

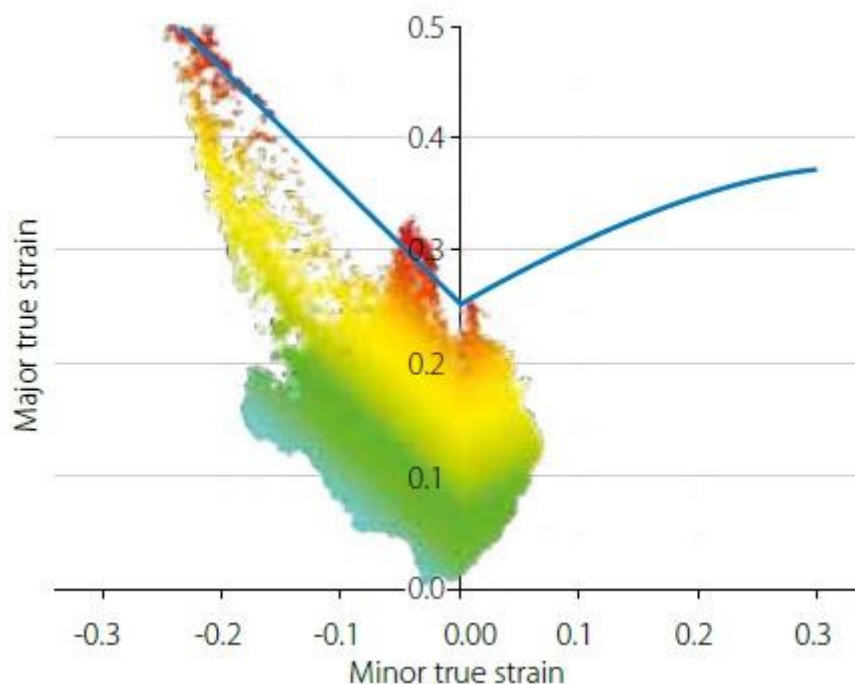
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

ESCUELA I.M.E. - I.M. - T.M.

PROYECTO INTEGRADOR

**TÍTULO: BASE METODOLÓGICA PARA DETERMINAR LA  
CURVA LÍMITE DE CONFORMADO, EN CHAPAS DE  
ACERO DE BAJO CARBONO**



Autor: René Orlando Tolaba

Carrera: Ingeniería Mecánica

Director de Proyecto Integrador: Lic. Reinaldo Mancini

Ing. Juan Carlos Gozálvez

Córdoba - Junio de 2017



## I. Prólogo

El presente trabajo titulado: *“Base metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado, en chapas de acero de bajo carbono”*, surge por un lado del deseo de complementar temas y conceptos, vistos en los cursos de Materiales y Procesos de Manufactura, y establecer la existencia o no de discrepancias entre la teoría y la parte práctica, esta última desarrollada en el ámbito experimental. Por otra parte, del interés en explorar y descubrir aquellos procesos, en los cuales puede estar inmerso un profesional de la Ingeniería, dentro del campo de la Ciencia de los Materiales. La experimentación e investigación junto con el análisis de variables, conforman una fuente de conocimientos, sobre los cuales se basan nuevos desarrollos.

La información expuesta en el presente escrito, describe procedimientos e inconvenientes en cuanto a la realización de los ensayos de laboratorio; se determinan dimensiones de probetas, método de grabado en metal, tipo de ensayos y herramientas necesarias, todo ello con el objeto de caracterizar el comportamiento de láminas de acero, ante deformaciones plásticas. Este informe puede ser utilizado como material de referencia, y seguir su metodología para la realización de ensayos en chapas, brindando condiciones de contorno más específicas frente a los diversos parámetros o variables que intervienen en un ensayo.

Por último quiero agradecer la colaboración de aquellas personas que me asistieron y brindaron parte de su tiempo valioso en la realización de los ensayos, preparación de muestras y demás actividades que realicé en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial sede en la provincia de Córdoba. A Julio Costa, Paula Strada y Alejandro Minghetti. También al Director del Proyecto Integrador; Lic. Reinaldo Mancini, y al Co-Director del Proyecto; Ing. Juan Carlos Gozálvez, por su atención y predisposición en la evacuación de dudas e incertidumbres que se fueron presentando durante el desarrollo del trabajo, sus observaciones y recomendaciones en la preparación del presente informe, y por darme la oportunidad de haber formado parte de su equipo de trabajo.

*René Orlando Tolaba.-*

## II. Índice

I. Prólogo .....	iii
II. Índice .....	iv
III. Lista de Símbolos y Abreviaturas .....	vii
Dedicatoria .....	viii
Introducción .....	9
Objetivos del Proyecto Integrador .....	11
1. Aceros utilizados en carrocería .....	12
1.1 Introducción.....	12
1.2 Acero Convencional .....	12
1.3 Aceros de Alta Resistencia.....	12
1.3.1 Aceros Bake-Hardening .....	12
1.3.2 Aceros Microaleados .....	13
1.3.3 Aceros Refosforados o Aceros Aleados al Fósforo .....	13
1.4 Aceros de Muy Alta Resistencia .....	13
1.4.1 Aceros de Fase Doble (DP) .....	14
1.4.2 Aceros de Plasticidad Inducida por Transformación (TRIP) .....	14
1.5 Aceros de Ultra Alta Resistencia .....	14
1.5.1 Aceros Martensíticos (Mar) .....	14
1.5.2 Aceros al Boro (Bor) .....	14
2. Diagrama Límite de Conformado - Forming Limit Diagram .....	16
2.1 Formabilidad .....	16
2.2 Diagrama Límite de Conformado (FLD, siglas en inglés) - Concepto .....	16
2.3 Obtención del Diagrama Límite de Conformado .....	17
2.3.1 Criterio de falla.....	17
2.3.2 Ensayos simulativos .....	17
2.3.3 Medición de las deformaciones.....	22
2.3.4 Cálculo de deformaciones y representación gráfica de datos.....	22
2.4 Curva Límite de Conformado (FLC, siglas en inglés) - Concepto .....	24
2.5 Interpretación en el FLD, de posibles estados deformación de un círculo .....	25
2.6 Valor FLD <sub>0</sub> .....	26
2.7 Utilidad del FLD en la práctica Industrial.....	26

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

2.7.1 El Índice de severidad.....	28
2.8 Factores que influyen sobre el FLD.....	29
2.8.1 El espesor de la chapa metálica .....	29
2.8.2 El tamaño de los círculos de la malla .....	29
2.8.3 La curvatura del punzón.....	30
2.8.4 La velocidad de deformación .....	31
3. Análisis de Regresión .....	32
3.1 Introducción.....	32
3.2 Modelo de regresión lineal simple .....	32
3.2.1 Ecuación de regresión estimada .....	32
3.2.2 Método de mínimos cuadrados .....	33
3.3 Coeficiente de determinación .....	34
3.3.1 Propiedades de $r^2$ .....	35
4. Desarrollo Experimental I.....	36
4.1 Descripción de la materia prima sometida a estudio.....	36
4.2 Ensayos Mecánicos - Resultados.....	36
4.3 Análisis Químico - Resultados.....	37
5. Desarrollo Experimental II.....	38
5.1 Grabado en metal - Método químico .....	38
5.1.2 Puesta a punto de Ensayos (Prueba - Error).....	38
5.2 Criterio de falla para la determinación del Diagrama Límite.....	39
5.3 Ensayos simulativos.....	39
5.3.1 Ensayo de Tracción Uniaxial.....	40
5.3.2 Ensayo Erichsen - Ensayo de copa Olsen .....	43
5.3.3 Ensayo con punzón semiesférico - Ensayo de severidad.....	45
5.4 Selección de datos y captura de imágenes .....	49
5.4.1 Selección de los datos de referencia.....	49
5.4.2 Captura de imágenes.....	50
5.5 Medición, cálculos y procesamiento de datos.....	52
5.5.1 Medición de las deformaciones.....	52
5.5.2 Cálculos realizados .....	53
5.5.3 Procesamiento de datos .....	54
5.6 Obtención del Diagrama Límite de Conformado - FLD .....	54
5.7 Obtención de la Curva Límite de Conformado - FLC .....	55
5.7.1 Criterio para la depuración de datos aislados .....	55
5.7.2 Criterios de evaluación para curvas de regresión.....	56
5.8 Resultados .....	56

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

5.9 Comentarios .....	66
6. Ejemplo de aplicación del FLD.....	67
6.1 Introducción.....	67
6.2 Resumen.....	67
6.3 ABAQUS - CAE.....	68
6.3.1 Datos de entrada (Declaración de las variables ingresadas al sistema).....	68
6.3.2 Respuesta de la simulación .....	70
6.4 Conclusión .....	71
7. Desarrollo Experimental III.....	72
7.1 Análisis metalográfico de muestras - análisis microscópico.....	72
7.2 Metodología aplicada .....	72
7.2.1 Extracción de la muestra.....	72
7.2.2 Montaje de la probeta .....	72
7.2.3 Desbaste .....	74
7.2.4 Pulido.....	74
7.2.5 Ataque .....	75
7.2.6 Observación microscópica y determinación del tamaño de grano.....	76
7.3 Resultados .....	78
8. Conclusiones .....	82
8.1 Aspectos a tener en cuenta.....	84
8.2 Recomendaciones para futuros ensayos.....	84
9. Anexo Documental.....	85
A. Grabado Químico en Chapas Metálicas .....	86
A.1 Procedimiento para el grabado en placas metálicas .....	86
A.1.1 Preparación de la superficie a grabar .....	87
A.1.2 Procedimiento de grabado.....	87
A.2 Recomendaciones y advertencias.....	88
B. Propuesta: Rediseño del Herramental para Ensayos de Embutido.....	90
B.1 Rediseño del subconjunto matriz-tapa .....	90
C. Certificados de Calidad de chapas .....	93
11. Referencias.....	97
12. Bibliografía.....	99

### III. Lista de Símbolos y Abreviaturas

- $e_1$  Deformación mayor de ingeniería.
- $e_2$  Deformación menor de ingeniería.
- FLC** Curva Límite de Conformado.
- FLD** Diagrama Límite de Conformado.
- $n$  Coeficiente de endurecimiento por deformación plástica.
- $r_m$  Coeficiente de anisotropía normal.
- R** Resistencia a Tracción.
- $R_{0.2}$**  Límite de Fluencia.
- $\epsilon_1$  Deformación mayor verdadera.
- $\epsilon_2$  Deformación menor verdadera.
- $\Delta r$  Coeficiente de anisotropía planar.

## Dedicatoria

### **A Mis Padres.**

*Por la oportunidad que brindaron de seguir estudiando una carrera y de poderla elegir. Su apoyo constante, consejos y por el gran esfuerzo que hicieron, deseando lo mejor para uno en esta vida.*

### **A mis hermanas.**

*Que me ayudaron a ser mejor persona, a perseverar y no rendirme ante las dificultades de la vida.*

*A todas aquellas personas que he conocido a lo largo de la carrera; compañeros, amigos, profesores y a esta querida facultad.*



## Introducción

El conformado de chapa metálica es básicamente la conversión de una chapa plana en un producto con un diseño preestablecido. Siendo más específico, la forma física de cualquier componente de una carrocería y/o del chasis de un vehículo, se obtiene por deformación plástica del metal en las matrices de prensas.

En la ciudad de Córdoba se hallan radicadas firmas como; Gestamp Córdoba S.A, Fumiscor, Montich S.A, Renault en Santa Isabel, entre otras, que fabrican una amplia gama de productos a partir del acero, y que posteriormente se integran a la carrocería del vehículo.

Es sabido que estas firmas, ponen mucho esfuerzo en pos de obtener productos de calidad, es decir; piezas sanas sin defectos. Aun así, se han relevado casos donde piezas terminadas presentaron fallas (fisuras o deformación excesiva), por simple inspección. Estos inconvenientes generan desechos y producen pérdidas económicas y de tiempo, ya que el producto no es factible de ser reparado o retrabajado.

Frente a este problema, lo ideal sería que por un lado las acerías provean chapas con características mínimas y necesarias para realizar una determinada pieza, y por el otro mejorar el diseño de las matrices, todo esto con la intención de obtener un proceso de estampado exitoso.

El objetivo al que apunta el presente trabajo es poner a punto y definir los ensayos necesarios a realizar para caracterizar las chapas de acero, utilizadas en los procesos de conformado. Incluido un método de grabado en superficie metálica para el relevamiento de las deformaciones. Y de todo lo mencionado, obtener información precisa para futuros trabajos del mismo tipo.

El alcance del objetivo mencionado se resume en: clasificar los datos arrojados por los ensayos y proceder a un análisis sobre las tres chapas, objeto en estudio, en cuanto a sus características y parámetros mecánicos para contrastarlos con sus certificados de calidad. Finalmente obtener los diagramas y a partir de ellos trazar las curvas límites de conformación, las cuáles serán de utilidad para alimentar al programa de simulación en

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

Ingeniería (ABAQUS®), en pos de mejorar el diseño de las matrices; esto último queda fuera de los límites de este trabajo.

Se espera que a partir del fruto de este proyecto, las instituciones como el Departamento de Materiales y Tecnología de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba y el INTI Córdoba, puedan asistir o brindar servicios a empresas autopartistas y terminales automotrices, en pos de aumentar la confiabilidad en sus procesos de conformado y la calidad de los productos de chapa. Ya que además de contar con herramientas, equipos, profesionales capacitados, se le sumaría una *metodología* para evaluar las chapas.

## Objetivos del Proyecto Integrador

### Objetivo general

El presente trabajo experimental tiene como objetivo general:

- Caracterizar chapas de acero para procesos de conformado, de manera, de mejorar la simulación por elementos finitos.

### Objetivos específicos

Los objetivos específicos son los que a continuación se detallan:

- Evaluar los ensayos de recepción que utilizan las empresas que conforman chapas para la industria automotriz en Córdoba.
- Determinar las curvas límites de conformado.
- Poner a punto los ensayos para obtener los datos requeridos por los modelos de Elementos Finitos.

# 1. Aceros utilizados en carrocería

## 1.1 Introducción

En las carrocerías de los automóviles existen una gran variedad de aceros con características muy dispares, el material seleccionado para la fabricación de una pieza en particular dependerá de la función que debe desempeñar la pieza dentro de la carrocería. A continuación se mencionan algunos aceros de mayor uso en el mercado.

## 1.2 Acero Convencional

Es un acero dulce, laminado en frío y con un bajo contenido en carbono. Este reducido contenido en carbono le proporciona unas buenas características para el trabajo de deformación en prensas, pero por el contrario su límite elástico es demasiado bajo, por lo que se necesitan mayores espesores para soportar los esfuerzos a los que se someten las distintas piezas, y además en los paneles exteriores se producen abolladuras con facilidad. El bajo contenido de elementos aleantes le confiere una buena soldabilidad.

Aplicación: en piezas con baja responsabilidad estructural (aletas, paneles de puertas, portones traseros, etc.), debido a su bajo límite elástico.

## 1.3 Aceros de Alta Resistencia

En función del mecanismo de endurecimiento empleado, para aumentar su resistencia, estos se clasifican en tres tipos:

### 1.3.1 Aceros Bake-Hardening

Estos aceros han sido elaborados y tratados, para conseguir un aumento significativo del límite elástico durante un tratamiento térmico a baja temperatura. La ganancia en su límite elástico conseguida por el tratamiento de cocción, llamado efecto "Bake Hardening" (BH), es generalmente superior a 40 MPa. El efecto "Bake Hardening" ofrece una mejora en la resistencia a la deformación y una reducción del espesor de la chapa para unas mismas

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

propiedades mecánicas. Al tener baja aleación su aptitud para la soldadura es buena sea cual fuere el método utilizado.

### 1.3.2 Aceros Microaleados

Estos aceros se caracterizan por una buena resistencia a la fatiga, una buena resistencia al choque y una buena capacidad de deformación en frío. Esto se logra mediante la reducción del tamaño de grano y precipitación de nitruros y carbonitruros de elementos de aleación como titanio, niobio o cromo. Poseen una buena aptitud a la soldadura con cualquier procedimiento debido a su bajo contenido de elementos de aleación.

### 1.3.3 Aceros Refosforados o Aceros Aleados al Fósforo

Son aceros con una matriz ferrítica, que contienen elementos de endurecimiento en la solución sólida, tales como fósforo, cuya presencia puede ser de hasta un 0.12 %. Estos aceros se caracterizan por ofrecer altos niveles de resistencia, conservando al mismo tiempo una buena aptitud para la conformación por estampación. Respecto al proceso de soldadura, cualquier procedimiento es apto debido a su bajo contenido en elementos aleantes.

Aplicación: estos aceros se utilizan para la fabricación de piezas de panelería exterior (puertas, capós, portones, aletas delanteras y techo), piezas estructurales para el automóvil bastidores inferiores, piezas interiores de la estructura, que requieren una elevada resistencia a fatiga, como por ejemplo los refuerzos de la suspensión. Y también en piezas que deben intervenir en las colisiones como son largueros, travesaños o refuerzos de pilares.

### 1.4 Aceros de Muy Alta Resistencia

Estos aceros, también llamados multifásicos, adquieren una mayor resistencia mediante la coexistencia en la microestructura final de; “fases duras” al lado de “fases blandas”, es decir, se parte de un acero inicial que se somete a un proceso específico, por lo general es un tratamiento térmico (temple, revenido, normalizado), que lo transforma en otro. Este grupo lo conforman los siguientes aceros:

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

#### 1.4.1 Aceros de Fase Doble (DP)

Presentan una buena aptitud para la distribución de las deformaciones, un excelente comportamiento a la fatiga y una alta resistencia mecánica lo que genera una buena capacidad de absorción de energía y por lo tanto predispone a utilizarlos en piezas de estructura y refuerzo. Su fuerte consolidación combinada con un efecto BH ("Bake Hardening") muy marcado les permite ofrecer buenas prestaciones para aligerar piezas.

#### 1.4.2 Aceros de Plasticidad Inducida por Transformación (TRIP)

La capacidad de consolidación de estos aceros es importante, lo que favorece la distribución de las deformaciones, y por lo tanto, le asegura una buena estampación. Su gran potencial de consolidación, sumado a una alta resistencia mecánica le otorga una buena capacidad de absorción de energía. A su vez, esta gama de aceros son sometidos a un importante efecto BH que les proporciona una mayor resistencia, y por lo tanto permite aligerar las piezas.

### 1.5 Aceros de Ultra Alta Resistencia

Se caracterizan por su alta rigidez, la absorción de grandes energías y su alta capacidad para no deformarse.

#### 1.5.1 Aceros Martensíticos (Mar)

Los Aceros Martensíticos presentan una microestructura compuesta básicamente de martensita, obtenida al transformarse la austenita en el tratamiento de temple. El resultado son aceros que alcanzan límites elásticos de hasta 1400 MPa.

#### 1.5.2 Aceros al Boro (Bor)

Presentan un alto grado de dureza como resultado del tratamiento térmico al que son sometidos, así como de la adición de elementos aleantes tales como manganeso (1,1 a 1,4 %), cromo y boro (0,005%). Gran parte de la dureza que poseen estos aceros es el resultado de la estructura martensítica, favorecida por el boro que aumenta la templabilidad, que se obtiene de aplicar el tratamiento térmico.

Aplicación: Por su alto límite elástico y su reducido alargamiento (entorno a un 8%), estos aceros se emplean en piezas estructurales que deben brindar un alto grado de

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

seguridad, debido a su alta resistencia a los choques y a la fatiga. La mayoría de las aplicaciones actuales están centradas en piezas anti-intrusión (habitáculo o motor), por ejemplo; refuerzos de pilar B y traviesas.

## 2. Diagrama Límite de Conformado - Forming Limit Diagram

### 2.1 Formabilidad

La *formabilidad* de una chapa, es la facilidad o capacidad para deformarse plásticamente mediante un proceso de conformado, sin que falle el material. Entiéndase por falla, a una fractura o estricción.

### 2.2 Diagrama Límite de Conformado (FLD, siglas en inglés) - Concepto

El *Diagrama Límite de Conformado* de una chapa, es una gráfica de puntos; los cuales representan diversos estados críticos de deformación que puede sufrir el material, durante la operación de conformado.

Estas deformaciones se llevan a un plano cartesiano, sobre el eje de abscisas se ubican las deformaciones menores  $e_2$  [%], que podrán ser positivas o negativas. Y sobre el eje vertical, las deformaciones mayores  $e_1$  [%], que son puramente positivas.

De lo expuesto, para la construcción del grafico es necesario:

- Adoptar un criterio de falla.
- Realización de ensayos simulativos, para distintos mecanismos de deformación.
- Tomar mediciones de las deformaciones impuestas al material de estudio.



*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

### 2.3 Obtención del Diagrama Límite de Conformado

Para la construcción del diagrama se deberá adoptar un criterio de falla.

#### 2.3.1 Criterio de falla

Los criterios de falla en piezas conformadas son:

- Deformación excesiva - Estricción.
- Fractura.

Cuando se busca el FLD según el primer criterio, la localización de la deformación no es siempre fácil de visualizar, por lo que es necesario ir incrementando la deformación poco a poco y analizar la aparición de gradientes de deformación. Esta técnica resulta complicada y lleva tiempo.

En el caso del segundo criterio, la cuestión se simplifica ya que la fractura del material es fácil de observar.

#### 2.3.2 Ensayos simulativos

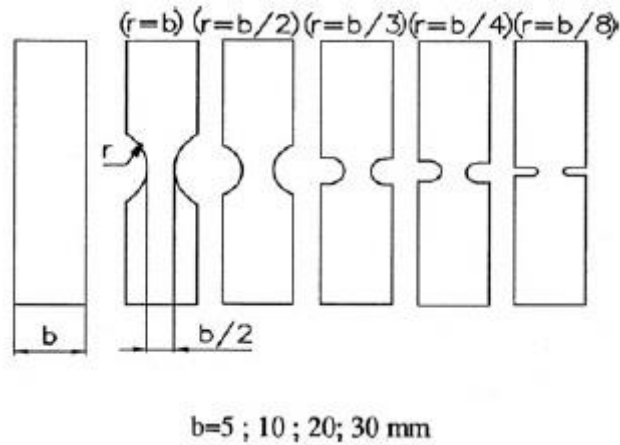
Los ensayos que generalmente se realizan, con el fin de lograr las diferentes relaciones de deformaciones en el plano de la chapa, se mencionan a continuación.

##### 2.3.2.1 Ensayo de Tracción Uniaxial

Este ensayo sirve para determinar una porción del FLD en un rango de  $e_2 < 0$ . Para obtener diferentes trayectos de deformación, se utilizan probetas <sup>[1]</sup> con diferentes formas y tamaños de entallas, ver Figura 2.1.

La ventaja del ensayo para determinar las FLDs radica en que las probetas son fáciles de fabricar y una máquina de tracción de propósito general puede ser utilizada; además las muestras se mantienen planas durante el ensayo lo cual facilita la medición. Sin embargo, únicamente la región negativa del diagrama límite de conformado ( $e_2 < 0$ ) puede ser determinada.

