $\beta$  realmente impuesta a los puntos.

Si bien los datos obtenidos con el anclaje original son válidos, el hecho de emplear un anclaje que evita el escurrimiento de la probeta hace que para cada máscara se fije una trayectoria de deformación más definida.

El nuevo anclaje cumple la función para la que fue diseñado.

La construcción de estas máscaras permite al equipo existente obtener trayectorias diferentes de deformaciones de tracción biaxial sobre chapas metálicas.

Estas facilidades se traducen en una mayor precisión en la determinación de la zona de estirado de los Diagramas Límites de Conformado.

## 9. REFERENCIAS

- [1] Marciniak, Z., Duncan, J.L., Hu, S.J., *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth Heinemann (2002)
- [2] ISO/WD 12004. Metallic Materials - Determination of Forming Limit Curves (2005)
- [3] ASM HANDBOOK. Forming and Forging, Volume 14 (1993)
- [4] Hosford, W.F., Caddell, R.M., *Metal forming, Mechanics and metallurgy*, Second Edition (1993)
- [5] Carriac, A., Lucaioli, A., Fernandez Long, F., Iurman, L., Ziegler, D., “Diseño y Construcción de un Equipo Hidráulico Para Ensayo Biaxial de Chapas Metálicas”, Actas del IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, CIDIM’99, Volumen 3, Universidad de Santiago de Chile (1999)
- [6] Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S., *Teoría de Placas y Láminas*, Urmo (1970)
- [7] Parker Hannifin Corporation, O-Ring division. *Parker O’Ring Handbook*, Ord 5700 (2007)

## UNBALANCED - BIAXIAL STRETCHING WITH A HYDRAULIC BULGING EQUIPMENT

**Abstract** – These are diagrams showing the limit strains or deformations which can be borne by steel plates on their plane when they are formed. The limits here indicated are in correspondence with the different capabilities for stamping shown by each material. These diagrams are known as Forming limit diagrams (FLD). For the preparation of these (by tests), different strain paths are reproduced enabling data acquisition. The Metallurgy Laboratory of the U.N.S. has an hydraulic cupping equipment originally designed to obtain a balanced biaxial traction of a test-piece. For this, a mask with a circular opening is used. It is possible to reproduce the strain

paths located on the right quadrant of the before-mentioned diagram by tests with hydraulic cupping (both positive strains), that is, balanced and non-balanced biaxial traction. This paper proposes to adapt this equipment for the obtention of non-balanced biaxial traction paths. In order to achieve this goal, masks with an elliptical opening are designed for the fixing of the test piece. The strain path therefore depends on the half axes of the ellipse. As with the first mask's design, the test piece was deformed outside the ellipse's area, its anchorage system was modified so that the deformation remains within the area of the elliptical opening.

**Keywords** – Hydraulic bulging test, Steel sheets, Forming limit diagram, Unbalanced biaxial stretching.