



Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional San Nicolás
Departamento de Metalurgia



Análisis del Efecto de la Anisotropía Planar en la Curva Límite de Conformado de un Acero de Bajo Carbono Galvanizado

Mariano Nicolás Inés

INFORME DE PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

Director : Dr. Javier W. Signorelli
Co-Director: Ing. Mariano J. Serenelli

Cátedra Proyecto Final

Responsables: Dra. Elena Brandaleze

Líc. Rocío Avetta

Diciembre de 2010

El presente trabajo constituye el Proyecto Final de Mariano N. Inés, realizado en la Facultad Regional San Nicolás - Universidad Tecnológica Nacional para acreditar al grado de Ingeniero Metalúrgico.

El mismo ha sido desarrollado en el Grupo de Metalurgia Física del Departamento de Metalurgia/DEYTEMA (Centro de desarrollo y tecnología de Materiales) de la mencionada Facultad Regional San Nicolás en conjunto con el Instituto de Física de Rosario (IFIR), bajo la dirección del Dr. Javier W. Signorelli y la codirección del Ing. Mariano J. Serenelli.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero expresar mi agradecimiento a mi director, Dr. Javier W. Signorelli por su magistral dirección y paciente disponibilidad durante la realización del trabajo.

Muy cercano a él, a mi codirector, Ing. Mariano J. Serenelli por su constante apoyo y dedicación en cuanto a las tareas experimentales se refiere. Las reuniones llevadas a cabo y las palabras de aliento por él dadas eran un constante estímulo para seguir trabajando y dar lo mejor de mí mismo.

Mi agradecimiento a la Directora del Departamento de Metalurgia de la Facultad Regional San Nicolás, Dra. Elena Brandaleze, por el acompañamiento brindado a lo largo de toda la carrera. Sus consejos y la insistente motivación me han servido para avanzar y afianzarme aún más a lo largo de mi formación académica.

Muchas gracias al Dr. Pablo Turner, al Ing. Michael Stout, y a la Ing. Gladys Charca Ramos por los aportes realizados en el tema de trabajo.

Al Instituto de Física de Rosario, IFIR, por la generosidad en la utilización del Laboratorio de Ensayos Mecánicos, Dr. Alberto Armas. En particular al Sr. Fernando Ugo por brindar su apoyo y disposición en todo momento en la realización de los ensayos mecánicos.

Quiero agradecer también a la Dra. Graciela A. Mansilla por su tenaz e incesante predisposición a colaborar en lo que le fuera posible. Al Sr. Miguel Cabanilla por su completa disposición y por la amistad brindada.

No quiero olvidarme de agradecer a mi familia y amigos por haberme ayudado a transitar este camino. Nada de esto hubiera sido posible sin el apoyo de todos ellos.

RESUMEN

Resulta muy importante poder evaluar el comportamiento de los aceros frente a diferentes estados de deformación. Son característicos los procesos de conformado a los que son sometidas las chapas de acero de bajo contenido en carbono en Industrias Siderúrgicas y especialmente en las Automotrices que son las que más tratan con este tipo de aspectos, por ejemplo en la producción de autopartes como las que se aplican en el armado del chasis y carrocería de los autos, piezas del motor, tanque de nafta, etc. También son muy utilizadas para conformar artículos de la denominada línea blanca para el hogar, lavarropas, heladeras, etc.

Los ensayos que se utilizan para tal fin son los de embutido profundo y estampado, donde se deforma al material tratando de que no se genere ningún tipo de defecto de localización que impida su uso final. Para poder conocer y cuantificar el límite de deformación en este tipo de materiales, se debe construir el denominado Diagrama Límite de Conformado (DLC) ó *Forming Limit Diagram* (FLD). En el mismo se grafican las evoluciones de las deformaciones principales y se traza la curva límite (Figura 1) que define dos campos de trabajo: un campo inferior de deformaciones seguras y otro superior donde el material se deforma pero con cierta inestabilidad, es decir, aquí la generación de fenómenos de localización es altamente probable.

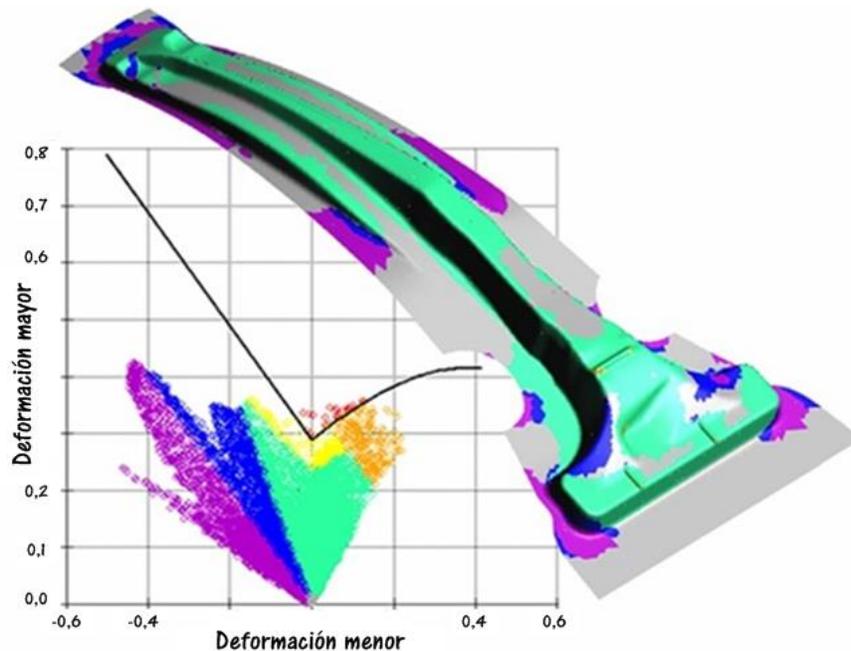


Figura 1. Diagrama Límite de Conformado de una pieza metálica.

En el presente trabajo se analizan las propiedades mecánicas de una chapa de acero de 0,07%C, de 0,62 mm de espesor, galvanizada, y se evalúa la formabilidad de la misma por medio de ensayos de estirado mecánico sobre probetas cortadas a 0°, 90° e inclinadas 45° respecto de la dirección de laminación (RD). Con este trabajo se pretende lograr un aporte de conocimiento relevante ya que se espera avanzar sobre el entendimiento que se tiene respecto de cómo afecta la anisotropía del material laminado al proceso mismo de estirado, prestando suma atención a la textura desarrollada durante la laminación de la chapa. Se muestra una escasa influencia de la anisotropía planar sobre la variabilidad de las deformaciones límite para este tipo de materiales, particularmente en la rama derecha del mencionado diagrama. Los resultados son analizados en términos de la textura cristalográfica del material, debido a la fuerte relación entre la textura desarrollada durante el proceso de deformación y la anisotropía inducida por ésta sobre la localización de la deformación. La inclusión de la textura cristalográfica en el estudio del material sugiere que el control de la misma puede ser una herramienta útil para la mejora de la formabilidad.

ÍNDICE

RESUMEN	5
ÍNDICE	7
NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES	10
CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN	12
1. Introducción	12
2. Proceso de manufactura del acero	13
2.1. Proceso de galvanizado en continuo por inmersión en caliente	17
3. Diagrama límite de conformado	18
4. Defectos en piezas embutidas	19
5. Plan del manuscrito	20
6. Bibliografía	20
CAPÍTULO II - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
1. Caracterización mecánica en productos planos	21
1.1. Ensayo de tracción uniaxial	21
1.2. Coeficiente de endurecimiento por deformación	26
2. Anisotropía en los materiales ferrosos	28
2.1. Borde ondulado y su relación con la anisotropía planar	30
3. Texturas cristalográficas	31
3.1. Sistemas de deslizamiento	31
3.2. Representación de texturas cristalográficas	32
3.2.1. Descripción de texturas mediante PF	33
3.2.2. Descripción de texturas por medio de ODF	34
3.3. Texturas de fibras	38
3.4. Efectos de texturas	38
3.4.1. Aplicación a aceros de bajo carbono laminados	38
3.4.2. Evolución de la textura durante la recristalización	39
4. Descripción general del diagrama límite de conformado	40

4.1.	Factores que afectan la curva límite de conformado _____	44
4.1.1.	El rol del lubricante _____	46
4.1.2.	Criterios de fluencia – Efecto de la anisotropía en la razón máxima de embutido ____	48
4.1.3.	Otros factores a tener en cuenta sobre la ubicación de la curva límite _____	50
5.	Construcción del diagrama límite de conformado _____	50
5.1.	Ensayos mecánicos _____	50
5.1.1.	Ensayo de acopado hidráulico _____	51
5.1.2.	Ensayos tipo Nakazima y Marciniak _____	52
5.1.3.	Ensayo de estirado mecánico: adaptación del ensayo Nakazima _____	53
6.	Determinación de las deformaciones límites _____	53
6.1.	Procedimiento de grillado _____	53
6.2.	Diseño de grillas utilizadas para evaluar deformaciones _____	54
6.3.	Métodos de grillado sobre chapas de acero _____	58
6.4.	Métodos de medición de las deformaciones _____	58
7.	Defectos en piezas conformadas _____	63
8.	Bibliografía _____	65
CAPÍTULO III – PROPIEDADES MECÁNICAS Y CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL _____		68
1.	Introducción _____	68
2.	Caracterización del material _____	69
2.1.	Composición química _____	69
2.2.	Microscopía óptica _____	70
2.3.	Determinación del tamaño de grano _____	71
2.4.	Determinación de microdureza _____	72
3.	Análisis de texturas cristalográficas _____	72
4.	Determinación de propiedades mecánicas _____	76
4.1.	Ensayos de tracción uniaxial _____	76
4.2.	Determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación _____	79
4.2.1.	Análisis por orientación _____	80
4.3.	Determinación del coeficiente de Lankford _____	85
5.	Ensayos de estirado _____	88
6.	Bibliografía _____	92

CAPÍTULO IV – DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO	93
1. Trabajo previo a la obtención de las bandas límite de conformado	93
1.1. Proceso de corte	94
1.2. Limpieza superficial de las probetas	94
1.3. Procesos de grillado electroquímico	94
1.4. Entallas de las probetas	97
1.5. Aplicación de los lubricantes	98
2. Ensayos de estirado	98
3. Determinación del estado de deformación	102
3.1. Método de medición del grillado post-deformación	102
4. Construcción del diagrama límite de conformado	105
4.1. Análisis de texturas cristalográficas	112
5. Estudio de tiempos	113
6. Bibliografía	115
CAPÍTULO V – DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	117
- Perspectivas futuras	122
- Bibliografía	123
ANEXOS	124
ANEXO I - PROYECTOR ÓPTICO DE PERFILES	125
ANEXO II - PLANOS DE LAS PROBETAS	132
ANEXO III - PLANO DE LA MATRIZ UTILIZADA PARA LOS ENSAYOS DE ESTIRADO	142
ANEXO IV - COSTO DEL PROYECTO	144
ANEXO V - IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO	146
ANEXO VI - PRESUPUESTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL DLC CON 12 PROBETAS	147

NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

A	Ampere
A_0	Área inicial de la probeta
a	Exponente de la ecuación de Hill
BCC	Estructura cristalina Cúbica Centrada en el Cuerpo
BLC	Banda Límite de Conformado
CLC	Curva Límite de Conformado
CLC_0	Deformación mínima
DLC	Diagrama Límite de Conformado
ΔR	Anisotropía planar
d_1, d_2	Diámetros de los círculos del grillado inicial
d'_1, d'_2	Diámetros principales (mayor y menor) de los círculos deformados
E	Módulo de Elasticidad
e_y	Deformación al punto de fluencia
ε	Deformación ingenieril
ε_l	Deformación ingenieril en longitud
ε_t	Deformación ingenieril en espesor
ϵ	Deformación verdadera
ϵ_t	Deformación verdadera en espesor
ϵ_w	Deformación verdadera en ancho
FCC	Estructura cristalina Cúbica Centrada en las Caras
g	Función de distribución de orientaciones
HG	Probeta geometría Reloj de Arena
K	Coefficiente de resistencia
K_c	Sistema de referencia del cristal
K_s	Sistema de referencia de la muestra
l	Longitud final
l_0	Longitud de referencia
$\Delta l = l - l_0$	Extensión
n	Coefficiente de Endurecimiento por Deformación
ODF	Función de Distribución de Orientaciones

P	Carga de la muestra
PF	Figura de Polo
$P_{m\acute{a}x}$	Carga máxima de la muestra
P_y	Carga de fluencia inicial
R	Coefficiente de Lankford
RD	Dirección de Laminación
R_{prom}	Valor medio de anisotropía
ρ	Relación de deformación
$R_{0^\circ}, R_{45^\circ}, R_{90^\circ}$	Valor de anisotropía evaluado a 0° , 45° y 90° respecto de RD
s	segundos
σ	Tensión verdadera
σ_{eng}	Tensión ingenieril
σ_f	Tensión de fluencia
σ_r	Tensión de rotura
$\sigma_{0,2\%}$	Límite elástico convencional
t_0	Espesor inicial de la probeta
UTS	Resistencia máxima a la tracción
V	Voltio
W, L	Ancho y longitud final de la probeta hasta la resistencia máxima
W_0, L_0	Ancho y longitud inicial de la probeta
$\varphi_1, \phi, \varphi_2$	ángulos de Euler

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

- Introducción
- Proceso de Manufactura del Acero
- Diagrama Límite de Conformado
- Defectos en Piezas Embutidas
- Plan del Manuscrito

La información que se brinda en el presente capítulo permite al lector introducirse en el Proceso Siderúrgico de obtención del acero. También se realiza una primera descripción del Diagrama Límite de Conformado, definiendo y especificando la información que estos aportan.

1. INTRODUCCIÓN

Argentina es el segundo país sudamericano en producción de “acero crudo”, según reflejan los datos de la *World Steel Association*¹. El primer lugar lo ocupa Brasil, el cual ha registrado en el mes de Agosto de 2010 un aumento del 7,8% de la producción de acero respecto del mes de Agosto del año anterior. Argentina, en el mismo período de tiempo y aunque con un crecimiento más acelerado (superior al 27%), ocupa un importante lugar dentro de América del Sur en el ranking elaborado por la Asociación antes mencionada de países productores de acero.

¹ La World Steel Association (worldsteel) es una de las asociaciones de la industria más grande y más dinámica del mundo. Worldsteel está constituida aproximadamente por 180 productores de acero (incluyendo a 19 de las 20 mayores compañías de acero del mundo), asociaciones siderúrgicas nacionales y regionales de la industria, y los institutos de investigación del acero. Los miembros de worldsteel producen alrededor del 85% del acero del mundo.

World Steel Association (<http://www.worldsteel.org>)

Los aceros al carbono, particularmente en la forma de chapas son los materiales de mayor producción a nivel mundial [1]. Sus tecnologías de procesamiento y propiedades han experimentado un continuo proceso de evolución y mejora. Una de las principales aplicaciones a las que se someten los productos semi-elaborados de aceros de bajo contenido en carbono es el estampado y sobre todo el relacionado con la producción de piezas para la industria automotriz (partes de carrocerías, filtros, carcasas de motores, guardabarros, capot, etc.) y para el hogar (línea blanca para la fabricación de lavarropas, cocinas, secadores, hornos, etc).

Para comprender con mayor profundidad las propiedades del acero galvanizado, a continuación se explica el proceso de fabricación del acero en general y luego el proceso de galvanizado en sí.

2. PROCESO DE MANUFACTURA DEL ACERO

El proceso comienza en el puerto, donde se descargan los distintos minerales (mineral de hierro calibrado, fundentes y pelet). El carbón se lleva al área de coquería donde se produce la coquización del mismo. El coque obtenido se usa luego en el Alto Horno para reducir el mineral de hierro y obtener el arrabio líquido, Figura 1. En su camino a la Acería, el arrabio es desulfurado utilizando diferentes reactivos químicos tales como cal, carburo de silicio y magnesio.

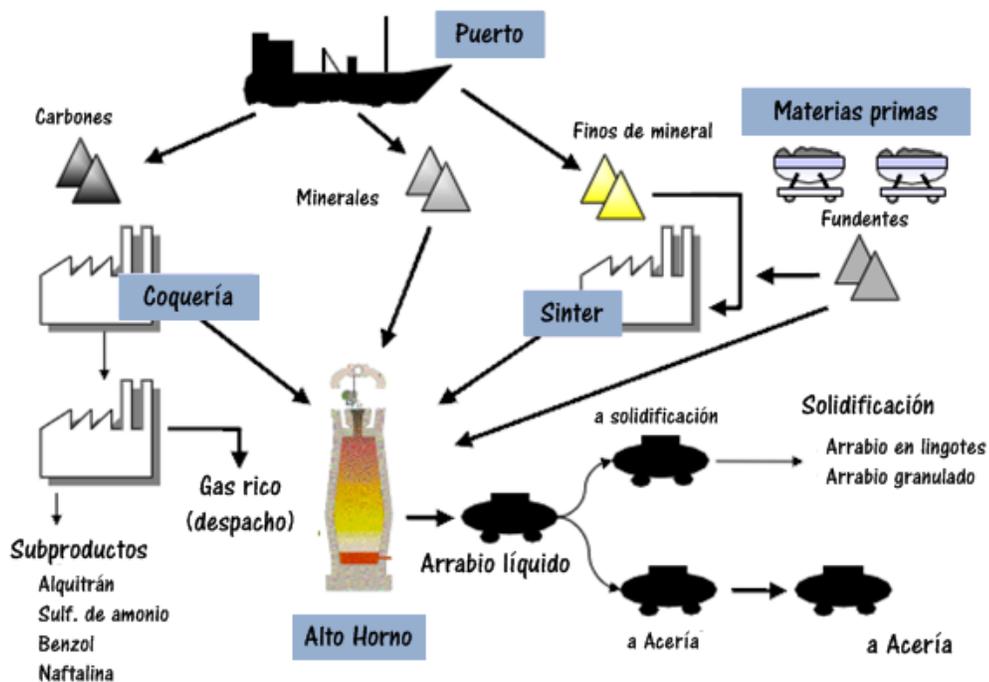


Figura 1. Esquema ilustrativo del proceso de reducción.

INTRODUCCIÓN

El arrabio obtenido se envía mediante vagones-termo a la Acería, donde se vacía el contenido de los mismos dentro del convertidor LD (Linz-Durrer), Figura 2. Allí es dónde efectivamente se baja la concentración del carbono en el arrabio y se obtiene el acero.

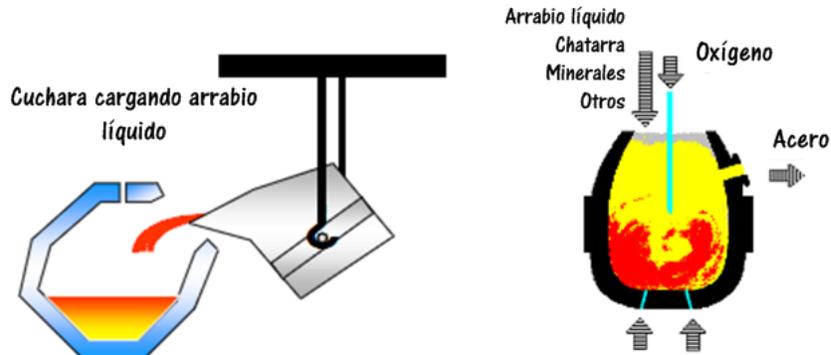


Figura 2. Proceso de oxidación en el Convertidor LD.

Los porcentajes en carbono que suele tener un acero al finalizar su estadía en el convertidor oscila entre un 0,03% a 0,05%. También es en el convertidor donde se realiza la remoción del fósforo. Finalizado el proceso, se vuelca primeramente el baño metálico sobre la cuchara de acero en la que se realizará después el afino secundario, y luego se vuelca la escoria. El acero se transporta en la Cuchara hacia el Horno Cuchara. Éste tiene tres electrodos por los cuales se hace pasar una corriente de alto voltaje que aumenta la temperatura del acero. Se le adicionan fundentes, carburantes y ferroaleaciones. El objetivo de este proceso es continuar ajustando la composición final del acero y trabajar con temperaturas menores que las del Convertidor. Finalmente, la Cuchara es transportada a la estación de agitado (Trimming) para continuar la etapa de flotación y eliminación de las inclusiones generadas. Habiéndose ajustado la composición química de acuerdo a las especificaciones y con un estricto control sobre la temperatura del acero líquido, comienza la etapa de solidificación del mismo en la máquina de Colada Continua, Figura 3.

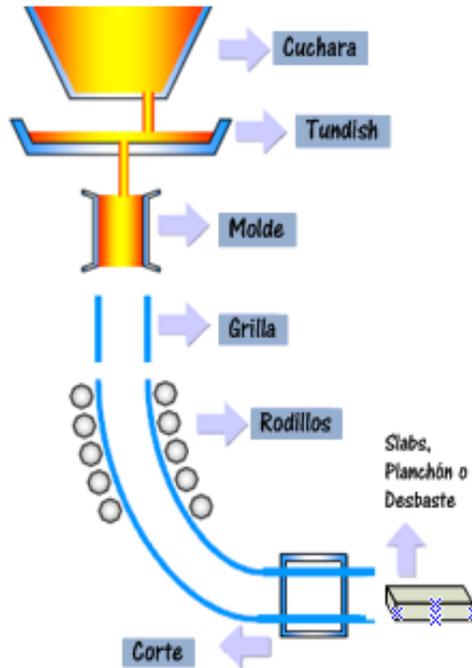


Figura 3. Esquema del proceso de Colada Continua.

El acero líquido de la cuchara es volcado en un Repartidor o Tundish. De aquí pasa a los moldes oscilantes, donde comienza la solidificación del mismo por el contacto con las paredes frías del molde. El acero es extraído lentamente mediante una barra falsa y recorre una serie de rodillos dónde sigue enfriándose con agua mediante el sistema de enfriamiento secundario. A medida que el acero va descendiendo, se va solidificando. En la etapa final, el mismo comienza a enderezarse hasta adoptar la posición horizontal. Luego se realiza el corte del semi-producto obtenido.

Posteriormente para poder reducir el espesor del planchón o desbaste (entre un 94% y un 99%) obtenido en el proceso de Colada Continua, se lo lleva a laminación en caliente (Figura 4) donde el material se deforma a elevadas temperaturas (en la región austenítica). Como producto del mencionado proceso se obtienen bobinas que se denominan "negras" debido a la inevitable oxidación sufrida durante el proceso. Las mismas son posteriormente zunchadas y almacenadas. Su destino más probable es la laminación en frío (Figura 5), pero también se comercializan, previo corte de acuerdo a las dimensiones solicitadas.

INTRODUCCIÓN

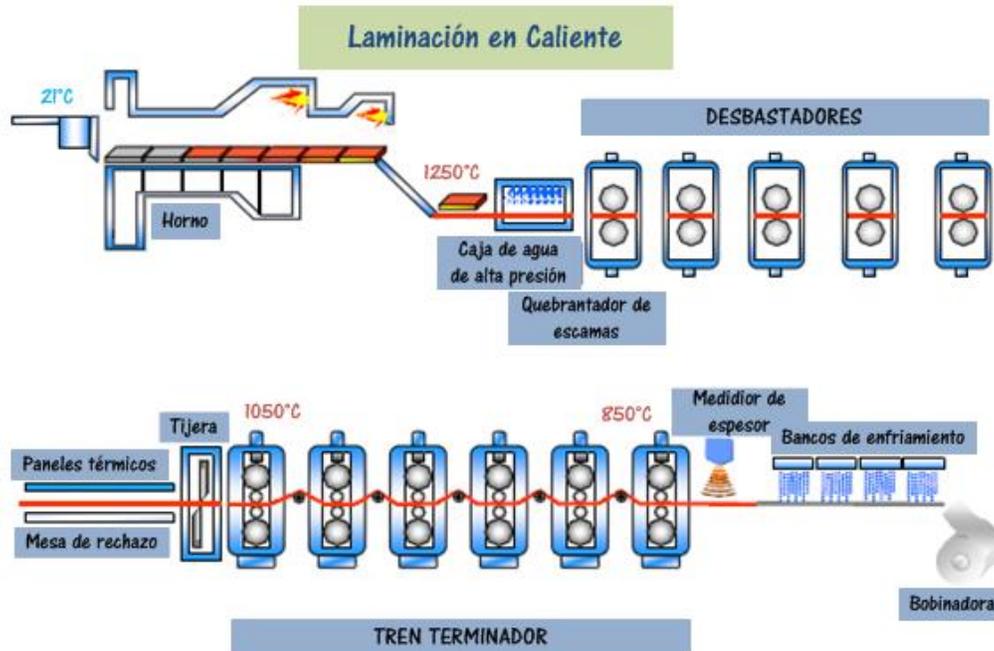


Figura 4. Diagrama del flujo de proceso de Laminación en Caliente.

El objetivo principal de la laminación en frío es reducir el espesor (entre un 40% y un 90%) de la chapa laminada en caliente y obtener un producto con elevadas propiedades mecánicas y terminados superficiales que permitan una amplia gama de aplicaciones industriales. Para poder lograr que la chapa así obtenida realce propiedades como tensión máxima admisible y ductilidad, es necesario someter al mismo a un proceso de recocido que regenere la estructura deformada por la laminación en frío, mediante la recristalización de sus granos (total o parcialmente).