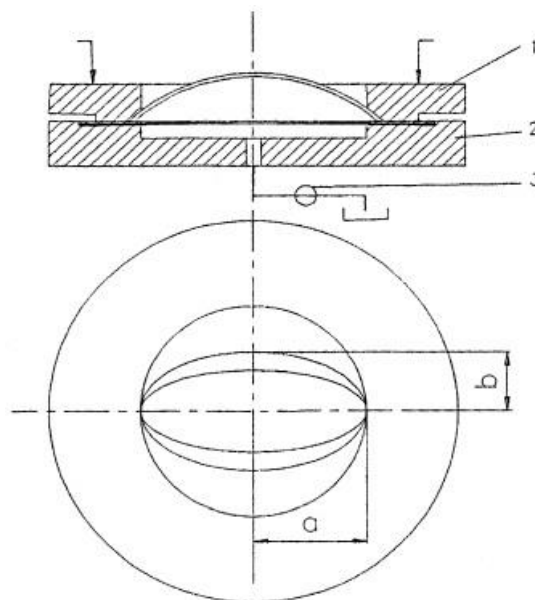
Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado



**Figura 2.1**  
 Probetas rectangulares con y sin entallas [1].

2.3.2.2 Ensayo de protuberancia hidráulica

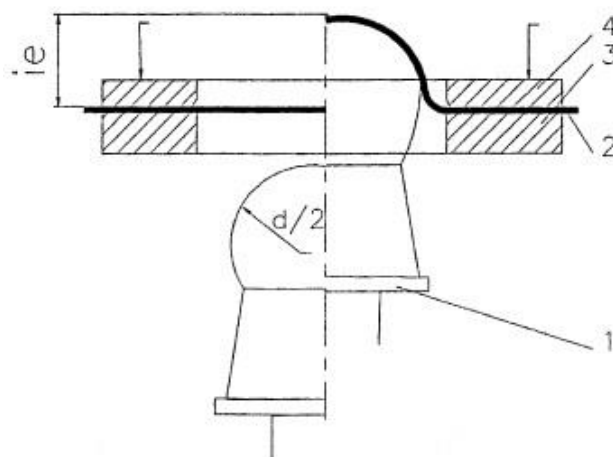
Este ensayo fue el primero propuesto por Olsen [2]. Mientras varíe la trayectoria de deformación, una matriz elíptica o de forma diferente puede ser utilizada, ver Figura 2.2. La ventaja más importante de este ensayo es la ausencia de fricción. La desventaja es que únicamente la porción de valores  $e_2$  positivos del diagrama límite de conformado pueden ser obtenidos.



**Figura 2.2**  
 Esquema del ensayo de protuberancia hidráulica.

### 2.3.2.3 Ensayo de estiramiento con punzón

Este ensayo fue el primero propuesto y utilizado por Keeler <sup>[3]</sup>. Consiste en estirar una probeta fijada entre una tapa y una matriz utilizando un punzón, esférico hasta elíptico, ver Figura 2.3. La trayectoria de deformación es mayormente variada, utilizando muestras de anchos diferentes; esto puede ser modificado según varíe el radio del punzón y el lubricante. En lugar de utilizar probetas rectangulares, Hasek <sup>[4]</sup> utilizó probetas con entallas circulares.

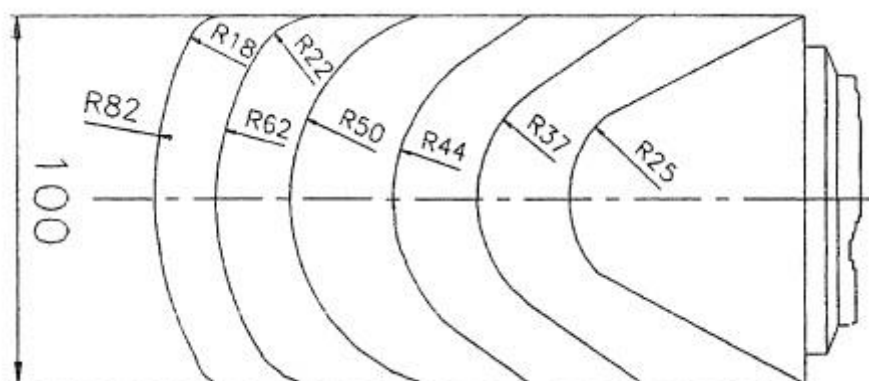


**Figura 2.3**

Disposición esquemática del ensayo de estiramiento con punzón.

### 2.3.2.4 Ensayo Keeler

Este ensayo <sup>[3]</sup> consiste en utilizar punzones de diferente radio, a medida que cambia el estado de tensión, ver Figura 2.4. La desventaja del ensayo está en la cantidad enorme de trabajo experimental; únicamente la región positiva del diagrama límite de conformado será obtenida, y la forma y posición del límite de conformado son influidas por el radio del punzón.



**Figura 2.4**

Punzones utilizados en el ensayo Keeler.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

### 2.3.2.5 Ensayo Hecker

En este ensayo <sup>[5]</sup> únicamente solo un tipo de tamaño de punzón y de probeta es necesario, por lo cual el régimen de fricción es variado según la lubricación para la obtención de diferentes caminos de deformación. La desventaja es que únicamente la zona positiva del diagrama límite de conformado es determinado.

### 2.3.2.6 Ensayo Nakazima

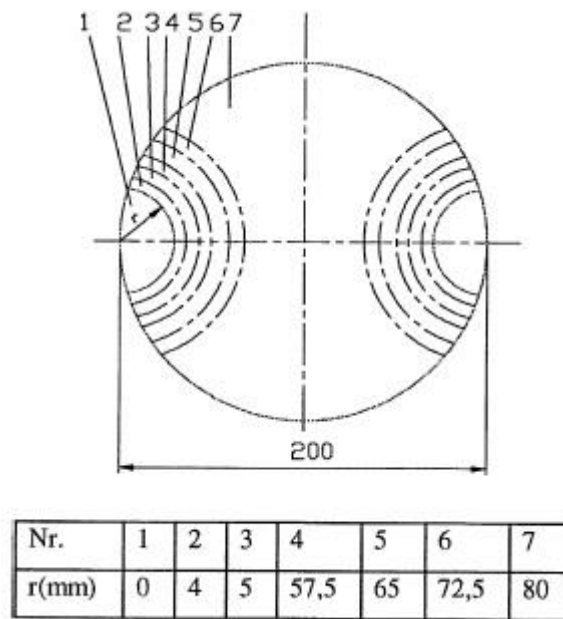
El ensayo <sup>[6]</sup> consiste en conformar muestras rectangulares de diferentes anchos, utilizando un punzón semiesférico y una matriz. Variando el ancho de las probetas y el lubricante, uno puede obtener ambos dominios, positivo y negativo, en el FLD. Para el diámetro del punzón y la oquedad de la matriz, se recomiendan valores de 100 y 105 mm, respectivamente.

La ventaja de este ensayo radica en la simplicidad de la herramienta, la forma simple de las probetas y la posibilidad de cubrir la totalidad del dominio de la FLD. La desventaja se da en la posibilidad de arrugas y errores de medición causados por la curvatura del punzón. Este método se utiliza actualmente como método estándar por la norma ISO 12004 "Materiales metálicos - Determinación de curvas límite de conformado".

### 2.3.2.7 Ensayo Hasek

Para evitar el arrugado en las probetas, Hasek <sup>[4]</sup> propuso el uso de probetas circulares con entallas de diferentes radios, ver Figura 2.5. Esto requiere de una cantidad mayor de trabajo para la fabricación de las probetas.

Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado

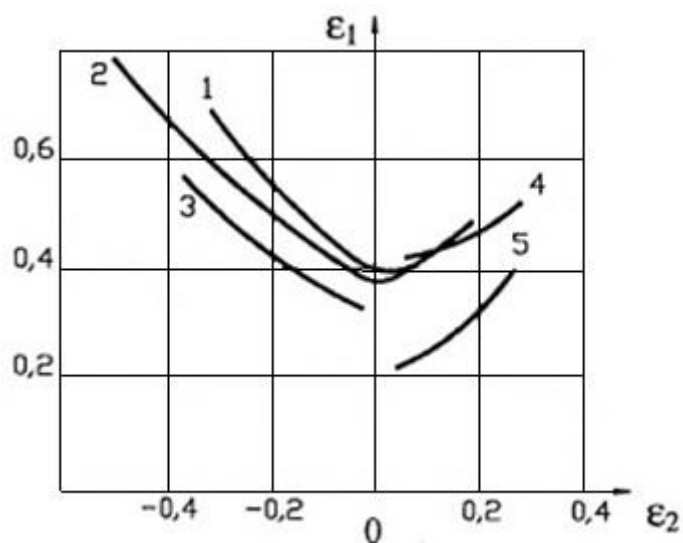


**Figura 2.5**  
Formas de probetas utilizadas en el ensayo Hasek.

2.3.2.8 Comparativa de ensayos

Frente a los ensayos descriptos, existen otros ensayos pero su utilidad es limitada a un número reducido de estados de deformación.

Hasek <sup>[7]</sup> ha publicado un estudio sistemático de la influencia de los métodos de ensayo sobre los FLDs obtenidos. Los resultados de importancia se resumen en la Figura 2.6.



**Figura 2.6**  
Establecimiento de FLDs, utilizando diferentes métodos de ensayo: 1-Hasek; 2-Nakazima; 3-Tracción uniaxial; 4-Keeler; 5-Ensayo de protuberancia hidráulica <sup>[7]</sup>.

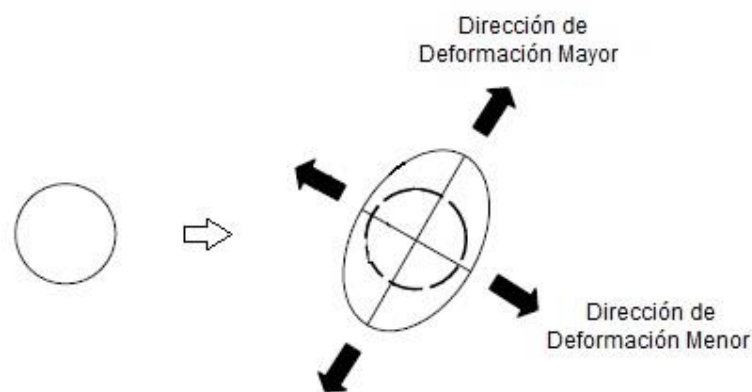
*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

De los ensayos descritos, los siguientes son algunos de los recomendados: el ensayo de protuberancia hidráulica para eliminar la fricción; el Ensayo de Tracción Uniaxial, si se busca sencillez; Ensayo Nakazima para cubrir una gran variedad de la trayectoria de deformación.

### 2.3.3 Medición de las deformaciones

Antes de proceder con los ensayos, es necesario grabar en la superficie de las probetas una malla patrón; por lo general se elige una matriz de círculos de diámetro nominal, aplicando alguna técnica de grabado en metal como ser el grabado electroquímico.

La ventaja del patrón circular, radica en que permite determinar a simple vista las deformaciones; mayor y menor, ya que el círculo (después de la conformación) se convierte en elipse. Ver Figura 2.7.



**Figura 2.7**

Deformación del patrón circular.

### 2.3.4 Cálculo de deformaciones y representación gráfica de datos

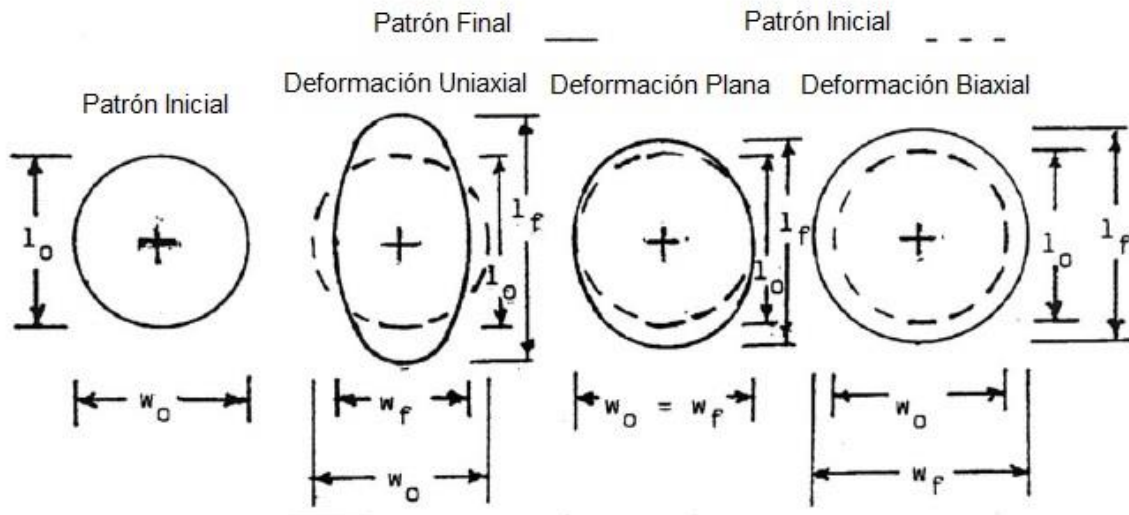
Una vez medidas las deformaciones en la chapa, se procede a calcular la deformación mayor asociada a la deformación menor, mediante la expresión de la deformación de ingeniería:

$$\text{Deformación mayor} = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100 = e_1 [\%] \quad (2.1)$$

$$\text{Deformación menor} = \frac{w_f - w_o}{w_o} * 100 = e_2 [\%] \quad (2.2)$$

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

Donde el subíndice  $f$  alude al estado final de deformación, mientras que el subíndice  $o$  hace referencia al estado inicial del círculo, antes de la deformación. Para una mejor interpretación de cada término, remítase a la Figura 2.8.



**Figura 2.8**  
Representación de patrones deformados. Norma ASTM E2218.

El diagrama mencionado también puede ser graficado mediante el uso de la deformación verdadera, cuya expresión para la deformación mayor y menor asociadas, está dada por:

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \tag{2.3}$$

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right) \tag{2.4}$$

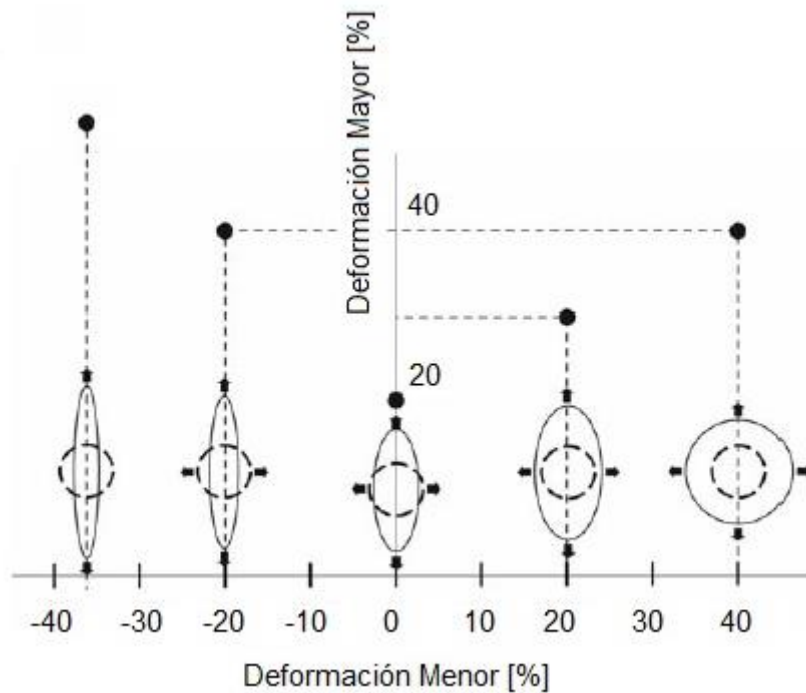
Donde  $d_0$  corresponde valor del diámetro inicial de referencia,  $d_1$  corresponde al valor de la deformación de la elipse en la dirección mayor de deformación y por último  $d_2$  corresponde al valor de la deformación de la elipse en la dirección menor de deformación.

Ambas deformaciones, de ingeniería y verdadera, están relacionadas mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \tag{2.5}$$

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

Por último se ubican estos datos sobre el plano anteriormente descrito, como puede observarse en la Figura 2.9.



**Figura 2.9**

Ubicación de datos, deformaciones de ingeniería, sobre el plano cartesiano.

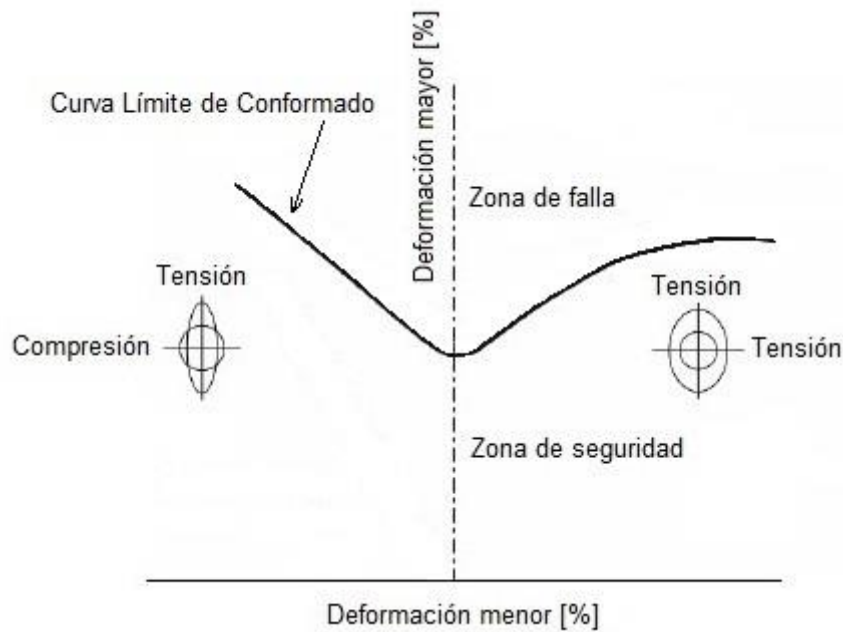
Resumen: El diagrama límite de conformado asociado a una chapa metálica, consiste en una gráfica o mapa donde muestra la evolución de las deformaciones ( $e_2, e_1$ ), en conexión con los diferentes estados de deformación a los que puede estar sometida la chapa.

**2.4 Curva Límite de Conformado (FLC, siglas en inglés) - Concepto**

Con la información obtenida (diagrama), se puede determinar las condiciones de inicio de la falla, para un material dado. Esto es, establecer un límite entre la zona segura y la zona de falla.

Al unir aquellos puntos significativos (los de mayor deformación) con una línea continua, se genera una curva. La frontera límite que permite distinguir estas dos zonas se denomina Curva límite de Conformado. Ver figura 2.10.



*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado***Figura 2.10**

Representación genérica de una Curva Límite de Conformado.

La norma de aplicación, que se utiliza para determinar las curvas límite de conformado, es la ASTM E2218.

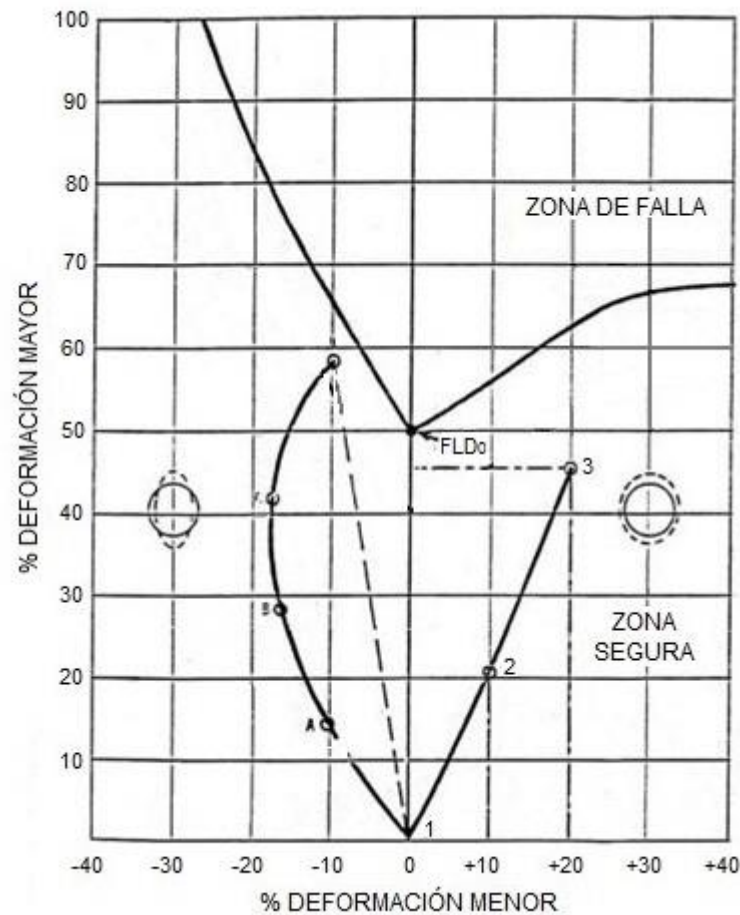
### 2.5 Interpretación en el FLD, de posibles estados de deformación de un círculo

Una chapa plana sometida a cualquier proceso de conformación, dará una pieza tridimensional conforme a un diseño preestablecido. Debido a la tecnología de transformación la lámina sufre deformaciones plásticas, ello puede ser apreciado mejor si, previamente, se graba una malla de círculos sobre su superficie.

Cualquier región de la pieza podrá ser representada en este diagrama, con solo ubicar el estado de deformación ( $e_2$ ,  $e_1$ ), que en definitiva constituye un punto sobre el FLD.

Un sector sobre la pieza, puede sufrir un nivel de deformación como el indicado por el punto 2, y luego seguir deformándose hasta llegar a un nivel representado por el punto 3 (Ver Figura 2.11). El camino o trayectoria de deformación seguida no es fácil de suponer, a menos que se deforme la pieza de a poco y posteriormente se midan ambas deformaciones ( $e_2$ ,  $e_1$ ).

Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado



**Figura 2.11**

Descripción de posibles o supuestas trayectorias de deformación seguidas por un círculo.

2.6 Valor  $FLD_0$

El punto característico  $FLD_0$  observado en la Figura 2.11, es el nivel más bajo de deformación que puede soportar el material o la pieza sin que falle (adelgace o rompa), y se presenta para un estado de deformación plana, es decir cuando la deformación menor ( $e_2$ ) es nula.

El lector ya habrá notado que la determinación experimental de los diagrama FLD es un proceso tedioso y que requiere tiempo.

2.7 Utilidad del FLD en la práctica Industrial

Algunas de las razones por las cuales es útil el FLD en cualquier proceso tecnológico de conformación son:

- El mapa brindado por FLD permite predecir la conformabilidad del material, es decir el límite de deformación que soportará el material antes de la falla.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

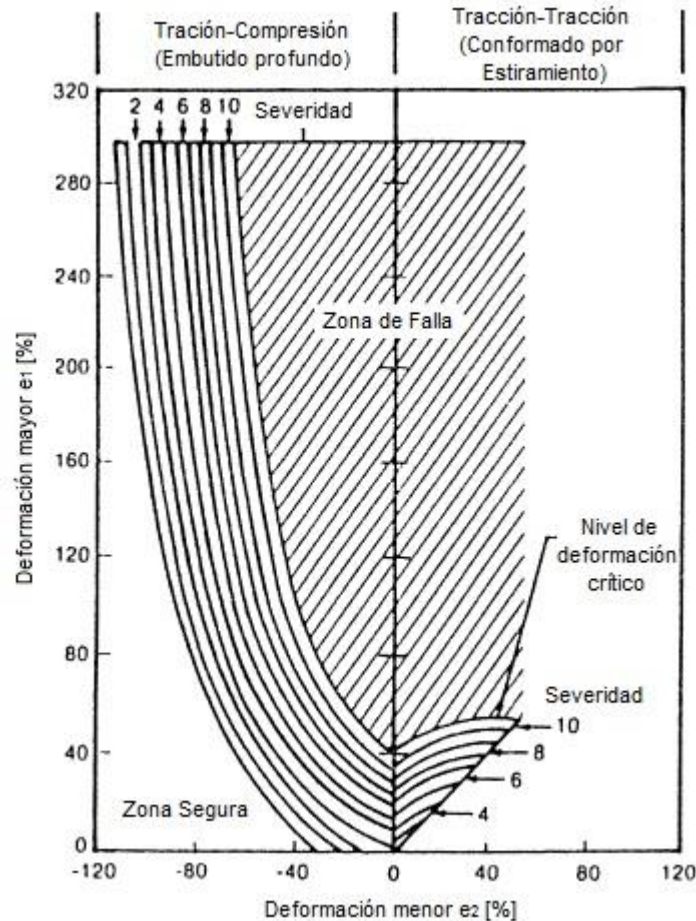
- El empleo del FLD ayuda en la puesta a punto de la herramienta, mejorando el diseño en zonas de la estampa, donde la pieza ve más comprometida su integridad. Utilizando un software para la simulación por elementos finitos, se evita el método de prueba y error tradicionalmente usado, con ello se reduce el tiempo dedicado al diseño de herramientas.
- Otra utilidad importante de los FLDs, es que permiten comparar y evaluar el comportamiento de diferentes calidades de chapas, frente a un diseño de estampa. Y de esta manera analizar si un cambio de material producirá inconvenientes.