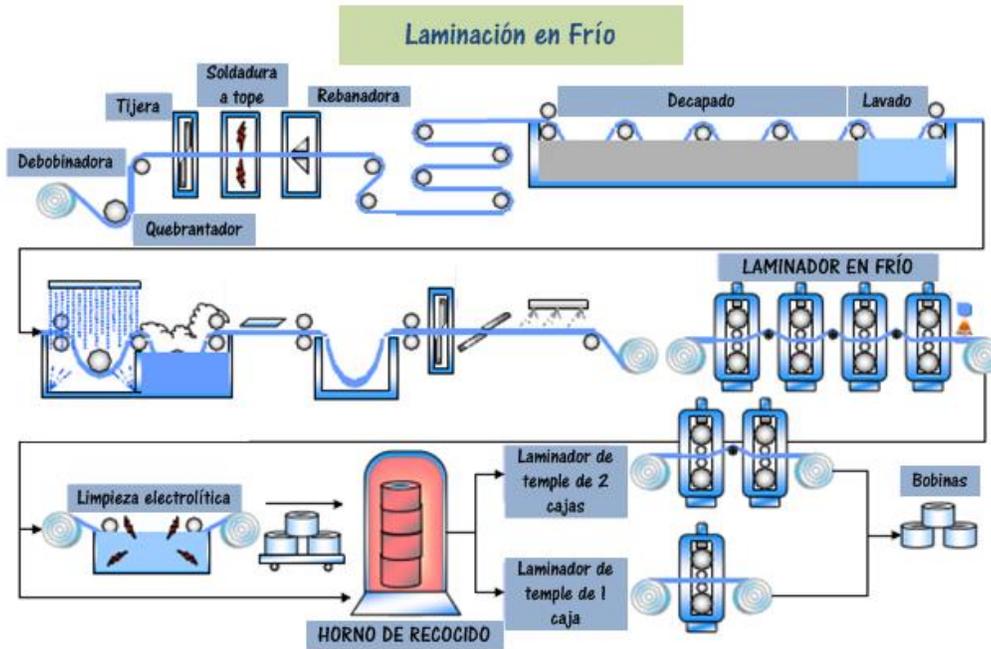


Figura 5. Diagrama del flujo de proceso de Laminación en Frío.

Al salir las bobinas del horno de tratamiento térmico, se las somete al proceso de Temperado Mecánico, donde la chapa se alarga hasta un 2% y se elimina de la misma la zona de fluencia discontinua. También se le otorga planitud, se la limpia y se define su terminación superficial.

2.1. Proceso de galvanizado en continuo por inmersión en caliente

El galvanizado por inmersión en caliente del acero es una práctica común para proteger las piezas de acero que van a ser expuestas a condiciones ambientales adversas por un largo período de tiempo. Es uno de los productos siderúrgicos de mayor desarrollo mundial, que forma una aleación de cinc-hierro a nivel superficial de gran resistencia a los distintos agentes de corrosión de la atmósfera, el agua o el suelo. Combina dos propiedades fundamentales como lo son la resistencia mecánica brindada por el acero y la resistencia a la corrosión que aporta el recubrimiento de cinc. Este proceso se logra a través de la inmersión del material en un baño de cinc fundido a 450°C.

Esta chapa puede ser sometida a tratamientos mecánicos, tales como cizallado, plegado, perfilado, embutido, punzonado, ensamblado, adhesivado, soldado (bajo condiciones especiales), etc. Estos productos son ampliamente utilizados por la industria automotriz y en la línea blanca.

3. DIAGRAMA LÍMITE DE CONFORMADO

Las Curvas Límites de Conformado (CLC) especifican los valores máximos de deformación de la chapa laminada admisibles para los diferentes tipos de procesos de conformado en aras de prevenir el riesgo de aparición de defectos sobre la superficie del material.

El hecho de determinar el grado de deformabilidad de las chapas de acero influye de manera directa sobre sus aplicaciones industriales. Este es un punto muy importante a tener en cuenta en el sector automotriz, donde se trabaja continuamente para poder realizar variaciones en las CLC que permitan trabajar de forma segura al momento de conformar las chapas [2], debido a que durante los procesos de conformado y, en particular cuando éstas son sometidas a procesos combinados de estirado y embutido, se presentan fenómenos de localización, los cuales generan una limitación importante a la formabilidad.

La CLC asociada a una chapa metálica se representa en un diagrama donde se muestra la evolución de las deformaciones principales ε_1 y ε_2 experimentadas por el material cuando se lo deforma. A éste diagrama se lo denomina Diagrama Límite de Conformado (DLC). Un ejemplo típico del mismo se representa en la Figura 6.

Estos diagramas aportan información necesaria para la predicción de posibles problemas durante los procesos de conformado, y constituyen una herramienta útil en las etapas de diseño, elección de material, definición de la geometría de la pieza/matriz, etc., [3].

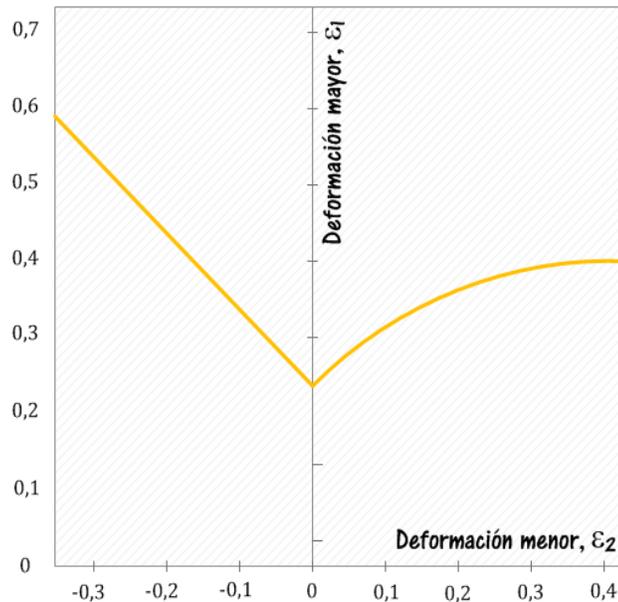


Figura 6. Diagrama Límite de Conformado (DLC).

Es por ello, y considerando la importancia que posee hoy día la industria automotriz que se ha querido mejorar el entendimiento que se tiene hasta ahora sobre el comportamiento de las CLC evaluando los efectos producidos sobre éstas, debido a variaciones en la anisotropía planar de la chapa laminada.

4. DEFECTOS EN PIEZAS EMBUTIDAS

La formabilidad de un material incluye la capacidad de someterse a procesos de deformación para obtener un producto con la forma deseada sin que se generen defectos sobre el mismo. Durante ensayos de embutición profunda, las causas principales que originan la formación de estas zonas de deformación heterogénea pueden ser debidas al herramental utilizado, al lubricante empleado, a parámetros geométricos o bien a variaciones en las propiedades mecánicas y metalúrgicas del propio material [4].

Los defectos más usualmente encontrados en estas operaciones son el arrugado del ala y de la pared, la formación de piel de naranja, fracturas en la parte inferior, bandas de Lüders, fractura en las esquinas, formación de pliegues, etc.

A continuación, en la Figura 7 se observan fotos que ilustran a algunos los defectos comentados anteriormente.

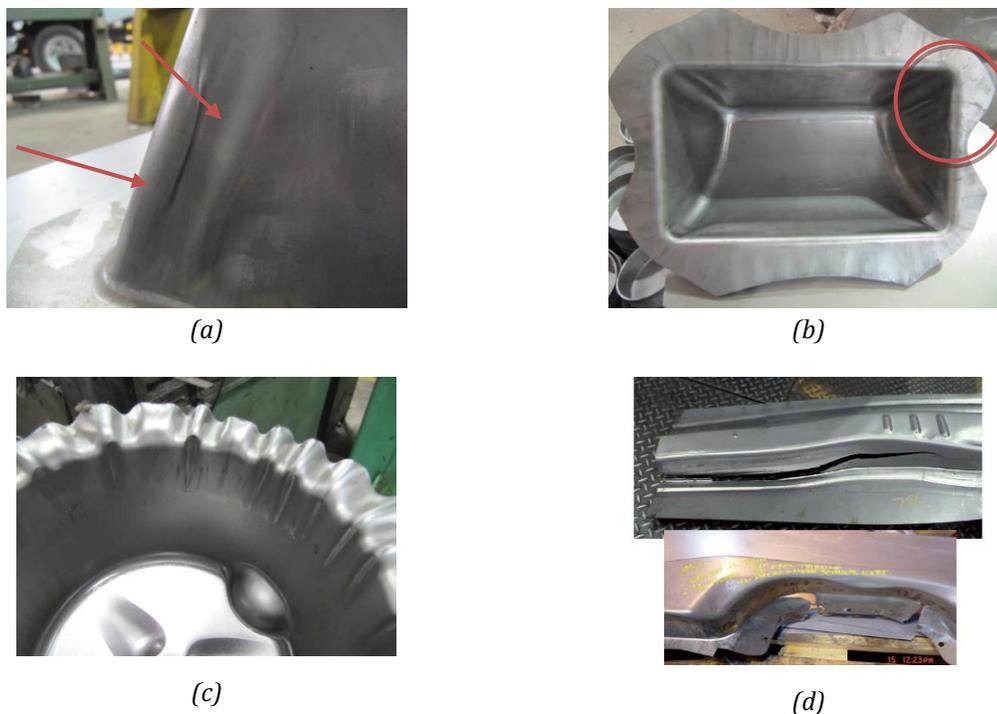


Figura 7. Defectos sobre piezas embutidas. (a) Arrugado en la pared, (b) Arrugado en la esquina de la pieza, (c) Arrugado en el ala y (d) Fractura de una pieza embutida.

5. PLAN DEL MANUSCRITO

El objetivo del presente trabajo es estudiar la influencia de la anisotropía planar sobre el límite de formabilidad de una chapa de acero de bajo contenido en carbono de producción nacional.

Se pretende lograr un aporte de conocimiento relevante ya que se espera avanzar sobre el entendimiento que se tiene respecto de cómo afecta la anisotropía del material laminado al proceso mismo de estirado, prestando suma atención a la textura desarrollada durante la laminación de la chapa y explicando mediante un estudio de componentes ideales de texturas el comportamiento observado.

La estructura del proyecto consta de cuatro etapas:

- Un relevamiento bibliográfico, sustento del presente proyecto. Análisis y descripción de la CLC, condiciones de lubricación. Relaciones entre la textura cristalográfica del material y la anisotropía plástica. Métodos de medición de las deformaciones límites.
- Una segunda etapa experimental donde se presentan los ensayos mecánicos realizados. Determinación de propiedades mecánicas: coeficientes de endurecimiento, n ; de anisotropía, R ; anisotropía planar, ΔR , y el valor medio de anisotropía, R_{prom} . Medición de la textura cristalográfica del material y análisis de componentes ideales de textura.
- Construcción y determinación de la CLC, de la banda límite de conformado (BLC) y DLC. Análisis de los resultados obtenidos y determinación de correlaciones con la textura cristalográfica del material.
- Conclusiones del trabajo realizado y perspectivas futuras.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. L. Plaut, A. F. Padilha, N.B. Lima, C. Herrera, A. F. Filho y L. H. Yoshimura, "Medium carbon steel deep drawing: A study on the evolution of mechanical properties, texture and simulations, from cold rolling to the end product", (2009), *Materials Science and Engineering*, A 499, 337–341.
- [2] Keeler S.P. y Backhofen W.A., "Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches", (1964), *ASM trans. Quart*, 56, 25–48.
- [3] J.W. Signorelli, M. A. Bertinetti, P. A. Turner, R. E. Bolmaro, "Modelización de la Curva Límite de Conformado en materiales anisótropos utilizando metodologías multiescala", Instituto de Física de Rosario (UNR-CONICET). Rosario, Argentina.
- [4] D. Banabic, H. J. Bunge, K. Pöhlandt, A. E. Tekkaya, "Formability of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits", (2000), Capítulo 5, 173–214.

Capítulo II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- Caracterización Mecánica en Productos Planos
- Anisotropía en los Materiales Ferrosos
- Texturas Cristalográficas
- Descripción General de la CLC
- Construcción del DLC
- Determinación de las Deformaciones Límites
- Defectos en Piezas Conformadas

En el presente capítulo se introduce al lector a los procesos de deformación plástica de los metales y sus aleaciones. Se inicia el mismo con una caracterización avanzada de estos materiales, continuando con una descripción detallada del Diagrama Límite de Conformado y del procedimiento de medición de las deformaciones generadas durante el estampado. Finalmente se analizan los defectos más comunes encontrados durante el conformado de las piezas.

1. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA EN PRODUCTOS PLANOS

1.1. Ensayo de tracción uniaxial

El ensayo de tracción es la técnica experimental más utilizada para determinar las propiedades mecánicas de los materiales metálicos. Con él se suelen obtener los parámetros que definen el

comportamiento del material, sea en régimen elástico, plástico, e incluso en rotura. Hasta hace poco tiempo se pensaba que con los parámetros elásticos del material - módulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (ν) y límite elástico - era suficiente para definir el comportamiento mecánico de los metales debido a que las piezas y construcciones se diseñaban para que no sobrepasen el valor de fluencia en sus condiciones de trabajo [1]. Dicha aclaración sigue siendo válida, pero en el campo de la Ingeniería Civil, en cambio para la metalurgia mecánica no basta con la definición de dichas variables. Aquí hace falta determinar parámetros de deformación, que indiquen cual será el comportamiento de la pieza en servicio. Para ello se recurre al ensayo de tracción.

En el mismo se somete a una probeta (ver Figura 1) a una fuerza de tracción uniaxial que va aumentando de manera progresiva conforme el material se deforma (se alarga). El producto del espesor inicial de la probeta (t_0) por su ancho inicial (W_0) definen el área inicial de aquella, A_0 . La carga de la muestra en cualquier instante es P , la cual es medida por una celda de carga en la máquina de ensayos. A mitad del espécimen, una longitud de referencia l_0 se monitorea por medio de un extensómetro y en cualquier instante la longitud de referencia actual es l , y la extensión es $\Delta l = l - l_0$.

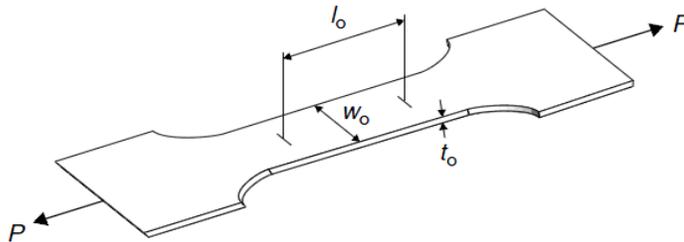


Figura 1. Geometría de una probeta típica de tracción.

Durante el ensayo, los datos de carga y extensión son grabados por un sistema adquisidor de datos; posteriormente con estos datos se construye el diagrama tensión (σ) - deformación (ϵ).

La Figura 2 muestra una curva típica de tracción que poseen los aceros de calidad para embutido de bajo carbono. La forma y las magnitudes de la curva de tensiones-deformaciones de un metal dependerá de su composición, de la historia de tratamientos termomecánicos anteriores a los que fue sometido y de la velocidad de la deformación, además de la temperatura y del estado de tensión creado durante el ensayo [2].

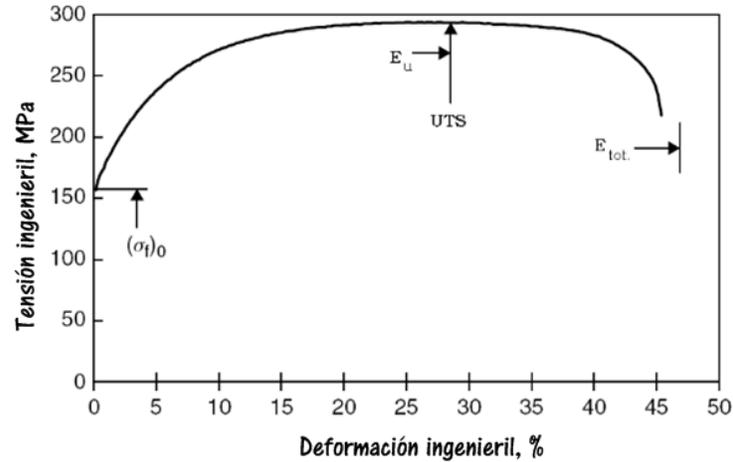


Figura 2. Curva de tracción (tensión-deformación) ingenieril.

De la curva de tracción simple pueden extraerse parámetros de resistencia mecánica (resistencia a la tracción máxima o UTS, y el límite elástico convencional, $\sigma_{0,2\%}$) y de ductilidad del material (alargamiento porcentual y la estricción). Valores de la tensión de fluencia (σ_f), tensión en rotura (σ_r) y tenacidad, son fácilmente obtenidos.

El aspecto de la curva cambia levemente cuando se trabaja con aceros de mayor contenido en carbono, Figura 3. Aquí aparece un punto de fluencia superior, σ_f^s , y un punto de fluencia inferior, σ_f^i .

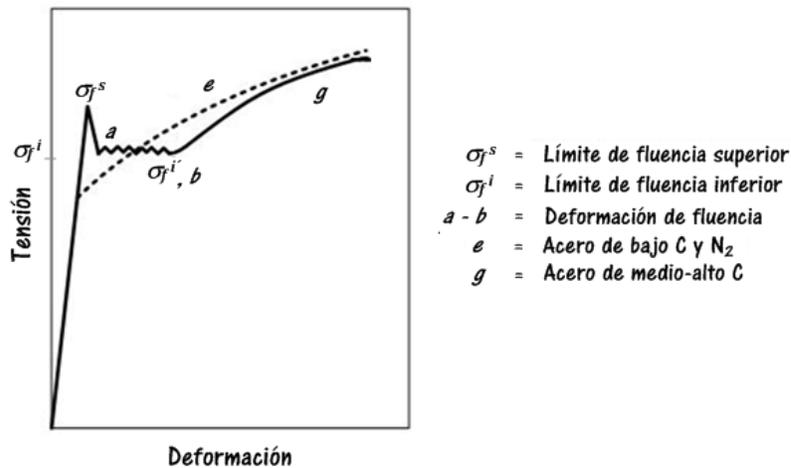


Figura 3. Curva tensión-deformación para dos aceros de diferentes contenidos en C.

En σ_f^s el metal cede repentinamente y se estabiliza al llegar a σ_f^i , y entre σ_f^i y $\sigma_f^{i'}$ se producen una serie de deformaciones y consolidaciones de los cristales hasta que a partir de $\sigma_f^{i'}$ en adelante la curva sigue su trazado normal. Esta zona de transición en los aceros – denominada zona de Lüders – está caracterizada por la aparición de bandas superficiales a 45°. Estas líneas permanecen visibles luego del

estampado y por lo tanto son inaceptables en piezas que precisan de buena apariencia superficial. Lo que realmente sucede es que el material en σ^s se endurece como consecuencia de que el movimiento de las dislocaciones se ve obstruido por la presencia de los átomos de carbono ubicados intersticialmente en la red cúbica que forman los átomos de hierro. Una vez que las dislocaciones en su camino logran destrabarse por presencia de defectos cristalinos (mayormente vacancias), superan dicha barrera y el material fluye (se reacomoda internamente) hasta alcanzar σ^i donde se estabiliza.

A partir del mencionado punto, comienza un período de deformación plástica apreciable en posiciones de concentración de esfuerzos como bandas discretas de material deformado (Bandas de Lüders). La deformación comienza en estas áreas localizadas y se extiende dentro de las áreas sin deformar. Esto ocurre a un esfuerzo casi constante y explica la parte horizontal de la curva esfuerzo-deformación en el límite elástico inferior. Sólo después que la deformación de Lüders ha cubierto toda la sección, comenzará a elevarse de nuevo la curva esfuerzo-deformación.

Para toda la gama de aceros al carbono, una vez superada la fluencia, la deformación será uniforme hasta alcanzar el punto de carga máxima, donde más allá del mismo, la deformación se vuelve heterogénea debido al desarrollo de defectos localizados en la sección reducida del material que llevarán a la falla del mismo. La tensión a la cual ocurre ésta se denomina *tensión de rotura* del material. La tensión ingenieril se define por medio de:

$$\sigma_{eng} = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

La deformación ingenieril porcentual se puede calcular de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (2)$$

La tensión de fluencia inicial se indica en la ecuación 3, siendo P_y la carga de fluencia inicial:

$$(\sigma_f)_0 = \frac{P_y}{A_0} \quad (3)$$

La tensión ingenieril máxima se denota como UTS, y puede calcularse a través de:

$$UTS = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_0} \quad (4)$$

donde $P_{m\acute{a}x}$ representa la carga máxima alcanzada por la probeta durante el ensayo.

La elongación correspondiente hasta la carga máxima se denomina *elongación máxima uniforme*, E_u . Si se incrementa la escala de deformaciones en las cercanías al origen de coordenadas, se podrá observar

la parte elástica de la curva, Figura 4, recta cuya pendiente se denomina *módulo elástico* o también llamado *módulo de Young*, E . Se define a E como:

$$E = \frac{(\sigma_f)_0}{e_y} \quad (5)$$

donde e_y representa la deformación al punto de fluencia inicial. Si en el material se supera la carga de fluencia, y en cualquier instante posterior se detiene la acción de la carga, la deformación elástica se recuperará, la línea de descarga será paralela a la línea de carga elástica inicial. Pero sobre el material quedará un residual de deformación plástica como se muestra en la Figura 4.

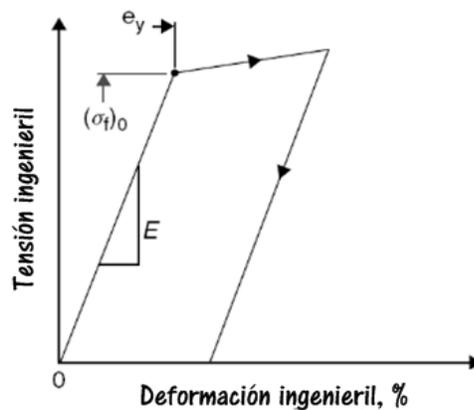


Figura 4. Parte inicial del diagrama anterior mostrando una magnificación de la zona elástica.

En algunos materiales, la transición de la parte elástica a la plástica no se observa con claridad y resulta difícil establecer el valor exacto de la σ_f . Es por ello que muchas veces se recurre al límite elástico convencional, que indica el valor de tensión necesaria para producir en el material una deformación permanente del 0,2%. Este límite elástico, observado en la Figura 5, se determina trazando una línea paralela a la línea de carga elástica y observando el valor de tensión correspondiente a la intersección de la línea trazada con la curva de carga.

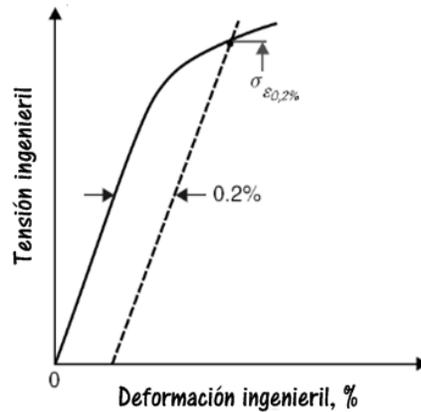


Figura 5. Límite elástico convencional, $\sigma_{0,2\%}$.

1.2. Coeficiente de endurecimiento por deformación

El endurecimiento por deformación plástica en frío es el fenómeno por medio del cual un metal dúctil se vuelve más duro y resistente a medida que es deformado plásticamente. Generalmente a este fenómeno también se lo llama “trabajo en frío” debido a que la deformación se da a una temperatura “baja” relativa a la temperatura de fusión del metal.

La respuesta de un material así definida, se determina mediante el exponente de endurecimiento por deformación, n , que es la pendiente de la porción plástica de la curva $\sigma - \epsilon$ cuando se utilizan escalas logarítmicas.

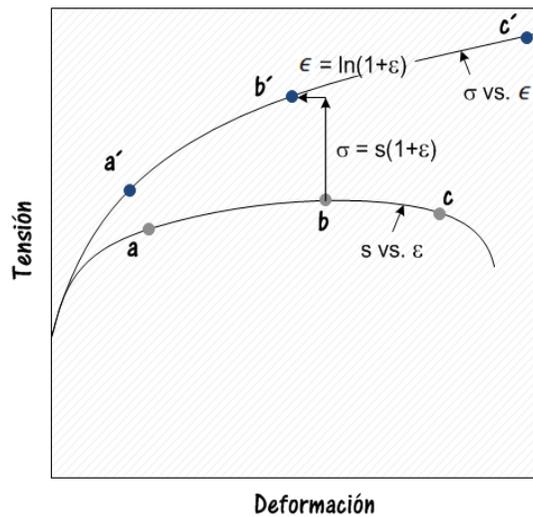


Figura 6. Comparación entre las curvas de esfuerzo-deformación ingenieril (abajo) y verdadera (arriba).

La curva $a'b'c'$ de la Figura 6 es la curva tensión $\sigma - \epsilon$. A menudo a ésta se la aproxima a través de la siguiente expresión [3]:

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \quad \text{Ecuación de Hollomon} \quad (6)$$

donde K es una constante, llamada también coeficiente de resistencia. Representa el esfuerzo real para producir una deformación real unitaria, y el exponente n , como se comentó con anterioridad, es una medida de la capacidad de endurecimiento por deformación del material; ambos valores varían para cada aleación y dependen de la condición del material, esto es si han sido deformados previamente, o tratado térmicamente [4].