En resumen, el FLD más el empleo de un software de simulación por elementos finitos son esenciales para predecir y resolver casos de fallas generadas en el conformado.

Para determinar en qué zona se está trabajando, sólo basta con ubicar sobre la FLC de la chapa en cuestión, los estados de deformación relevados de la pieza conformada.

### 2.7.1 El Índice de severidad

El uso del FLD también da una estimación de la intensidad de la deformación a través del llamado índice de severidad <sup>[8]</sup>. Este parámetro es definido como se muestra en la Figura 2.12.



**Figura 2.12**  
Definición del índice de severidad <sup>[8]</sup>.

Si el punto de deformación máxima está debajo y lejos a partir de la curva límite de conformado, el índice de severidad es pequeño y el margen de seguridad es tan grande que el material es desaprovechado. Por lo tanto es posible modificar el proceso de conformado incrementando las deformaciones, o utilizar un material que tiene una curva límite de conformado más baja (más allá del punto de deformación máxima).

El margen de seguridad depende de la calidad del material, así como de los parámetros del proceso. Un buen compromiso entre márgenes de seguridad razonables y prevenir que el material se desperdicie, parece ser la zona donde el índice de severidad es 7 u 8.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

Esta metodología es muy utilizada por parte de empresas que se dedican a la fabricación de piezas de chapa metálica, para obtener una elevada calidad y terminación del producto final, como así también para poner a punto los diseños de estampas.

## 2.8 Factores que influyen sobre el FLD

### 2.8.1 El espesor de la chapa metálica

Además de utilizar una chapa de mayor calidad, la solución más común para el éxito en un dificultoso proceso de conformado es el de aumentar el espesor de la chapa.

El efecto del espesor de la chapa sobre el FLD, se resume en lo siguiente:

- A medida que el espesor aumenta, la curva asciende sobre la gráfica ( $e_2$ ,  $e_1$ ).
- La influencia es mayor frente a una expansión pura y deja de ser relevante para una compresión pura.
- A lo largo de una trayectoria de deformación lineal, el aumento en el FLD es proporcional al incremento del espesor, pero este efecto se desvanece por encima de un valor crítico.

El Ingeniero puede decidir, si un proceso de conformado ineficaz puede ser mejorado, utilizando una chapa de mayor espesor. Esto es importante si las tensiones que actúan durante el proceso de conformación son de tracción, en las dos direcciones principales.

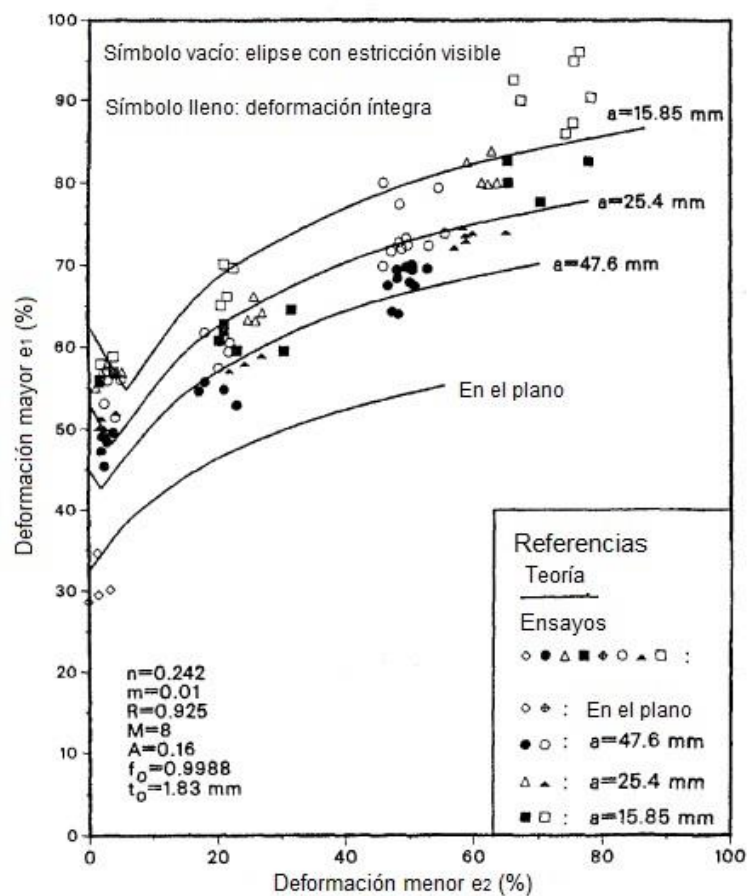
### 2.8.2 El tamaño de los círculos de la malla

Si los círculos de la red inicial tienen un diámetro  $d$ , la deformación medida es un valor medio promediado sobre una magnitud igual a  $d$ . Por lo tanto, en presencia de un gradiente de deformación, un tamaño de círculos más pequeño mejora la resolución.

Cuando se determina el FLD por estricción, los gradientes de deformación son bastante bajos; en este caso el efecto del tamaño de la red de círculos en los resultados de la prueba es débil. Sin embargo, cuando se determina el FLD por fractura, se producen gradientes de deformación más importantes.

### 2.8.3 La curvatura del punzón

Ghosh y Hecker <sup>[9]</sup> demostraron que la elección del método experimental utilizado para la determinación de la FLC afecta la ubicación de la curva límite. La influencia de la curvatura del punzón sobre los límites de estiramiento ha sido estudiada por Charpentier <sup>[10]</sup>. El utilizó punzones con radios de diferentes curvatura y avisaba que la reducción en el radio estaba acompañado por un incremento de la formabilidad (movimiento hacia arriba de la FLC). Shi y Gerdeen <sup>[11]</sup> realizaron un análisis teórico de esta incidencia utilizando el modelo de Marciniak-Kuczynsky, ver Figura 2.13.

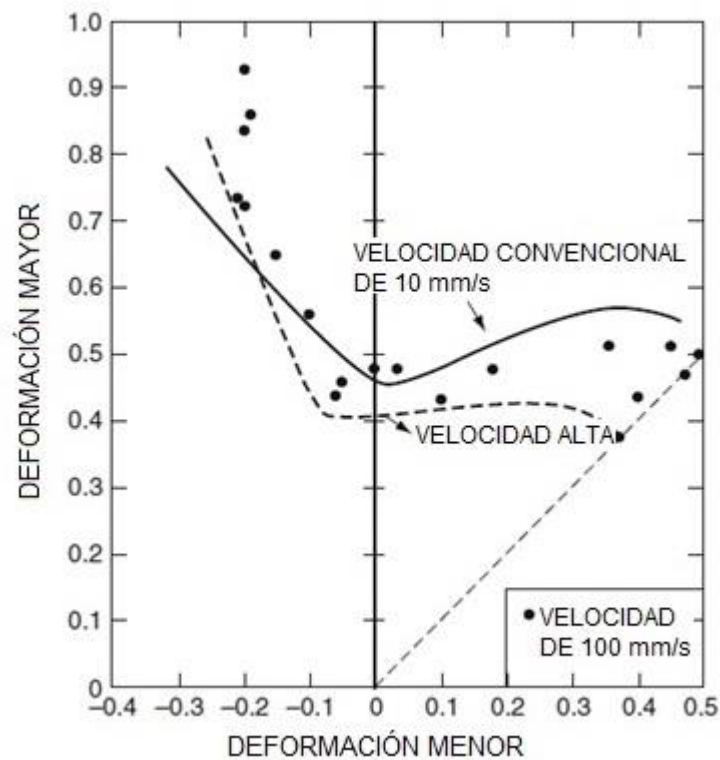


**Figura 2.13**  
 Influencia de la curvatura del punzón sobre el FLC <sup>[11]</sup>.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

## 2.8.4 La velocidad de deformación

Drewes <sup>[12]</sup> seguido después por Ayres <sup>[13]</sup> y Percy <sup>[14]</sup> han analizado la influencia de la velocidad de deformación en la deformación límite. En general, el aumento de la tasa de deformación provoca un desplazamiento hacia abajo de la FLC, que conlleva a una disminución de la formabilidad. Como ejemplo se muestra la Figura 2.14, correspondiente al acero SPCEEN-SD.

**Figura 2.14**

Influencia de la velocidad de deformación sobre la FLC para el acero SPCEEN-SD <sup>[14]</sup>.

## 3. Análisis de Regresión

### 3.1 Introducción

Para juzgar la relación entre dos variables aleatorias, puede emplearse un procedimiento estadístico llamado análisis de regresión y obtener una ecuación que indique cuál es la relación entre ellas.

En la terminología que se emplea en regresión, a la variable que se va a predecir se le llama variable dependiente. A la variable o variables que se usan para predecir el valor de la variable dependiente se les llama variables independientes.

El tipo más sencillo de análisis de regresión es el que interviene una variable independiente y una variable dependiente, y que además la relación entre estas es aproximada mediante una línea recta, se le conoce como regresión lineal simple.

### 3.2 Modelo de regresión lineal simple

A la ecuación que describe la relación de  $y$  con  $x$ , y en la que se da un término para el error, se le llama modelo de regresión.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (3.1)$$

Los valores de  $\beta_0$  y  $\beta_1$  se conocen como los parámetros del modelo, mientras que  $\epsilon$  es una variable aleatoria que se conoce como error, y da cuenta de la variabilidad de  $y$  que no puede ser explicada por la relación lineal.

#### 3.2.1 Ecuación de regresión estimada

Los diagramas de dispersión para el análisis de regresión se trazan colocando la variable independiente  $x$  en el eje horizontal y la variable dependiente  $y$  en el eje vertical. Este diagrama permite observar gráficamente los datos y obtener conclusiones acerca del tipo de relación entre las variables.



*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

Si la distribución de los datos es tal que, existe una relación lineal positiva entre  $x$  e  $y$ , la respuesta  $y$ , puede ser aproximada por el modelo de regresión lineal simple cuya ecuación de regresión estimada es:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_i \quad (3.2)$$

Donde

$\hat{y}_i$  = valor estimado

$b_0$  = intersección de la recta de regresión con el eje  $y$

$b_1$  = pendiente de la recta de regresión

$x_i$  = valor de la variable regresora

### 3.2.2 Método de mínimos cuadrados

Para que la recta de regresión estimada proporcione un buen ajuste a los datos, las diferencias entre los valores observados  $y_i$  y los valores estimados  $\hat{y}_i$  deben ser pequeñas, esto es:

$$\min \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.3)$$

Donde

$y_i$  = valor observado, variable dependiente, en la observación  $i$

$\hat{y}_i$  = valor estimado, variable dependiente, en la observación  $i$

Se puede usar cálculos diferenciales para demostrar que los valores de  $b_0$  y  $b_1$  que minimiza la expresión (3.3) se pueden encontrar usando las ecuaciones (3.4) y (3.5).

La pendiente e intersección con el eje  $y$  de la ecuación de regresión estimada es:

$$b_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.4)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (3.5)$$

Donde

$x_i$  = valor de la variable independiente en la observación  $i$

$y_i$  = valor de la variable dependiente en la observación  $i$

$\bar{x}$  = media de la variable independiente

$\bar{y}$  = media de la variable dependiente

$n$  = número total de observaciones

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

Siendo

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (3.6)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad (3.7)$$

Notas

El método de mínimos cuadrados proporciona una ecuación de regresión estimada que minimiza la suma de los cuadrados de las desviaciones entre los valores observados y los valores estimados.

El criterio de mínimos cuadrados permite obtener la ecuación de mejor ajuste. Si se emplea otro criterio, como minimizar la suma de las desviaciones absolutas entre los valores observados y los valores estimados, se obtendría una ecuación diferente. En la práctica el método de mínimos cuadrados es el más usado.

### 3.3 Coeficiente de determinación

Luego de obtener la ecuación de regresión estimada la pregunta es: ¿qué tan bien se ajusta a los datos la ecuación obtenida?

Definiciones

Suma de cuadrados debida al error

$$SCE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.8)$$

El valor de SCE es una medida del error al utilizar la ecuación de regresión para estimar los valores de la variable dependiente.

Suma total de cuadrados

$$STC = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.9)$$

El valor de STC es una medida del error que se comete cuando se usa la media de las observaciones, para estimar el valor de la variable dependiente.

Se puede entender STC como una medida de qué tanto se agrupan las observaciones en torno a la recta  $\bar{y}$  y SCE como una medida de qué tanto se agrupan las observaciones en torno a la recta  $\hat{y}$ .

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

Suma de cuadrados debida a la regresión

$$SCR = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.10)$$

Relación entre  $STC$ ,  $SCR$  y  $SCE$ .

$$STC = SCR + SCE \quad (3.11)$$

El coeficiente de determinación, indicado por  $r^2$ , se usa para evaluar la bondad de ajuste de la ecuación de regresión estimada, el mismo está definido por la siguiente relación:

$$r^2 = \frac{SCR}{STC} \quad (3.12)$$

El coeficiente dice qué porcentaje de la variabilidad total en la variable  $y$  puede ser explicada por la variable regresora, en consecuencia es una medida de la capacidad de predicción del modelo.

También puede verse como una medida de la fuerza de asociación lineal entre  $x$  e  $y$  (Esto es para el modelo lineal).

### 3.3.1 Propiedades de $r^2$

- $0 \leq r^2 \leq 1$
- No depende de las unidades de medición.
- Mientras mayor sea  $r^2$  menor es la  $SCE$  y por lo tanto, más cercanos están los puntos a la "recta" de regresión.

Todo ajuste mínimo cuadrático debe venir acompañado de su respectivo coeficiente de determinación para poder conocer el poder representativo de la función de ajuste, es decir el valor explicativo del modelo.

En la actualidad varios programas se encuentran disponibles para el análisis de datos, que son de fácil manejo y permiten al estadista, realizar comparaciones y elegir el modelo (según el criterio adoptado), que describa los datos obtenidos experimentalmente.

## 4. Desarrollo Experimental I

### 4.1 Descripción de la materia prima sometida a estudio

En el presente trabajo, se le practicaron una serie de ensayos a tres chapas suministradas por la empresa RENAULT ARGENTINA S.A. Las mismas son de uso comercial para el conformado en frío, son de bajo contenido en carbono y están galvanizadas. Fueron denominadas como: B, C y D.

El proceso de manufactura de las tres muestras, según consta en sus certificados de calidad, es el siguiente: Línea de decapado - Laminación en frío - Recocido en horno por lotes - Laminación de acabado - Recocido en horno - Línea continua de galvanización por inmersión en caliente.

### 4.2 Ensayos Mecánicos - Resultados

En primer lugar se le realizaron ensayos, para determinar las características mecánicas y parámetros propios de cada material, los valores resultantes se muestran en la Tabla 4.1 y la Tabla 4.2.

**Tabla 4.1** Características mecánicas de las tres chapas. Valores según dirección 0°.

Denominación	Límite de Fluencia $R_{0.2}$ [MPa]	Resistencia a Tracción $R$ [MPa]	Alargamiento a rotura $A$ [%]
CHAPA B	143,4	284,6	53,5
CHAPA C	170,6	297,6	52,0
CHAPA D	154,9	293,2	52,4

**Nota Fuente:** Informe de ensayos mecánicos - O.T. N° 015-8725. INTI-Córdoba.

**Tabla 4.2** Parámetros de conformado, obtenido para los tres tipos de chapas.

Denominación	Anisotropía plástica Normal $r_m$	Anisotropía plástica Planar $\Delta r$	Coefficiente de endurecimiento por deformación $n$
CHAPA B	2,08	0,52	0,2553
CHAPA C	2,31	0,45	0,2330
CHAPA D	2,02	0,38	0,2461

**Nota Fuente:** Informe de ensayos mecánicos - O.T. N° 015-8725. INTI-Córdoba.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

Metodología empleada:

Ensayo de tracción de acuerdo a norma ASTM E8/E8M-15

Ensayo para determinación de coeficientes de anisotropía plástica planar y normal de acuerdo a Norma ASTM E517-00 (2010).

Ensayo para determinación del exponente de endurecimiento por deformación "*n*" de acuerdo a Norma ASTM E646-15.

#### 4.3 Análisis Químico - Resultados

También se realizó un análisis químico a cada muestra, para determinar el porcentaje en peso de los elementos de aleación, los resultados se muestran en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3** Componentes presentes en las tres muestras analizadas.

Denominación	% en peso							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
CHAPA B	<0,01	0,01	0,09	0,010	0,009	0,03	0,02	0,01
CHAPA C	<0,01	0,03	0,12	0,010	0,014	0,02	0,01	<0,01
CHAPA D	<0,01	0,01	0,12	0,013	0,005	0,01	0,02	<0,01

**Nota Fuente:** Informe de análisis químico - O.T. N° 015-8822. INTI-Córdoba.

Metodología empleada:

Espectrometría de Emisión Óptica según norma ASTM E 415-2014.

## 5. Desarrollo Experimental II

### Procedimiento Sistemático para determinar el Diagrama Límite de Conformado

#### 5.1 Grabado en metal - Método químico

Se procedió a grabar las probetas para los ensayos, con diferentes técnicas de impresión. Luego de varias pruebas se consiguió elaborar un procedimiento de grabado en superficie metálica, método químico.

Con él, se obtuvo repetibilidad y buena definición en el grabado. La malla impresa en cada probeta de ensayo, se compone de una matriz de círculos cuyo diámetro nominal es de 2,5 mm, configuración que permitirá determinar los niveles críticos de deformación.

Para conocer el procedimiento, remítase al Anexo Documental: A. Grabado Químico en Chapas Metálicas.

#### 5.1.2 Puesta a punto de Ensayos (Prueba - Error)

Se realizaron varios ensayos destructivos con probetas de diversas medidas e impresas con la malla de círculos, con el objeto de definir las dimensiones adecuadas de éstas y además el número de pruebas a realizar por cada modo de deformación (tipo de ensayo).

Luego de los ensayos preliminares, se observó el nivel de deformación de cada probeta y se comprobó lo siguiente: las probetas del ensayo de tracción aportan “puntos” de la región tracción-compresión (segundo cuadrante del diagrama límite de conformado), mientras que las del ensayo con punzón semiesférico, brindan “puntos” ubicados en la zona central de diagrama (ligeramente a la izquierda del eje de deformación mayor) y por último las deformaciones relevadas en el ensayo Erichsen, proveen de “puntos” situados en el primer cuadrante (en la región tracción-tracción).

Para el ensayo de tracción y el ensayo con punzón semiesférico, las dimensiones de las probetas fueron definidas de manera que se obtenga la mayor cantidad de datos posibles, con la menor cantidad de ensayos (los necesarios y suficientes).

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

En el caso del ensayo Erichsen, fue necesario que las dimensiones de la probeta cubran completamente el área de la matriz de sujeción.

Cada probeta se cortó con guillotina, luego se marcó una codificación para individualizarlas, ya que son tres chapas de diferentes lotes, y por último se grabó una malla de círculos sobre la superficie de cada muestra, mediante un método químico como ya se comentó.

En todos los casos, la longitud mayor de cada muestra coincidió con la dirección de laminación de la chapa.

Las dimensiones y cantidad de probetas ensayadas, se consigna en un informe final.

## 5.2 Criterio de falla para la determinación del Diagrama Límite

En piezas conformadas, una falla puede ser interpretada como:

- Deformación excesiva - Estricción.
- Fractura.

El criterio adoptado para determinar el Diagrama Límite de Conformado (y por consiguiente la finalización de todos los ensayos), fue la falla por fractura del material; su adopción se debe a que es más simple detectar la fisura mientras el ensayo progresa (a velocidad baja y controlada), y detenerlo en el instante en que la misma se produce.

## 5.3 Ensayos simulativos

Para el estudio de la conformabilidad de las chapas de acero, se realizaron tres clases de ensayos, a saber:

- Ensayo de Tracción.
- Ensayo con punzón semiesférico - Ensayo de severidad.
- Ensayo Erichsen - Ensayo de copa Olsen.

A continuación se describen brevemente cada ensayo y algunos aspectos que se tuvieron en cuenta.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

## 5.3.1 Ensayo de Tracción Uniaxial

## Equipo utilizado

En la Figura 5.1 se muestra la Máquina Universal, con la cual se realizaron los ensayos.



**Figura 5.1**  
Máquina Universal INSTRON - Laboratorio de ensayos mecánicos INTI-Córdoba.

## Descripción

Para deformar las probetas rectangulares y asegurar una sujeción correcta de sus extremos, se debió seleccionar las mordazas adecuadas (en función del ancho de las mismas) y acoplarlas en los cabezales, inferior y superior de la máquina. Luego se posicionó la probeta entre las mordazas y éstas se cierran con un mecanismo de giro. En la Figura 5.2 se puede observar a una de las tantas probetas ensayadas, fijamente sujeta en la máquina.



*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado***Figura 5.2**

Posicionamiento de la probeta entre las mordazas de la máquina de tracción.

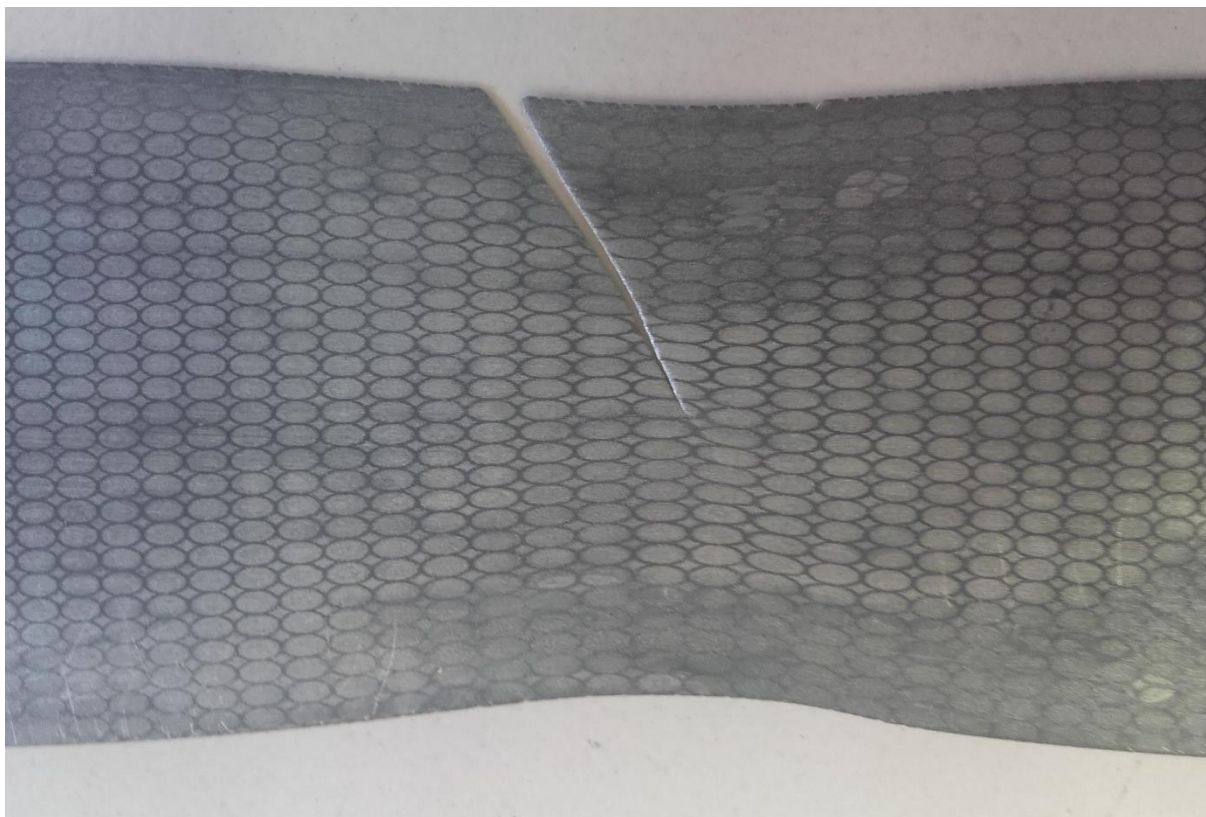
El dispositivo de tracción se gestiona íntegramente por una computadora, antes de dar inicio a la deformación, fue necesario ingresar las magnitudes de los siguientes parámetros:

- La denominación de la probeta.
- El ancho.
- El espesor.
- La magnitud de la velocidad de deformación [mm/min].