Las propiedades mecánicas asociadas a la plasticidad están directamente relacionadas con el valor de n que presenta cada material. Aquellos que presentan un bajo valor de n , frente a operaciones de estirado alcanzan rápidamente el alargamiento uniforme dando origen a deformaciones localizadas. En contraste, aquellos materiales que poseen un elevado valor de dicho índice, endurecen rápidamente por deformación, retardando la aparición de deformaciones localizadas. Consecuencia de dicho comportamiento es que aquellos materiales con elevados índices de endurecimiento poseen excelente comportamientos en las operaciones de estirado mecánico.

Por ejemplo, un material que posee un bajo endurecimiento por deformación debe someterse a una gran cantidad de deformación antes de que el resto del material pueda contribuir a la deformación. En la Figura 7(a), se asume un nivel requerido de tensión “x” para que el material entre en fluencia. La chapa metálica con un bajo valor de n debe deformarse mucho más (L) para poder conseguir la tensión “x” de fluencia en el resto del material. La mayor deformación bajo el punzón y la consecuente menor deformación en el resto del material crea un gradiente de deformación severo. Sin embargo, una chapa con un elevado valor de n alcanza el mismo nivel de tensión de “x” con un nivel de deformación mucho menor (H) lo que resulta en un menor gradiente de deformación [5], Figura 7(b).

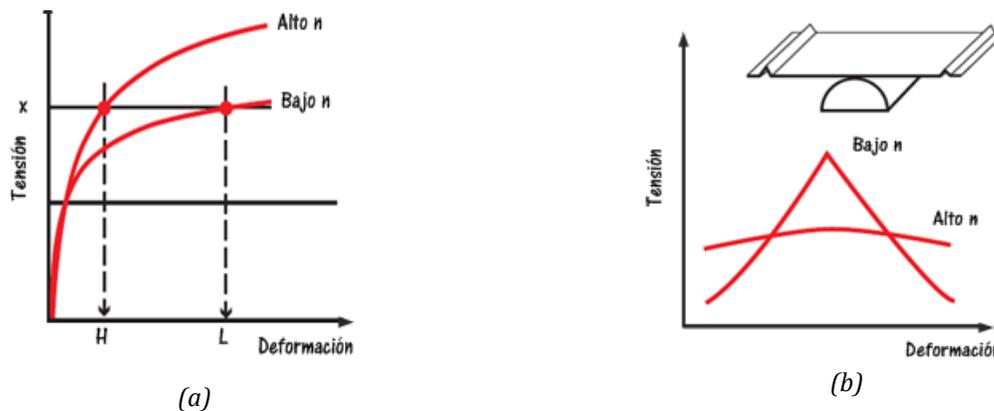


Figura 7. Efecto de la variación del estado de la deformación con diferentes valores de n .

2. ANISOTROPÍA EN LOS MATERIALES FERROSOS

El que una lámina se pueda estampar y obtener una pieza de forma de copa cilíndrica es función de la anisotropía normal, R , del metal laminado. En este tipo de ensayos se pueden producir las denominadas orejas, las cuales aparecen cuando los bordes de las copas embutidas no son perfectamente planos debido a variaciones en la anisotropía planar, presentándose crestas con valles entre ellas, tal como se muestra en la Figura 8.

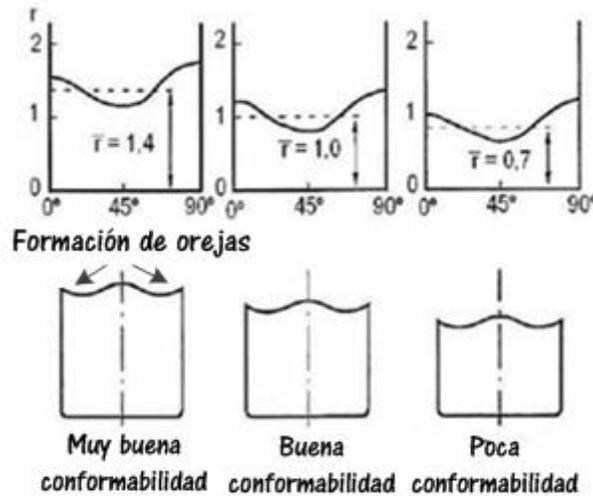


Figura 8. Variación de la anisotropía con la dirección de laminación.

La anisotropía normal, plástica, o simplemente, el Coeficiente Lankford, R , se obtiene mediante ensayos de tracción utilizando probetas extraídas a diferentes direcciones de la RD original del material (Figura 9) evaluando deformaciones verdaderas de entre el 10% y el 20%. Puede definirse R como el cociente entre la deformación en ancho ϵ_ω sobre la deformación real en el espesor ϵ_t .

$$R = \frac{\epsilon_\omega}{\epsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{W}{W_0}\right)}{\ln\left(\frac{L_0 W_0}{L W}\right)} \quad (7)$$

donde W y L son el ancho y longitud calibrada durante el ensayo de tracción hasta la resistencia máxima, y W_0 y L_0 son el ancho y longitud inicial.

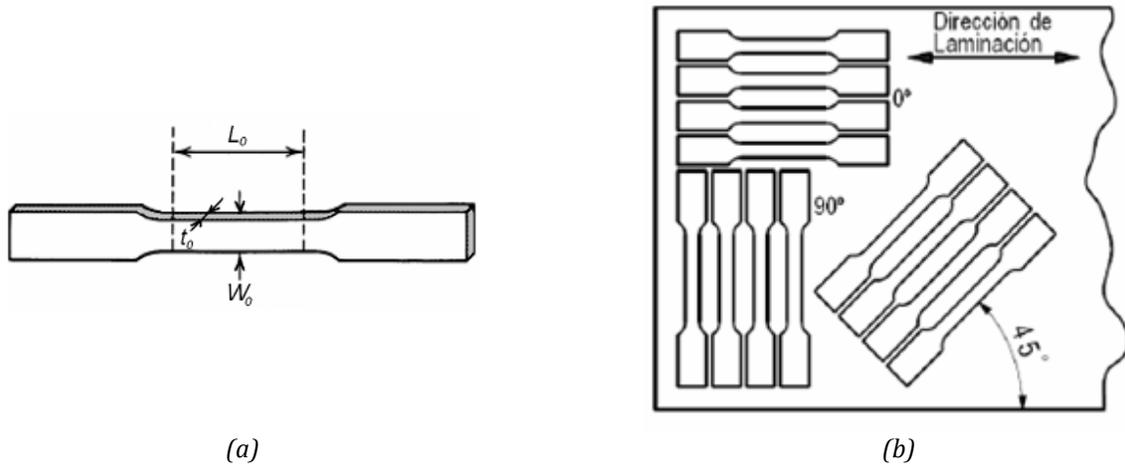


Figura 9. (a) Dimensiones de una probeta para ensayo de tracción uniaxial, (b) Disposición de las probetas respecto de la dirección de laminación.

La misma varía debido a que las propiedades dependen de la dirección de extracción de la muestra respecto a la chapa laminada. En los metales, la causa más importante de anisotropía plástica es la orientación preferencial de los granos cristalinos (textura). A su vez, la textura cristalográfica depende de factores inherentes a su composición química y a factores tales como la temperatura de laminación en caliente, la disminución del espesor en frío, tipo de tratamiento térmico, recristalización durante el recocido [3], etc.

Debido a que a nivel industrial suelen utilizarse materiales de bajo espesor para las operaciones de conformado, se vuelve poco preciso poder evaluar el valor de la deformación en la dirección del espesor. Es por ello, y considerando que existe constancia de volumen, que se puede calcular la deformación en el espesor, ϵ_v , de la siguiente manera:

$$\epsilon_t = (\epsilon_w + \epsilon_l) \quad (8)$$

donde ϵ_l representa la deformación en longitud y ϵ_w la deformación en ancho.

Como casi siempre las hojas laminadas en frío tienen anisotropía en su dirección planar, el valor de R de una muestra cortada de una lámina dependerá de su orientación (0° , 45° , 90° de RD). Una vez calculados los valores de R para estos ángulos, es decir, R_{0° , R_{45° y R_{90° , se calcula un valor promedio de anisotropía, denominado R_{prom} , que puede determinarse por medio de la siguiente fórmula:

$$R_{prom} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (9)$$

En la Tabla 1 se pueden ver algunos valores de R para diferentes tipos de materiales ferrosos y no ferrosos.

Material	Valor de R
Aleaciones de zinc	0,4 - 0,6
Acero laminado en caliente	0,8 - 1,0
Acero laminado en frío - acero efervescente	1,0 - 1,4
Aluminio laminado en frío - acero calmado	1,4 - 1,8
Aleaciones de aluminio	0,6 - 0,8
Cobre y latón	0,6 - 0,9
Aleaciones de titanio (α)	3,0 - 5,0
Aceros inoxidable	0,9 - 1,2
Aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA, High-strength, low-alloy)	0,9 - 1,2

Tabla 1. Valores característicos de R para varios metales laminados [6].

2.1. Borde ondulado y su relación con la anisotropía planar

Además del coeficiente de anisotropía medio, R_{prom} , que representa una medida de la anisotropía en todas las direcciones de la chapa, existe otro valor de interés que es el coeficiente de anisotropía planar, ΔR , determinado por la siguiente relación y que indica la capacidad que posee un material de estirarse de manera no uniforme (tendencia a la formación de orejas):

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (10)$$

De acuerdo a la Figura 8, en la misma se muestra la embutición profunda de tres copas a partir de tres chapas cuya anisotropía normal R es diferente pero cuya anisotropía planar es positiva. Cuanto mayor es R mayor es la profundidad de la copa. Las orejas son irregularidades en la altura de las copas y el sitio de su aparición depende del valor positivo o negativo de la anisotropía plana ΔR . En el primero de los casos ($\Delta R > 0$) aparecerán orejas a 0° y a 90° con respecto a la dirección de laminación. En el segundo caso ($\Delta R < 0$) aparecerán orejas a 45° con respecto a la dirección de laminación. Un valor de $\Delta R=0$ indica que el material posee igual resistencia a la deformación en el espesor en todas las direcciones de la chapa y por lo tanto se deformará uniformemente sin orejas. Una combinación de altos valores de anisotropía normal R y valores cercanos a cero de anisotropía plana ΔR ofrecen un embutido óptimo con profundidades mayores y menos formación de orejas.

Entre las orejas formadas en un material con alto índice ΔR hay valles en los cuales el material se ha engrosado bajo tensiones compresivas en vez de elongarse bajo tensión biaxial. Este metal más grueso en ciertas ocasiones fuerza a la matriz a separarse, permitiendo que el metal se arrugue en las áreas más delgadas, cerca de las orejas.

Los factores que más afectan al orejado son: el porcentaje de reducción, el diseño de la matriz y el tipo de lubricante empleado.

Como comenta F. Campos en [6], la capacidad de embutición profunda aumenta con un valor alto de R_{prom} y bajo de ΔR . Sin embargo y en general, los metales laminados con R_{prom} alto también tienen valores altos de ΔR . Se están desarrollando texturas de metal laminado para mejorar la capacidad de embutición controlando el tipo de los elementos aleantes en el material, al igual que diversos parámetros del proceso durante el laminado de la hoja.

3. TEXTURAS CRISTALOGRÁFICAS

Para poder fundamentar el comportamiento observado en la deformación y relacionarlo con la anisotropía del mismo, se hace necesario definir lo que se entiende por “Textura” en los aceros. La misma representa la orientación preferencial que poseen los granos respecto de sus vecinos en un agregado policristalino. Suelen definirse un plano y una dirección cristalográfica para poder identificar una componente de textura. Es decir, si (hkl) corresponde a un plano paralelo al plano de laminación, y $[uvw]$ indica una dirección paralela a la dirección de laminación, será $(hkl)[uvw]$ el conjunto que determine una componente de textura.

En la siguiente tabla, se muestran algunas de las familias de planos y direcciones cristalográficas más frecuentes que definen la textura encontrada en el análisis de metales y aleaciones no ferrosas (como por ejemplo, aluminio, cobre y latón) que poseen estructura cúbica centrada en las caras, FCC.

Plano de deslizamiento	Dirección de deslizamiento	Denominación de la textura
{001}	<100>	Cube
{011}	<100>	Goss
{011}	<211>	Brass
{112}	<111>	Copper
{123}	<634>	S
{021}	<100>	CG
{4 4 11}	<11 11 8>	Taylor
{001}	<120>	CH

Tabla 2. Denominación de las principales texturas cristalográficas.

Aquellos materiales exentos de orientación preferencial se dicen que no poseen textura.

3.1. Sistemas de deslizamiento

El principal mecanismo de deformación plástica en aceros a temperaturas ordinarias es el deslizamiento cristalino. Un sistema de deslizamiento puede definirse como la combinación de un plano y una dirección que se halla sobre el plano a lo largo del cual se produce el deslizamiento, Tabla

3. Este mecanismo de deslizamiento puede definirse como el movimiento paralelo de dos regiones cristalinas adyacentes, una respecto a la otra, a través de algún plano o grupo de planos. Es decir, éste se produce sobre pequeñas regiones de planos paralelos llamados bandas de deslizamiento o líneas de deslizamiento, las cuales se diferencian considerando su espesor. Debido a que todas las líneas de deslizamiento están en grupos paralelos dentro de un monocristal (cada grano), deben corresponder a una misma familia de planos ocupados $\{hkl\}$ del grano particular. En las estructuras FCC, el deslizamiento se produce siempre sobre el sistema $\{111\}\langle 110\rangle$ de empaquetamiento compacto.

En cambio, la estructura BCC no es una estructura de empaquetamiento compacto, consecuentemente se requerirán mayores esfuerzos cortantes para conseguir deslizamientos en este tipo de metales. Sin embargo, el mismo se produce predominantemente en el sistema $\{110\}\langle 111\rangle$, generando una apariencia ondulada supuestamente debida al deslizamiento simultáneo sobre los otros dos sistemas de planos $\{211\}$ y $\{321\}$.

Estructura del cristal	Planos de Deslizamiento	Dirección de Deslizamiento	Número de sistemas de deslizamiento	Ejemplos
FCC	$\{111\}$	$\langle 110\rangle$	12	Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, Fe _γ
BCC	$\{110\}$	$\langle 111\rangle$	12	Fe _ω , W, Mo, Latón, Nb, Ta
BCC	$\{211\}$	$\langle 111\rangle$	12	Fe _ω , Mo, W, Na
BCC	$\{321\}$	$\langle 111\rangle$	24	Fe _ω , K
HCP	$\{0001\}$	$\langle 1120\rangle$	3	Cd, Zn, Mg, Ti, Be, Co
HCP	$\{1010\}$	$\langle 1120\rangle$	3	Ti (planos prismáticos), Mg, Zr, Be
HCP	$\{1011\}$	$\langle 1120\rangle$	6	Ti, Mg (planos piramidales)

Tabla 3. Sistemas de deslizamientos característicos en diferentes materiales.

3.2. Representación de texturas cristalográficas

La representación de las texturas cristalográficas es una tarea compleja que involucra la descripción en el espacio 3D de miles de millones de granos individuales. A la misma se la puede representar por medio de:

1. Figura de Polos (PF), basada en la proyección estereográfica.
2. Función de Distribución de Orientaciones (ODF) mediante la definición de los tres ángulos de rotación de Euler requeridos para co-orientar una celda unitaria en un sistema de referencia.

3.2.1. Descripción de texturas mediante PF

Las orientaciones preferenciales de los cristales son usualmente descritas por medio de las PF. Estas son simples proyecciones estereográficas que muestran la distribución de direcciones cristalográficas particulares en el ensamble de granos que constituyen el metal. Dicha representación se obtiene de la siguiente forma:

1. La celda unitaria se localiza en el centro del sistema de coordenadas, rodeada de una esfera de radio 1.
2. Para representar las caras de la misma en la proyección estereográfica, se debe determinar el punto de intersección de un vector normal a cada una de las ellas con la superficie de la esfera unidad.
3. Solo las intersecciones 1, 2 y 3 de la hemiesfera superior son tenidas en cuenta.
4. Conectando estos puntos con el polo sur, las intersecciones 1', 2' y 3' determinan el plano ecuatorial.

Por ejemplo, en la Figura 10 se puede observar la relación que existe entre la orientación de la celda unitaria cúbica y los polos $\langle 100 \rangle$ y $\langle 111 \rangle$ sobre una proyección estereográfica.

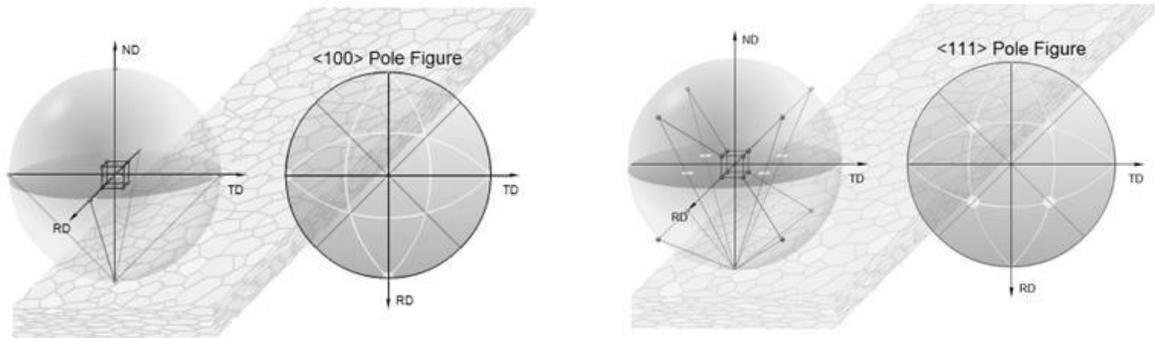


Figura 10. Proyecciones estereográficas $\langle 100 \rangle$ y $\langle 111 \rangle$.

Considerando que los metales son policristalinos, se puede trazar un conjunto de polos para cada grano y luego construir la PF correspondiente. Si los cristales del material poseen una orientación preferencial (Textura Cristalográfica), la PF presentará zonas localizadas de puntos que hacen referencia a las intersecciones mencionadas anteriormente. En las Figura 11 y 12 se muestran dos PF correspondientes a un material no texturado y a otro que presenta una orientación cristalográfica preferencial.

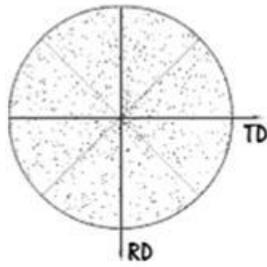


Figura 11. PF $\langle 100 \rangle$, material no texturado.

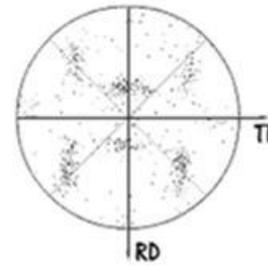


Figura 12. PF $\langle 100 \rangle$, material texturado.

3.2.2. Descripción de texturas mediante ODF

“En la descripción de las componentes de texturas presentes en un policristal, la principal desventaja en utilizar PFs es que ellas no permiten realizar estimaciones cuantitativas de propiedades mecánicas. Solamente entregan una información cualitativa, válida sólo para efectos comparativos”, [7]. Para realizar estudios cuantitativos, se ha desarrollado la teoría de función ODF, a partir de la que sí es posible realizar predicciones cuantitativas de propiedades mecánicas.

Las ODF proporcionan la información más completa en 3D acerca de las texturas cristalográficas que caracterizan a un determinado material, especificando la frecuencia o probabilidad de que una determinada orientación se encuentre en un dado punto del espacio tridimensional de orientaciones de Euler [8]. Cada orientación está descrita por una terna de ángulos φ_1 , ϕ , φ_2 (ángulos de Euler en convención de Bunge) en acuerdo con la Figura 13. Las direcciones principales del laminado son referidas como RD (dirección de laminado), TD (dirección transversal) y ND (dirección normal a la chapa). Asimismo, es usual que la información contenida en una ODF tridimensional sea expresada en función de componentes típicas o fibras en el caso de chapas de aceros. Estas componentes o fibras asocian una intensidad más o menos constante a un grupo de orientaciones relacionadas unas a otras por rotaciones alrededor de una dirección cristalográfica particular. Es característico de los metales BCC describir la textura desarrollada en base a la presencia o ausencia de una determinada componente de textura durante el proceso de laminado, por lo cual resulta útil describir la densidad de orientaciones mediante los “diagramas de fibras”.

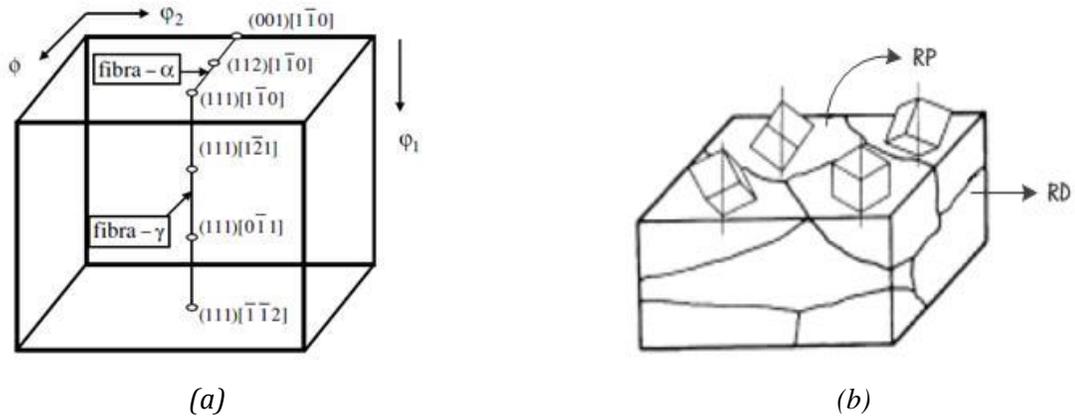


Figura 13. Vista tridimensional del espacio de Euler (convención de Bunge). Se muestran esquemáticamente las fibras α y fibras γ (izquierda) y las orientaciones de texturas pertenecientes a la fibra γ (derecha).

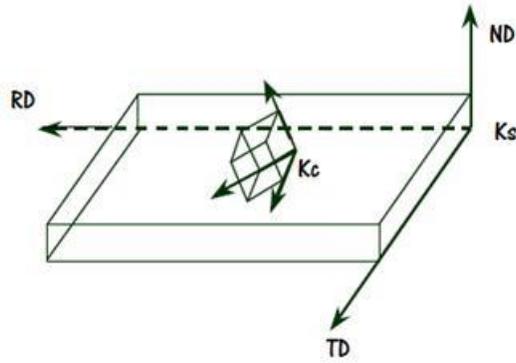
La fibra- α y la fibra- γ se interceptan en la componente $(111)[110]$, siendo ambas visibles en la sección del espacio de Euler $\phi_2 = 45^\circ$. Al describir esta fibra, es suficiente considerar sólo un segmento, por ejemplo desde $\phi_1 = 30^\circ$ hasta $\phi_1 = 60^\circ$. En general, se observa que en las texturas de aceros las máximas intensidades a lo largo de la fibra no se encuentran en la posición exacta de la fibra- γ ideal, sino que desvíos de hasta 15 grados suelen ser frecuentes.

Para describir la teoría de la ODF [9] se deben definir dos sistemas de referencia, tal como se muestra en la Figura 14. Una vez definidos ambos sistemas se postula la existencia de una función g capaz de transformar el sistema de coordenadas de la muestra (K_S) en el sistema de coordenadas del cristal (K_C) a través de:

$$K_C = g \cdot K_S \quad (11)$$

La función g se puede escribir, de acuerdo a la notación de Bunge, a partir de los ángulos de Euler ϕ_1 , ϕ y ϕ_2 como:

$$g = g(\phi_1, \phi, \phi_2) \quad (12)$$



K_c : sistema de referencia del cristal
 K_s : sistema de referencia de la muestra

Figura 14. Sistema de referencia de la muestra y el cristal.

Los ángulos de Euler se obtienen poniendo un sistema de coordenadas variable a partir de rotaciones hechas al cristal original K_c y rotando después sucesivamente para hacerlo coincidir con el sistema de referencia de la muestra, como se aprecia en la Figura 15, según:

- φ_1 : a través del eje z.
- ϕ : a través del eje x (en la nueva orientación).
- φ_2 : rotación alrededor del eje z (en su nueva orientación).

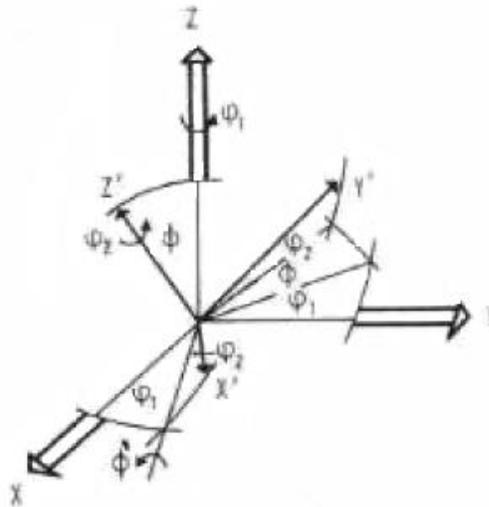


Figura 15. Definición de los ángulos de Euler.