Luego de ingresado los datos de partida se dio comienzo al ensayo. El mismo se dio por finalizado cuando se producía la rotura de la probeta. La velocidad de deformación, con la cual fueron realizados todos los ensayos de este tipo fue de **9 [mm/min]**.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

En la Figura 5.3 se puede observar, una de las probetas que fue deformada mediante el ensayo de tracción.



**Figura 5.3**

Probeta rectangular posterior al ensayo, el inicio de la falla se produjo en el centro y se propago hacia uno de los bordes de la muestra.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

## 5.3.2 Ensayo Erichsen - Ensayo de copa Olsen

## Equipo utilizado

En la Figura 5.4 muestra la máquina, utilizada en el ensayo Erichsen y en la Tabla 5.1 se exponen las características de la misma.

**Figura 5.4**

Máquina de embutición - Laboratorio de ensayos mecánicos INTI.

**Tabla 5.1.** Características de la máquina.

Marca	ALFRED J. AMSLER Y CIA.
Modelo	26/207
Fuerza máxima del punzón	10.000 kg
Desplazamiento máximo del punzón	50 mm
Diámetro del penetrador-punzón	22,22 mm
Fuerza máxima de sujeción	N/A
Rango de velocidad para ensayos	N/A

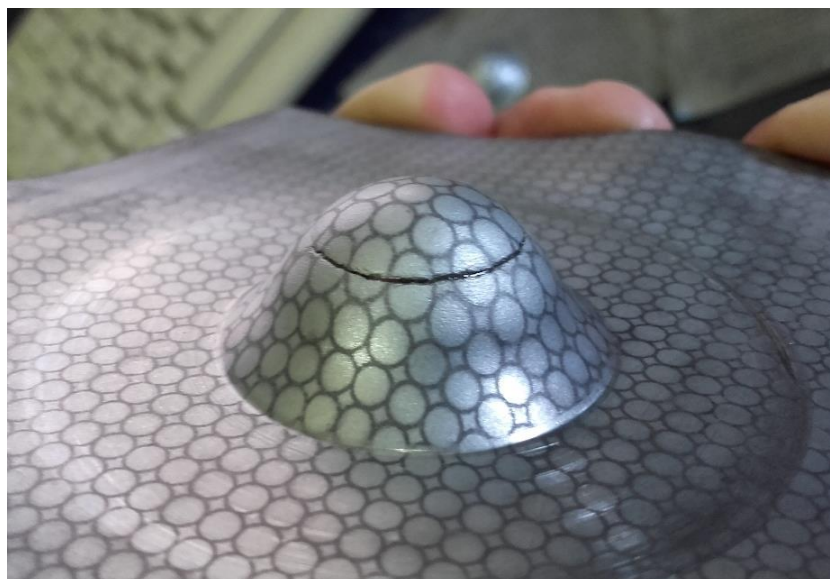
*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado***Descripción**

Como se pudo observar, este dispositivo es manejado manualmente por el operador. El mismo cuenta con dos testigos analógicos los cuales registran; uno la magnitud de la fuerza instantánea ejercida por el punzón y el otro, el desplazamiento de este último al finalizar el ensayo.

En primer lugar se lubricó la superficie (sin grabar) de la probeta, utilizando grasa grafitada, luego se la ubicó dentro de la matriz que posee la máquina de ensayo; con la superficie grabada hacia arriba, ya que el penetrador actúa de forma vertical ascendente sobre la cara inferior. Esta ubicación se debe a que si se hiciera con la superficie de grabado hacia abajo, el punzón podría borrar los círculos impresos y esto conlleva a un inconveniente a la hora de medir las deformaciones.

Posteriormente se cerró la matriz ejerciendo un torque de ajuste sobre una barra metálica, que se coloca entre las muescas ubicadas en la parte superior de la máquina. Esta acción hace descender la tapa de la matriz y aprisiona la probeta, luego se verificó que la llave del sistema hidráulico (situada en el lateral de la máquina) esté cerrada. Finalmente se ejercieron movimientos giratorios a velocidad baja sobre la manivela; en sentido horario y en el sentido anti-horario, ello provoca el desplazamiento del penetrador hacia el interior de la matriz.

La probeta va adquiriendo la forma de una copa a medida que progresa el ensayo, el cual se dio por finalizado cuando se apreció la fractura, como lo ilustra la Figura 5.5.

**Figura 5.5**

Probeta luego de finalizado el ensayo; la falla se ubica cerca del polo, inicia en algún punto determinado y se propaga de forma rápida.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

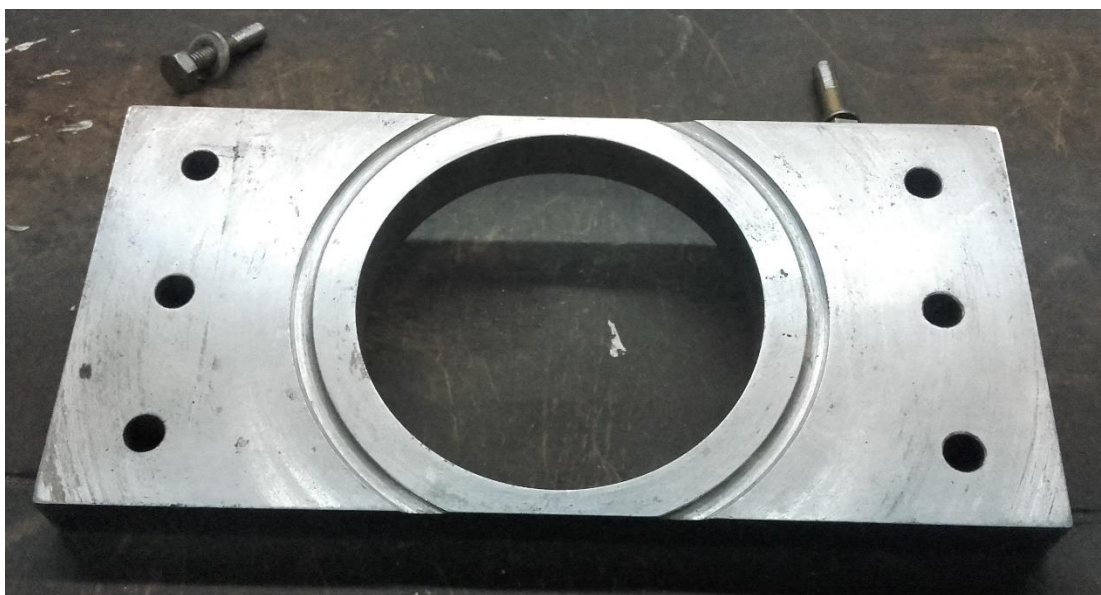
## 5.3.3 Ensayo con punzón semiesférico - Ensayo de severidad

## Equipo utilizado

Para realizar este ensayo además de la máquina de tracción, Figura 5.1, se utilizó una matriz, Figura 5.6, y sus respectivos implementos que se muestran en la Figura 5.7 y en la Figura 5.8. Estos elementos pertenecen al Departamento de Materiales y Tecnología de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.



**Figura 5.6**  
Matriz - Ensayo de severidad.



**Figura 5.7**  
Tapa de la matriz.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

**Figura 5.8**  
Punzón semiesférico.

#### Descripción de la matriz

La matriz posee una tapa, ambas tienen 6 agujeros roscados pasantes donde se alojan los bulones. También poseen una oquedad circular en su parte central de 105,7 mm de diámetro, que permite el libre desplazamiento del punzón.

Por último, la primera posee un nervio y la segunda un surco; que sirven para sujetar firmemente la probeta durante el ensayo.

#### Posicionamiento y sujeción de la probeta en la matriz

Se colocó sobre el nervio de la matriz y el surco de la tapa, recortes de chapas (envase de conserva) más dúctiles, con la intención de aminorar el efecto de corte que ellas ejercen sobre las probetas; ya que en ensayos preliminares, éstas se rompían en esas zonas. Luego se ubicó sobre la matriz, la probeta del ensayo con la superficie grabada hacia abajo; de este modo se evita que el punzón borre la malla de círculos, ya que el mismo hizo contacto con la cara opuesta.

Para finalizar se colocó la tapa y los bulones, estos se ajustaron con un torquímetro. El valor del torque aplicado sobre cada bulón fue de 5 [kgm].

Nota: se recuerda al lector que a las probetas, para este tipo de ensayo, se les hizo un pliegue a 90°, en sus bordes longitudinales, de forma que estas abracen a la matriz. Para mejor claridad observe detenidamente la Figura 5.9.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

## Inicio y fin del ensayo

Al conjunto anterior se lo ubicó sobre la mesa de la máquina, posicionándolo de manera que el eje de la oquedad coincida con el eje de acción del punzón. Posterior a ello se colocó dos prensas de mano, para sujetar los pliegues contra la matriz y así mejorar el agarre de la probeta, para una mejor comprensión de lo descrito se exhibe la Figura 5.9. Luego se colocó sobre la probeta, el punzón y se hizo descender el cabezal superior de máquina de tracción hasta hacer contacto con él.

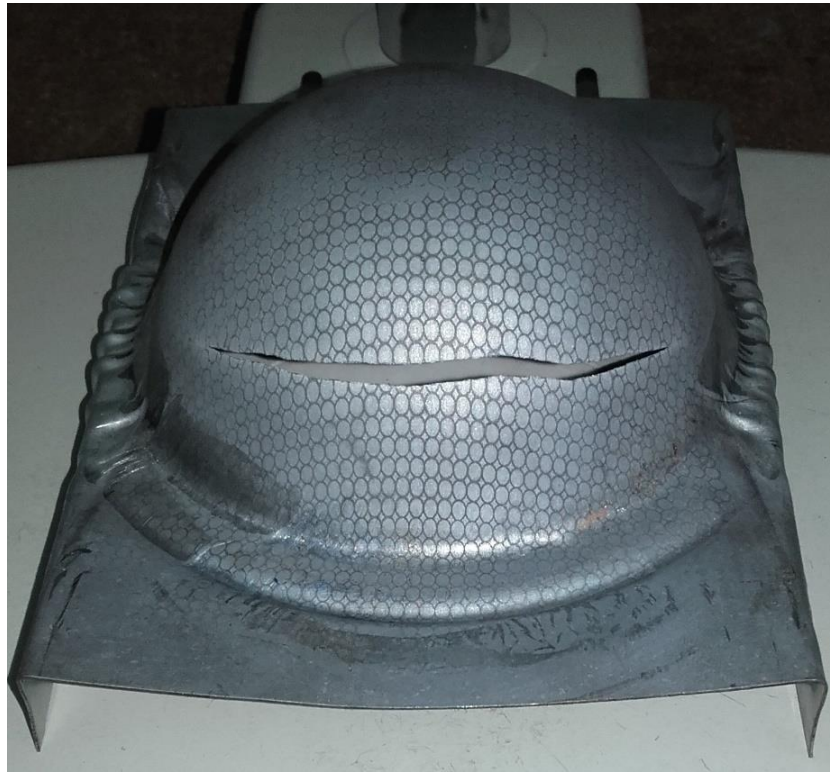
**Figura 5.9**

Configuración previa a iniciar el ensayo, las prensas de mano sujetan la probeta a fin de mejorar el agarre de la chapa.

Por último se ingresó en el ordenador de la máquina, el valor de la velocidad de avance del punzón, que fue establecida en **16 [mm/min]**, y se dio inicio al ensayo. El mismo terminó cuando se observó (en la pantalla de la computadora) la caída de la carga máxima aplicada, en el gráfico instantáneo de la tensión-deformación.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

En la Figura 5.10 se muestra el estado de la probeta, posterior al ensayo.



**Figura 5.10**

Estado de la probeta posterior al ensayo, en el momento de la fractura (en algunos casos) se oyó un pequeño estruendo, similar al producido cuando se abre una lata de gaseosa.

Nota: Todos los ensayos, fueron programados y llevados a cabo en las instalaciones del Instituto Nacional de Tecnología Industrial en la ciudad de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield N° 1561.



*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

#### 5.4 Selección de datos y captura de imágenes

Para no confundir al lector se realiza la siguiente aclaración.

Cuando se habla de elipse o círculos deformados, se hace referencia a la forma que adquiere uno o varios de los círculos de la malla grabada en la chapa, luego del ensayo. Por lo que estos términos deberán ser tomados como equivalentes.

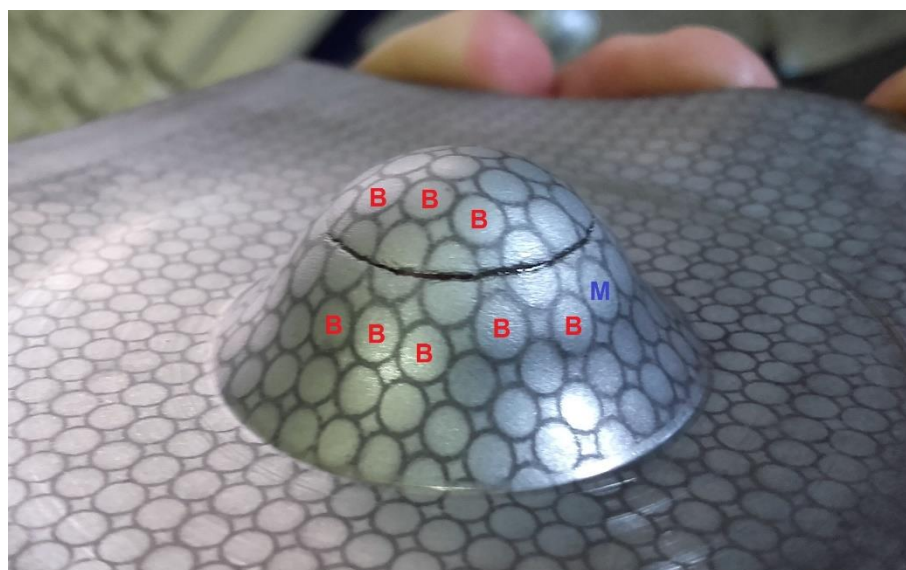
Cuando se habla de malla o malla de círculos, se hace referencia a la matriz de círculos grabados en la chapa, por lo que estas denominaciones deberán ser tomadas como equivalentes.

##### 5.4.1 Selección de los datos de referencia

El siguiente es el procedimiento de selección de las elipses que resultan relevantes como datos para construir el diagrama.

- Se observó detenidamente la zona de fractura.
- Se denominó *elipse de falla* aquella que, a causa de la fractura, fue dividida por el medio de su mayor extensión longitudinal (condición excluyente).
- Se marcó todas aquellas elipses adyacentes a la *elipse de falla* (las más próximas).

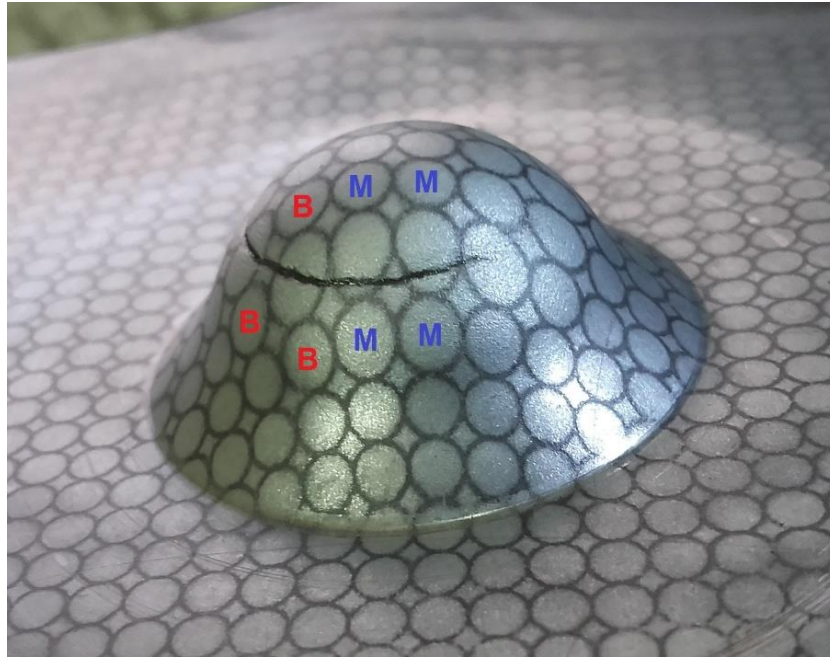
En relación a lo establecido, se muestran la Figura 5.11, Figura 5.12 y la Figura 5.13 para una mejor comprensión.



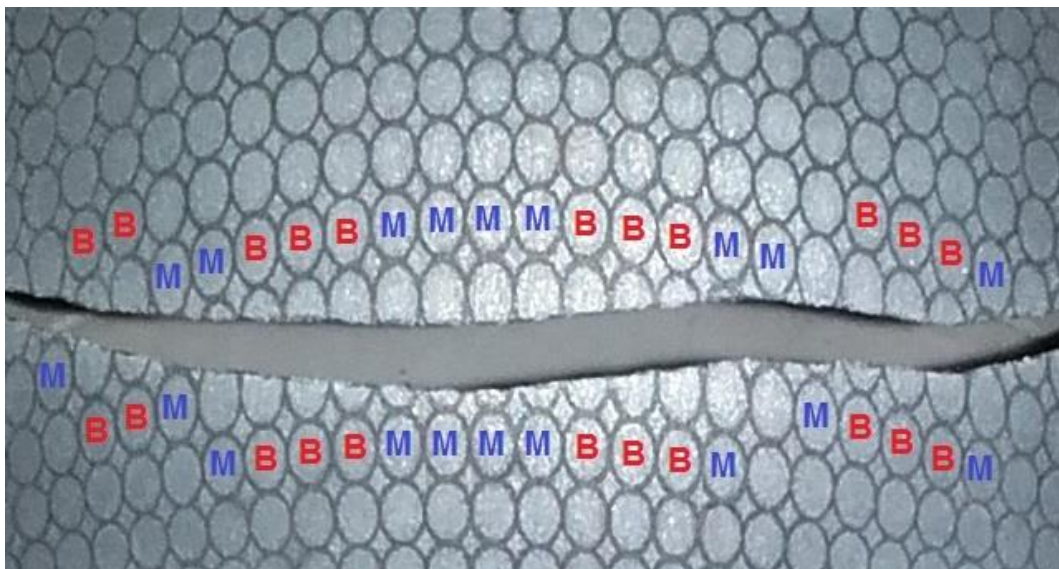
**Figura 5.11**

Selección de elipses para el relevamiento de datos: B puntos buenos y M puntos no considerados.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*



**Figura 5.12**  
Selección de elipses: B puntos buenos y M puntos no considerados.



**Figura 5.13**  
Selección de elipses: B puntos buenos y M puntos no considerados.

#### 5.4.2 Captura de imágenes

Se procedió a sacar fotos a las elipses marcadas. La validez y la confiabilidad de las mediciones corren el riesgo inherente de ser invalidadas, dado que algunas probetas dejan de ser planas luego del ensayo.

Para minimizar errores en la medición, se ubicó (lo mejor posible) el plano de la elipse perpendicular al foco de la cámara de imágenes, posteriormente se posicionó el eje mayor

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

de la elipse coincidente con la dirección norte-sur, relativa al observador, y recién se tomó la fotografía. Para una mejor comprensión observe la Figura 5.14.



**Figura 5.14**

Captura de imágenes: cada elipse marcada, se ubicó de manera que su plano esté perpendicular al eje de la lente de la lupa.

En la Figura 5.15 se muestra el dispositivo utilizado para observar y registrar los estados de deformación en las probetas, y cuyas características se resumen en la Tabla 5.2.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado***Figura 5.15**

Lupa: 1-Cámara de imágenes, 2- Foco y 3- Probeta. Laboratorio de Metalografía INTI-Córdoba.

**Tabla 5.2.** Dispositivo Óptico (Lupa).

Marca	MOTIC
Modelo	SMZ-168 SERIES
Ocular	Gran campo WF10X/23 mm.
Rango de aumento	7,5 - 50

Por último, se eliminaron aquellas imágenes defectuosas, llámense a estas; elipses en forma de lágrima, elipses borrosas y con deformación excesiva.

## 5.5 Medición, cálculos y procesamiento de datos

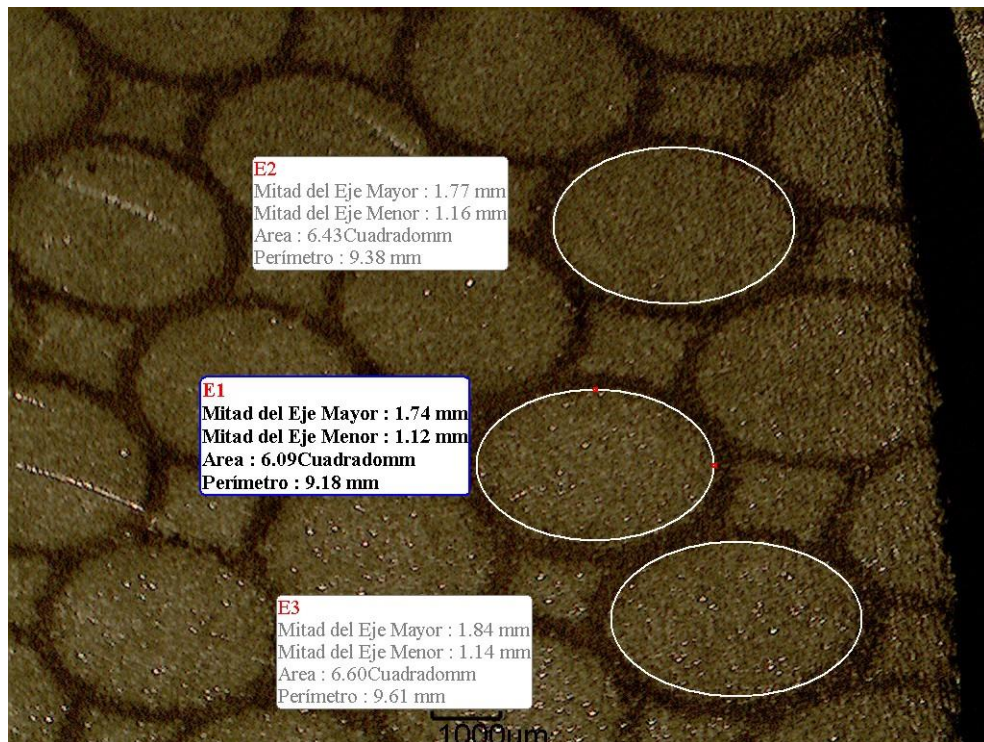
### 5.5.1 Medición de las deformaciones

Los ejes, mayor y menor, de las elipses fueron medidos utilizando el software Motic de la cámara de imágenes.

A cada fotografía se le trazó una elipse (por el interior), copiando la forma del círculo deformado tal como se puede apreciar en la Figura 5.16; junto a la elipse trazada aparece

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

instantáneamente un cuadro informativo con los valores del eje mayor y del eje menor. Luego estas magnitudes se guardan en el ordenador para generar la base de datos.



**Figura 5.16**

Medición de las deformaciones: se trazó una elipse por el interior, copiando la forma de la elipse que se quiere medir.

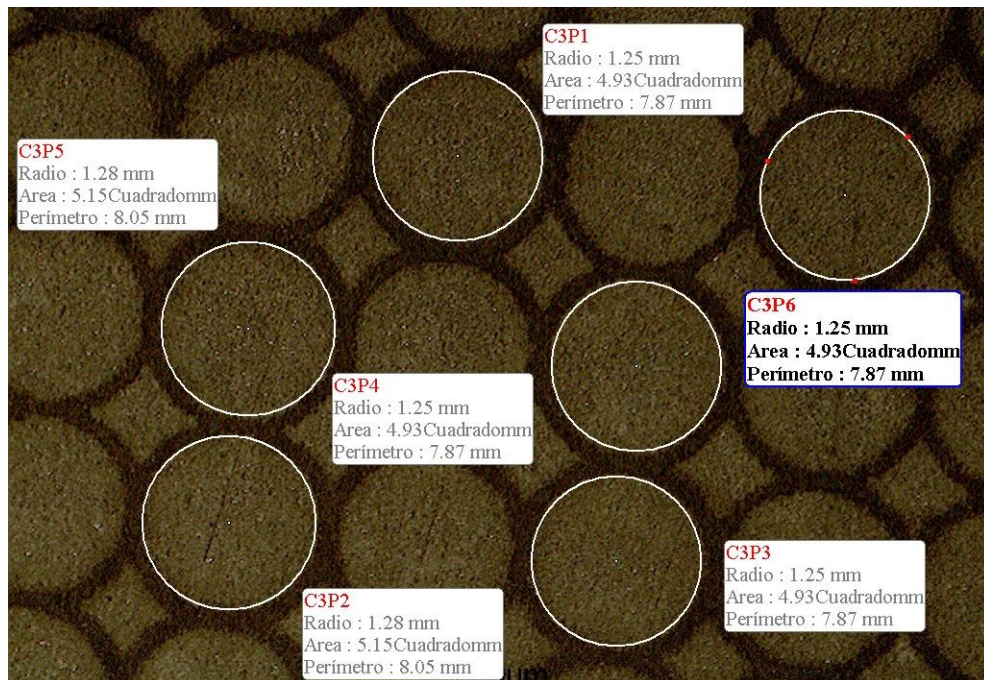
### 5.5.2 Cálculos realizados

Antes de iniciar los ensayos se le tomó una fotografía, a cada probeta, y a partir de ella se eligieron seis círculos impresos al azar (ver Figura 5.17), para determinar un valor de referencia según la siguiente expresión:

$$d_{promedio} = \sum_1^6 d_i / 6$$

Siendo  $d_i$  el diámetro interno del círculo medido en [mm].

Importante: a cada probeta le corresponde un diámetro de referencia particular.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado***Figura 5.17**

Cálculo del valor de referencia: se midió el diámetro de varios círculos grabados, trazando un círculo por el interior.

Con el valor de referencia y con aquellos obtenidos en las mediciones, se procedió a calcular las deformaciones de ingeniería  $e_1$  y  $e_2$ , ecuación 2.1 y 2.2, tal como lo establece la norma ASTM E2218.

### 5.5.3 Procesamiento de datos

Se ordenó y agrupó la información obtenida (valores de deformaciones), en función al tipo de chapa (B, C y D), y seguidamente se elaboró una planilla de cálculo (base de datos) en Excel.

### 5.6 Obtención del Diagrama Límite de Conformado - FLD

Finalmente con la base de datos se procedió a graficar las combinaciones de deformaciones, bajo un sistema ortogonal de ejes; en abscisas se ubicó la deformación menor  $e_2$  y en ordenadas la deformación mayor  $e_1$ . Esta representación, es conocida como Diagrama Límite de Conformado.

Los diagramas obtenidos para las tres chapas están publicados en la sección: 5.8 Resultados.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado***5.7 Obtención de la Curva Límite de Conformado - FLC**

La norma que permite el establecimiento del diagrama límite de conformado, no define una metodología a seguir para determinar la curva límite de conformado. Frente a esto, se decidió aplicar herramientas de la estadística descriptiva: la distribución de probabilidad normal y el análisis de regresión.

Cuando se graficaron los tres diagramas en el plano ortogonal ( $e_2$ ,  $e_1$ ), se notó una leve dispersión de algunos puntos. Con la finalidad de obtener una curva de regresión representativa, fue necesario discriminar esos puntos aislados.

Se procedió a analizar la variabilidad en los datos de manera unidimensional, siendo la variable aleatoria con distribución normal la deformación  $e_1$ , dentro de un subconjunto de datos (par  $e_2$ ,  $e_1$ ), para los cuales la deformación menor ( $e_2$ ) es idéntica.

Se elaboró una hoja de cálculo en Excel y se computaron: la media,  $\mu$ , la varianza, la desviación estándar,  $\sigma$ , y la variable aleatoria normal estándar,  $z$ , para cada conjunto de datos en estudio. Luego se procedió a buscar aquellos datos que no cumplieran con el siguiente criterio, para luego prescindir de ellos.

**5.7.1 Criterio para la depuración de datos aislados**

Se adoptó trabajar con los datos que representan un área de probabilidad del 68%, esto quiere decir que la variable  $e_1$  deberá estar dentro de un rango límite para poder ser considerada como dato explicativo.

Para el porcentaje adoptado, el valor de variable normal estándar,  $z$ , correspondiente a la variable  $e_1$  deberá estar dentro del intervalo:

$$-1 \leq z \leq 1$$

Siendo  $z$  igual a:

$$z = \frac{e_1 - e_m}{\sigma}$$

Luego de reclasificar los datos, mediante el procedimiento descrito, se obtuvo un conjunto más contiguo y a partir de ellos se procedió a realizar aproximaciones a través de diversas curvas.

El análisis de regresión se realizó con el software TCWIN, se configuró el programa para que calcule curvas de ajuste, y sus respectivos parámetros, utilizando como criterio de regresión la maximización del valor del coeficiente de determinación.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

A continuación se exponen los criterios que se establecieron, para evaluar las diferentes curvas de ajuste.

### 5.7.2 Criterios de evaluación para curvas de regresión

Finalmente las curvas adoptadas, en cada caso, cumplieron íntegramente con los siguientes criterios de evaluación preestablecidos, que a continuación se enuncian.

La curva de ajuste deberá:

- Ser continua y suave.
- Ser sencilla, con pocos parámetros de estimación y que proporcione un buen ajuste a los datos que representa.
- Tener un coeficiente de determinación significativo.
- Su valor mínimo relativo, deberá situarse dentro del intervalo, 0% y 5% de  $e_2$ . (Condición excluyente).

Nota: La función de regresión (de ajuste) obtenida no debe ser utilizada a los fines de predecir aquellos niveles de deformación fuera del rango de regresión.

### 5.8 Resultados

A continuación se presentan los Diagramas Límite de Conformado obtenidos y la correspondientes Curva Límite de Conformado estimada: ver Figura 5.18 y Figura 5.19 para la chapa B; Figura 5.20 y Figura 5.21 para la chapa C; Figura 5.22 y Figura 5.23 para la chapa D. También se elaboró una hoja de información relativa a los ensayos realizados, en base a requerimientos establecidos por la norma ASTM E2218, ver Tabla 5.3, Tabla 5.4 y Tabla 5.5.

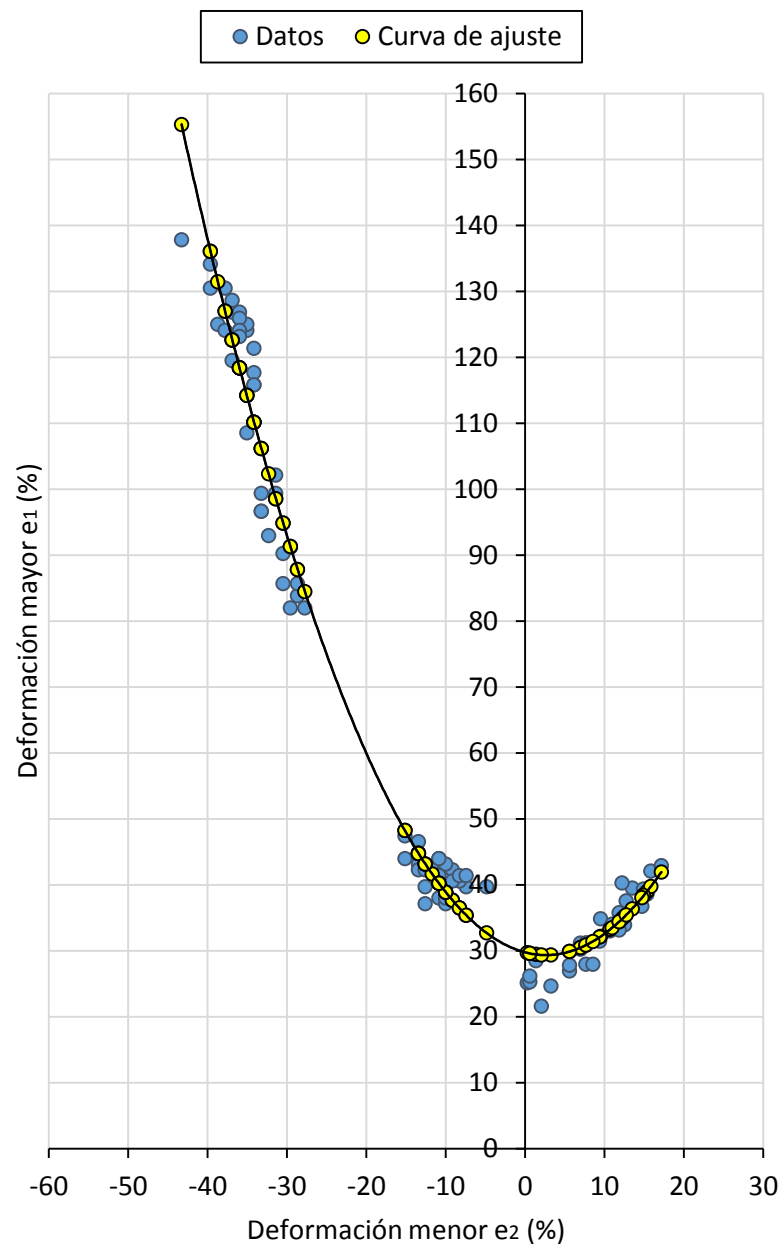


## Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado

Tabla 5.3. Información de ensayos realizados a la chapa B.

Informe					
Objeto	Obtención de la Curva Límite de Conformado - FLC			Fecha	
Material					
Denominación y tratamiento del material	<b>Chapa "B"</b> - DX56 D Z100 MAO -		Espesor	0,65 mm	
Ensayos realizados					
Clase					
Ensayo	Ensayo Erichsen		Ensayo con punzón semiesférico	Ensayo de tracción	
Deformación	Biaxial equilibrada		Biaxial no equilibrada	Plana; estiramiento en el sentido longitudinal	
Muestras					
Dimensión de probeta (largo x ancho), en mm	100x85		175x160	250x80	250x90
Cantidad de probetas ensayadas	4 (cuatro)		1 (única)	2 (dos)	2 (dos)
Orientación de la muestra	0° (Longitud mayor paralela al sentido de laminación)		0° (Longitud mayor paralela al sentido de laminación)	0° (Longitud mayor paralela al sentido de laminación)	
Condición del ensayo					
Temperatura entorno al ensayo	22°C (ambiente)		20°C (ambiente)	22°C (ambiente)	
Lubricante empleado en superficies de contacto	Grasa grafitada		Sin lubricación	N/A	
Forma y magnitud característica del grabado en la superficie de la muestra	Malla de círculos, de 2,5 mm de diámetro.		Malla de círculos, de 2,5 mm de diámetro.	Malla de círculos, de 2,5 mm de diámetro.	
Parámetros del ensayo					
Diámetro del punzón	22,22 mm		101,6 mm	N/A	
Velocidad de avance del ensayo	N/A		16 mm/min.	9 mm/min.	
Método de relevamiento de datos					
Descripción	De manera ocular, mediante lupa.		De manera ocular, mediante lupa.	De manera ocular, mediante lupa.	
Aumento	10		10	10	

Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado



**Figura 5.18**

Diagrama Límite de Conformado - Curva Límite de Conformado - Chapa B. Representación utilizando deformaciones de ingeniería.

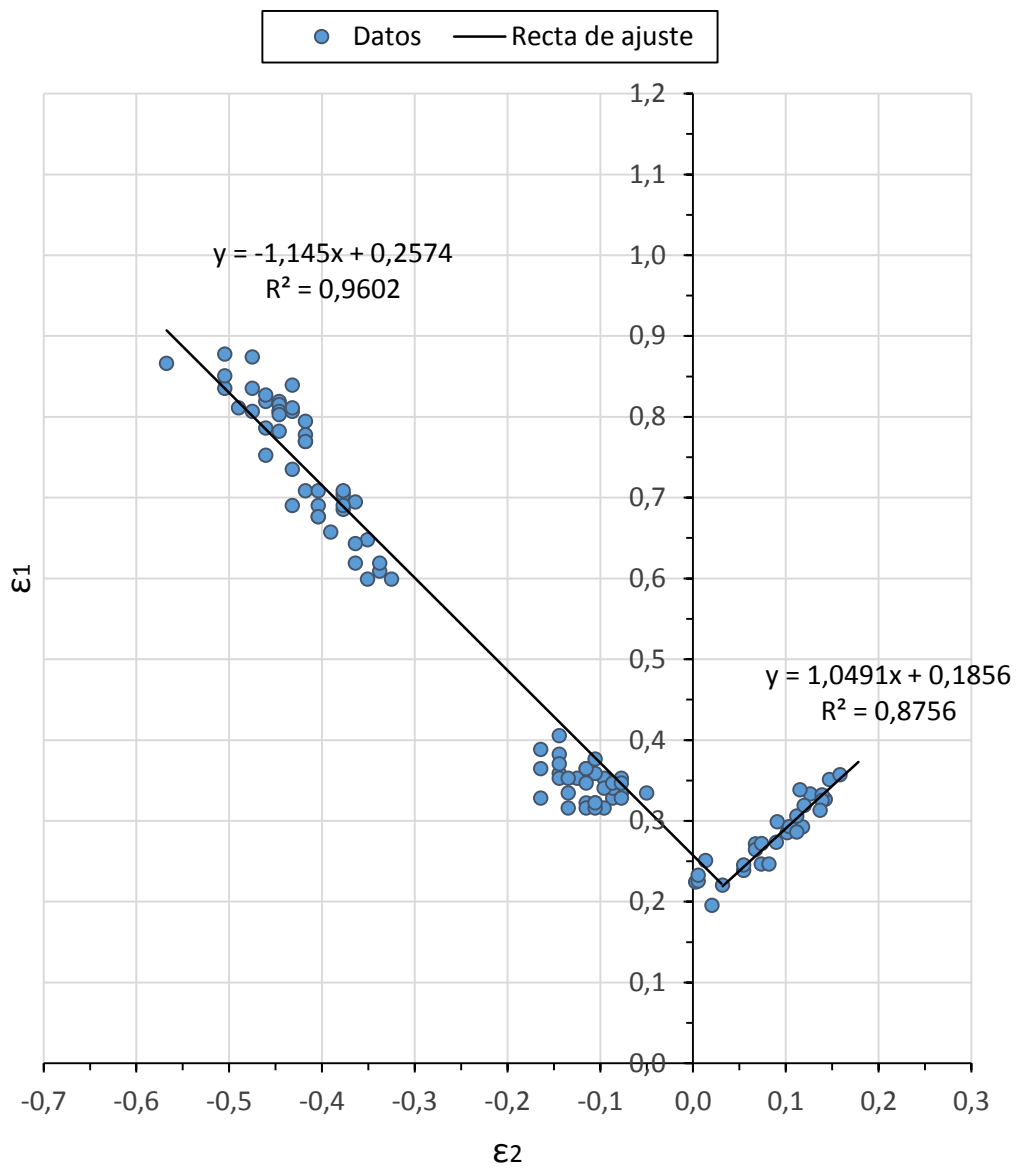
Ecuación de regresión estimada:

$$y = 0,0597 x^2 - 0,3153 x + 29,775$$

Coefficiente de determinación:

$$r^2 = 0,9825$$

Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado



**Figura 5.19**

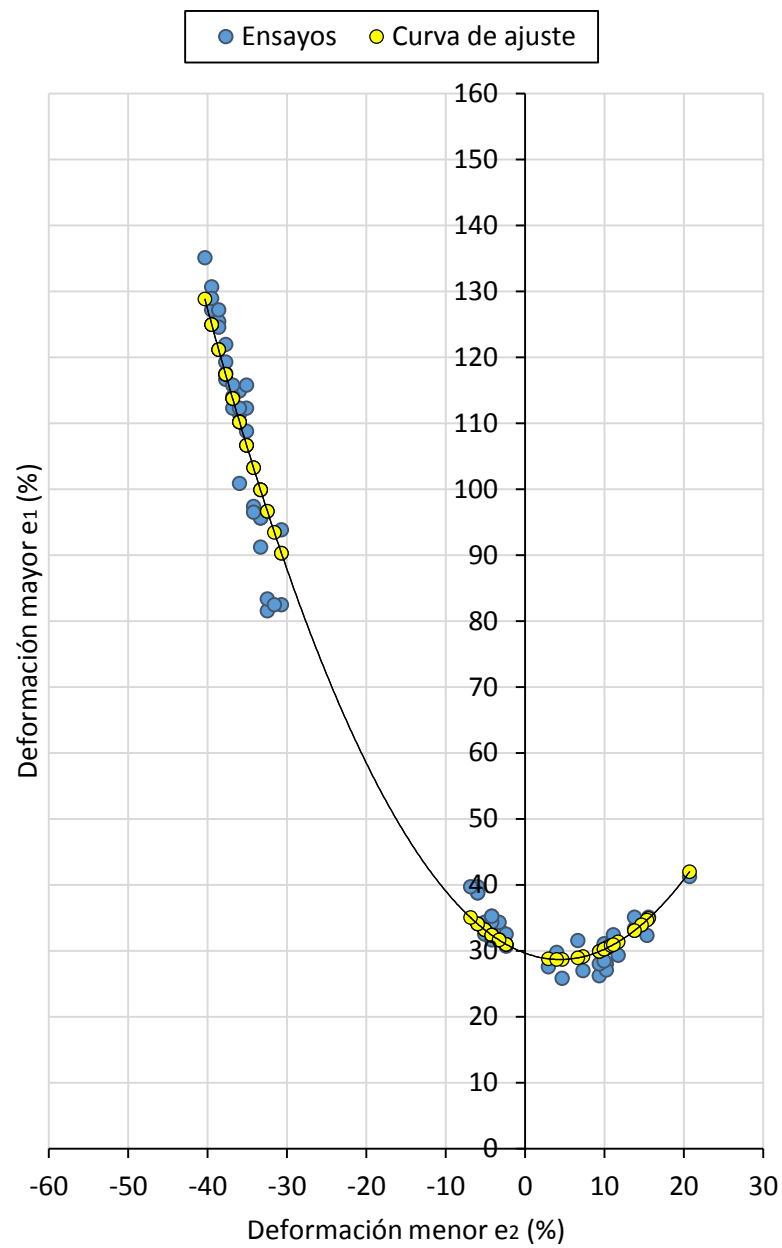
Diagrama Límite de Conformado - Curva Límite de Conformado - Chapa B. Representación utilizando deformaciones verdaderas.

## Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado

Tabla 5.4. Información de ensayos realizados a la chapa C.

Informe							
Objeto	Obtención de la Curva Límite de Conformado - FLC				Fecha		
Material							
Denominación y tratamiento del material	Chapa "C" - XES G 6/6 -		Espesor	0,60 mm			
Ensayos realizados							
Clase							
Ensayo	Ensayo Erichsen		Ensayo con punzón semiesférico		Ensayo de tracción		
Deformación	Biaxial equilibrada		Biaxial no equilibrada		Plana; estiramiento en el sentido longitudinal		
Muestras							
Dimensión de probeta (largo x ancho), en mm	100x84		175x160		250x70	250x90	250x100
Cantidad de probetas ensayadas	4 (cuatro)		1 (única)		1 (única)	2 (dos)	1 (única)
Orientación de la muestra	0° (Longitud mayor paralela al sentido de laminación)		0° (Longitud mayor paralela al sentido de laminación)		0° (Longitud mayor paralela al sentido de laminación)		
Condición del ensayo							
Temperatura entorno al ensayo	22°C (ambiente)		20°C (ambiente)		22°C (ambiente)		
Lubricante empleado en superficies de contacto	Grasa grafitada		Sin lubricación		N/A		
Forma y magnitud característica del grabado en la superficie de la muestra	Malla de círculos, de 2,5 mm de diámetro.		Malla de círculos, de 2,5 mm de diámetro.		Malla de círculos, de 2,5 mm de diámetro.		
Parámetros del ensayo							
Diámetro del punzón	22,22 mm		101,6 mm		N/A		
Velocidad de avance del ensayo	N/A		16 mm/min.		9 mm/min.		
Método de relevamiento de datos							
Descripción	De manera ocular, mediante lupa.		De manera ocular, mediante lupa.		De manera ocular, mediante lupa.		
Aumento	10		10		10		

Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado



**Figura 5.20**

Diagrama Límite de Conformado - Curva Límite de Conformado -Chapa C. Representación utilizando deformaciones de ingeniería.