En la Figura 16 se aprecia una configuración policristalina en la que el cristal de volumen V_1 posee una función de orientación g_1 ; el cristal de volumen V_2 posee una función de orientación g_2 y así sucesivamente.

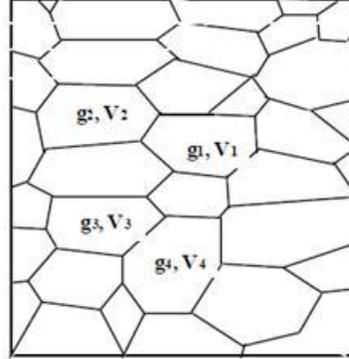


Figura 16. Material policristalino con diversas texturas.

En general, existe una función de distribución de la función g , definida por:

$$f(g)dg = \frac{dV}{V} \quad (13)$$

En que dV/V representa la fracción de volumen de material que posee un valor de la función g comprendida entre g y $g+dg$. Así, en el caso del policristal completo debe cumplirse que:

$$\oint f(g)dg = 1 \quad (14)$$

La función de distribución de orientaciones $f(g)$ puede ser calculada de manera aproximada a través del desarrollo en series de Fourier de armónicos esféricos generalizados a través de tres dimensiones:

$$f(g) = \sum_{l=0}^L \sum_{\mu=1}^{M(l)} \sum_{\nu=1}^{N(l)} C_l^{\mu\nu} T_l^{\mu\nu}(g) \quad (15)$$

Donde $M(l)$ representa el número de funciones independientes de simetría del cristal y $N(l)$ es el número de funciones independientes de simetría de la muestra. Los coeficientes C y T pueden ser calculados a partir de cuatro figuras de polo. Por lo tanto, a partir de las figuras de polo es posible determinar las funciones de distribución de orientaciones.

3.3. Texturas de fibras

Se dice que un material posee textura de fibra cuando ésta se presenta como familias, presentando un nexo entre ellas tal como un plano en común o bien, una dirección cristalográfica. Dos de las texturas en fibras más conocidas son, la fibra γ y la α .

ND o fibra γ : corresponde al conjunto de componentes de texturas en las que los planos $\{111\}$ yacen aleatoriamente sobre el plano de laminado. Por ejemplo: $(111)[110]$, $(111)[123]$, $(111)[112]$. La importancia de la fibra γ radica en que es la textura predominante en aceros recocidos, dando una buena respuesta frente a embutibilidad.

RD o fibra α : corresponde al conjunto de componentes de texturas en que la dirección $[110]$ se mantiene constante y paralela a la dirección de laminación. Por ejemplo: $(001)[110]$ ($\phi=0^\circ$), $(112)[110]$, $(111)[110]$ ($\phi=55^\circ$). La importancia de la fibra α radica en que es la textura preponderante en aceros laminados en frío.

La intensidad de las transformaciones de texturas se puede incrementar por adiciones de ciertos elementos microaleantes al acero, tales como Nb, Ti y V, dando grandes reducciones durante la laminación y utilizando menores temperaturas de fin de proceso [10]. Se puede incrementar la intensidad de componentes favorables que aumenten la embutibilidad mediante la presencia de solutos sustitucionales como lo son el Mn, Ni, Cr, Mo, y por la obtención de más finos (pequeños) tamaños de grano austeníticos en conjunto con la aplicación de elevadas velocidades de enfriamiento durante las transformaciones. Esto conlleva también a mejorar la tenacidad y resistencia del acero.

Tal como expresó Hatherly et al. [11], *“No es raro encontrar texturas de fibras en materiales que han sido deformados por procesos que no son simétricos axialmente y en esos casos puede que los ejes del fibrado de la textura no coincidan con los ejes de deformación principales. Esta situación ocurre a veces en chapas laminadas donde la textura puede ser mejor descrita en términos de varias texturas de fibras”*.

3.4. Efectos de texturas

3.4.1. Aplicación a aceros de bajo carbono laminados

De acuerdo a lo expresado por Signorelli [12], las diferentes orientaciones cristalinas del grano contribuyen a la activación de un determinado conjunto de sistemas de deslizamiento. Estos sistemas activos determinarán los valores de deformación y tensión locales del grano y consecuentemente la deformación y tensión a nivel macroscópico, lo cual a su vez modifica el valor de la deformación límite del material.

En la Figura 17 se observan las PFs $\{110\}$ y $\{200\}$ y la sección de la ODF $\phi_2 = 45^\circ$ recalculadas a partir de las figuras de polos incompletas. Se observa una marcada componente $\{111\}\langle 011\rangle$ y una menos

intensa componente $\{111\}\langle 112\rangle$, dando lugar a una fibra γ completa. Se observa también la presencia de la orientación $\{554\}\langle 225\rangle$ y la ausencia de algunas componentes de la fibra α , mostrando una escasa proporción de componente $\{112\}\langle 011\rangle$, excepto por la $\{111\}\langle 011\rangle$ la cual pertenece también a la fibra γ . La baja intensidad de fibra α es característica de aceros de bajo carbono sometidos a un proceso de recocido posterior al laminado en frío. En este tipo de procesos la fibra α y la fibra γ se transforman en una muy intensa fibra γ y componente $\{554\}\langle 225\rangle$.

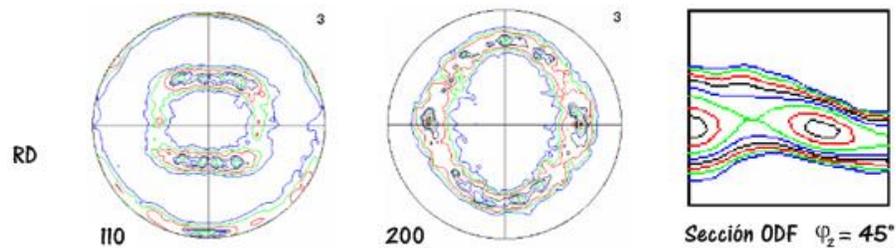


Figura 17. PFs $\{110\}$ y $\{200\}$ y sección de ODF experimentales.

La deformación plástica es acomodada por deslizamiento según tres modos potencialmente activos: $\{110\}\langle 111\rangle$ (12 sistemas), $\{112\}\langle 111\rangle$ (12 sistemas) y $\{123\}\langle 111\rangle$ (24 sistemas), dando un total de 48 sistemas. La activación de los diferentes sistemas de deslizamiento está fuertemente asociada a las tensiones críticas de activación τ_c^s . En consecuencia, la anisotropía plástica dependerá de la relación entre estos valores.

3.4.2. Evolución de la textura durante la recristalización

Como comenta De Cock [13], la textura que posee el acero es el resultado de los diferentes tratamientos termomecánicos a los que éste fue sometido. Durante el proceso de laminación en caliente se destruye la estructura de colada y se mejoran las propiedades mecánicas debido a fenómenos de recristalización que tienen lugar durante la deformación del acero a elevadas temperaturas. Finalizada esta primera etapa, el material se lamina en frío para realzar propiedades como resistencia y tenacidad, y finalmente se somete a un tratamiento de recocido para mejorar ductilidad y potenciar su posterior uso frente a procesos de deformación que le darán al mismo su aspecto final, de acuerdo con los requerimientos planteados. Es por ello y considerando los distintos estadíos en los cuales el acero está sometido a sollicitaciones mecánicas y térmicas, que la textura del mismo sufre modificaciones, las cuales pueden ser interpretadas evaluando el esquema de la Figura 18.

En esta última se relaciona el tipo de textura con el mecanismo de nucleación durante la recristalización del acero: procesos que involucran el crecimiento anormal de subgranos durante el

tratamiento térmico darán lugar a núcleos de baja energía almacenada, mientras que núcleos originados en bandas de deformación tendrán orientaciones concentradas alrededor del componente Goss [14, 15]. El mecanismo de nucleación por coalescencia de subgranos producirá granos recristalizados pertenecientes a la fibra γ (nucleación de alta energía), mientras que la nucleación alrededor de la cementita dará lugar a granos con orientaciones aleatorias.

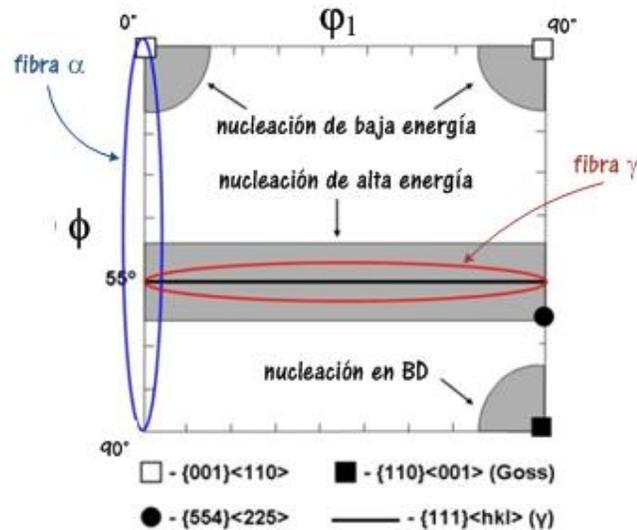


Figura 18. Principales orientaciones y mecanismos de nucleación asociados. BD: bandas de deformación [13].

4. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DIAGRAMA LÍMITE DE CONFORMADO

Para poder predecir el límite máximo de deformación que admitirá un material, es de mucha utilidad construir el diagrama límite de conformado. En el mismo se grafican las deformaciones mayores y menores sufridas por el material cuando se lo somete a ensayos de estirado mecánico o embutido, haciendo variar la geometría de las muestras para poder así obtener la totalidad de la curva allí representada. De este modo se obtienen estados de deformación uniaxial, de deformación plana y se llega hasta estados que se aproximan a los de biaxialidad equilibrada. Mediante estos diagramas es posible predecir el comportamiento de los materiales debido a que en ellos se asocia un límite de conformado, por encima del cual el material es más propenso a fallar, sea mediante la generación de estricciones (difusas y localizadas) o bien, por la aparición de una fisura sobre el material.

La determinación del límite de conformabilidad de los materiales es de suma importancia, y surge debido a la necesidad de identificar un límite que evite la formación de defectos (estricciones localizadas, arrugas, piel de naranja, grietas, etc) sobre el producto conformado. En todo momento se busca la satisfacción de cliente, y la presencia de chapas con defectos, además de las pérdidas que eso origina para las empresas, lleva a la no conformidad por parte de los mismos.

Determinar dicho límite no es tarea sencilla. Previamente se debe grabar sobre la superficie de la chapa un enrejado circular que será el que permita cuantificar las deformaciones sufridas por el material una vez que el mismo ha sido ensayado (ver punto 6 del presente capítulo).

Actualmente los dos métodos empleados para determinar el límite de conformabilidad de un determinado material son:

1. Considerando zonas afectadas por localización de la deformación.
2. Incluyendo información sobre zonas fracturadas.

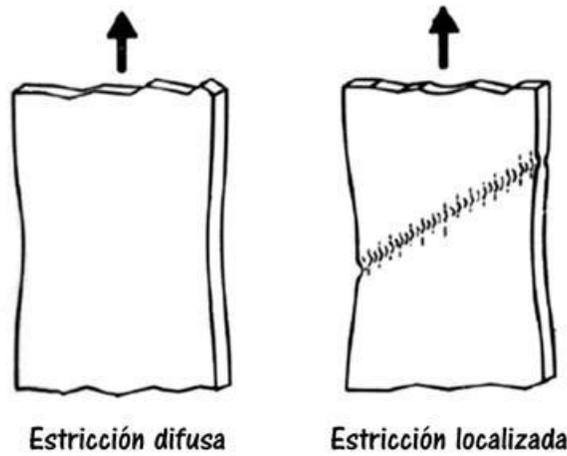


Figura 19. Representación de la estricción difusa (izquierda) y localizada (derecha).

En la Figura 19 se muestran los dos tipos más comunes de estricción: la estricción difusa (llamada así porque su extensión es mucho mayor que el grosor de la chapa), y la estricción localizada (a través del adelgazamiento del espesor), la cual termina en fractura final. La estricción localizada ocurre cuando el estado de tensión tiende a incrementar el área de superficie de la chapa en decremento de una reducción del espesor. Una vez que se inició la misma, la deformación del material se concentra en ella y la deformación se vuelve heterogénea. Por lo tanto, la estricción localizada es un fenómeno muy importante en la determinación en la cantidad de deformación útil que puede imponerse a una pieza.

Pero para poder obtener la representación gráfica del DLC es necesario cuantificar las deformaciones que se generan en el material una vez que éste ha sido ensayado. Para ello, se debe grabar la superficie metálica del acero y una vez que la chapa metálica ha sido deformada, medir los diámetros principales (mayor y menor) de los círculos deformados (Figura 20), de acuerdo al estado de deformación alcanzado.

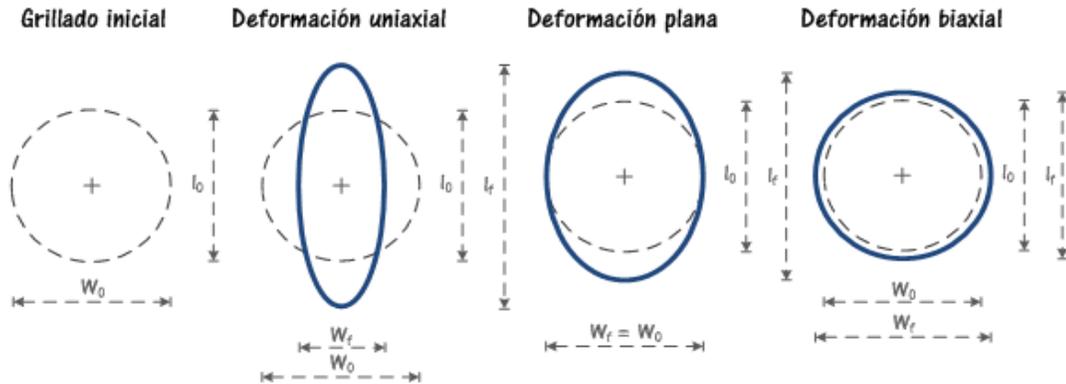


Figura 20. Cambios posibles en la forma del patrón de grillado causados por las operaciones de conformado sobre láminas metálicas.

Luego de obtenida la pieza por medio del ensayo de embutido o de estirado mecánico, se deberán medir aquellos círculos que resulten críticos de acuerdo al criterio de selección optado. Esto es, se medirá el cambio de longitud inicial (l_0) a longitud final (l_f), y de ancho inicial (w_0) a final (w_f) experimentado por los círculos. Ambas medidas deberán ser tomadas a 90° cada una de ellas, de acuerdo con la representación de la figura anterior.

Las deformaciones mayores (ε_1) y menores (ε_2) experimentadas se determinan por medio de las siguientes fórmulas:

$$\varepsilon_1 = \ln \left(\frac{l_f^{(1)}}{l_i} \right) \quad ; \quad \varepsilon_2 = \ln \left(\frac{l_f^{(2)}}{l_i} \right) \quad (16)$$

Los valores obtenidos referidos a condiciones de rotura y/o presencia de estricción en las elipses medidas, dan las condiciones de “falla del material”. En cambio, las mediciones sobre las elipses deformadas de manera homogénea, indican zonas de “deformaciones seguras”.

Una vez seleccionados los círculos deformados de interés y calculadas las deformaciones ε_1 y ε_2 , se llevan los datos a una planilla de cálculo y se grafican las deformaciones correspondientes. En la Figura 21 se marcan los caminos de deformación que se utilizarán luego para determinar el DLC.

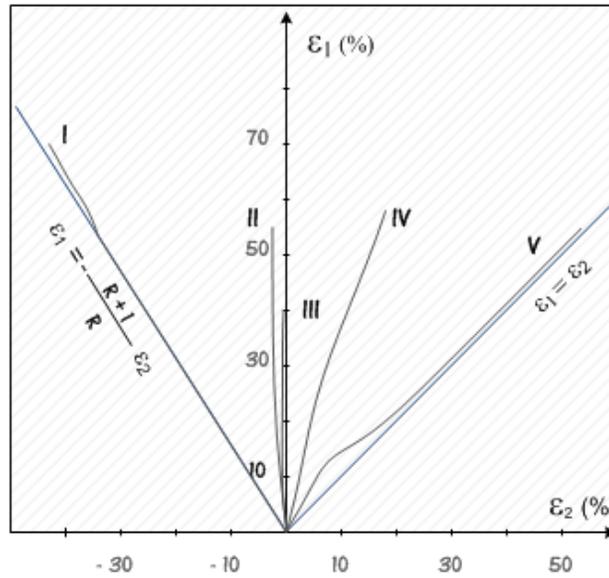


Figura 21. Curva Límite de Conformado (CLC).

La pendiente del camino de deformación correspondiente a tensiones uniaxiales sigue la siguiente relación:

$$\varepsilon_1 = -\frac{1+R}{R} \varepsilon_2 \quad (17)$$

En cambio, la pendiente que se tiene cuando se trabaja con deformaciones equi-biaxiales (Bulge Test) es igual a:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (18)$$

Los caminos de deformación situados entre estos dos valores límites se logran utilizando probetas con diferentes geometrías. Una vez marcadas las trayectorias de deformación, se estará en condiciones de trazar la CLC. Se debe saber interpretar muy bien los círculos de las rejillas, ya que permite a los ingenieros comparar como el material puede deformarse - contraerse, doblarse y tensarse - contra lo que se espera del mismo en el troquel. Luego, al graficar las deformaciones mayores y menores, se obtiene la CLC correspondiente.

Estas curvas son muy útiles para evaluar cual es el desempeño que juega la carga aplicada en base a un análisis exhaustivo de la deformación que sufre la chapa metálica. Mediante un profundo conocimiento de la curva y de las variables que intervienen en dicha gráfica, se podrá aumentar la productividad, ahorrar material y reducir rechazos de clientes.

4.1. Factores que afectan la curva límite de conformado

Las variaciones que se producen en las CLCs, sean de altura como de mayor extensión en cualquiera de sus ramas, son atribuibles a ciertos factores inherentes tanto al proceso de solidificación y al historial de deformación del material base, como a parámetros del proceso de estirado mismo. Factores tales como la presencia de imperfecciones (inclusiones, reducción de espesor, reducción de la resistencia debido a la segregación de elementos endurecedores, etc) y la velocidad con la que se efectúa el ensayo son de considerable interés [16]. Pero son la anisotropía plástica, el endurecimiento por deformación y la textura del material, los factores que más ponen de manifiesto variaciones en las curvas límites.

Uno de los puntos de la CLC de mayor importancia es el denominado punto CLC_0 , el que se encuentra íntimamente ligado con el valor del endurecimiento por deformación del material. El punto CLC_0 representa la mínima deformación admisible por éste para condiciones de deformación plana, $\epsilon_2=0$. Dicho valor se determina por la intercepción de la curva límite con el eje de las deformaciones mayores, como se observa en la Figura 22.

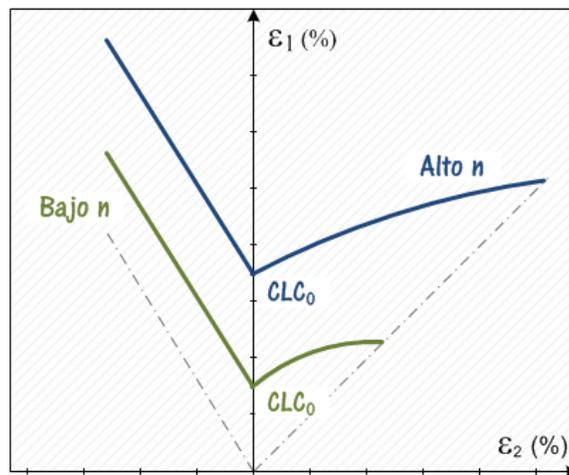


Figura 22. Variación en las FLDs para dos diferentes coeficientes de endurecimiento.

A medida que el exponente n disminuye, también lo hace la CLC. Si lo que se quiere es estirar biaxialmente una chapa de acero con el fin de obtener una forma deseada, será necesario trabajar con materiales que posean un alto coeficiente n , que permita estirarlo lo suficiente (deformarlo) sin generar en el mismo ningún tipo de defecto localizado. Como se aprecia en la Figura 23 a medida que se incrementa dicho exponente, disminuye la pendiente de la curva CLC [3]. Allí se comparan dos tipos de acero y un material no ferroso, todos con distintos n .

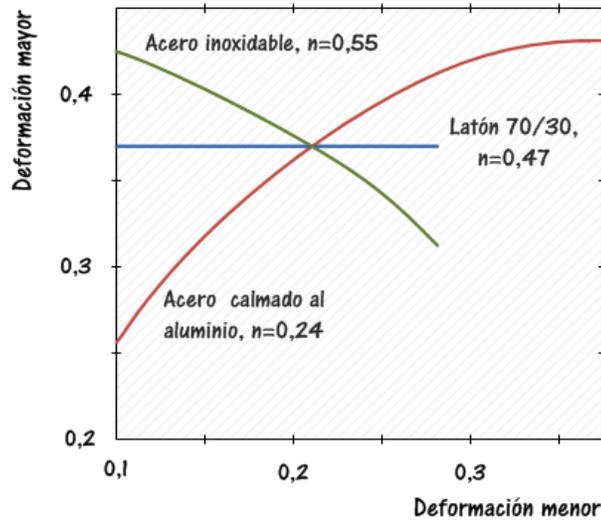


Figura 23. Influencia del valor de n en la pendiente de la CLC.

Como comenta Charca et al. [17], los principales parámetros mecánicos que afectan la formabilidad de las chapas metálicas son R y n . Debido a ello y como es de esperar, la influencia de los mismos sobre la localización del punto de deformación menor igual a cero ($\varepsilon_2=0$) tiene importancia absoluta. Se ha encontrado experimentalmente que el nivel de la CLC se incrementa con el espesor de la chapa. Keeler y Brazier aproximaron este efecto mediante el empleo de las siguientes fórmulas:

$$CLC_0 = n(1 + 0,72t) \quad \text{para } n \leq 0,2 \quad (19)$$

$$CLC_0 = 0,2(1 + 0,72t) \quad (20)$$

donde t es el espesor de la chapa en mm.

Las Figuras 24(a) y 24(b) muestran el efecto que poseen variaciones de R y n sobre el punto CLC_0 .

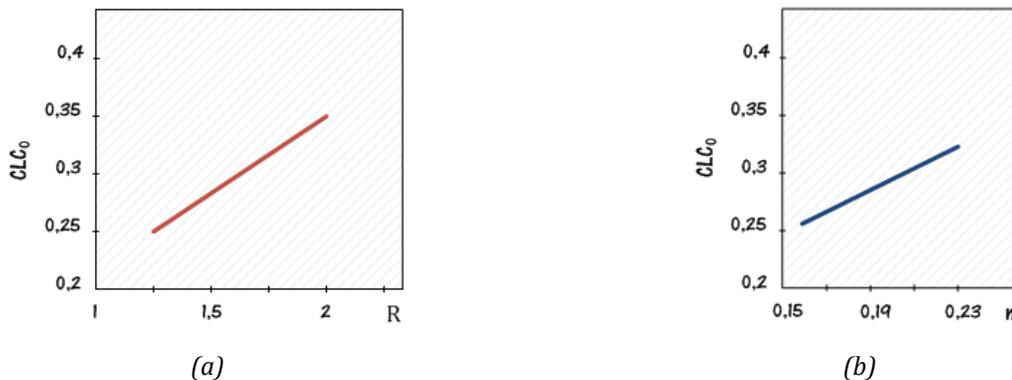


Figura 24. Variaciones experimentada por el punto de deformación plana cuando varía: (a) R y (b) n .

En contraste con lo dicho hasta aquí, se ha reportado que los valores de n superiores a 0,2 poseen bajo efecto sobre el valor de deformación mínimo en las CLCs. Por lo tanto, es el valor de anisotropía el parámetro que se vuelve más crítico al momento de evaluar la formabilidad de las chapas de acero.

4.1.1. El rol del lubricante

La formabilidad de las chapas metálicas se encuentra limitada por la aparición de defectos localizados o de deformaciones no uniformes que ocurren dentro de una pequeña región en el plano de la chapa. Es por ello que la cantidad de deformación que una chapa metálica puede tolerar justo antes de la generación de la estricción, se llama deformación límite [18]. Diferentes factores inherentes tanto a las propiedades de material como al proceso en si mismo afectan a las CLCs; ellos son: el exponente de endurecimiento por deformación, la constante de anisotropía [19], la geometría de la herramienta, la sensibilidad a la velocidad de deformación [20], el tamaño de grano [21], los cambios en los caminos de deformación [22] y el efecto de la fricción.

En el conformado de las chapas, más precisamente en el embutido profundo, la fricción juega un rol muy importante debido a que incide sobre la capacidad de embutido y estirado, aumenta las fuerzas, así como el desgaste de las herramientas, afectando la calidad superficial del producto obtenido. Generalmente para aplicaciones generales, los lubricantes de uso común son aceites minerales, soluciones de jabón y emulsiones que reducen las fuerzas de fricción durante el embutido evitando adelgazamientos excesivos.

Su selección también está influenciada por la facilidad en su colocación y extracción, temperatura de trabajo y por el poder corrosivo del mismo. Con respecto a este último punto, por ejemplo, las aleaciones de cobre son susceptibles a mancharse por lubricantes que contienen grandes cantidades de azufre o compuestos de cloro. Los lubricantes que contienen compuestos de cinc o plomo no se recomiendan para el embutido de aceros inoxidables, ni tampoco para las aleaciones resistentes a elevada temperatura, porque si los compuestos no son removidos totalmente, puede causar corrosión intergranular cuando la pieza de trabajo es tratada térmicamente o colocada en servicio a elevada temperatura [23].