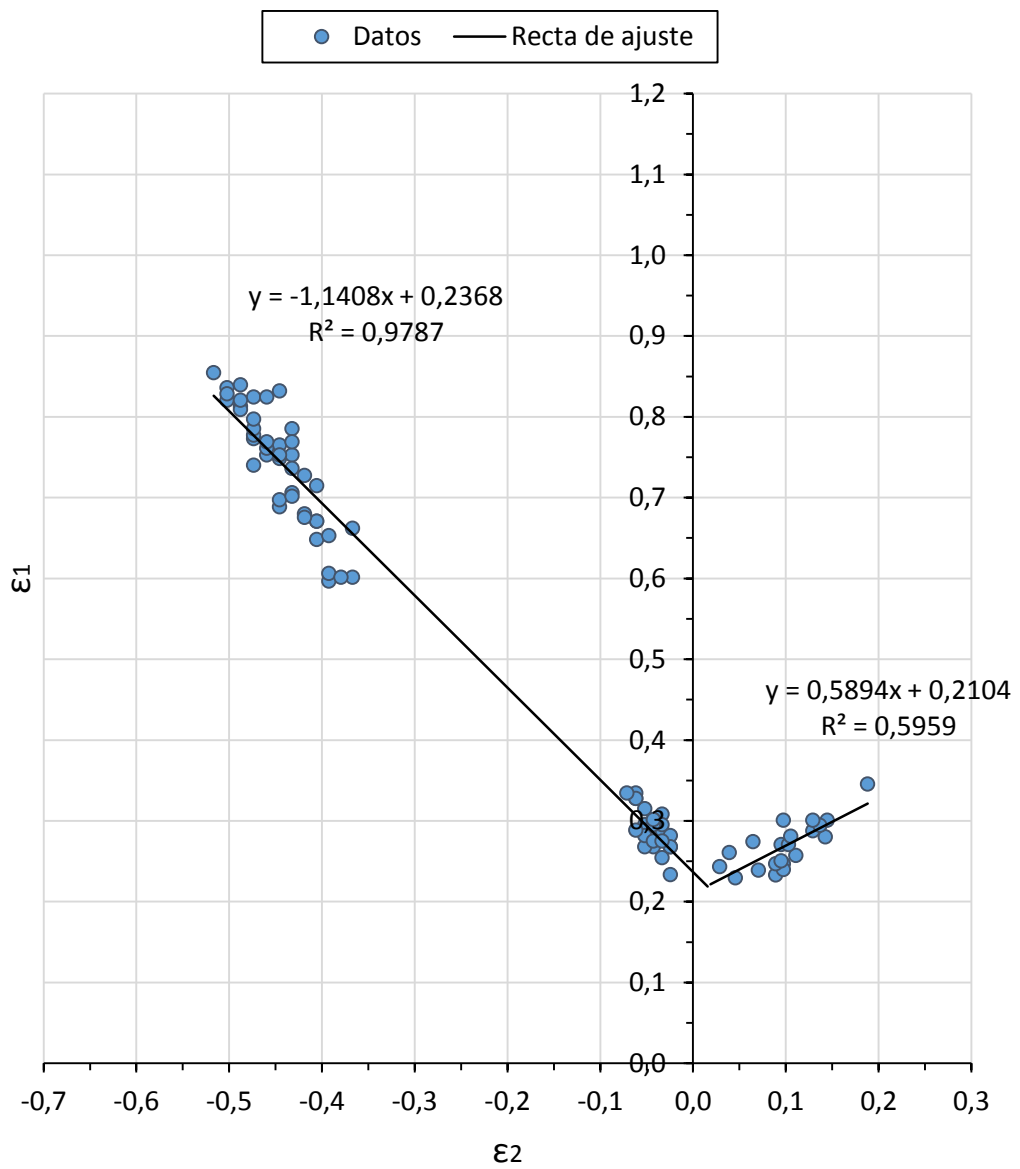
Ecuación de regresión estimada:

$$y = 0,05 x^2 - 0,4407 x + 29,658$$

Coefficiente de determinación:

$$r^2 = 0,9869$$

Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado



**Figura 5.21**

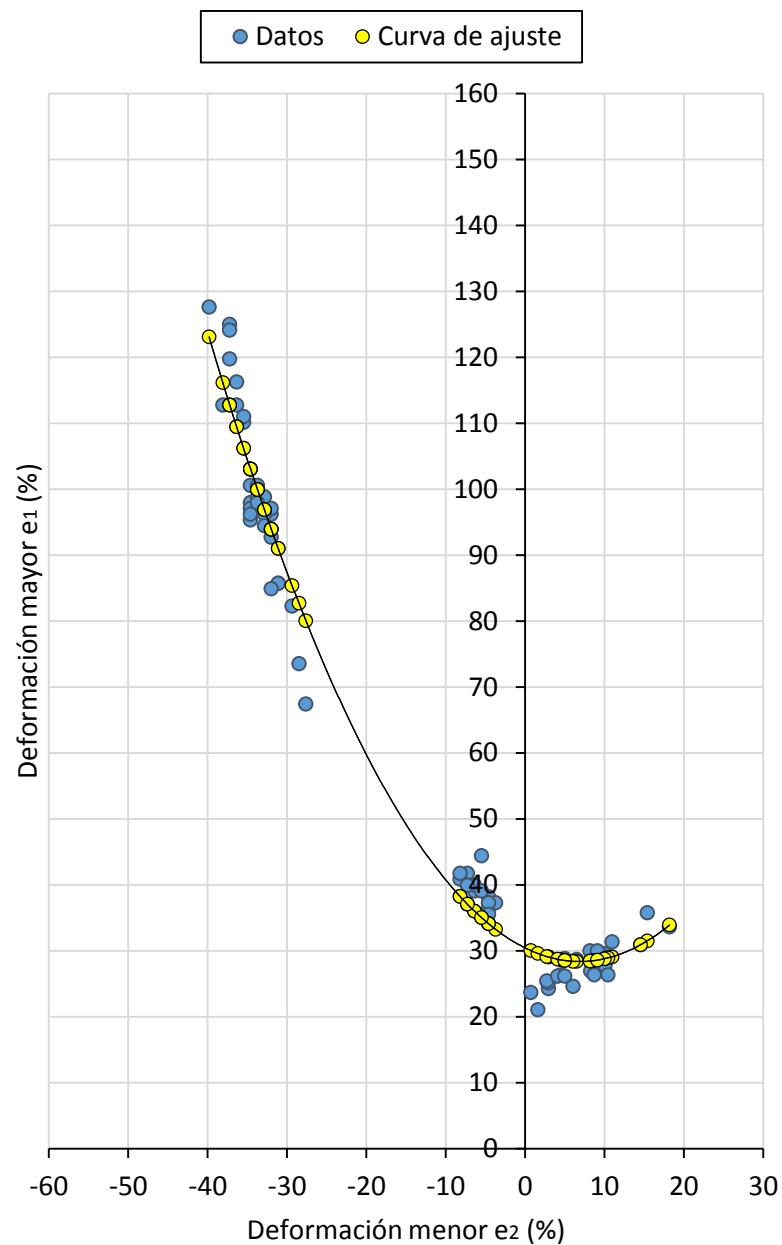
Diagrama Límite de Conformado - Curva Límite de Conformado - Chapa C. Representación utilizando deformaciones verdaderas.

Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado

**Tabla 5.5.** Información de ensayos realizados a la chapa D.

Informe							
Objeto	Obtención de la Curva Límite de Conformado - FLC			Fecha			
Material							
Denominación y tratamiento del material	<b>Chapa "D"</b> - DIN EN 10346 - DX56D		Espesor	0,61 mm			
Ensayos realizados							
Clase							
Ensayo	Ensayo Erichsen		Ensayo con punzón semiesférico	Ensayo de tracción			
Deformación	Biaxial equilibrada		Biaxial no equilibrada	Plana; estiramiento en el sentido longitudinal			
Muestras							
Dimensión de probeta (largo x ancho), en mm	100x82		180x160	250x70	250x80	250x90	250x100
Cantidad de probetas ensayadas	4 (cuatro)		1 (única)	1 (única)	1 (única)	1 (única)	1 (única)
Orientación de la muestra	0° (Longitud mayor paralela al sentido de laminación)		0° (Longitud mayor paralela al sentido de laminación)	0° (Longitud mayor paralela al sentido de laminación)			
Condición del ensayo							
Temperatura entorno al ensayo	22°C (ambiente)		20°C (ambiente)	22°C (ambiente)			
Lubricante empleado en superficies de contacto	Grasa grafitada		Sin lubricación	N/A			
Forma y magnitud característica del grabado en la superficie de la muestra	Malla de círculos, de 2,5 mm de diámetro.		Malla de círculos, de 2,5 mm de diámetro.	Malla de círculos, de 2,5 mm de diámetro.			
Parámetros del ensayo							
Diámetro del punzón	22,22 mm		101,6 mm	N/A			
Velocidad de avance del ensayo	N/A		16 mm/min.	9 mm/min.			
Método de relevamiento de datos							
Descripción	De manera ocular, mediante lupa.		De manera ocular, mediante lupa.	De manera ocular, mediante lupa.			
Aumento	10		10	10			

Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado



**Figura 5.22**

Diagrama Límite de Conformado - Curva Límite de Conformado - Chapa D. Representación utilizando deformaciones de ingeniería.

Ecuación de regresión estimada:

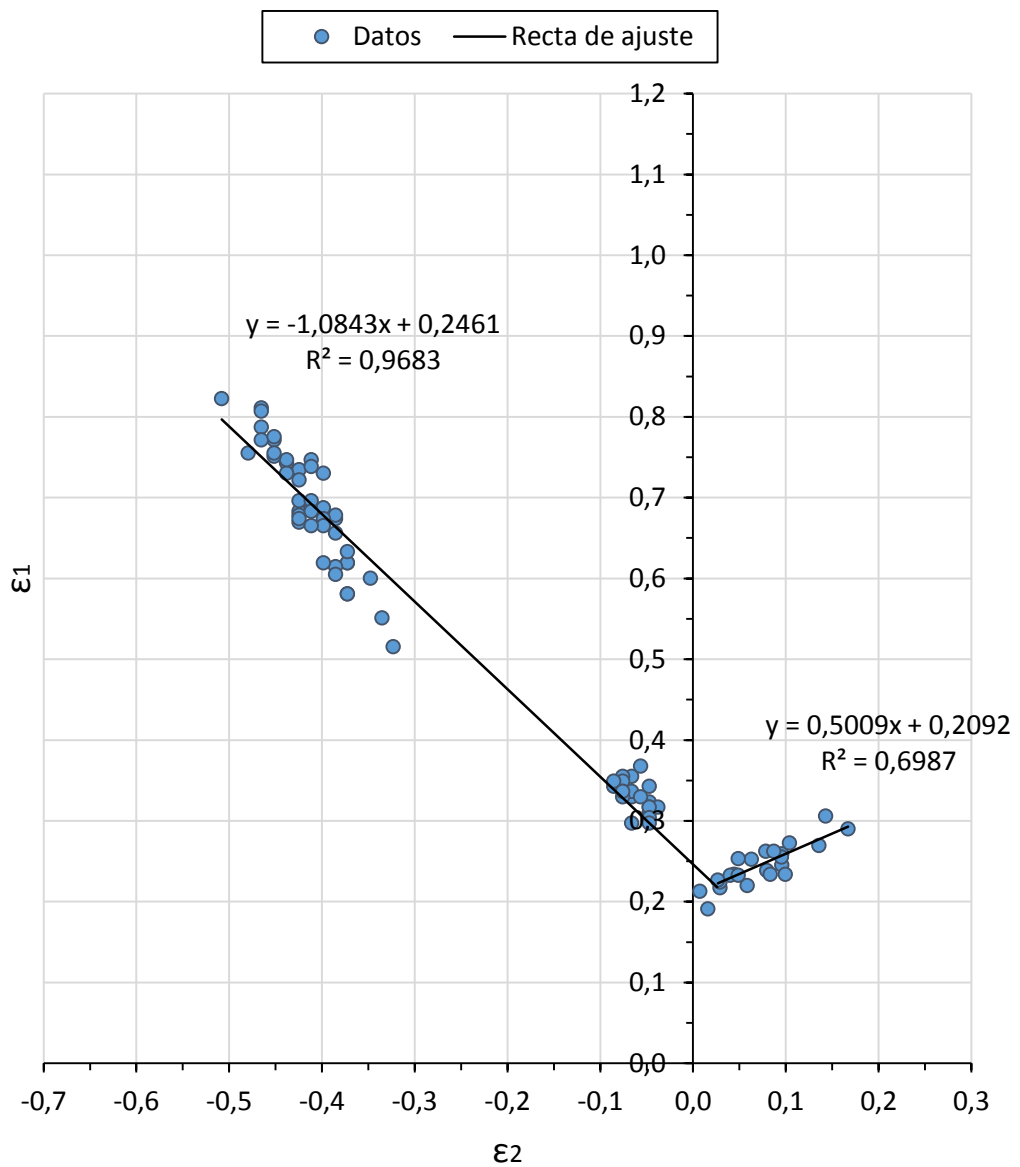
$$y = 0,0434 x^2 - 0,598 x + 30,445$$

Coefficiente de determinación:

$$r^2 = 0,9815$$



Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado



**Figura 5.23**

Diagrama Límite de Conformado - Curva Límite de Conformado - Chapa D. Representación utilizando deformaciones verdaderas.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

## 5.9 Comentarios

Keeler y Brazier lograron determinar el valor característico  $FLD_0$ , conociendo el espesor de la chapa y su correspondiente coeficiente de endurecimiento por deformación plástica, valor  $n$ . La expresión para determinarlo es la siguiente:

$$FLD_0 = n * (1 + 0,72 * t) \quad \text{valido para } n < 0,2$$

$$FLD_0 = 0,2 * (1 + 0,72 * t) \quad \text{valido para } n \geq 0,2$$

Donde  $t$  es el valor del espesor de la chapa en [mm].

Partiendo de estas expresiones se procedió a calcular los valores característicos para las tres chapas, los resultados se muestran en la Tabla 5.6.

**Tabla 5.6.** Valores de  $FLD_0$  calculados para la tres chapas.

Denominación	Espesor [mm]	Coeficiente n	FLD <sub>0</sub>	FLD <sub>0</sub> [%]
Chapa B	0,65	0,2553	0,2936	29,36
Chapa C	0,60	0,2330	0,2864	28,64
Chapa D	0,61	0,2461	0,2878	28,78

Si se remite a los diagramas respectivos (representación utilizando deformaciones de ingeniería), la curva de ajuste intercepta al eje  $e_1$  en los siguientes niveles de deformación: chapa B ( $e_1 = 29,77\%$ ); chapa C ( $e_1 = 29,65\%$ ), y en la chapa D ( $e_1 = 30,44\%$ ).

De esta comparación, sin ser demasiado exigente, se observó que los valores experimentales se aproximan bastante a los teóricos de la Tabla 5.6.

La misma evaluación se realizó para el diagrama límite de conformado (representación utilizando deformaciones verdaderas). Para ello se utilizó la ecuación (2.5), que vincula la deformación de ingeniería con la deformación verdadera, para obtener el valor  $FLD_0$  correspondiente.

De los cálculos se obtuvo: para la chapa B ( $FLD_0 = 0,2574$ ), para la chapa C ( $FLD_0 = 0,2518$ ), y para la chapa D ( $FLD_0 = 0,2529$ ).

Luego comparando estos valores en correspondencia a cada recta de regresión (intersección de la recta con el eje de deformación mayor  $\epsilon_1$ ), se confirmó que las curvas de ajustes experimentales correlacionan con los teóricos.

## 6. Ejemplo de aplicación del FLD

### 6.1 Introducción

El método de los elementos finitos es un método numérico de resolución de problemas de mecánica de sólidos que resulta de gran importancia por su utilidad práctica. Es una herramienta de cálculo muy potente que permite al ingeniero proyectista resolver infinidad de problemas. Sin embargo, es un método que no proporciona la solución exacta a un problema dado, sino que, en realidad posibilita obtener una solución aproximada que, con el juicio ingenieril que le supone al calculista, puede ser más que suficiente para la resolución de un problema práctico.

Dada una pieza sometida a un sistema de cargas, restricciones y condiciones de vínculo, el método consiste en subdividir al sólido en pequeñas partes (elementos) interconectadas entre sí a través de nudos de manera que, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento, puede expresarse en función de los desplazamientos nodales; posteriormente se podrá determinar la matriz de rigidez de cada elemento, las cuales una vez ensambladas, permitirán la obtención de los desplazamientos en los nudos de cada elemento. De esa manera, conocidos dichos desplazamientos, se podrá determinar las tensiones y deformaciones en el interior del elemento.

### 6.2 Resumen

A continuación se muestra, sin entrar en profundidad, una simulación que fue realizada por el departamento de Diseño y Simulación asistida por computadora del INTI - Córdoba.

Con la finalidad de determinar la importancia de la utilización de las curvas reales de los materiales para definir el criterio de falla en procesos de conformado plástico, se utilizó un modelo de elementos finitos, para conformar un componente estructural de un vehículo. Se utilizó como criterio de falla el diagrama límite de conformado (FLD Damage de Abaqus), el cual se definió utilizando un modelo teórico basado en el espesor de la chapa y el valor del exponente  $n$ , y la definición basada en un FLD obtenido mediante ensayos. El objetivo de este tipo de trabajos suele ser el de identificar zonas susceptibles a fallas, y modificar

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

localmente la geometría de matriz y punzón para evitar la aparición de defectos en las piezas conformadas.

Software utilizado para realizar la simulación: ABAQUS, distribuido por Dassault Systemes.

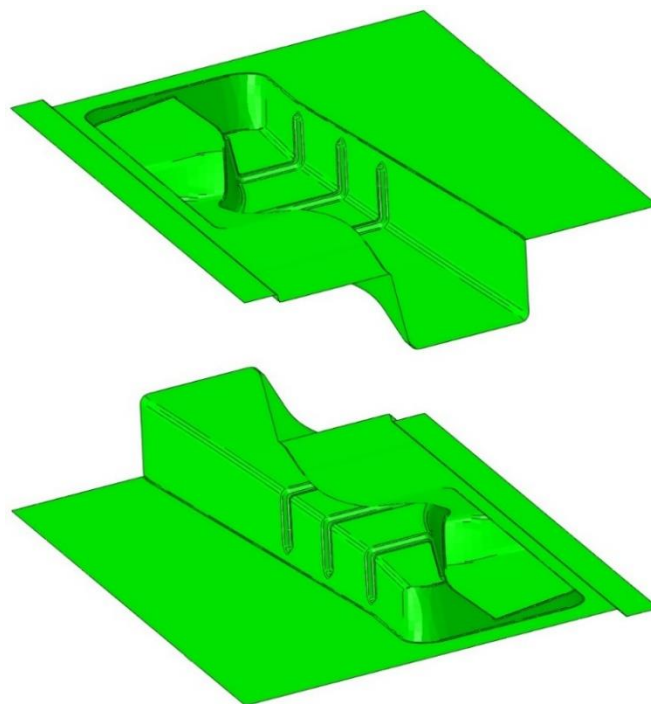
### 6.3 ABAQUS - CAE

Es un programa destinado a resolver problemas de ciencias e ingeniería y está basado en el método de los elementos finitos. El programa puede resolver casi todo tipo de problemas, desde un simple análisis lineal hasta simulaciones complejas no lineales. Abaqus posee una extensa librería de elementos finitos que permite modelar virtualmente cualquier geometría, así como su extensa lista de modelos que simulan el comportamiento de una gran mayoría de materiales, permitiendo su aplicabilidad en distintas áreas de ingeniería.

#### 6.3.1 Datos de entrada (Declaración de las variables ingresadas al sistema)

Para poder obtener una solución en simulaciones de procesos de conformado es necesario contar con las siguientes definiciones:

**La matriz del conformado** (modelo matemático en 3D). Ver Figura 6.1.



**Figura 6.1**  
Matriz de conformado 3D.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado***Características del material**, expresadas a través de:

- Resistencia mecánica: Resistencia a Tracción R, Límite de Fluencia  $R_{0,2}$ , curva tensión-deformación. (Valores obtenidos de ensayos de tracción, para distintas direcciones en relación a la dirección de laminación de la chapa).
- Coeficiente de endurecimiento por deformación plástica, n, la anisotropía plástica, r, entre otros. (Valores obtenidos de ensayos de tracción, para distintas direcciones en relación a la dirección de laminación de la chapa).
- Definición del criterio de falla del material (FLD experimental y FLD teórico).

**Definir velocidad de desplazamiento del punzón****Criterio de falla del material**

Para definir la falla del material se cuentan con dos alternativas:

La primera consiste en realizar una serie de ensayos destructivos a la chapa, para obtener el *FLD* de manera experimental y luego hacer un análisis de regresión para obtener su *FLC* - experimental.

El segundo es más sencillo, se calcula el  $FLD_0$  con el valor del espesor de la chapa y el coeficiente de endurecimiento por deformación, n, según la siguiente expresión:

$$FLD_0 = 0.2 * (1 + 0.72 * t)$$

Siendo *t* el valor del espesor de la chapa en [mm].

Se utilizan dos valores de deformación (extremos), obtenidos de los ensayos destructivos (Ensayo Erichsen y Ensayo de Tracción Uniaxial) y se calculan dos puntos, con las siguientes ecuaciones:

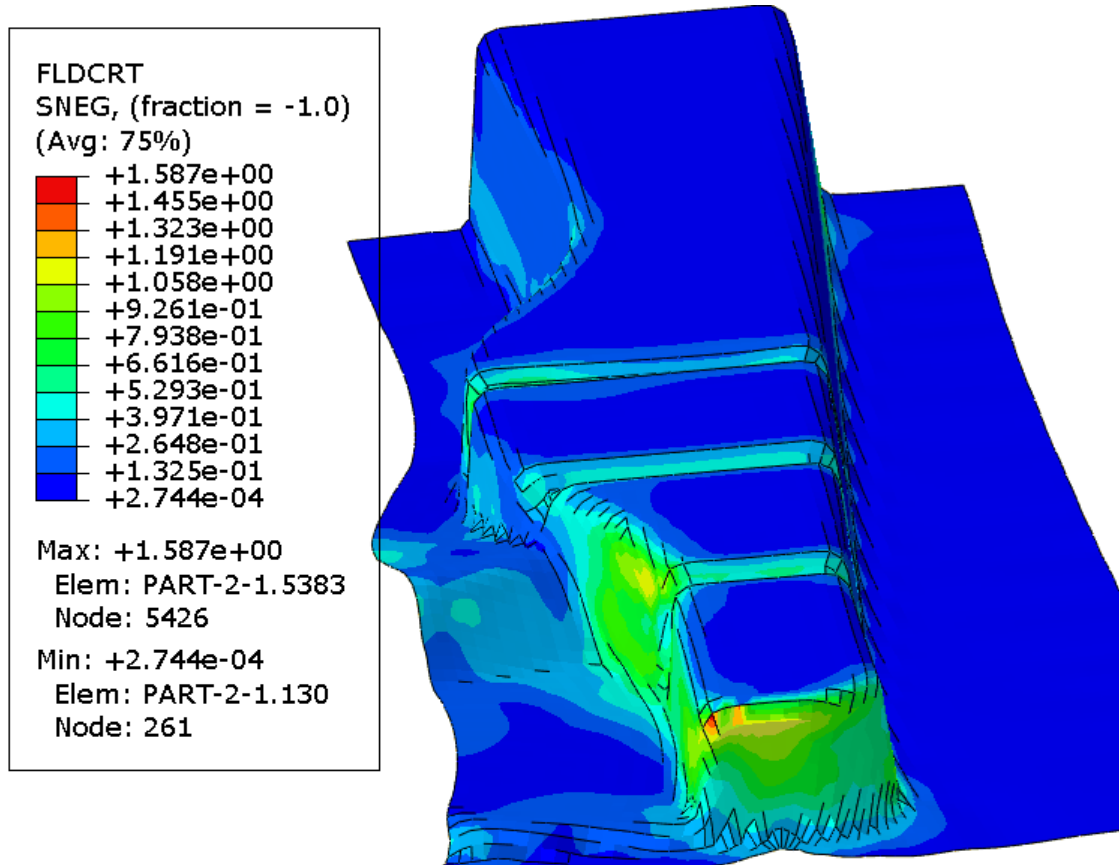
$$\varepsilon_1^* = \frac{2n(1 + \rho + \rho^2)}{(\rho + 1) * (2\rho^2 - \rho + 2)} \quad (\text{primer cuadrante})$$

$$\varepsilon_1^* = \frac{n}{1 + \rho} \quad (\text{segundo cuadrante})$$

Estos valores calculados, que se situaran en el primer y segundo cuadrante, respectivamente, en el diagrama de conformado. Posteriormente se traza una recta (*FLC* - teórica), que intersecta a esos puntos, teniendo como punto en común el valor de la ordenada al origen, valor  $FLD_0$ .

### 6.3.2 Respuesta de la simulación

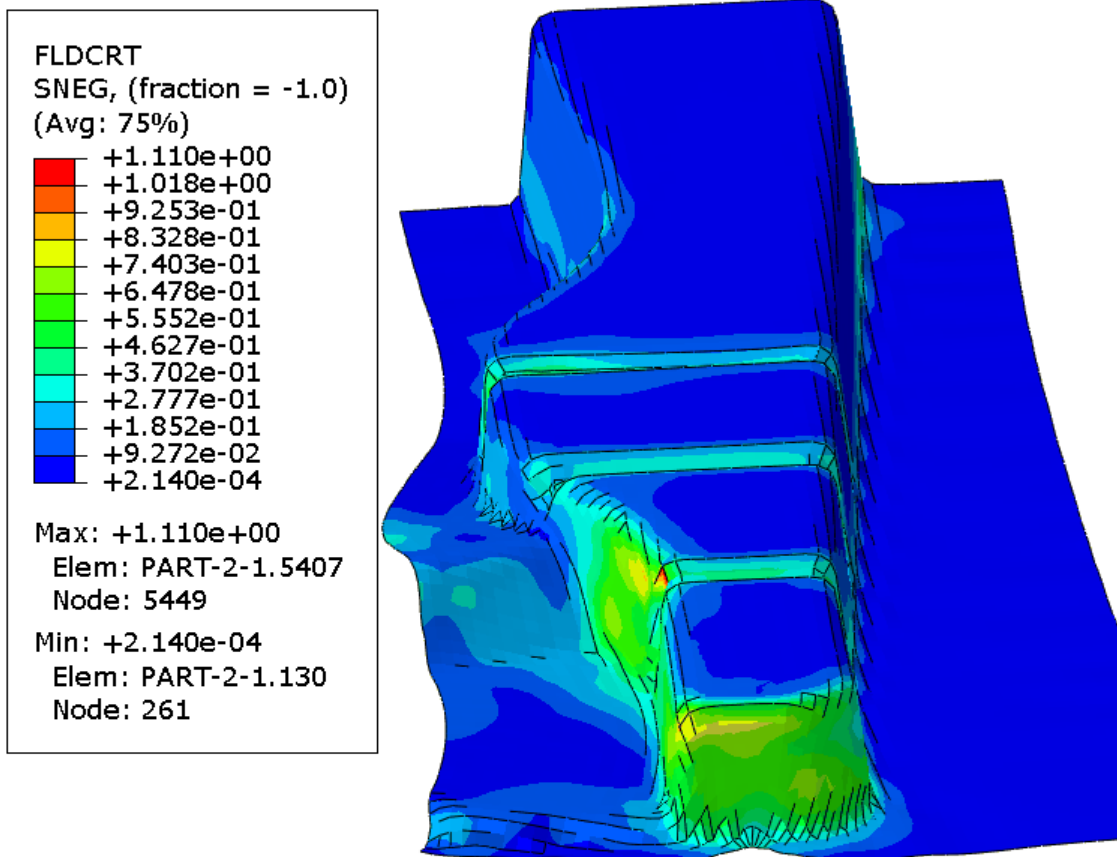
Como resultado de la simulación se obtienen los componentes de tensiones y deformaciones, desplazamientos, deformaciones plásticas equivalentes, y el valor del criterio de falla. En cuanto a esto último, cuando el valor del criterio de falla es igual o superior a 1, se considera que se producirá la falla del material de acuerdo con el criterio definido, si es menor a uno no se produciría la falla. Ver Figura 6.2 y Figura 6.3.



**Figura 6.2**

Simulación del comportamiento del material, utilizando el FLD experimental (ensayos destructivos). Software ABAQUS.

Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado



**Figura 6.3**

Simulación del comportamiento del material, utilizando el FLD teórico. Software ABAQUS.

### 6.4 Conclusión

Como se muestran en la Figura 6.2 y Figura 6.3, en ambas simulaciones, el material falló mucho antes de llegar a su estado final de conformación.

Para ambos casos, el origen de la falla se produjo en una región diferente, pero muy próximas entre sí.

Los resultados obtenidos indican la utilidad de contar con la curva *FLD* obtenida a partir de ensayos, debido a que se puede obtener una mejor aproximación para poder identificar zonas propensas a las fallas, y a partir de ello mejorar las geometrías para evitar fallas en piezas conformadas.

## 7. Desarrollo Experimental III

### 7.1 Análisis metalográfico de muestras - análisis microscópico

Para examinar la estructura microscópica, se debió acondicionar tres muestras. A continuación se describe, el procedimiento seguido para la preparación de probetas, que luego fueron observadas con el microscopio.

### 7.2 Metodología aplicada

#### 7.2.1 Extracción de la muestra

Se realizaron dos cortes por chapa; un recorte plano pequeño, para observar la estructura granular y medir el tamaño de grano, y otro a través del espesor, paralelo a la dirección de laminación, con el objetivo de observar la forma de los granos y medir la capa de galvanizado.

#### 7.2.2 Montaje de la probeta

La Figura 7.1 muestra a la Incluidora metalográfica utilizada, para obtener los insertos. Esta máquina es una prensa mecánica con calefactor incorporado, en su interior posee un cilindro donde se ubicó los recortes de la chapa, luego se añadió resina fenólica y se cerró la cavidad con una tapa. Seguidamente se giró la manivela para comprimir esta preparación.

Por último se encendió el dispositivo y se contabilizó un tiempo de 30 minutos. Una vez cumplido se apagó el mismo, y se dejó enfriar por el tiempo de dos horas. Finalmente se extrajo la inclusión del dispositivo.



*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado***Figura 7.1**

Incluidora metalográfica para el montaje de muestras - Laboratorio de Metalografía INTI-Córdoba.

En la Figura 7.2 se muestran las inclusiones obtenidas, por el proceso anterior descrito. Estas favorecen la fase de pulido ya que se dispone de una mayor área para ser tomada con las manos.

**Figura 7.2**

Inclusiones extraídas del cilindro de la máquina.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

### 7.2.3 Desbaste

En la Figura 7.3 se muestra la máquina que se utilizó para realizar el desbaste fino. También fue necesario contar con papeles de lija, al agua, con diversos grados; 220, 320, 600 y 1200.



**Figura 7.3**  
Desbastadora metalográfica de dos platos - Laboratorio de Metalografía INTI-Córdoba.

Se colocó el papel de lija sobre el disco, comenzando con aquella de grado más tosco. Sobre aquél se hizo incidir un chorro de agua y luego, tomando la inclusión con la mano, se presionó levemente sobre el papel manteniendo firme la misma, esto continuó hasta que toda la superficie tratada estuviera rayada en una sola dirección. Al pasar al siguiente grado de abrasivo, fue necesario girar la probeta a fin de producir rayas perpendiculares al anterior lijado.

Este procedimiento se repitió con las demás lijas y finalmente culminó con el papel abrasivo de mayor finura, cuando se obtuvo una superficie completamente plana, con rayas muy finas y en una sola dirección.

### 7.2.4 Pulido

En la Figura 7.4 se exhibe a la pulidora utilizada para dar el acabado final a la superficie que fue pulida en el paso anterior. La pulidora metalográfica posee un disco giratorio, sobre el cual se halla adherido un paño especial.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado***Figura 7.4**

Pulidora metalográfica - Laboratorio de Metalografía INTI-Córdoba.

Antes de empezar con el proceso, se colocó sobre el paño una pasta diamantada (abrasivo en suspensión líquida) y se encendió la máquina. Se tomó firmemente la probeta y se presionó suavemente la superficie tratada, contra el paño del disco; imprimiéndole un movimiento de rotación en sentido contrario a la del disco. Finalmente este procedimiento culminó cuando se obtuvo una superficie plana, sin marcas (rayas) y de apariencia especular.

Luego se lavó la superficie con agua y alcohol, quedando la probeta lista para la siguiente etapa.

### 7.2.5 Ataque

#### Solución de ataque

Denominación: Nital 5%. Composición: Ácido nítrico 5%, Alcohol etílico 95%.

Se sumergió la inclusión, con la cara pulida hacia arriba, en un recipiente que contenía el reactivo denominado nital y se la movió continuamente durante 5 segundos, para lograr

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

un ataque más homogéneo. Posteriormente se lavó con agua y después con alcohol para finalmente secarla con una corriente de aire caliente. En la Figura 7.5 se muestran las tres inclusiones totalmente listas para ser observadas por el microscopio.

En el ataque químico, se produce una reacción que está ligada a la velocidad de disolución de los constituyentes metalográficos de la muestra, en el reactivo. El de mayor velocidad de reacción se ataca rápidamente y se verá más oscuro al microscopio, mientras que el menos atacable permanecerá más brillante, reflejará más luz y por consiguiente, se verá más claro en el microscopio.



**Figura 7.5**

Inclusiones resultantes del proceso de desbaste, pulido y ataque químico.

### 7.2.6 Observación microscópica y determinación del tamaño de grano

Dispositivos utilizados:

Microscopio óptico. Marca: NIKON. Modelo: EPIPHOT.

Cámara de imágenes. Marca: MOTIC. Modelo: Motic 2300, 3.0 Live Resolution.

En la Figura 7.6 se exhibe el microscopio que permite ver de forma clara y magnificada las probetas objeto de estudio. El mismo posee; un acoplador donde se monta la cámara fotográfica, un binocular (tubo de observación), una platina móvil (portador de muestras), un revólver porta objetivos (lentes de aumento) y un sistema complejo de iluminación por reflexión, para observar la microestructura del material.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

**Figura 7.6**  
Microscopio metalográfico - Laboratorio de Metalografía INTI-Córdoba.

Se ubicó la inclusión sobre la platina móvil, con la cara pulida hacia abajo, luego se posicionó sobre el eje de los oculares, el objetivo correspondiente al aumento de 100x, y por último se tomó diferentes microfotografías, para elaborar un informe. Este procedimiento se llevó a cabo para las tres chapas.

#### 7.2.6.1 Determinación del tamaño de grano

Para determinar el tamaño de grano de un metal, se siguió el método de comparación que figura en la norma ASTM E112-13. Métodos de prueba estándar para determinar la media del tamaño de grano.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

En resumen, se observó la inclusión con aquel objetivo que posee el aumento de 100x, luego se interpuso una lente patrón, translúcida; la cual posee una serie de granos de diferente graduación. Y por último se definió el tamaño de grano, a través de la comparación y semejanza en el tamaño de grano de la probeta con el patrón.

Nota: El tamaño de grano se designa por un número, a saber; No. 1, No.2, No. 3, No. 4, No. 5, No. 6, No. 7, No. 8. El grano de tamaño No. 1, es mayor que el grano de tamaño No. 2; es decir, a menor tamaño de grano promedio le corresponde un número de designación mayor.

### 7.3 Resultados

A continuación se exhiben los resultados del estudio metalográfico de las tres chapas.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

Estudio de Metalografía

Tipo de material: Lámina de acero, de bajo contenido de carbono.

Denominación: **CHAPA B.**

Estado de probeta: con revestimiento de Zinc.

Aumento: 100x

**Análisis de la Microestructura**

Microestructuras encontradas: Se observan granos de Ferrita en color claro y líneas poligonales oscuras (borde de grano), ver imagen 1.

Tamaño de grano: No. 8.

Porcentaje de fases: N/A.

Observaciones adicionales.

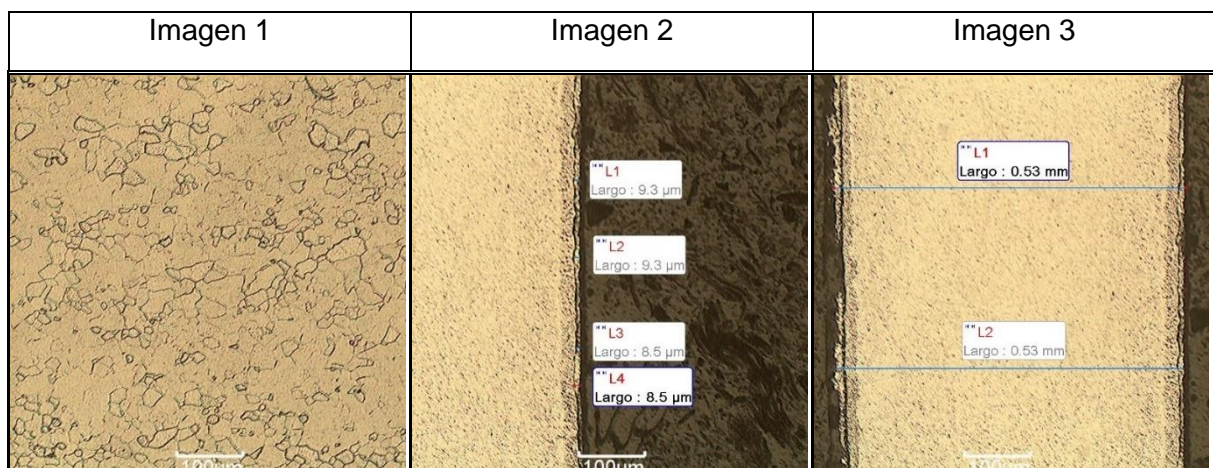
Sobre el corte perpendicular al plano de la chapa (antes de realizar el ataque químico), se observa una delgada capa de galvanizado.

Espesor de la capa de galvanizado: 8,9  $\mu\text{m}$  (promedio), ver imagen 2.

Espesor de la muestra: 0,53 mm (promedio), ver imagen3.

**Fin de Informe**

A continuación se adjuntan las tres imágenes mencionadas anteriormente.



*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

## Estudio de Metalografía

Tipo de material: Lámina de acero, de bajo contenido de carbono.

Denominación: **CHAPA C.**

Estado de probeta: con revestimiento de Zinc.

Aumento: 100x

**Análisis de Microestructura**

Microestructuras encontradas: Se observan granos de Ferrita en color claro y líneas poligonales oscuras (borde de grano), ver imagen 4.

Tamaño de grano: No. 8.

Porcentaje de fases: N/A.

Observaciones adicionales.

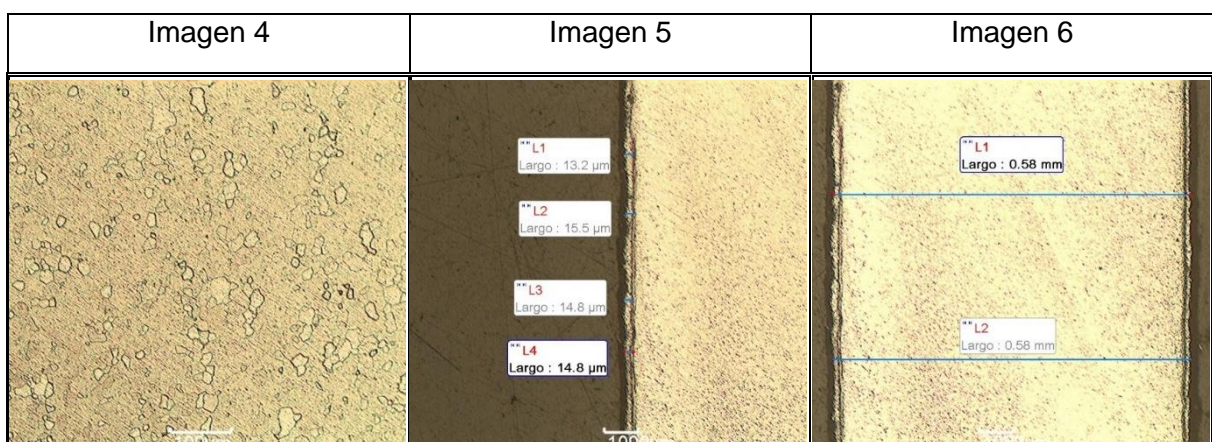
Sobre el corte perpendicular al plano de la chapa (antes de realizar el ataque químico), se observa una delgada capa de galvanizado.

Espesor de la capa de galvanizado: 14,6  $\mu\text{m}$  (promedio), ver imagen 5.

Espesor de la muestra: 0,58 mm (promedio), ver imagen 6.

**Fin del Informe**

A continuación se adjuntan las tres imágenes mencionadas anteriormente.





*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

Estudio de Metalografía

Tipo de material: Lámina de acero, de bajo contenido de carbono.

Denominación: **CHAPA D.**

Estado de probeta: con revestimiento de Zinc.

Aumento: 100x

**Análisis de Microestructura**

Microestructuras encontradas: Se observan granos de Ferrita en color claro y líneas poligonales oscuras (borde de grano), ver imagen 7.

Tamaño de grano: No. 8.

Porcentaje de fases: N/A.

Observaciones adicionales.

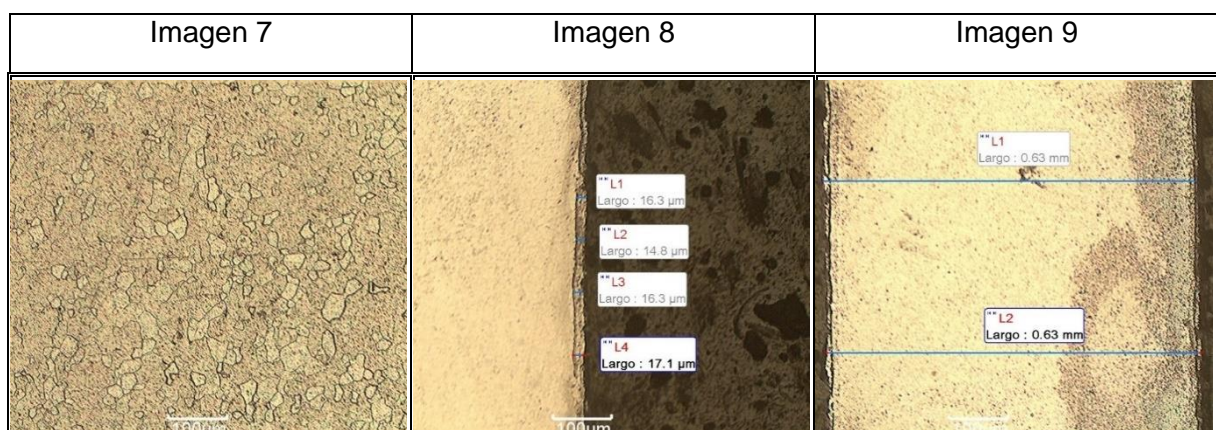
Sobre el corte perpendicular al plano de la chapa (antes de realizar el ataque químico), se observa una delgada capa de galvanizado.

Espesor de la capa de galvanizado: 16  $\mu\text{m}$  (promedio), ver imagen 8.

Espesor de la muestra: 0,63 mm (promedio), ver imagen 9.

**Fin del Informe**

A continuación se adjuntan las tres imágenes mencionadas anteriormente.



## 8. Conclusiones

- Una manera, muy común, de grabar una superficie metálica es electroquímicamente, este método no produjo resultados satisfactorios: en algunos casos el grabado corroía de forma severa la superficie, en otros la impresión no estaba bien definida, es decir, se apreciaban zonas borrosas. Se utilizó como solución electrolítica ácido oxálico y nital; además se probó con diferentes niveles de tensión entre 0,5 a 6 [V] de continua. En el mercado se ofrecen equipos para el grabado por este método, se cree que estas firmas utilizan un tipo especial de solución electrolítica, muy desarrollada, y que en conjunto con los dispositivos (marcadora y estencil) para el grabado, brindan resultados aceptables.
- Se propone utilizar el método de grabado publicado en el Anexo Documental: A. Grabado Químico en Chapas Metálicas, del presente trabajo. Con ese procedimiento se logró una buena definición y reproducibilidad de la malla de círculos en las probetas, a un costo inferior en relación a otras técnicas de grabado disponibles en el mercado. El electrolito utilizado es muy conocido en el ámbito artesanal del grabado en metales, sin embargo no se hallaron publicaciones en referencia al uso de este líquido en aplicaciones de similares características.
- Los tres tipos de ensayos simulativos utilizados resultan suficientes para poder determinar el diagrama límite de conformado para estos tipos de chapas, dentro del intervalo de [-45%, +20%] para  $e_2$ .
- Observando el trazo de las curvas límites de conformación, se afirma que estamos en presencia de chapas equivalentes. En cuanto al parámetro  $FLD_0$ , valor mínimo de deformación que resiste la chapa bajo el mecanismo de deformación plana, toma un valor próximo al 30% en los tres casos.
- Darle un tratamiento estadístico a los datos, previo a la regresión, ayudó a obtener una mejor curva de ajuste en todos los casos. Estas curvas de conformado estimadas tienen un importante valor gráfico, ya que su representación permitió establecer una zona segura de trabajo.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

- Los resultados que se obtienen con esta metodología tienen asociada una incertidumbre, por lo que en la práctica es común definir una banda de seguridad o índice de severidad. Para la determinación de ellos se pueden formar criterios, como por ejemplo: adoptar como nivel de deformación máxima el 100%, para el valor de  $FLD_0$  y fijar como nivel de trabajo un cierto valor inferior a ese, como por ejemplo: un nivel del 90% y luego trazar una curva de igual perfil que intercepte al eje de deformación mayor en  $FLD_0$  (al 90%).
- Como habrá podido observar el lector, se publicaron dos versiones del diagrama límite de conformado: la primera pone énfasis en los valores de las deformaciones de ingeniería, como lo expresa la norma E2218; el segundo se representa mediante los valores de deformación verdadera y es a entender del autor la manera más conveniente de brindar información rápida y útil para el procedimiento de simulación por elementos finitos, ya que estas deformaciones se ingresan como dato en el software.
- Las metodologías implementadas en este trabajo, fueron adaptadas con éxito al equipamiento disponible. Esto permitirá que el Departamento de Materiales y Tecnología de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba y el Laboratorio de Ensayos Mecánicos del Instituto Nacional de Tecnología Industrial de la Ciudad de Córdoba, estén en condiciones de asistir a la industria local en la caracterización de chapa para embutido.
- En función a los resultados obtenidos de: análisis químicos, ensayos mecánicos y del estudio metalográfico, se puede decir que estamos frente a tres chapas de análogas características.
- Por último, se contrastaron los valores mecánicos característicos que se emiten en los certificados de calidad, frente a los arrojados en los ensayos de laboratorio; se observó una discrepancia cercana al 10% (en detrimento) en los valores de la resistencia a fluencia para las chapas B y C. Para los restantes valores característicos, el error fue inferior al 5%.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

### 8.1 Aspectos a tener en cuenta

- En el ensayo con el punzón semiesférico, debido a que las muestras tienden a zafarse de la matriz por los laterales de la misma, se deberá realizar unos dobleces o pliegues a 90° en las probetas de los ensayos finales y además aprisionar las mismas contra la matriz, por medio de prensas de mano.
- La ubicación correcta de la elipse, por debajo del eje de la cámara de imágenes se vuelve dificultosa, esto se debe a que las probetas una vez deformadas dejan de ser planas y se convierten en superficies convexas (en los ensayos con punzón semiesférico y de Erichsen). Debido a ello, la medición de las deformaciones insume un tiempo considerable, al tener que ubicar de la mejor manera la probeta sobre la mesa de la lupa.

### 8.2 Recomendaciones para futuros ensayos

- En los ensayos de tracción, utilizar probetas de 70, 80, 90 o 100 [mm] de ancho. Ello ofrece dos ventajas: permitirá obtener una mayor cantidad de datos (puntos del diagrama límite de conformado) en comparación con probetas de menor ancho, y representa una menor cantidad de ensayos a realizar.
- En referencia al bajo alcance de la deformación menor ( $e_2 < 20\%$ ) obtenida en los ensayos, se propone rediseñar la matriz del ensayo de punzón semiesférico, y contrastar los valores de deformación hallados con la nueva matriz, con los del ensayo Erichsen para dirimir si en realidad, este último es el responsable del bajo nivel de deformación alcanzado para  $e_2$ . El nuevo diseño debería contemplar un sistema de sujeción completo y no parcial como el actual, además permitir que el cierre se realice por medio de bulones y tuercas, y no un diseño inapropiado como el de una matriz con agujeros roscados para la sujeción.