En general, a medida que la eficacia del lubricante aumenta, también lo hace la dificultad para extraerlo. Por ejemplo, tanto la grasa como el aceite pueden ser removidos fácilmente, pero muchas veces se requieren de procedimientos especiales para poder remover lubricantes que contienen óxido de cinc, sulfuro de molibdeno o grafito.

Otra consideración a tener en cuenta es que cualquier lubricante debe permanecer estable cuando es almacenado por un período de varios meses bajo gradientes de temperaturas.

Los trabajos experimentales llevados a cabo por Moshksar et al. [18] demuestran el efecto benéfico que posee el trabajar con agentes lubricantes sobre chapas de aluminio. Allí se demuestra que la fricción contribuye a la deformación *out-of-plane*, debido a que la misma demora la localización del flujo plástico sobre el punzón. El efecto de la lubricación se puede observar en la Figura 25.

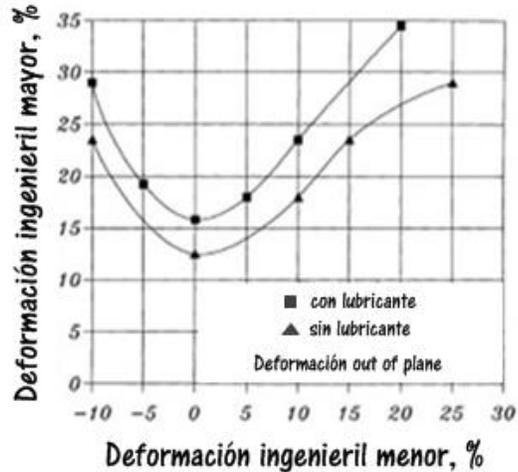


Figura 25. Influencia del lubricante sobre la CLC out-of-plane.

Como bien se sabe, la lubricación disminuye la fricción, posibilitando mayor deformación. La disminución de la fricción causa que la localización del flujo se concentre y se dirija al polo de la pieza, y consecuentemente allí ocurra la fractura, Figura 26.

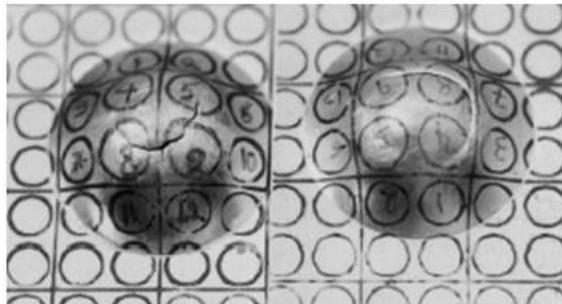


Figura 26. Comparación del sitio de fractura en muestras de 80 mm de ancho con y sin agente lubricante, izquierda: con lubricante, derecha: sin lubricante.

Como se desprende de la observación de la figura anterior, la localización de la fractura para la muestra con lubricante se encuentra más cercana al polo que la de la muestra sin lubricante.

4.1.2. Criterios de fluencia – Efecto de la anisotropía en la razón máxima de embutido

Son varias las teorías utilizadas para determinar la tensión a partir de la cual un material comienza a deformar plásticamente bajo la acción de una carga. Con tan sólo tres años de diferencia, Bassani, Gotoh y Hosford propusieron diferentes relaciones matemáticas para definir su propio criterio; Tresca y Von Mises lo plantearon para materiales isotrópicos, representando una aproximación razonable del comportamiento experimental observado. Pero es la ecuación de Hill la que mejor describe el límite de fluencia de los aceros de estructura ferrítica BCC.

Para determinar la fluencia plástica de materiales anisotrópicos, Hill (1948) modificó la ecuación de von Mises de la siguiente manera [3]:

$$F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (21)$$

donde F, G, H, L, M y N son constantes que describen la anisotropía en la ecuación de Hill.

Para el caso especial donde x, y, z sean direcciones principales ($\tau_{yz} = \tau_{zx} = \tau_{xy} = 0$), la ecuación anterior puede ser expresada de la siguiente forma:

$$F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 = 1 \quad (22)$$

Realizando las sustituciones correspondientes y continuando con la deducción, se llega a obtener la ecuación 23 que se usa a menudo con un promedio de R en análisis de materiales que tienen propiedades que no son simétricas rotacionalmente en base a la normal de la chapa. Si bien este procedimiento no es estrictamente correcto, a menudo es útil para evaluar el papel de la anisotropía normal.

$$(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + R(\sigma_x - \sigma_y)^2 = (R + 1)X^2 \quad (23)$$

Las predicciones de los DLC son muy sensibles al criterio de fluencia adoptado. En la Figura 27 se muestra que los DLC calculados con el criterio de fluencia de Hill son muy dependientes del valor de R , aunque esto no está de acuerdo con las observaciones experimentales realizadas.

Las ecuaciones precedentes pueden generalizarse para criterios de fluencia de más alto exponente ($a \geq 2$).

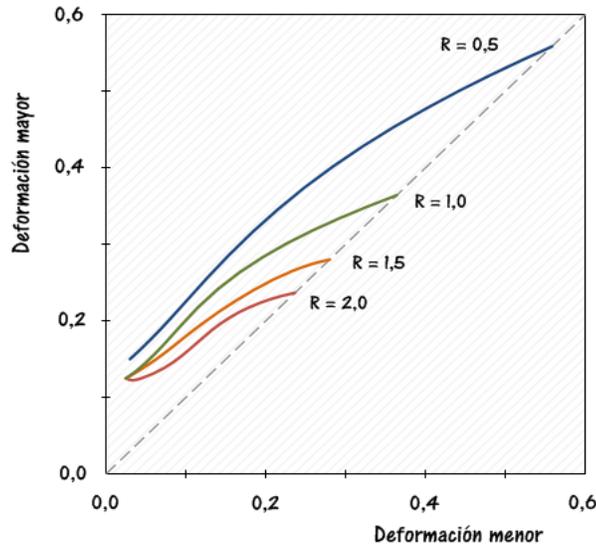


Figura 27. Diagramas Límite de Conformado calculados para varios valores de R utilizando el criterio de Hill (1948).

De la Figura 28 se desprende que utilizando un alto valor del exponente de Hill, prácticamente no hay una dependencia calculada sobre el valor de R.

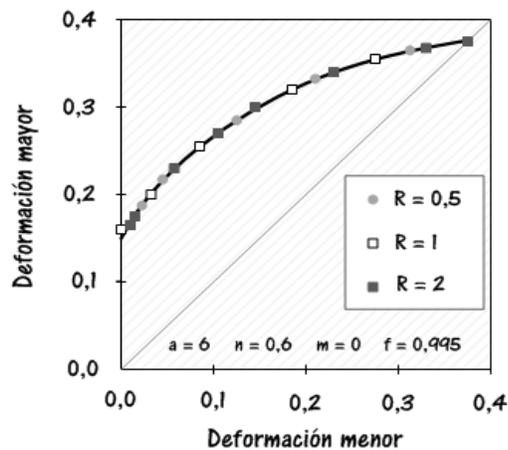


Figura 28. Diagramas Límite de Conformado calculados para varios valores de R utilizando $a = 6$ como exponente del criterio.

La textura del material es uno de los factores que, junto con la anisotropía, afecta significativamente la formabilidad de las chapas metálicas. La respuesta mecánica del material queda condicionada por la textura morfológica y cristalográfica desarrollada durante los procesos de solidificación, recristalización o transformación de fases que sufre el acero durante las distintas etapas en su procesamiento, debido a la activación de determinados conjuntos de sistemas de deslizamiento que hacen a la deformación de los granos del material. Los materiales poseen de acuerdo a su estructura

cristalina, una textura de embutido ideal, como es el caso de los materiales BCC cuando una gran cantidad de sus granos se encuentran orientados con sus planos {111} paralelos al plano de la chapa (conocida como fibra γ). Desde este punto de vista, metalúrgicamente se puede mejorar la embutibilidad de los aceros calmados al aluminio (como es el caso del material empleado en este proyecto) mediante la realización de los tratamientos termomecánicos correspondientes. En este tipo de aceros, mediante reducciones de hasta el 75% en la laminación en frío, se logran cambiar y obtener los planos cristalográficos correspondientes a la familia {111}, y además evita la pérdida de ductilidad que se produce durante el envejecimiento de la chapa. En estos aceros que también poseen elevado contenido en N_2 , el Al tiende a combinarse con el N_2 en solución y formar nitruros de aluminio (AlN), los cuales mediante un tratamiento adecuado pueden impedir el crecimiento de los granos durante el recocido de la chapa a través de la precipitación de los mismos en borde de grano, conservando la microestructura de granos alargados producida durante el laminado en frío. Esta estructura aumenta la embutibilidad del material.

4.1.3. Otros factores a tener en cuenta sobre la ubicación de la curva límite

Como comenta Akoy et al. en su trabajo sobre aceros ferríticos [24], las variaciones del punto CLC_0 también pueden ser debidas a la microdureza del material, a su tensión de fluencia y UTS, ductilidad y profundidad del punzonado. Defectos e inhomogeneidades tales como variaciones locales en el espesor de la chapa, composición, tamaño de grano o cualquier otro factor que afecte la fluencia del material producen una disminución en la CLC.

También existe evidencia de que la medición de las deformaciones límites depende del tamaño de la grilla utilizada para medir las deformaciones [3]. El criterio de selección de los puntos de la CLC es otro aspecto a tener en cuenta debido a que produce variaciones de nivel en las mismas.

5. CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA LÍMITE DE CONFORMADO

5.1. Ensayos mecánicos

Para poder inferir aspectos del comportamiento de los aceros frente al estampado real, se han desarrollado varios tipos de ensayos.

Según el modo de deformación predominante, los ensayos son clasificados en: “tracción uniaxial”, “expansión biaxial”, “estampado” y “mixtos”. En la Tabla 4 se detallan algunos de los más importantes.

Tracción uniaxial	Ensayos de Expansión		Ensayos de Estampado	Ensayos Mixtos
	Biaxial			
Probetas extraídas a 0°, 45° y 90° respecto de la dirección de laminación	Jovignot		Swift	Ericksen-Olsen
	Bulge Test		Schmidt	Engelhardt
	Perso			Fukui Renault

Tabla 4. Ensayos utilizados para evaluar la conformabilidad del acero.

5.1.1. Ensayo de acopado hidráulico

Con esta prueba de tipo hidráulica, se ensayan chapas en tensión biaxial. El ensayo consiste en fijar un disco delgado en sus bordes y mediante un fluido someter al mismo a una presión sobre uno de sus lados. Se utilizan máscaras elípticas con distintas relaciones de diámetros para obtener trayectorias de deformación diferentes, Figura 29.

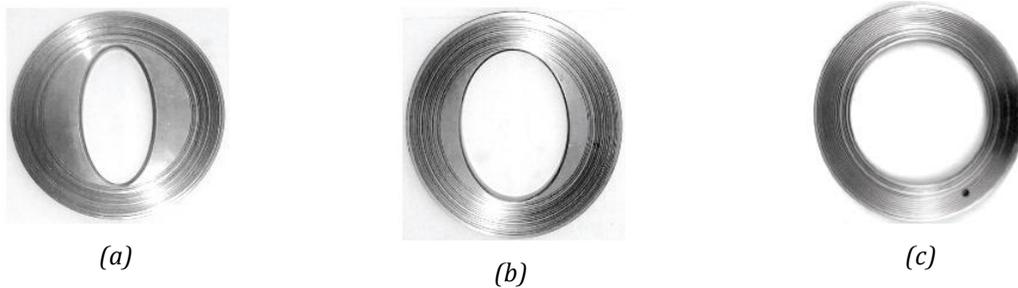


Figura 29. Máscaras utilizadas en los ensayos: (a) $D_{mayor}/D_{menor}=0,5$; (b) $D_{mayor}/D_{menor}=0,75$ y (c) $D_{mayor}/D_{menor}=1$. [25]

Como se aprecia en la Figura 30, a medida que la chapa se va inflando, la región cercana al domo se vuelve casi esférica, [3].

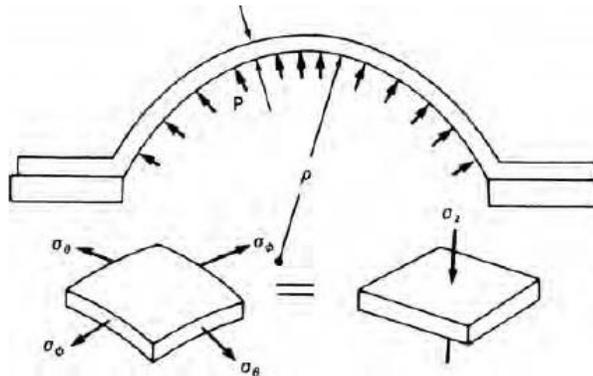


Figura 30. Esquemización del ensayo de acopado hidráulico.

Los esfuerzos de tracción son:

$$\sigma^- = \sigma_\theta = \sigma_\phi = \frac{P\rho}{2t} \quad (24)$$

donde P es la presión, ρ es el radio de curvatura, y t es el espesor. La deformación efectiva se define a través de:

$$\varepsilon^- = -2\varepsilon_\theta = 2\varepsilon_\phi = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (25)$$

Es necesario medir la deformación para encontrar el espesor t . Duncan desarrolló un dispositivo especial para medir ρ . La ventaja del ensayo hidráulico es que se puede llevar a cabo a mayores deformaciones que las representadas en un ensayo de tracción convencional.

5.1.2. Ensayos tipo Nakazima y Marciniak

El ensayo Nakazima utiliza un punzón hemiesférico para conformar las muestras por estirado mecánico (Figura 31). Debido a que la deformación sigue la curvatura del punzón, a esta técnica también se la denomina “*out-of-plane*”.

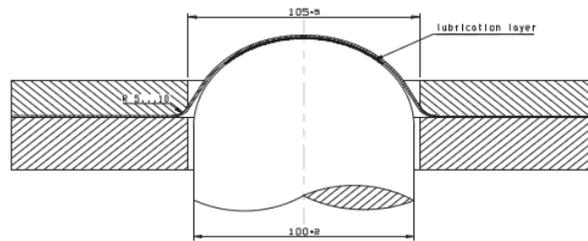


Figura 31. Geometría Nakazima.

Para efectuar los ensayos y tratar de minimizar el efecto que produce la fricción en la interfaz punzón-material, se utiliza una capa o varias de agentes lubricantes. El ensayo será válido sólo si la fisura se genera en el domo de la pieza, a una distancia +/- 15% del diámetro, [26].

En cambio, en el ensayo Marciniak (o técnica “*in-plane*”) se emplea un punzón plano como el representado en la Figura 32. La deformación se produce sobre la superficie plana de la muestra deformada y aquí es necesario emplear una contrachapa para lograr una distribución homogénea de deformaciones entre el material a ensayar y el punzón, la que debe tener un mayor grado de deformación que el material a ensayar. La contrachapa, perforada en su centro, permite evitar el rozamiento entre el punzón y la chapa a ensayar.

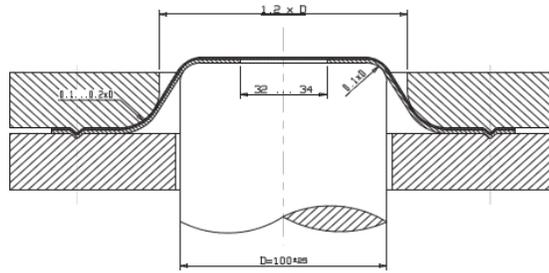


Figura 32. Geometría Marciniak.

Como se comenta en el punto siguiente, para el desarrollo del presente proyecto se trabajó con ensayos de estirados de tipo Nakazima.

5.1.3. Ensayo de estirado mecánico: adaptación del ensayo Nakazima

El estampado mecánico es el proceso de trabajo de los metales que consiste en obtener, mediante la acción de un punzón, la geometría de la pieza deseada. Los ensayos de estirado que se llevan a cabo en este proyecto se realizan colocando la probeta sobre una matriz de forma adecuada y prensando el metal contra ella mediante un punzón hemiesférico, Figura 33. Generalmente es necesario fijar la pieza en bruto contra la matriz, para lo que se emplea un anillo sujetachapas o prensachapas sobre el que actúa el segundo efecto de la prensa.

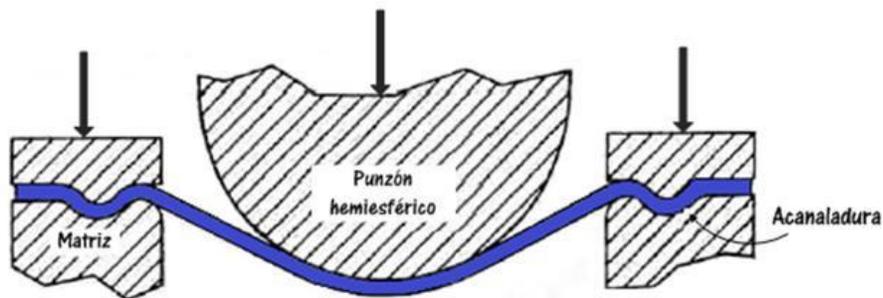


Figura 33. Esquema ilustrativo del ensayo de estirado.

6. DETERMINACIÓN DE DEFORMACIONES LÍMITES

6.1. Procedimiento de grillado

El análisis de las deformaciones juega un rol muy importante en la construcción y evaluación de los diagramas límites de conformado. Mediante los mismos es posible predecir las condiciones críticas de tensiones que llevan a que el material desarrolle estados de deformaciones heterogéneas originando la aparición de defectos localizados sobre la superficie. Un método práctico que permite seguir el estado de deformación de un material es a través del grillado de círculos sobre la superficie del mismo. La disposición de cada uno de los componentes del equipo se muestra en la Figura 34.

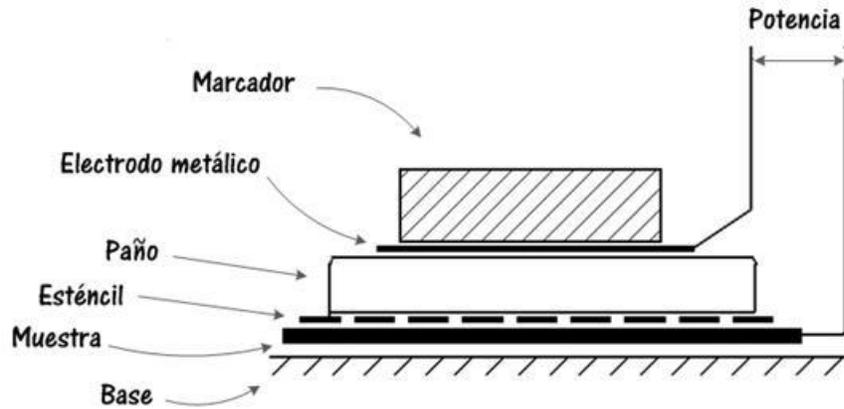


Figura 34. Equipo de grillado electrolítico.

Se debe tener en cuenta que la calidad del grillado obtenido sobre las probetas influye de manera notable sobre las mediciones posteriores. Es por ello que a la hora de realizar el grillado, hay que tener en consideración una serie de recomendaciones. Ellos son:

- **Correcta selección del electrolito para el metal que será marcado**, debido a que existen diferentes químicas de los mismos y cada uno de ellos sirve para cubrir un cierto espectro de materiales.
- **Ajuste de los parámetros de intensidad de corriente y voltaje**. Si alguno de estos parámetros no se ajusta de la manera correcta, pueden ocurrir eventualidades como lo son la rotura del esténcil, o bien, la obtención de un grillado discontinuo y difuso.
- **Un esténcil adecuado que contenga la imagen que será grillada**.
- **El mejor marcador de mano que se adecue a la aplicación**. Para el desarrollo del presente trabajo, se utilizó un marcador de mano de geometría convexa capaz de impartir una presión homogénea sobre la superficie de la muestra.

6.2. Diseños de grillas utilizadas para evaluar deformaciones

El tamaño de la cuadrícula recomendada es de aproximadamente unas veces mayor que el espesor del material (este tamaño está relacionado con el espesor del mismo debido al ancho de la estricción, [27]). Diámetros de 2,54 mm y 5,08 mm son de los de mayor uso hoy en día, aunque dependiendo de factores tales como dimensiones de la pieza y espaciado entre los círculos, se puede llegar a trabajar con diámetros de 2 mm y hasta 1 mm.

Dos aspectos a tener en cuenta para obtener un buen grillado son que éste posea un muy buen contraste (que facilitará las mediciones de los ejes principales de los círculos deformados) y que no afecte y/o cambie la microestructura del material base.

Existen en el mercado actual diferentes diseños de grillas para poder determinar las deformaciones de las chapas metálicas, Figura 35.

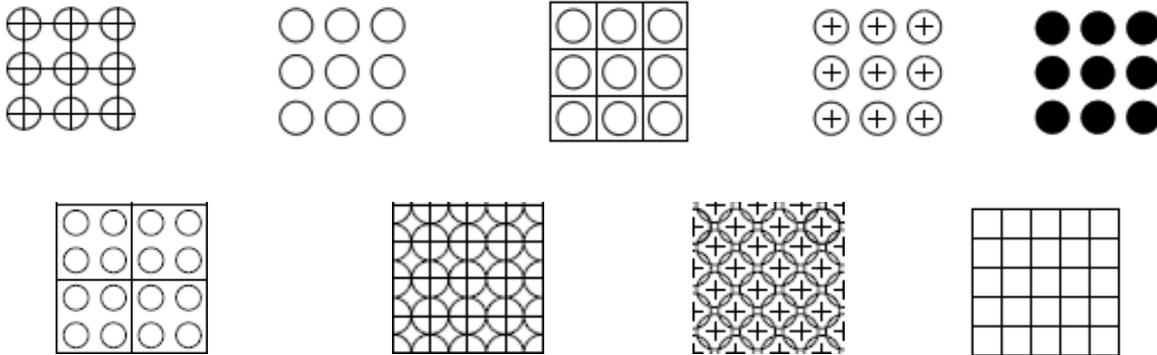


Figura 35. Ejemplo de grillados circulares y cuadrados.

Por lo tanto, existe más un diseño (posible) aplicable para poder establecer las deformaciones durante los ensayos de estirado mecánico. Los dos extremos para tal situación lo constituyen el grillado con círculos y el que posee sólo retículos cuadrangulares. Entonces, ¿Cuál debe elegirse para una aplicación en particular?

El diseño cuadrangular se encuentra cada vez más en desuso. Primeramente cuando se trabaja con éste, lo que se debe hacer es medir las longitudes l_1 y l_2 características del propio diseño, como se aprecia en la Figura 36(a).

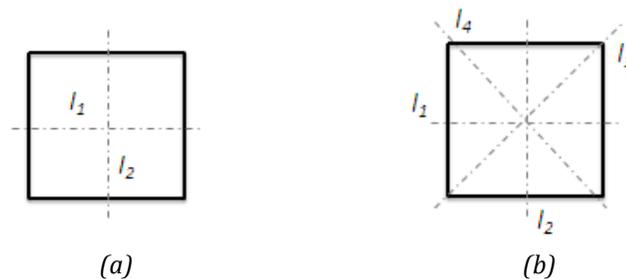


Figura 36. Diferentes formas de medir las longitudes características de un cuadrado.

Una vez realizados los ensayos de estirado mecánico, previa medición de las longitudes iniciales del grillado, se podrán presentar tres casos distintos de deformación del mismo de acuerdo a lo expresado por la Figura 37:

- Cuando el material ha sido deformado en presencia de tensiones uniaxiales, el cuadrado inicial se deformará como se observa en la Figura 37(a), donde la identificación de las longitudes principales (referidas a las longitudes l_1 y l_2) se determinan con facilidad.

- En el caso (b) sucede algo similar, pero aquí las mediciones que posterior a la deformación deberán llevarse a cabo son las de las diagonales (no medidas inicialmente) – ver Figura 37(b).
- En el caso representado en (c) se tiene el porqué del menor uso que posee este diseño. Al sufrir el material deformaciones biaxiales no equilibradas, se hace imposible poder determinar cuáles de las longitudes medidas inicialmente hacen referencia a las longitudes finales obtenidas.

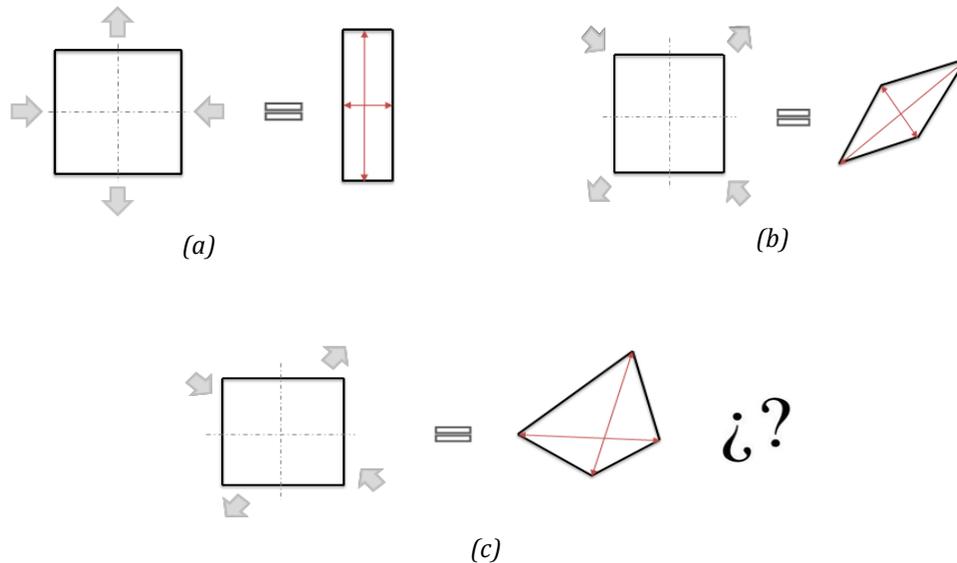


Figura 37. Forma y tamaño de la grilla.

Debido a ello, es que el uso del grillado cuadrangular se está reemplazando por el circular.

Ahora bien, evaluando solamente el reticulado circular, la primera pregunta que uno debe hacerse al momento de grillar un material es que tipo de diseño es el más adecuado para la aplicación en cuestión, es decir, si este se hará utilizando círculos entrelazados o bien separados entre si, que diámetro del grillado será el adecuado, etc.

- **Círculos separados:** se miden generalmente longitudes h_1 mucho mayores que las correspondientes al caso de los círculos entrelazados. Además, debido a que quedan espacios libres entre los círculos del grillado, se pierde información acerca del comportamiento de la estricción y/o grieta en esos sectores, Figura 38(a).
- **Círculos entrelazados:** este diseño permite acotar más al sector que posea la presencia de una estricción y/o fisura y analizarlo en detalle para posteriormente determinar las deformaciones que ha sufrido el material. Siempre se encontrará un camino en el cual se deba recorrer una distancia h_1 menor para medir las longitudes principales deformadas, en comparación con el grillado de círculos separados entre sí.

Si se comparan ambos procedimientos de grillado con el análisis posterior de la estricción y/o fisura, se puede notar que se obtendrán más datos para el caso de círculos entrelazados debido a que entre cada elipse la cantidad de “espacios vacíos” por los que puede llegar a pasar cualquier defecto es menor que en el caso de los círculos separados entre si.

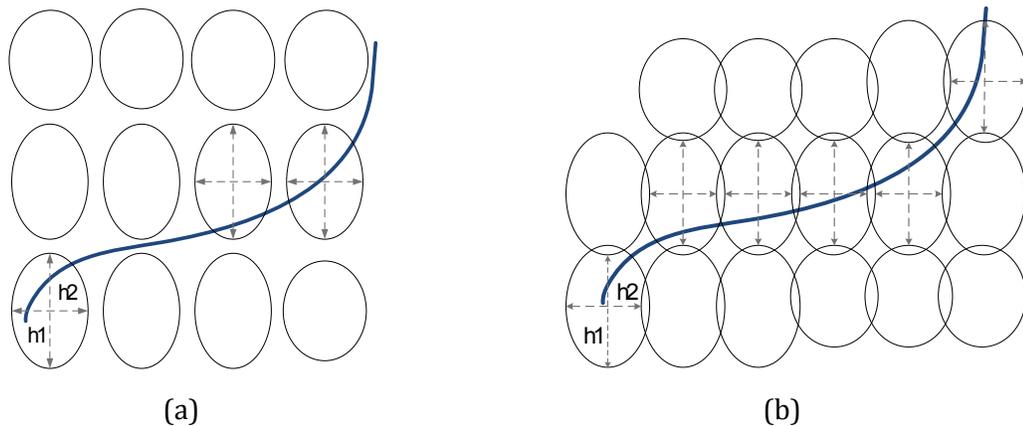


Figura 38. Comparación de dos diseños de grillas; (a) Círculos separados por una distancia “d”, (b) Círculos entrelazados – ambos posterior a la deformación.

El otro tema a considerar es el tamaño del círculo grillado. Las dimensiones más utilizadas son de $1/10$ ” (2,54 mm) y la de $1/5$ ” (5,08 mm). Pero, ¿Cuál conviene usar? Todo dependerá básicamente de las dimensiones de la pieza con la que se trabaje. Es decir, si se quiere evaluar la capacidad de conformabilidad que posee el capot de un auto cuando se lo estampa, lo usual será utilizar un diámetro de grillado más grande (Figura 39-a) que si lo que se desea es ensayar una probeta de pequeñas dimensiones a escala de laboratorio (Figura 39-b). El factor dominante para estos casos será la cantidad de mediciones que serán necesarias efectuar sobre la pieza ensayada.

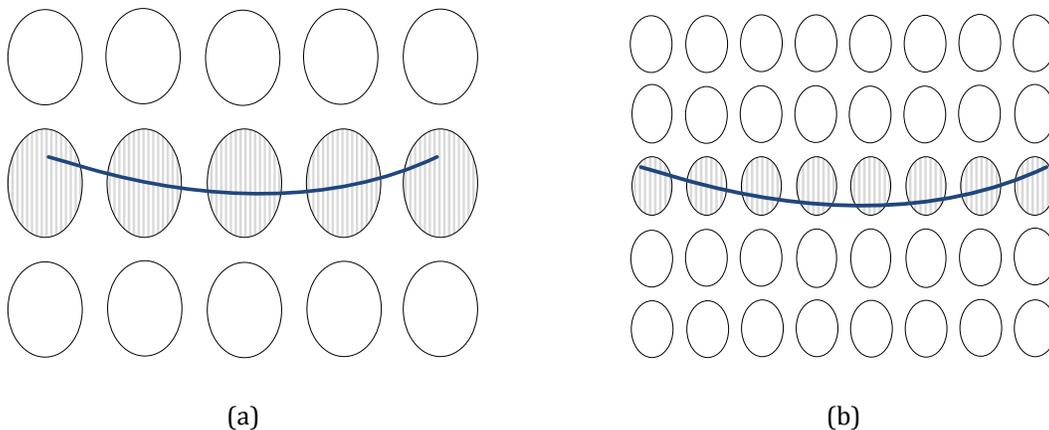


Figura 39. Comparación de dos tamaños distintos de grillas circulares; (a) 5,08 mm y (b) 2,54 mm.

Al igual que se mencionó en el caso de los círculos entrelazados, cuando se utilizan círculos de pequeño diámetro lo que se está haciendo es delimitar aún más al sector que se quiere analizar, teniendo más control sobre el defecto que se va a medir y recopilando mayor cantidad de información en cuanto al estado de deformación que llevó a tal situación.

6.3. Métodos de grillado sobre chapas de acero

Actualmente, los métodos empleados para efectuar el grillado involucran medios electroquímicos, técnicas por láser, técnicas fotográficas y de impresión. Cada método en sí posee un material o gama de materiales en los cuales puede aplicarse.

El grillado por láser da muy buenos resultados en muestras de acero laminadas en frío y galvanizadas, sin embargo si se trabaja con muestras que tienen algún recubrimiento de color oscuro sobre la superficie, el contraste entre el grillado y la muestra será pobre. En cuanto a la aplicación de las técnicas fotográficas o de impresión, se resalta que el grillado producido por las mismas puede ser removido durante el ensayo, por lo que se prefiere a las técnicas electroquímicas que dan mayor adherencia y contraste con el material base.

Las ventajas que presenta éste último son:

- Alta calidad del grillado
- Excelente adherencia del mismo
- Fácil y sencillo de aplicar
- Buen aspecto posterior a la deformación de la chapa

6.4. Métodos de medición de las deformaciones

Los métodos que permiten medir las deformaciones experimentadas a partir del grillado en una chapa metálica, son:

- Método manual
- Análisis de regresión múltiple
- Procesamiento computacional de imágenes
- Proyector óptico de perfiles
- Correlación de imágenes

Las mediciones *in-situ* sobre la probeta deformada pueden realizarse mediante el uso de una regla transparente (Figura 40) y una lupa que se superponen sobre la probeta deformada. Este procedimiento se considera no sólo tedioso sino impreciso, especialmente en la determinación del eje menor de la elipse. Es por ello que este sistema de medición no es muy utilizado.

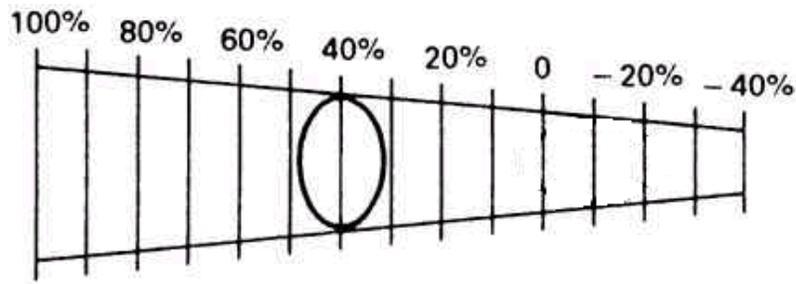
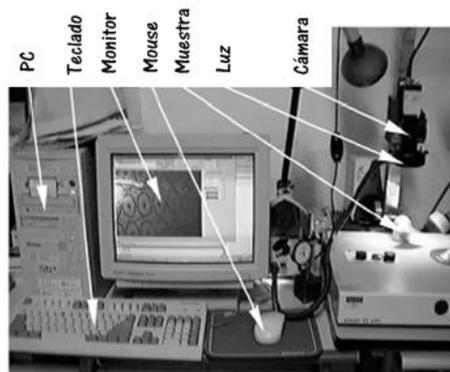
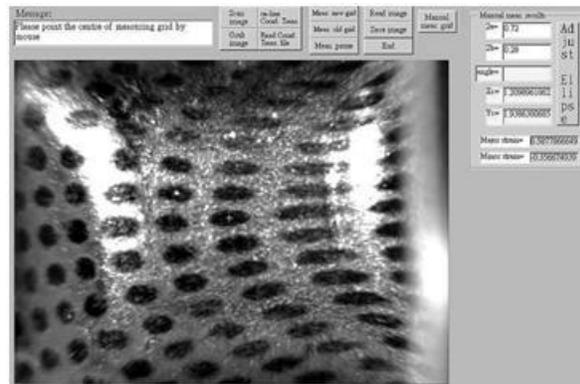


Figura 40. Regla transparente de medición de deformaciones.

Los métodos de regresión múltiple (Figura 41) involucran la obtención de la ecuación de la elipse deformada y posterior representación y medición de los diámetros principales de las mismas [28]. No obstante es crítico el cambio de orientación de las mismas, es decir, los ángulos de rotación y traslación que las definen.



(a)



(b)

Figura 41. (a) Equipo de medición, (b) Pantalla para la medición de las deformaciones de la pieza estampada.

También están aquellos métodos que se basan en la toma de fotos de los puntos deformados y el posterior procesamiento computacional a través de software específico, Figura 42. Se miden los diámetros de los círculos originales y las longitudes características de los círculos y elipsoides obtenidos, [17].

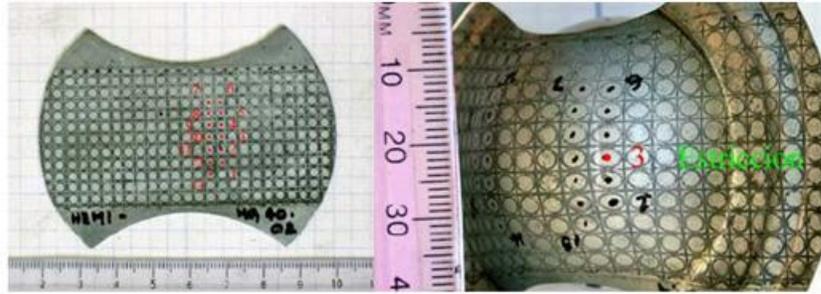


Figura 42. (a) Fotos de la chapa sin deformar, y (b) Foto de la probeta deformada. En ambas se identifican los puntos de mayor deformación segura y aquellos que presentan estricción.

Sin embargo, son las mediciones con un proyector óptico de perfiles las que permiten efectuar las mediciones de manera más sencilla y directa [29]. Los proyectores ópticos verticales resultan adecuados para controlar piezas pequeñas, las cuales pueden apoyarse sobre la platina de cristal de la mesa de coordenadas, que posee desplazamiento en dos direcciones perpendiculares, Figura 43.

Para efectuar la medición de las muestras deformadas, las elipses deben quedar perfectamente perpendiculares al haz de luz reflejado por la muestra (emitido por el sistema de iluminación episcópico). Esta condición se hace muy difícil de obtener sin la ayuda de un soporte que posea la misma geometría que la de la probeta. Para obtener un buen enfoque sobre la superficie, se debe realizar un movimiento vertical de la mesa de coordenadas, la cual se encuentra motorizada. El conjunto de la pieza con el soporte, se coloca sobre la platina de cristal de la mesa de coordenadas del proyector.

La medición se realiza desplazando la mesa de coordenadas juntamente con la pieza a medir a lo largo de sus ejes. Sobre cada brazo móvil está montado un tornillo micrométrico que mediante fibras ópticas envían la información a un adquisidor de datos. Esta técnica se emplea en el presente estudio².

² Para más detalle acerca del principio de funcionamiento de proyector de perfiles [30], consultar el ANEXO I.



Figura 43. (a) Proyector óptico de perfiles, (b) Ubicación del conjunto soporte-muestra sobre la mesa de coordenadas del proyector. Sistemas de iluminación activos.

Otro método de creciente utilización para la obtención de las deformaciones experimentadas localmente por el material durante o al finalizar el ensayo, es el de correlación de imágenes. El mismo se realiza en base de la definición de un patrón aleatorio sobre la superficie. La determinación del desplazamiento y campo de deformación se lleva a cabo por correlación (detalle en Touchal-Mguil S., 2001).

El principio de éste último método es el siguiente:

- Se toman imágenes antes y después de la deformación de la zona de interés, Figura 44.
- Se toma como referencia una imagen de la configuración sin deformar y se la divide en pequeños cuadrados llamados patrones.

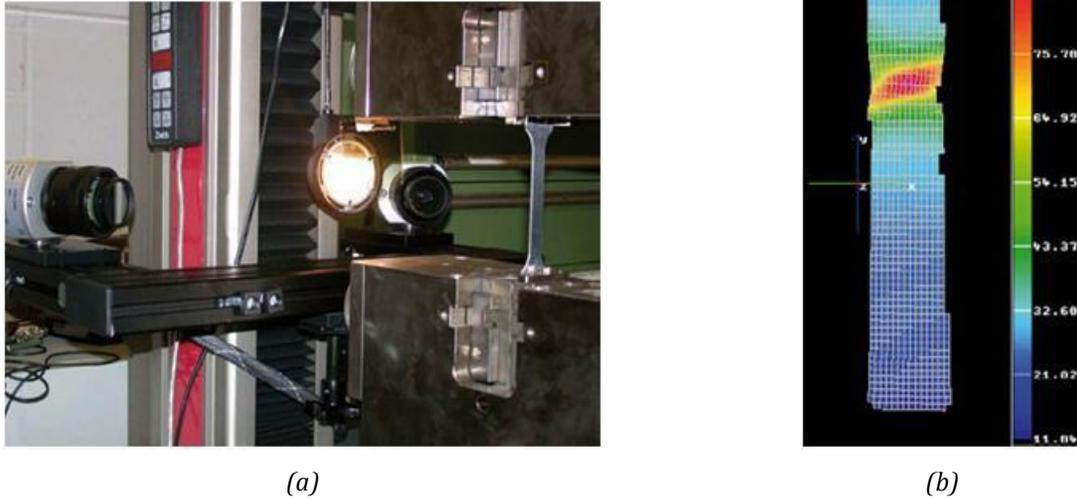


Figura 44. Medición de las deformaciones por correlación de imágenes. (a) Equipo en funcionamiento, (b) Deformación longitudinal experimentada por la muestra.

- A continuación el sistema trata de compatibilizar la distribución de ambos patrones en torno de un punto de la imagen deformada. Esta operación de ajuste es posible debido a la aplicación de una transformación al patrón. Esta transformación resulta de una combinación de una traslación, una rotación y una distorsión. Finalmente, un procedimiento de optimización permite la determinación de los parámetros de la transformación. La transformación entre ambos patrones se describe a través de las siguientes funciones:

$$x_t = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 xy \quad (26)$$

$$y_t = a_5 + a_6 x + a_7 y + a_8 xy \quad (27)$$

La calibración del sistema requiere la utilización de dos cámaras, tomándose dos imágenes de la zona no deformada y dos correspondientes a la zona deformada. A continuación se realizan tres pasos de correlación entre una de las imágenes, considerada como imagen de referencia, y las otras tres determinado posteriormente el campo de desplazamiento 3D y las deformaciones sobre la superficie de la zona. En la práctica se aplica un patrón aleatorio utilizando una pintura blanca y negra. El operador debe especificar un punto de referencia en las cuatro imágenes. En la Figura 44(b) se observa el gradiente de deformación longitudinal generado durante un ensayo de tracción efectuado a altas velocidades.

7. DEFECTOS EN PIEZAS CONFORMADAS

El embutido y estampado de chapas de acero no son procesos sencillos como lo son el corte o el doblado de una lámina. Muchas variables controlan al proceso en sí y son muy importantes para tratar de evitar la aparición de defectos en el producto obtenido.

Cuando se habla de imperfecciones *in situ* en el material se debe tener en cuenta que hay dos etapas fundamentales en las cuales éstas pueden llegar a aparecer; estas son en la etapa de diseño y ajuste del proceso, y en la etapa posterior de la producción misma.

La primera de ellas, es sin duda la etapa que mayor cantidad de piezas rechazadas genera debido a que es aquí donde se debe trabajar desde un ajuste fino para lograr obtener el producto con la forma especificada, sin que se presenten defectos sobre el mismo que impidan su uso posterior. Las condiciones que se utilizarán cuando se trabaje de forma seriada serán las que se hayan obtenido previamente en la etapa de puesta a punto del sistema matriz-chapa de acero-punzón.

Según datos consultados a empresas metalúrgicas nacionales que se dedican tanto al diseño y desarrollo, como a la producción misma de productos de acero calidad de embutido, como también a diferentes terminales automotrices que estampan y posteriormente ensamblan el producto, los índices que se manejan de “piezas descartadas” durante la calibración de la matriz en la prensa es inferior al 3,5%. Esto es, una vez que la misma se encuentra en las condiciones óptimas de operación, la cantidad de piezas que se logran embutir y/o estampar es bastante elevada. No obstante los índices de rechazos que se manejan en esta segunda etapa no suelen alcanzar el 0,7%. Se debe tratar de no superar este porcentaje y obviamente, de ser posible, minimizarlo lo más que se pueda. Los defectos producidos durante la fabricación de las piezas se traducen en rechazos y por lo tanto en pérdidas económicas para las empresas.

No obstante, las principales causas que dan origen al rechazo del material embutido son: rotura, adelgazamiento localizado excesivo – *estricción* –, arrugado, pandeo, etc.

En los párrafos siguientes se observan distintas fotos que ilustran algunos de los defectos más comunes encontrados en las chapas de acero, cuando se trabaja sobre la puesta a punto de la matriz. Las causas que originan tales imperfecciones suelen deberse a carencias en propiedades de formabilidad del material como los son los coeficientes de anisotropía y de endurecimiento por deformación, también como consecuencia de una lubricación deficiente, o bien a cuestiones inherentes al proceso de conformado en sí mismo.

Generalmente el defecto de arrugado en la pestaña y en la pared aparecen combinados. Es decir, el arrugamiento de la pestaña de una parte embutida no es más que la formación de una serie de pliegues que se forman radialmente en la pestaña no embutida de la parte de trabajo, debido al arrugamiento por compresión que sufre el material, Figura 45.



Figura 45. Defecto de arrugado en la pestaña de una pieza embutida.

Asimismo, el arrugamiento de la pared se origina cuando la brida arrugada se embute dentro de la pieza apareciendo finalmente sobre los laterales de la misma. Otros tipos de arrugas son las encontrados en las esquinas de las piezas embutidas y en aquellas partes que cambian abruptamente de sección.

Un defecto típico que se observa en la Figura 46 es el relacionado con una mala lubricación durante el ensayo, que genera un rayado paralelo y uniforme que deteriora la calidad superficial de la pieza. Este defecto puede deberse también a una elevada fricción entre el punzón y la pieza de trabajo, debido a que el primero no ha sido correctamente rectificado.



Figura 46. Defectos de rayado superficial en pieza embutida.

En la Figura 47 se observan los principales defectos de superficie encontrados en el panel de una puerta exterior de un auto. Los mismos suelen aparecer durante el proceso de embutido y posteriormente debido al fenómeno de *springback* característico. Se señalan los sitios preferenciales de aparición de los mismos.

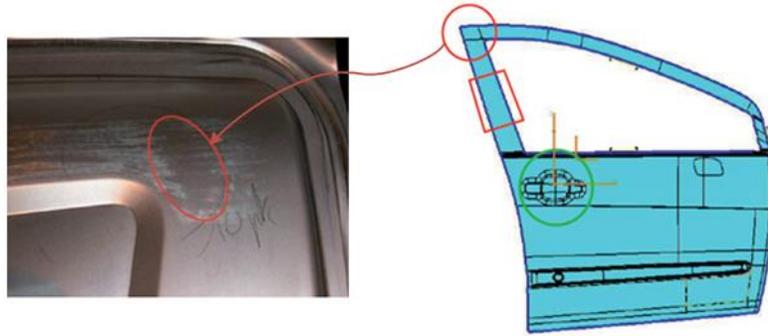


Figura 47. Localización de los principales defectos superficiales observados en la puerta de un auto.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. A. Cendón, J. M. Atienza, M. Elices, “Localización de la deformación durante un ensayo de tracción: resultados experimentales y numéricos”, (2009), Anales de Mecánica de la Fractura 26, Vol. 1, 154–159.
- [2] G. Dieter, “Metalurgia Mecánica”, (1967), Ed. Aguilar, España, Capítulo 9, 253–291.
- [3] W.F. Hosford, R. M. Caddell, “Metal forming: Mechanics and Metallurgy”, Cambridge University Press. Third Edition, 2007.
- [4] W D. Callister Jr, “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales”, (1995), Ed. Reverté, New York, Capítulo 6, p. 134.
- [5] S. Keeler, “Why work hardening is so important”, (2009), The Science of Forming, Metalforming.
- [6] F. Campos, “Formado por deformación en láminas metálicas por el proceso de embutido profundo”, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Junio 2008, 1–9
- [7] A. Monsalve G., “Descripción de texturas por medio de la función de distribución de orientaciones”, (2003), Jornadas SAM/CONAMET.
- [8] M. J. Serenelli, M. A. Bertinetti, J. W. Signorelli, “Influencia de la textura cristalográfica en la dispersión de coeficientes de Lankford en una chapa de acero galvanizada de bajo carbono”, (2008), Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Vol XXVII, 993–1001.
- [9] H. J. Bunge, “Texture Analysis in Materials Science”, (1982), Mathematical Methods, Butterworths, Berlin.
- [10] R. K. Ray, J. J. Jonas, M. P. Butrón-Guillén, J. Savoie, Review – “Transformation Textures in Steels”, (1994), ISIJ International, Vol. 34, No. 12, 927–942.
- [11] M. Hatherly, W.B. Hutchinson, “An introduction to Textures in Metals”, (1979), 1–76.
- [12] J.W. Signorelli, “Predicción de la Curva Límite de Formabilidad utilizando un Modelo de Plasticidad Policristalino Autoconsistente Viscoplastico”, (2006), Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Vol XXV, 2081–2096.

- [13] T. de Cock, Tesis doctoral, “Estudio y modelización de la recristalización estática de aceros ferríticos laminados en frío”, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Física de Materiales, Madrid 2008.
- [14] K. Ushioda, Proc. 6th Int. Conf. on Textures of Materials, (1981), Tokyo, 829.
- [15] T. Haratani et al., Metal Science, (1984), 18, 57.
- [16] Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu, “Mechanics of Sheet Metal Forming”, Butterworth-Heinemann, Elsevier Science, 2002.
- [17] G. Charca, M. Stout, P. Turner, J. Signorelli, “Estudio experimental de la deformabilidad de un acero galvanizado de bajo carbono para embutido profundo”, (2008), 2do Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales, Posadas – Misiones.
- [18] M.M. Moshksar, S. Mansorzadeh, “Determination of the forming limit diagram for Al 3105 sheet”, (2003), Journal of Materials Processing Technology 141, 138–142.
- [19] R. Sowerby, J.L. Duncan, “Failure in sheet metal in biaxial tension”, (1971), Int. J. Mech. Sci. 13, 217–229.
- [20] A.K. Ghosh, S.S. Hecker, “Stretching limits in sheet metals: in-plane versus out-of-plane deformation”, (1974), Metall. Trans. A 5A, 1607–1616.
- [21] F. Stachowicz, “Effects of microstructure on the mechanical properties and limit strains in uniaxial and biaxial stretching”, (1989), J. Mech. Work. Technol. 19, 305–317.
- [22] A. Graf, W. F. Hosford, “The influence of strain-path changes on forming limit diagrams of Al 6111 T4”, (1994), Int. J. Mech. Sci. 36, 897–910.
- [23] Metals Handbook Vol. 14, 1280
- [24] M. A. Akoy, E. S. Kayali, H. Cimenoglu, “The Influence of Microstructural Features and Mechanical Properties on the Cold Formability of Ferritic Steel Sheets”, (2004), ISIJ International, Vol. 44, No. 2, 422–428.
- [25] G. Bergé, M. Puccinelli, J. Insausti, D. Ziegler, A. Lucaioli, L. Iurman, “Influencia de la anisotropía planar en la trayectoria de deformación de una chapa de acero electrocincada bajo tracción biaxial no equilibrada”, (2008), CONAMET/SAM.
- [26] W. Hotz, J. Timm, “Experimental determination of forming limit curves (FLC)”, (2008), Numisheet, Novelis Switzerland SA - Novelis Development Centre Advanced Rolled Products, Interlaken, Switzerland, 271 - 278.
- [27] Association Francaise de Normalisation (AFNOR) norm NF EN ISO 12004-2, “Sheet and strip – Determination of forming-limit curves, Part 2: Determination of forming limit-curves in the laboratory”, (2008), 1 - 27.