## 9. Anexo Documental

## A. Grabado Químico en Chapas Metálicas

### A.1 Procedimiento para el grabado en placas metálicas

#### Método

- Químico

#### Elementos

- Probetas metálicas
- Esténcil (Plantilla)
- Rodillo de mano
- Sal de mesa
- Agua destilada
- Guantes de látex
- Sulfato de cobre
- Recipientes, tres unidades

#### Esténcil

La plantilla utilizada para el grabado en superficies metálicas es conocida como Esténcil, es una hoja rectangular de 210 [mm] por 297 [mm] de lado, tiene el aspecto de un film impermeable sobre el cual se halla impresa una malla de círculos contiguos. El diámetro nominal de los círculos es de 2,5 [mm].

#### Solución electrolítica

El electrolito que se procederá a obtener, se conoce como *sulfato salino* (denominación utilizada por los artesanos que se dedican al grabado artístico sobre superficies metálicas).

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

## Preparación

Se deberá disolver una cantidad de entre 100 a 150 gr de sulfato de cobre en un litro de agua (destilada), el líquido obtenido adquiere un color azul. Luego se deberá adicionar, de a poco, sal de cocina y mezclar hasta obtener una solución de color verde.

Esta preparación puede utilizarse para el grabado en los siguientes materiales: Aluminio, Hierro y Cinc. Y en menor grado en Bronce y Cobre.

Aclaración: La proporción que se detalla es en base a un litro de agua. En caso que se requiera una menor cantidad de sulfato salino, realizar los cálculos necesarios.

### A.1.1 Preparación de la superficie a grabar

Para obtener una buena impresión sobre la probeta, es necesario limpiarla correctamente.

Prelavado: se lava la superficie con ayuda de una esponja y jabón en pan (neutro). Asegúrese de remover restos de grasa, aceite, tintas de marcado, etc. Finalizado ello se procederá a secar de forma natural o forzada.

Limpieza final: una vez seca la muestra, puede que aún queden residuos en la superficie, por lo que se recomienda pasar sobre ésta, un algodón o un paño limpio humedecido con desengrasante; en caso de no disponer de ello usar alcohol etílico, y finalmente dejar secar al aire ambiente.

### A.1.2 Procedimiento de grabado

Previamente, se requiere humedecer con agua de red, ambos lados del esténcil para favorecer la calidad del grabado.

Luego seguir los siguientes pasos:

- Colocar el esténcil sobre la superficie, de la probeta, que se quiere grabar.
- Eliminar el aire encerrado entre el esténcil y la probeta metálica, para ello ejercer sobre el esténcil una leve presión y deslizamiento, a la vez, hacia los bordes de la probeta.
- Fijar el esténcil a la probeta con una cinta de papel o broches para hojas. Esto es necesario, debido a que puede ocurrir un deslizamiento relativo entre ellos,

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

al momento del grabado. En caso de producirse el deslizamiento, habrá que descartar la probeta ya que el grabado será irregular.

- Humedecer de manera uniforme la almohadilla del rodillo, con el sulfato salino, y luego realizar pasadas sobre el esténcil ejerciendo una leve presión; rehumedecer el rodillo y seguir aplicando el electrolito por las áreas que no fueron marcadas. Visualmente se observará que en los perímetros de los círculos del esténcil, se forman partículas oscuras producto de la corrosión.
- Dejar que la solución actúe unos 30 a 45 segundos, sin retirar el esténcil de la superficie. Pasado este tiempo retirar el esténcil y llevar la muestra grabada a un sector donde se airee, dejarla por un tiempo no inferior a 5 minutos.
- Por último limpiar la superficie grabada con paños de papel; en caso de ser necesario mojar la superficie con agua y secar aplicando leve presión.

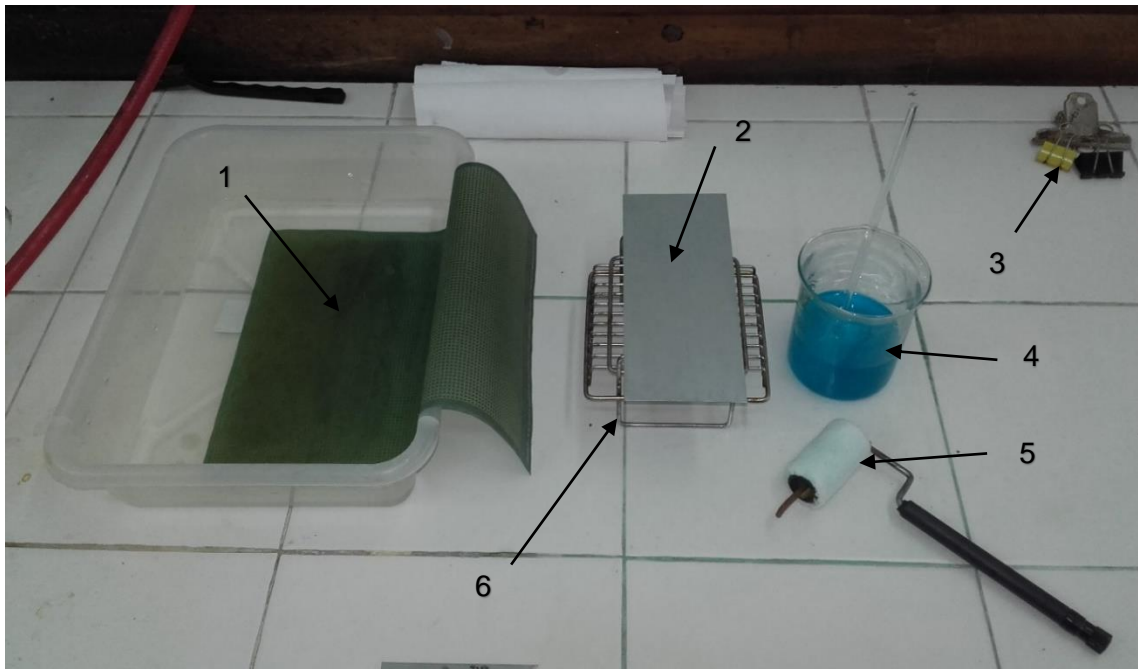
## A.2 Recomendaciones y advertencias

- Antes de iniciar el grabado, marcar cada muestra con una nomenclatura o código a elección para individualizarla.
- Trabajar con los guantes de látex, durante todo el proceso de grabado.
- En caso de ser viable, posicionar la probeta encima de un soporte de similares dimensiones que la primera, antes de grabar. De esta forma favorecerá a que exceso de electrolito, sobre el esténcil, filtre por gravedad sobre la mesa de trabajo y no interfiera en la calidad del grabado de la probeta.
- Antes de pasar el rodillo, controlar que no quede aire ocluido entre la probeta metálica y el esténcil. Si ello ocurriese, se producirá un grabado inapropiado con manchas oscuras.
- Al finalizar cada grabado, se deberá lavar el esténcil y no reutilizarlo; realizar lo mismo para la almohadilla del rodillo. No olvide que ambos se encuentran cubiertos de partículas, producto de la corrosión.
- Lavar el esténcil con agua de red y un trozo de algodón o paño suave, aplicando muy leve presión si es necesario y describiendo círculos con la mano. Tener cuidado de no hacer pliegues con el esténcil.



*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

A continuación se muestra la Figura A.1 y la Figura A.2, para que el lector asimile lo expuesto sobre el proceso de grabado en metal.



**Figura A.1**

Elementos utilizados para el grabado de probetas: 1- Esténcil, 2- Probeta, 3- Broches para papel, 4- Electrolito (Sulfato salino), 5- Rodillo de mano, 6- Soporte.



**Figura A.2**

Probeta luego del grabado; en los intersticios del esténcil se depositan restos de la corrosión, partículas de color negro.

## B. Propuesta: Rediseño del Herramental para Ensayos de Embutido

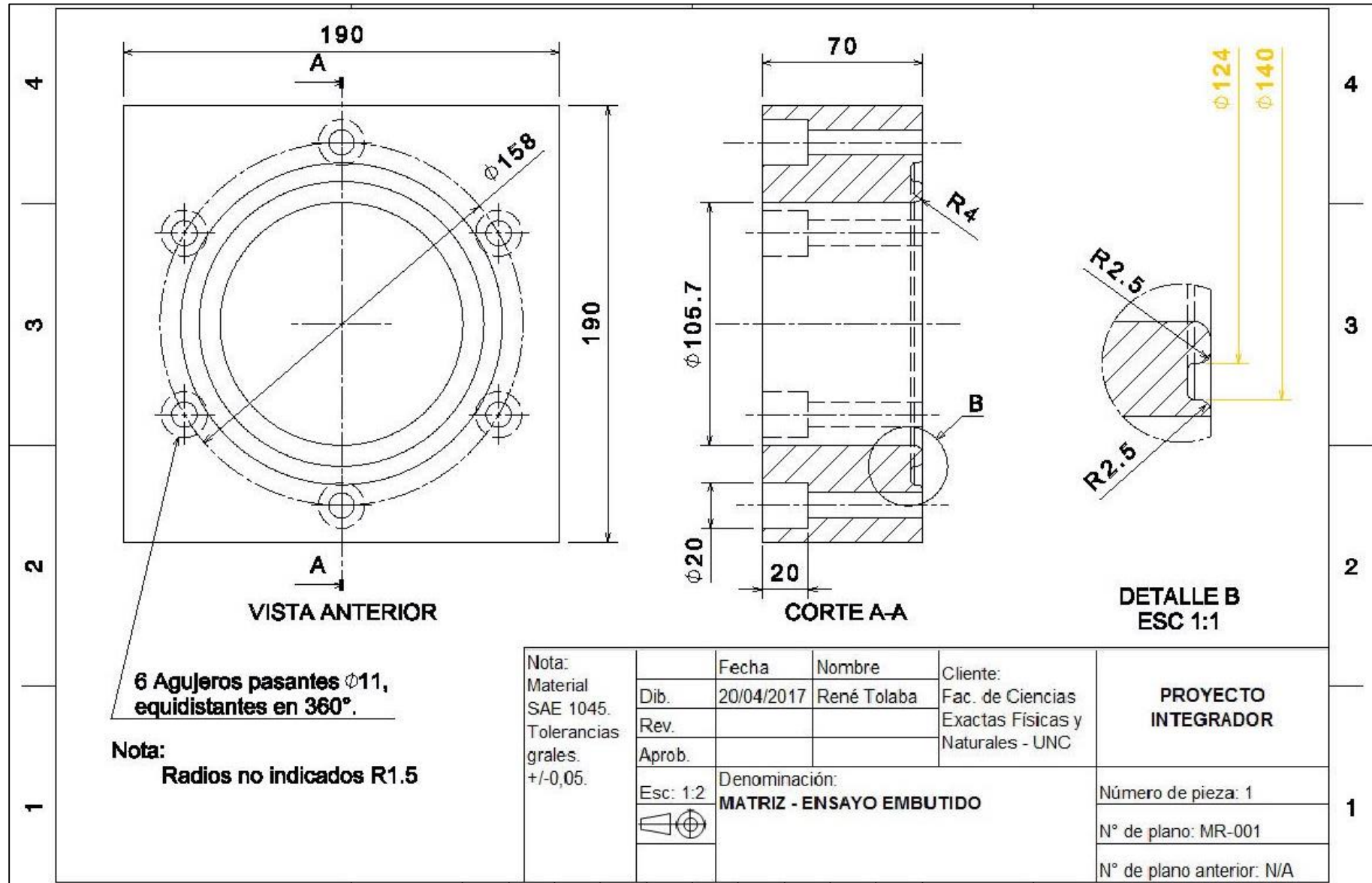
### B.1 Rediseño del subconjunto matriz-tapa

El diseño propuesto presenta las siguientes diferencias respecto a la matriz actual:

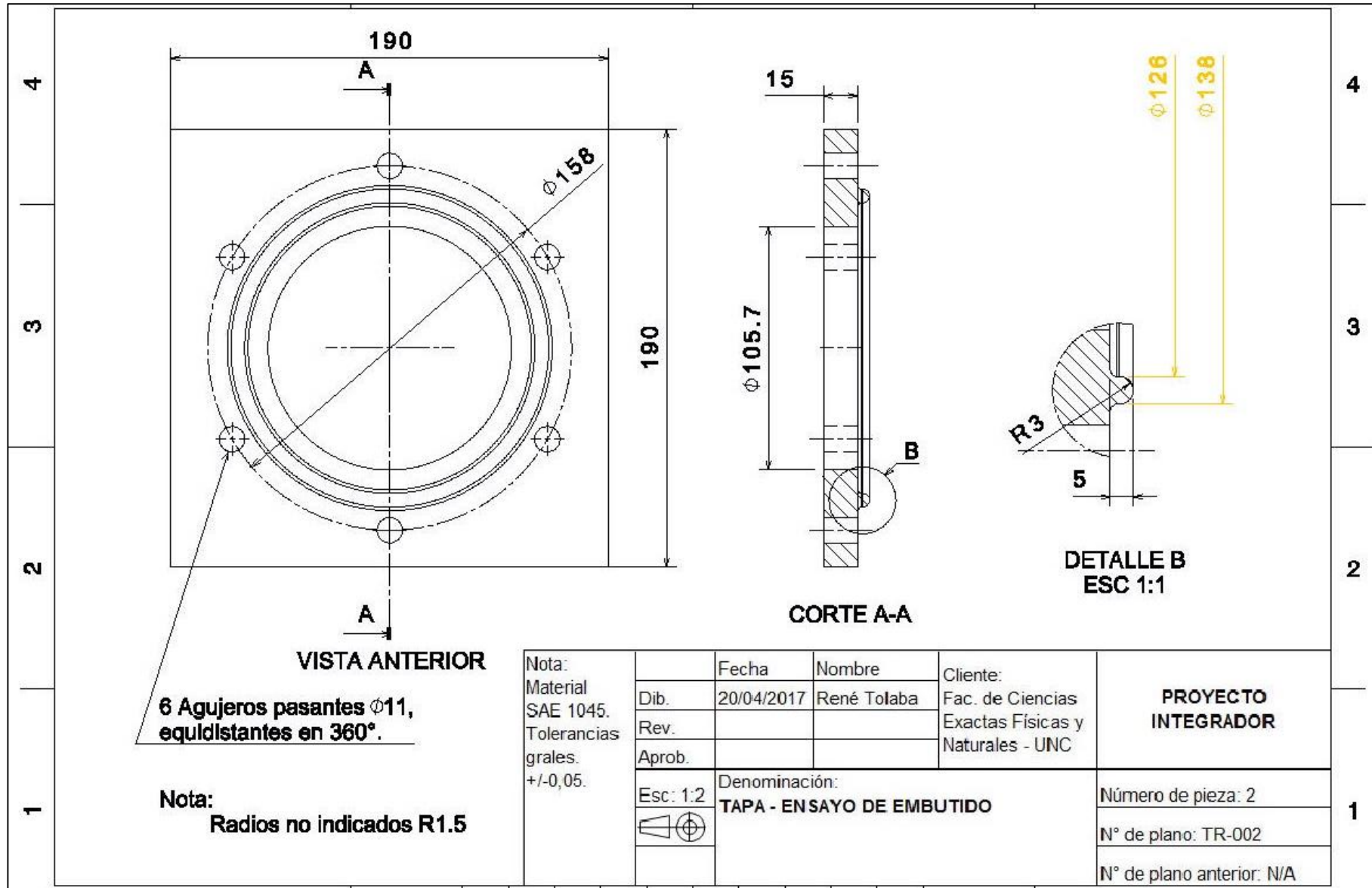
- Sistema de cierre completo.
- Sistema de ajuste equilibrado.
- La matriz no lleva rosca en los agujeros donde se alojan los bulones.
- Los bulones de ajuste, se posicionan en el cuerpo de la matriz (embutidos).
- En saliente, en ranura de sujeción y en el borde de entrada, se adoptan radios de empalme más amplios.

A continuación se exponen dos planos del diseño (esquema provisional) de ambos elementos.

Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado



Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado


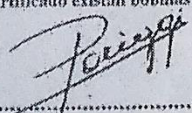


## C. Certificados de Calidad de chapas

Respondiendo a los requisitos de Calidad y de formalidad, las empresas que suministran el material para la conformación de autopartes, deben entregar al cliente un certificado de calidad del producto al momento de hacerse efectivo la entrega del mismo.

A continuación se publican los certificados de las chapas analizadas, provistos por la empresa Renault Argentina S.A.


Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado

 <b>FERROSIDER S.A.</b> ISO/TS 16949-ISO/14001 Panamericana Km. 31.5 - El Talar - Pcia. Bs. As. B1618FAT - Fax. 4006 1432 - Tel. 4006 1400		<b>Certificado de Calidad 268039</b>									
<b>CLIENTE RENAULT</b>		<b>Remito de Entrega 0249005</b>									
<b>Calidad DX56 D Z100 MAO</b>		<b>Dimensiones: 0065 X 1580 X 1135</b>									
BOBINA Nº	PAQUETE	Dureza (HRB)	Embut. (mm)	Rug. (µm)	Capa (gr y/o (gr y/o		ENSAYOS FISICOS				
					µm)	µm)	E	R	A %	r	n
052284-UM	27178805	00	11.70	0.00	064.00	054.00	164.00	300.00	46.00	2.34	0.237
	27178806	00	11.70	0.00	064.00	054.00	164.00	300.00	46.00	2.34	0.237
	27178807	00	11.70	0.00	064.00	054.00	164.00	300.00	46.00	2.34	0.237
Los valores de la capa de recubrimiento pueden estar expresados en peso (gr/m2) o en espesor (µm) según Norma y calidad											
<b>COMPOSICION QUIMICA</b>											
Bobina Nº	C %	Mn %	P %	S %	Si %	Al %	Cr %	Ni %	Ti %	Cu %	Nb %
052284-UM	0.001	0.090	0.012	0.011	0.010	0.033	0.020	0.030	0.037	0.010	0.001
Cuando en el Certificado existan bobinas de una misma colada podrá darse el caso de repetirse los valores físicos y químicos en más de una											
 ..... Firma Responsable Calidad								Fecha: 08/04/2015			

Formulario Nº AC-16-01-01 Rev.03

**Certificado de Calidad - Chapa B.**  
**Nota Fuente: Renault Argentina S.A.**

Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado

 <b>FERROSIDER S.A.</b> ISO/TS 16949-ISO/14001 Panamericana Km. 31.5 - El Talar - Pcia. Bs. As. B1618FAT- Fax. 4006 1432 - Tel. 4006 1400		<b>Certificado de Calidad</b> 276058	
<b>CLIENTE RENAULT</b>		<b>Remito de Entrega</b> 0253070	
<b>Calidad XES G 6/6</b>		<b>Dimensiones: 0060 X 1425 X 1285</b>	

BOBINA N°	PAQUETE	Dureza (HRB)	Embut. (mm)	Rug. (µm)	Capa		ENSAYOS FISICOS				
					(gr y/o µm)	(gr y/o µm)	E	R	A %	r	n
055234-UM	27689112	21	12.40	1.30	006.34	007.89	191.00	303.00	43.00	2.50	0.220
	27689113	21	12.40	1.30	006.34	007.89	191.00	303.00	43.00	2.50	0.220
	27689114	21	12.40	1.30	006.34	007.89	191.00	303.00	43.00	2.50	0.220
	27689115	21	12.40	1.30	006.34	007.89	191.00	303.00	43.00	2.50	0.220
	27689116	21	12.40	1.30	006.34	007.89	191.00	303.00	43.00	2.50	0.220

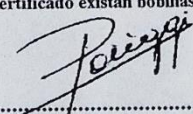
Los valores de la capa de recubrimiento pueden estar expresados en peso (gr/m<sup>2</sup>) o en espesor (µm) según Norma y calidad

COMPOSICION QUIMICA											
Bobina N°	C %	Mn %	P %	S %	Si %	Al %	Cr %	Ni %	Ti %	Cu %	Nb %
055234-UM	0.002	0.110	0.007	0.010	0.010	0.050	0.020	0.010	0.062	0.000	0.003

Cuando en el Certificado existan bobinas de una misma colada podrá darse el caso de repetirse los valores físicos y químicos en más de una

  
 .....  
**Firma Responsable Calidad**

**Fecha:**    06/07/2015

Formulário N° AC-16-01-01 Rev.03

PEA N° 901228285R    INTI PORTÓN TRASERO B-65

**Certificado de Calidad - Chapa C.**  
**Nota Fuente:** Renault Argentina S.A.





## 11. Referencias

- [1] Brozzo P, De Luca B, Rendina R (1972) A new method for the prediction of the formability limits of metal sheets. Proceedings of the 7<sup>th</sup> Biannual Congress of the IDDRG, Amsterdam.
- [2] Olsen TY (1920) Machines for ductility testing. Proceedings of the American Society for Testing and Materials 20: 398-403.
- [3] Keeler SP, Backofen WA (1963) Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches. Transactions of the American Society for Metals 56:25-48.
- [4] Hasek V (1973) On the strain and stress states in drawing of large un-regular sheet metal components. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Nr. 25, Girardet, Essen (in German).
- [5] Hecker S (1972) A simple forming limit curve technique and results on aluminum alloys. Proceedings of the IDDRG Congress, Amsterdam, 5.1-5.8.
- [6] Nakazima K, Kikuma T (1967) Forming limits under biaxial stretching of sheet metals. Testu-to Hagane 53:455-458 (in Japanese).
- [7] Hasek V (1978) Research and theoretical description concerning the influences on the FLDs. Blech Rohre Profile 25: 213-220, 285-292, 493-499, 617-627 (in German).
- [8] Chatfield DA, Keeler SP (1971) Technology for using sheet steel designing for formability. Metal Progress 99: 60-63.
- [9] Ghosh AK, Hecker SS (1975) Stretching limits in sheet metals: In-plane versus out-of-plane deformations. Metallurgical Transactions 5A: 2161-2164.
- [10] Charpentier PL (1975) Influence of the punch curvature on the stretching limits of sheet steel. Metallurgical Transactions 6A: 1665-1669.
- [11] Shi MF, Gerdeen JC (1991) Effect of strain gradient and curvature on forming limit diagrams for anisotropic sheets. Journal Material Shaping Technology 9: 253-268.
- [12] Drewes EJ, Martini A (1976) Einfluss der Umformgeschwindigkeit auf die Grenzformaenderungen und die Formaenderungsverteilung von Feinblech. Archiv fuer Eissenhuettenwesen 47: 167-172.

*Base Metodológica para determinar la Curva Límite de Conformado*

[13] Ayres RA, Wenner ML (1978) Strain and strain-rate hardening effect on punch stretching of 5182-0 aluminium at elevated temperature. Sheet Metal Industries 55: 1208-1216.

[14] Percy JH (1980) The effect of strain rate on the FLD for sheet metal. Annals of CIRP 29:151-152.

## 12. Bibliografía

- ASM Handbook, V. (2000). *Mechanical Testing and Evaluation*. Ohio: ASM International. Materials Park.
- ASTM E2218-15. (2015). *Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- Banabic, D. (2010). *Sheet Metal Forming Processes - Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Springer.
- David R. Anderson, D. J. (10ma Ed.). *Estadística para Administración y Economía*. CENGAGE Learning.
- E112-13, A. (2013). *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- Hu, J., Marciniak, Z., & Duncan, J. (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Oxford: BUTTERWORTH-HEINEMANN.
- Mariano, B. J. (2010). *Ensayo de chapas para determinación de diagramas de conformabilidad (FLD)*. Córdoba-Capital: UNC-Fac. de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.
- Robert M. Caddell, W. F. (3ra Ed, 2007.). *Metal Forming - Mechanics and Metallurgy*. Cambridge.
- Smith, W. F. (1993). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Madrid: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A.
- William D. Callister, J. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales I*. Barcelona: REVERTÉ, S.A.

PÁGINA EN BLANCO