[28] Q.-C. Hsu, "Comparison of different analysis models to measure plastic strains on sheet metal forming parts by digital image processing", (2003), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 515–521.

[29] M. N. Inés, C. R. Campos y G. A. Mansilla, "Propuesta de un método de medición para el grillado de chapas aplicado a ensayos de embutición profunda", (2010), 3er. Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales, Concepción del Uruguay.

[30] G. Mansilla, Tesis doctoral, "Caracterización del comportamiento en relajación de tensiones por curvado en aisi 316", (2005), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Rosario.

Capítulo III

PROPIEDADES MECÁNICAS Y CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

- Introducción
- Caracterización del Material
- Análisis de Texturas Cristalográficas
- Determinación de Propiedades Mecánicas
- Ensayos de Estirado

Comienza el desarrollo del presente capítulo con una caracterización metalúrgica del material determinando composición química, presencia de fases, tamaño de grano y microdureza. Mediante difracción de Rayos X se analiza la textura inicial y en conjunto con los valores de R medidos, se infiere el comportamiento frente a la conformación del material.

1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de estampado mecánico se somete al material a estados de carga que generan deformaciones permanentes, los cuales definen la geometría de la pieza que se desea fabricar. También se debe considerar que la chapa de acero previamente es laminada lo cual genera un marcado comportamiento anisótropo en el material, que puede mejorarse, en parte, mediante la realización de un tratamiento térmico de recocido que homogenice su estructura y composición química, a la vez que

aumente la ductilidad del acero. Todos estos hechos hacen que la caracterización del material sea una tarea realmente importante, la cual no deja de ser compleja y necesaria para tratar de comprender el comportamiento que desarrollará el material.

Una de las principales características que debe tener un material para ser sometido con éxito a procesos de estirado mecánico es que debe poseer muy buenas propiedades frente a la deformación. Es decir, propiedades como ductilidad, tenacidad y resistencia. Son los aceros de bajo contenido en carbono uno de los materiales que mejor se adaptan a estos requerimientos que se imponen con mayor peso, día tras día en el ámbito industrial del conformado de las chapas metálicas.

Entender la formabilidad del material significa también prestar atención a parámetros mecánico-metalúrgicos. Factores tales como la cualificación de las fases presentes de acuerdo a la química y al historial de tratamientos termomecánicos, su tamaño de grano, coeficiente de anisotropía, coeficiente de endurecimiento por deformación y textura cristalográfica definen en gran parte la deformabilidad del material.

Metalúrgicamente, lo que generalmente se busca es que el material posea un tamaño de grano grande (baja tensión de fluencia), el cual durante la deformación, debido a su gran superficie expuesta, produzca una baja concentración de dislocaciones las cuales podrán moverse con mayor libertad y así permitir obtener productos con mayor formabilidad.

La inclusión de la textura cristalográfica en el estudio del material sugiere que el control de la misma puede ser una herramienta útil para la mejora de la formabilidad. Según expresó Charca Ramos [1], los valores de R están relacionados con la orientación preferencial de los cristales (textura) en el material; R es alto en aceros ferríticos que poseen orientaciones $\{111\}\langle uvw \rangle$. En el laminado en frío el material desarrolla las orientaciones $\{hkl\}\langle 110 \rangle$ (fibra α) y $\{111\}\langle uvw \rangle$ (fibra γ) y durante el recocido de recristalización desarrolla altas intensidades de fibra γ y la fibra α prácticamente desaparece. La textura del material es un parámetro que afecta significativamente a la CLC y es por ello que a continuación se explicará la metodología que se utilizó para su determinación.

2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

2.1. Composición química

Como parte de la caracterización del material, se procedió inicialmente a determinar la composición química del mismo mediante la técnica de Espectrometría de Masas, a través de la cual se obtuvo la siguiente composición (Tabla 1):

PROPIEDADES MECÁNICAS Y CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Muestra	C	P	S	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
	%		%	%	%	%	%	%	%	%
DDS-M	0,07	0,02	0,009	0,3	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,192

V	Sn	Ca	N
%	%	ppm	ppm
0,002	0,003	27	88

Tabla 1. Composición química del acero.

Claramente se puede observar que el mismo es un acero de bajo porcentaje de carbono (0,07%), que ha sido calmado con aluminio y que en conjunto con el nitrógeno presente (88 ppm) podrían ser responsables de la precipitación de nitruros de aluminio los que se caracterizan por modificar de manera considerable las propiedades mecánicas del acero mediante cambios generados a nivel microestructural.

2.2. Microscopía óptica

Para poder tener una mayor comprensión del comportamiento mecánico del acero, se exige como complemento, el conocimiento de la microestructura del mismo; a tal fin se preparan muestras metalográficas del material que corresponden a los sentidos paralelo y transversal respecto de RD de la chapa.

Una chapa que se toma a partir de las condiciones de despacho, no es apta para ser analizada al microscopio, en este sentido se necesita la preparación previa de la misma, que implica las siguientes etapas: dimensionamiento de las muestras, embutido en resina fenólica, desbaste y pulido con papeles de carburo de silicio 120, 340, 420, 500, 600, 800, 1000 y #1200. Posteriormente, para un acabado definitivo se utilizan paños con pasta diamantada de 6 μm y 1 μm , respectivamente.

Durante el pulido se aconseja lavar la probeta, entre cada papel y/o paño, con un chorro de agua enérgico para eliminar al máximo las partículas de su superficie y así evitar la contaminación en los pasos posteriores y la consecuente aparición de rayas. Este hecho impide una correcta apreciación microscópica, además de restar calidad a la micrografía resultante.

Las Figuras 1 y 2 muestran la microestructura del acero para las orientaciones longitudinal y transversal respectivamente, la cual se ha puesto de manifiesto mediante ataque químico con Nital 5%. En las mismas se revela la presencia de una estructura ferrítico-perlítica parcialmente recristalizada, de granos deformados junto con una escasa cantidad de perlita globular bandeada, ambas en la

dirección de la deformación. En la Figura 2 los granos ferríticos se ven más equiaxiados como es de esperar debido al corte transversal efectuado.

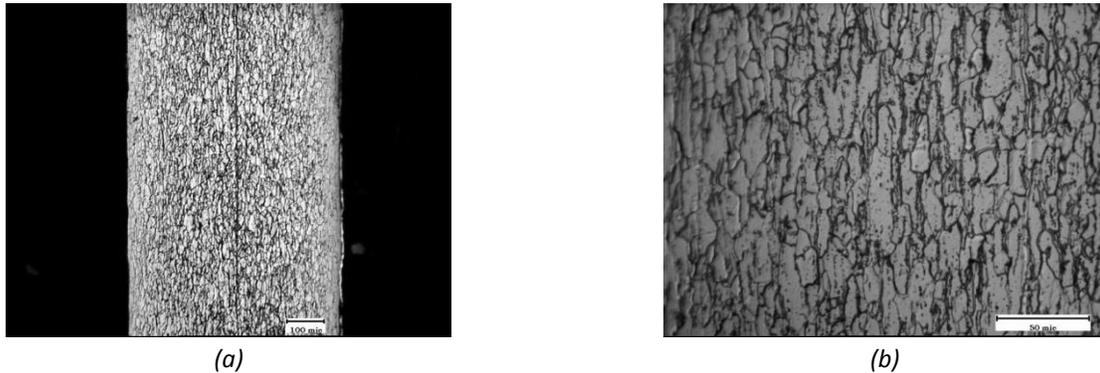


Figura 1. Microestructura del material, corte longitudinal. (a) [M] 200X, (b) [M] 1000X.

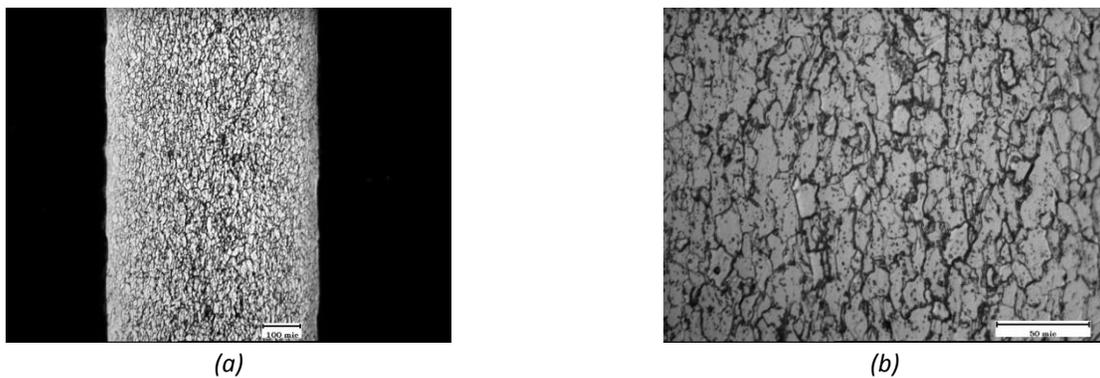


Figura 2. Microestructura del material, corte transversal. (a) [M] 200X, (b) [M] 1000X.

El recubrimiento de Zn sobre la superficie del acero se puede observar en la Figura 3.

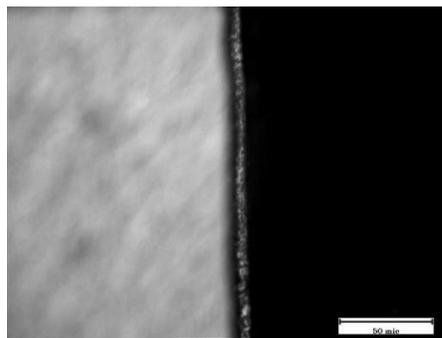


Figura 3. Recubrimiento de Zn, [M] 1000X.

2.3. Determinación de tamaño de grano

En la Tabla 2 se muestra el tamaño de grano promedio, obtenido en el sentido transversal respecto de la dirección de laminado, mediante mediciones directas a una amplificación de 500X empleando la

reglilla calibrada del ocular de un microscopio óptico Axiotech Zeiss anexo a una PC con analizador de imágenes. El índice de grano se determinó bajo la Norma IRAM-IAS U 500-122 bajo idénticas condiciones.

Tamaño de grano (μ)	índice
12,7	9 - 10

Tabla 2. Tamaño de grano de la chapa.

2.4. Determinación de microdureza

Se utilizó un microdurómetro LECO LM 300AT con indentador piramidal que aplica una carga de 200 gramos durante 10 segundos.

La muestra se coloca debajo del óptico del microdurómetro y se selecciona un campo apropiado (superficie de un grano preferentemente) para realizar las improntas, evitando la zona de límites de grano debido que son estas regiones donde suelen localizarse carburos, impurezas y segregaciones que difieren en comportamiento de lo que es la matriz ferrítica del acero. Posteriormente, se efectúan diez mediciones teniendo en cuenta que entre cada impronta debe existir una distancia tal que la deformación impresa por el indentador no afecte la subsiguiente. Con las mediciones efectuadas, se obtuvo un valor medio de microdureza Vickers que se indica en la Tabla 3.

Muestra	Microdureza Vickers (HV)
DDS-M	106,4

Tabla 3. Microdureza del material.

3. ANÁLISIS DE TEXTURAS CRISTALOGRÁFICAS

Para que los aceros de bajo contenido en carbono admitan un buen comportamiento frente a embutido, es necesario que posean, principalmente, elevados valores de R . Para lograr esto, el control de textura es determinante. En el caso de la laminación de aceros de bajo contenido en carbono, la situación tiende a mejorar cuando se maximiza la cantidad de granos que poseen planos $\{111\}$ paralelos al plano de laminación.

Para realizar el estudio de difracción sobre la fibra media en espesor de la chapa, la muestra fue pulida mecánicamente y electropulida para eliminar cualquier perturbación. La medición de textura se realizó utilizando un difractómetro Philips X'Pert Pro MPD (Figura 4) con tubo de Cu, lentes de RX y goniómetro de texturas. Se trabajó con 40 KV y 30 mA de intensidad.



Figura 4. Difractómetro Philips X'Pert Pro MPD.

La muestra de acero debe ser dimensionada (25x25mm) y colocada en el portamuestra del equipo, tratando de que quede en el plano horizontal del mismo. En la Figura 5 se aprecia una foto de la muestra seccionada con la que se trabajó y el portamuestra correspondiente. Se cierra perfectamente la puerta del equipo y se comienza con la medición.



(a)



(b)

Figura 5. (a) Muestra de acero a ensayar, (b) Portamuestra.

En la Figura 6 se puede apreciar el movimiento de roto-traslación que realiza la muestra dentro del equipo, desde la posición inicial a 0° hasta llegar inclinarse unos 90° (aproximadamente).

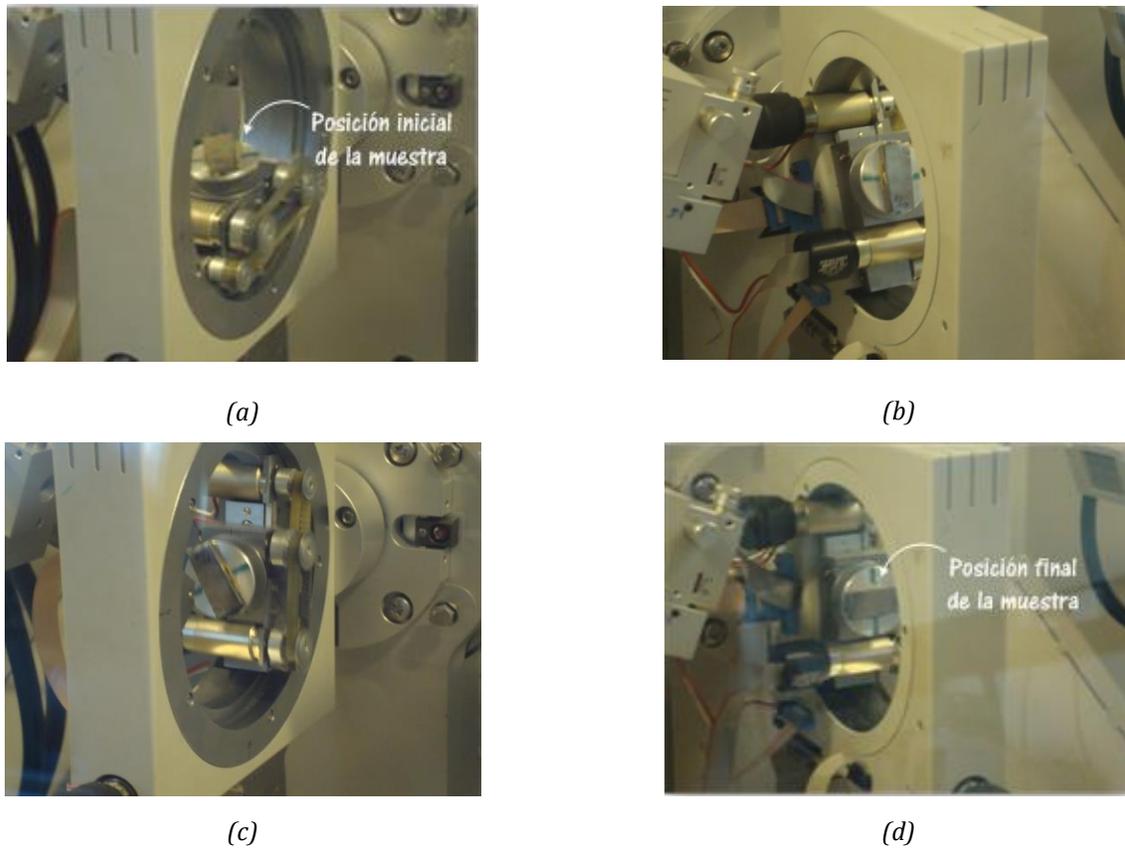


Figura 6. Ilustración en secuencia de imágenes del movimiento de roto-traslación que efectúa la muestra.

Una vez finalizado el ensayo, se realiza el análisis de datos y con la ayuda del software PopLA se construyen las PFs y a partir de ellas la ODF. El software PopLA fue desarrollado en Los Álamos por Fred Kocks y colaboradores, [2]. Consta de un conjunto de programas informáticos que ayudan a analizar las texturas de los materiales, mediante la obtención de las PFs y de la ODF. Proporciona un tratamiento integral de análisis de materiales de textura mediante la reducción, visualización y discretización de los datos de textura en un formato flexible. La distribución de la orientación de los cristales, o la textura, en materiales policristalinos es calculada y mostrada por una gran variedad de formatos gráficos.

En la Figura 7 se detallan las PFs $\{110\}$, $\{112\}$ y $\{100\}$ que describen las texturas cristalográficas del material.

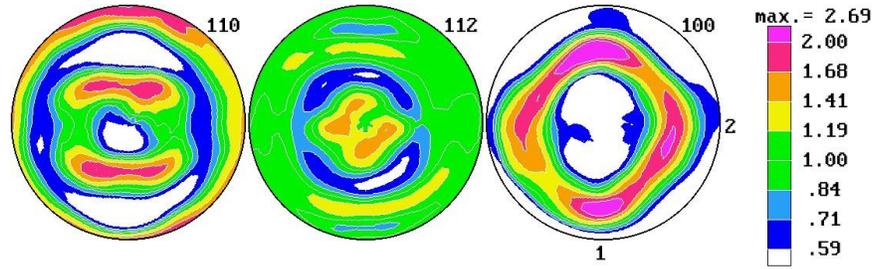
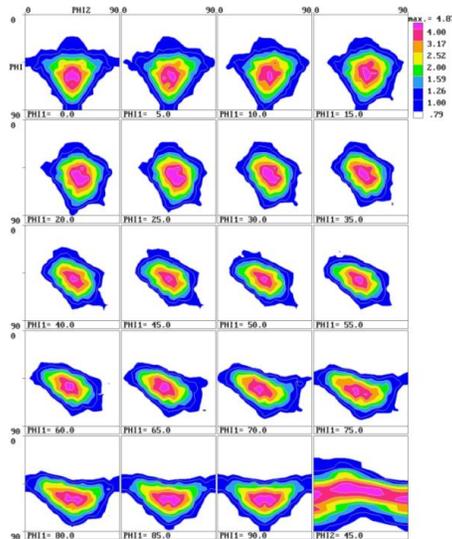


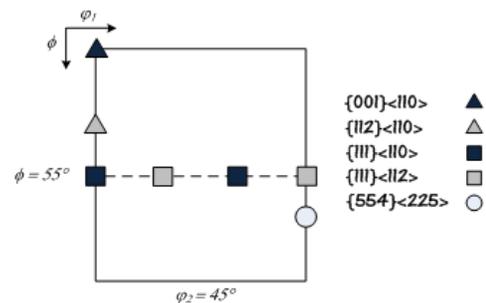
Figura 7. PFs {110}, {112} y {100}.

En la Figura 8 se observan los cortes en φ_1 cada 5° , desde 0° a 90° de la ODF, donde se ve que las orientaciones cristalográficas principales se concentran en el espacio de Euler $\varphi_2 = 45^\circ$, este corte es el de mayor interés por la información que brinda, debido a que la fibra α y la fibra γ se interceptan en la componente $(111) [1\bar{1}0]$. En la Figura 8(b), sobre la línea horizontal, se describen las ubicaciones de las distintas orientaciones del material para $\Phi = 55^\circ$ y se conocen como fibra γ , la cual está compuesta de tres segmentos simétricamente equivalentes $\{111\}\langle 110 \rangle$, $\{111\}\langle 112 \rangle$, $\{111\}\langle 112 \rangle$ y nuevamente $\{111\}\langle 110 \rangle$ y $\{111\}\langle 110 \rangle$. El material presenta fibra γ $\{111\}\langle uvw \rangle$ con una intensidad máxima de 4,87 y además presencia de fibra α $\{hkl\}\langle 110 \rangle$ con menor intensidad (orientaciones concentradas en Φ desde 0 a 55° y $\varphi_1 = 0$). Para una mayor comprensión acerca de los ángulos mencionados, ver sección 3.2.2, Capítulo II.

Con el sólo hecho de observar las intensidades y la concentración de las líneas de nivel en las secciones de ODF, se puede decir que se trata de un material que posee un buen valor de Coeficiente de Lankford.



(a)



(b)

Figura 8. (a) Función de distribución de orientaciones del material. (b) Sección $\varphi_2 = 45^\circ$ del espacio de Euler mostrando las fibras α y γ .

El comportamiento anteriormente descrito se puede distinguir con mayor facilidad en la Figura 9, donde se grafican las fracciones en volumen de las orientaciones cristalográficas principales que conforman la textura. Con la misma es posible cuantificar cantidades de fibras deseables y no deseables para la conformabilidad del acero. Las Componentes de Texturas se calculan como la fracción de volumen del policristal cuya orientación posee una misorientación menor a 15° respecto de una componente ideal (u orientación predeterminada). A partir de la mismas es posible cuantificar las orientaciones que contribuyen a la obtención de ciertas fibras en particular; se sabe que las componentes: $\{111\}\langle 110\rangle$ y $\{111\}\langle 112\rangle$ contribuyen a la fibra γ , mientras que las $\{112\}\langle 110\rangle$ y $\{001\}\langle 110\rangle$ lo hacen para la fibra α .

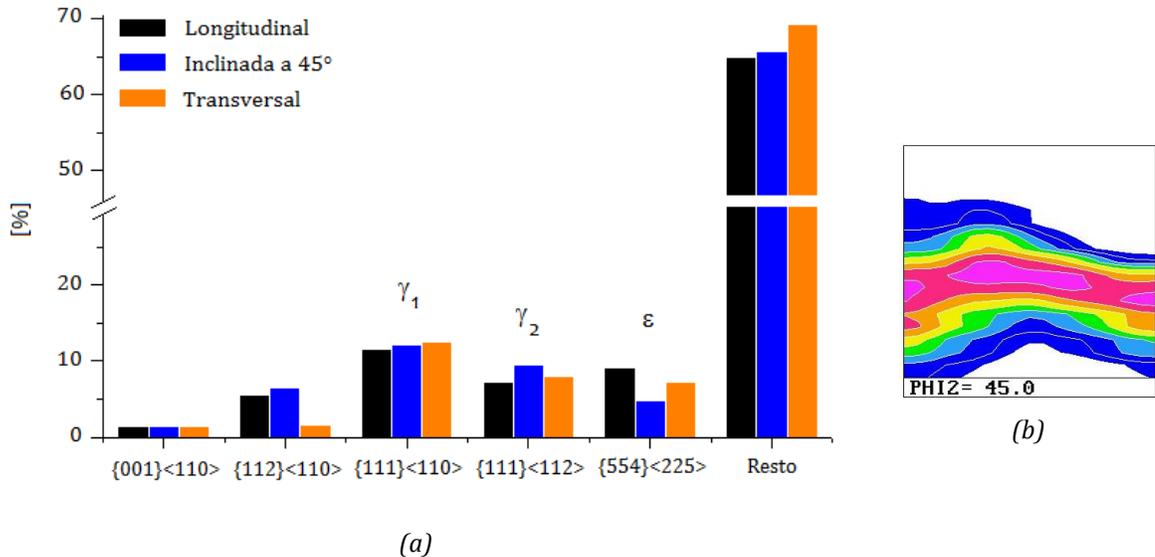


Figura 9. (a) Fracción volumétrica de componentes ideales para cada una de las inclinaciones de la chapa. (b) Sección de ODF para $\Phi 2=45^\circ$.

De acuerdo al trabajo realizado por Signorelli et al. [3], las orientaciones que se ubican en la fibra γ junto a las orientaciones de las componentes ε $\{554\}\langle 225\rangle$ favorecen la formabilidad de la chapa, mientras que las orientaciones situadas en la fibra α la deterioran.

4. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS

4.1. Ensayos de tracción uniaxial

Para efectuar tanto los ensayos de tracción uniaxial como los de estirado mecánico se utilizó una máquina de ensayos universal Instron 3382 de 100 kN (22.500 lbf) de capacidad de carga.



Figura 10. Máquina de ensayos Instron 3382.

En la Figura 10 se puede observar una foto de la máquina de ensayos empleada. Previo a la realización del ensayo se mecanizaron un total de 9 probetas de tracción según las direcciones a 0°, 45° y 90° respecto de la dirección de laminación original para poder luego caracterizar algunas de las propiedades mecánicas de mayor importancia del material. En la Figura 11 se observan las dimensiones de la probeta utilizada para efectuar los ensayos³.

En todos los casos se trabajó con una velocidad de 0,5 mm/min.

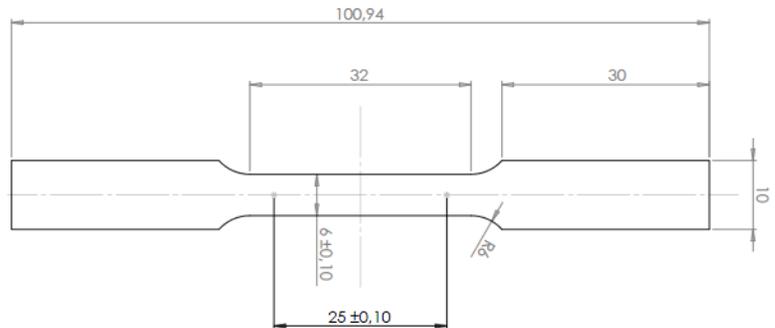


Figura 11. Probeta ASTM E8M.

Como se observa en la Figura 12, una vez que han sido colocadas las mordazas de cuña de tracción sobre los cabezales de la máquina, se coloca entre ellas la probeta que se ensayará. Entre dos puntos fijos, se mide el alargamiento de la misma mediante un extensómetro axial, a medida que se incrementa la carga aplicada. La longitud de referencia del extensómetro es de 25 mm.



Figura 12. Disposición de la probeta y del extensómetro.

³ El plano de la probeta utilizada se detalla en el ANEXO II.

Mediante la realización de los ensayos de tracción uniaxial a rotura se han podido determinar las principales propiedades mecánicas del acero de 0,62 mm de espesor para las diferentes orientaciones ensayadas. Propiedades como el límite de fluencia convencional ($\sigma_{f0,2\%}$), la resistencia máxima ($\sigma_{máx}$), la deformación plástica homogénea (ϵ_p) y la elongación a rotura (ϵ_r) fueron obtenidas y se detallan en la Tabla 4. Posteriormente, en el punto 4.2 se mostrará la metodología empleada para calcular el índice de endurecimiento por deformación (n) del material.

Orientación respecto de RD	Límite de fluencia convencional [MPa]	Resistencia máxima [MPa]	Deformación plástica homogénea [%]	Elongación a rotura [%]
Longitudinal	204	323	28	37
Transversal	208	335	26	34
Inclinada a 45°	217	349	24	33

Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero extraídas del ensayo de tracción.

Para los tres casos analizados, se observa que la resistencia máxima supera los 320 MPa y que en el caso particular de la orientación longitudinal, la misma presenta el valor más bajo de resistencia y en consonancia el valor de deformación más elevado. En la Figura 13 se pueden observar las curvas tensión-deformación ingenieriles para el acero estudiado, según las tres direcciones de ensayo tomadas, mientras que en la Figura 14 se tienen las curvas tensión-deformación verdaderas para el mismo material y bajo las mismas condiciones.

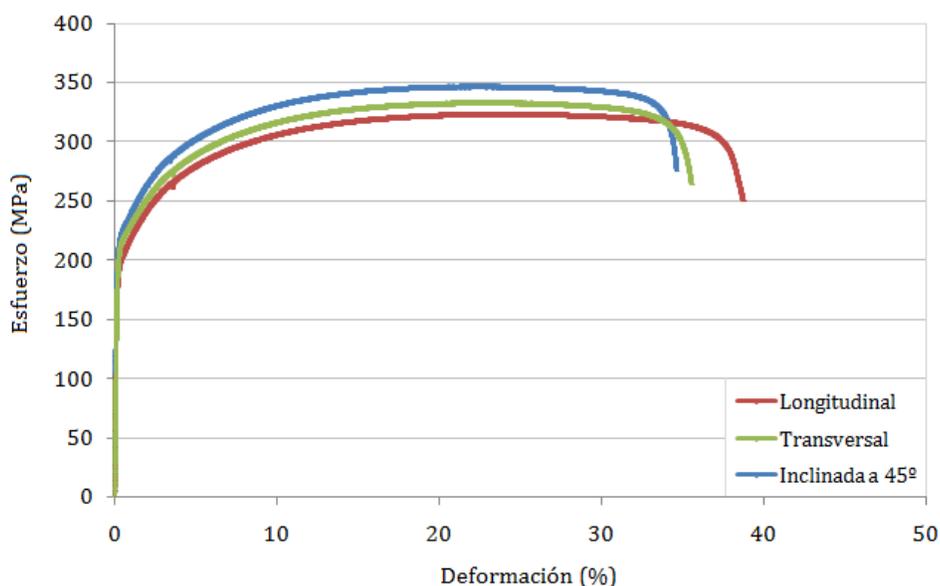


Figura 13. Curvas de esfuerzo-deformación ingenieriles.

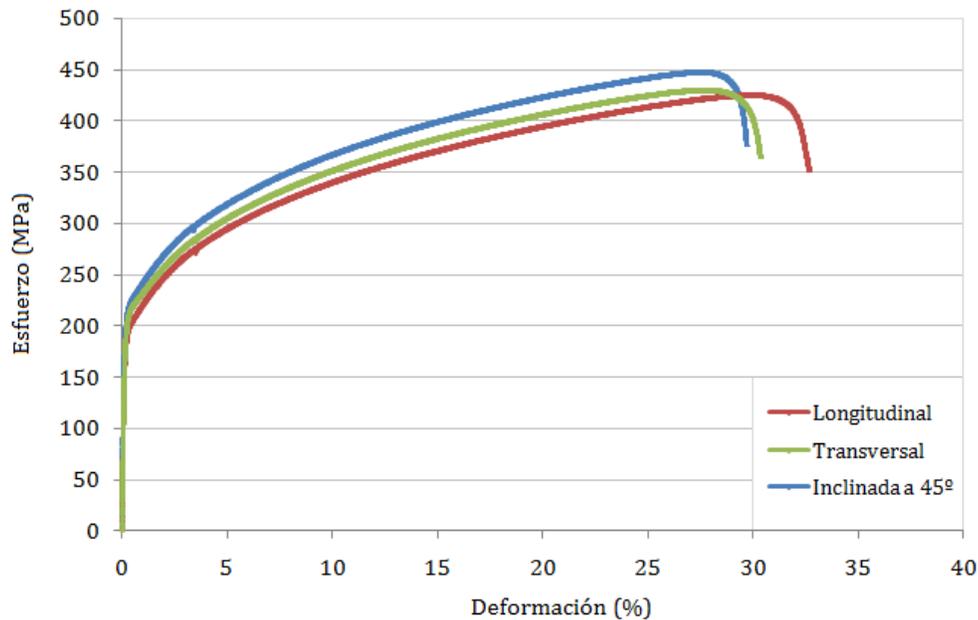


Figura 14. Curvas de esfuerzo-deformación verdaderas.

4.2. Determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación

El coeficiente n no es constante, sino que varía con la deformación plástica en función del material analizado. En chapas de acero de bajo carbono el valor se toma convencionalmente a partir de las mediciones realizadas entre el 10% - 20% de deformación ingenieril. Por encima del 10% se evitan fluctuaciones debidas al punto de fluencia y por debajo de 20% aseguramos estar en régimen de deformación plástica uniforme. Lo ideal sería desde el 10% hasta justo antes de la estricción teórica o UTS.

Por ello se efectúa en primer lugar un estudio de la variabilidad del coeficiente n con la deformación. A partir de los datos de deformación verdadera y tensión verdadera, se calculan $\log \epsilon$ y $\log \sigma$.

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \quad (1)$$

$$y = h + m \cdot x \quad (2)$$

$$\log \sigma = \log K + n \cdot \log \epsilon \quad (3)$$

$$m = n \quad (4)$$

donde " n " es la pendiente de la recta que ajusta la curva real.

Para plantear el n instantáneo, se efectúa el mismo razonamiento para un incremento de deformación.

$$[n]^k \sim \frac{\Delta \log \sigma}{\Delta \log \epsilon} = \frac{[\log \sigma]_k - [\log \sigma]_{k-1}}{[\log \epsilon]_k - [\log \epsilon]_{k-1}} \quad (5)$$

Tomando todos los pares σ - ϵ que proporciona la máquina de ensayos, se construye un gráfico de altas fluctuaciones. Para evitar este inconveniente se realiza una selección de datos llevando los casi 8000 pares σ - ϵ a unos 20-25 pares con los cuales el nivel de fluctuación de los n instantáneos baja considerablemente. Luego se hace pasar un polinomio de ajuste (grado 3 ó 4) y se observa que a partir del 5% de deformación las fluctuaciones existen pero se dan en torno a un valor casi constante.

Los valores del coeficiente n obtenidos se especifican en la Tabla 5 para el intervalo de 5% y 13,5% de deformación verdadera. Para realizar los cálculos, se utilizó la ley de Ludwik-Hollomon expresada en la ecuación 6 del Capítulo II.

Orientación respecto de RD	Coficiente de endurecimiento, n	K [MPa]
Longitudinal	0,198	219,7
Transversal	0,199	216,6
Inclinada a 45°	0,199	225,8

Tabla 5. Valores del coeficiente de endurecimiento para cada una de las orientaciones.

A continuación, se muestra la metodología de trabajo empleada para el cálculo del parámetro n , evaluándolo para cada una de las tres direcciones analizadas.

4.2.1. Análisis por orientación

Primeramente, debe determinarse la curva de tensión-deformación verdadera correspondiente a la dirección analizada, Figura 15.

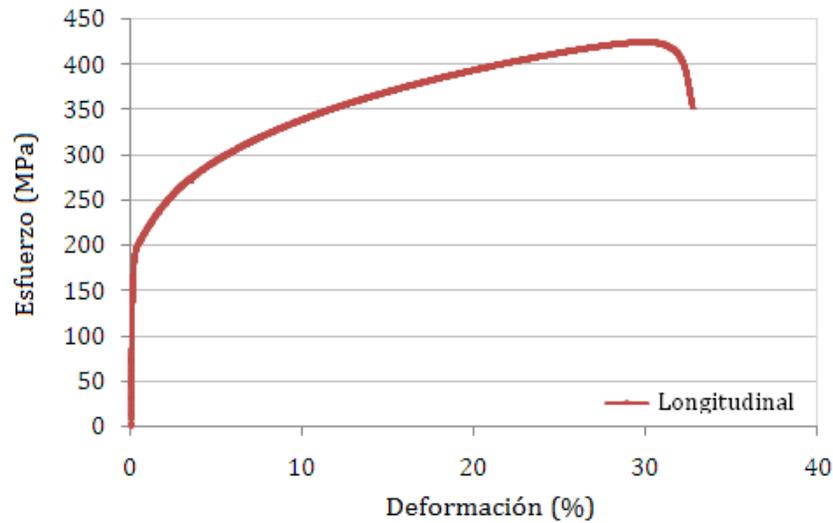


Figura 15. Curva esfuerzo-deformación verdadera.

Luego, se aísla la porción del diagrama anterior correspondiente al intervalo de deformación entre el 5% y el 13,5%, puesto que el interés se centra en el análisis de la zona de deformación plástica del material, Figura 16.

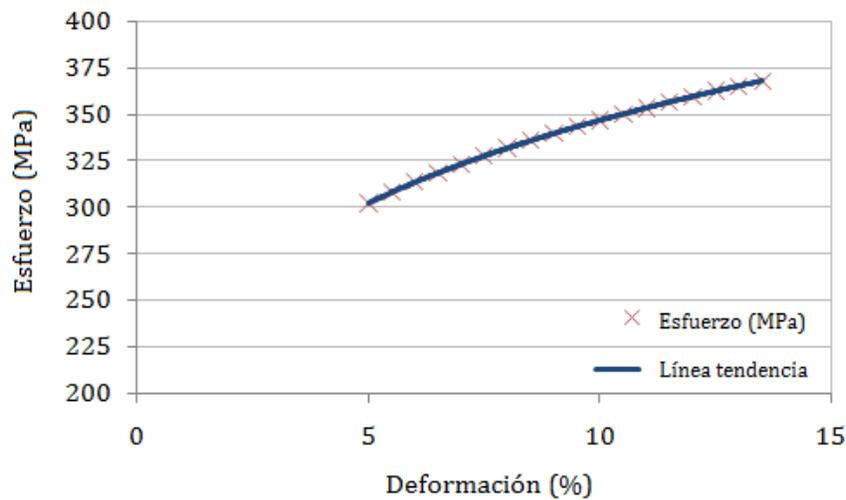


Figura 16. Sector plástico de interés de la curva de tensión-deformación verdadera.

Seguidamente, se determinan los coeficientes n y K de la ecuación de Hollomon, a través de un ajuste realizado con una regresión del tipo potencial con valor de $R^2=1,000$ sobre los pares $\sigma-\epsilon$. Con los valores obtenidos, se construye un gráfico de n vs ϵ como el mostrado en la Figura 17.

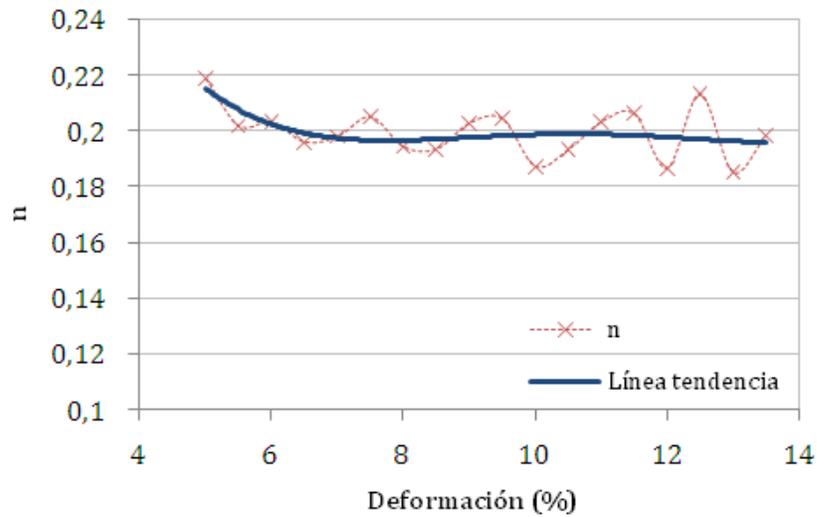


Figura 17. Variación de n con la deformación.

Luego se hace pasar un polinomio de ajuste de grado 4 y se observa que a partir del 5% de deformación las fluctuaciones existen pero se dan en torno a un valor casi constante.

De la misma forma se analiza a la orientación transversal, determinando primeramente la curva $\sigma - \epsilon$, Figura 18, y luego aislando el sector plástico de interés en la Figura 19.

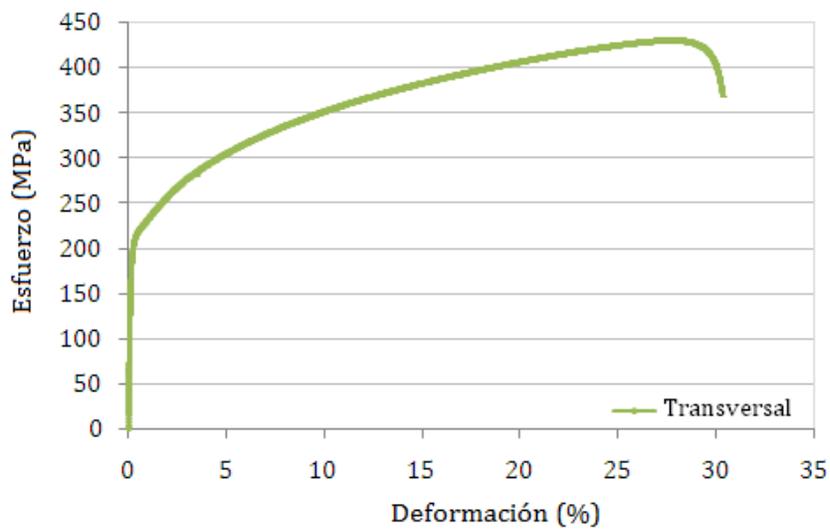


Figura 18. Curva esfuerzo-deformación verdadera.

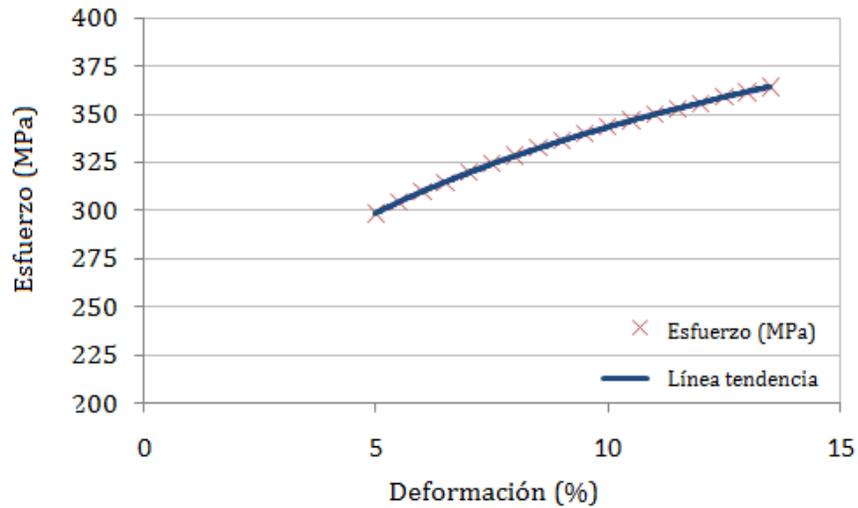


Figura 19. Sector plástico de interés de la curva de tensión-deformación verdadera.

Los valores de n y de K se calcularon a partir de una regresión del tipo potencial con valor de $R^2=0,999$

Con los valores de n y K obtenidos, se construye un gráfico de n vs ϵ , Figura 20.

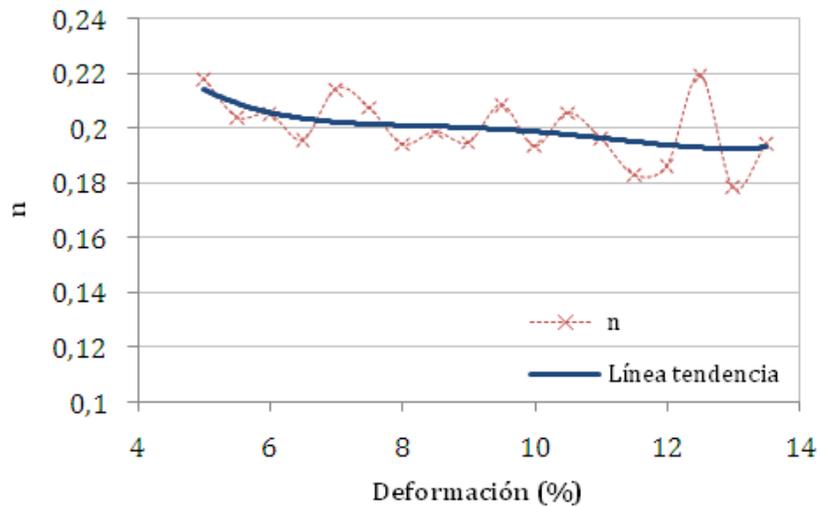


Figura 20. Variación de n con la deformación.

Finalmente y siguiendo los lineamientos planteados anteriormente, se trabaja con la dirección inclinada 45° . En la Figura 21 se muestra la curva $\sigma - \epsilon$, y en la Figura 22 la zona plástica de interés (5% - 13,5% ϵ ,) para poder calcular luego los valores de n y K mediante una regresión del tipo potencial con valor de $R^2=0,999$, Figura 23.

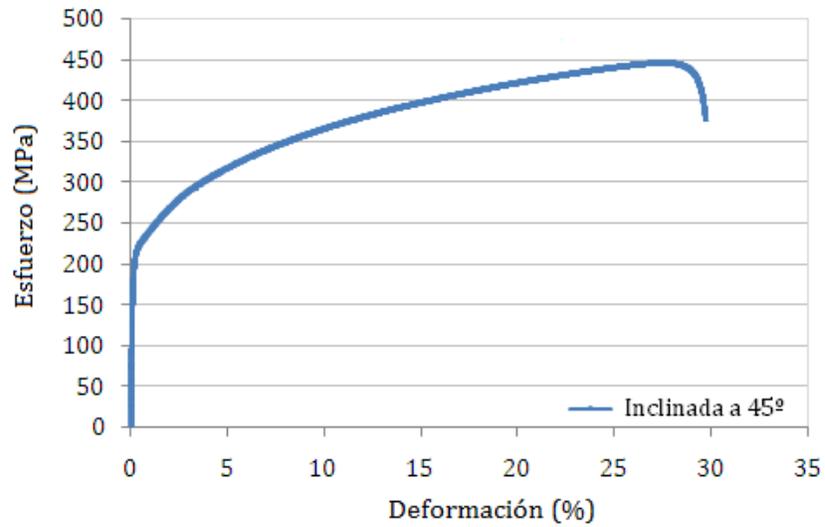


Figura 21. Curva esfuerzo-deformación verdadera.

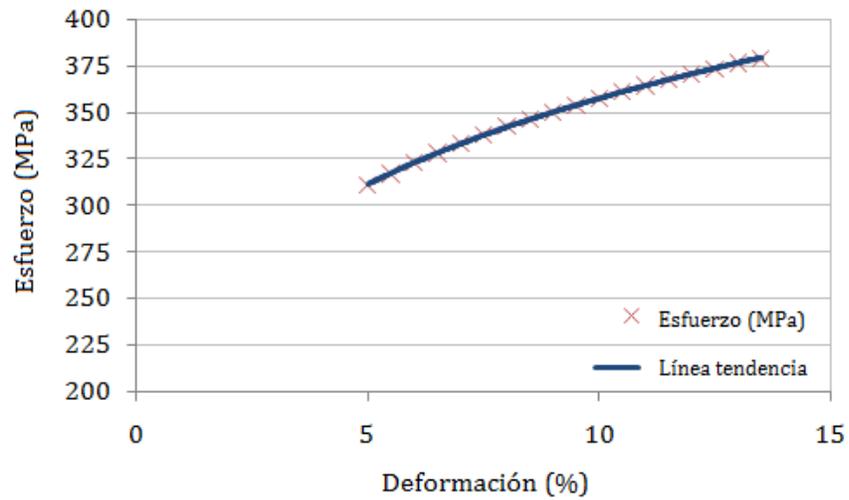


Figura 22. Sector plástico de interés de la curva de tensión-deformación verdadera.

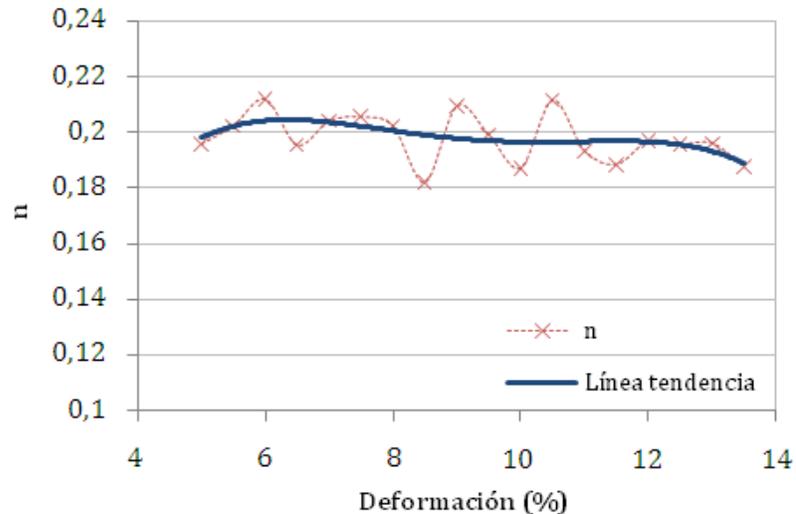


Figura 23. Variación de n con la deformación.

4.3. Determinación del Coeficiente de Lankford

Primeramente se cortaron con rayo láser probetas sub-size ASTM E8M, según la dirección paralela, inclinada a 45° y perpendicular a la dirección de laminación. Se determinaron los coeficientes de anisotropía plástica, R , anisotropía planar, ΔR , y para ello se emplearon dos probetas por cada dirección y se llevaron hasta el 5% y el 15% de deformación ingenieril. Se tomó una longitud de referencia de 20 mm y sobre la misma se efectuaron 3 mediciones equidistantes de los anchos mediante calibre de corredera. El valor inicial del ancho para todos los casos es de 6 mm.

Para poder calcular el valor de R , se realizará la deducción de la fórmula empleada en función del largo y el ancho especificados de las probetas. Se demostrará la expresión utilizando la siguiente nomenclatura:

- ϵ : Deformación verdadera
- ϵ : Deformación ingenieril
- w_0 : Ancho inicial de la probeta
- w : Ancho final luego de la deformación
- t_0 : Espesor inicial de la probeta
- t : Espesor final de la probeta
- L_0 : Largo inicial entre marcas de la probeta
- L : Largo final entre marcas luego de la deformación de la probeta

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(1 + \epsilon_w)}{\ln(1 + \epsilon_t)} \quad (6)$$

$$\ln(1 + \epsilon_w) = \ln\left[1 + \frac{w - w_0}{w_0}\right] = \ln \frac{w}{w_0} \quad (7)$$

$$\ln(1 + \epsilon_t) = \ln\left[1 + \frac{t - t_0}{t_0}\right] = \ln \frac{t}{t_0} \quad (8)$$

Mediante la hipótesis de la constancia de volumen en la deformación plástica, se tiene:

$$w_0 \cdot t_0 \cdot L_0 = w \cdot t \cdot L \quad (9)$$

Por lo tanto:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{w_0 \cdot L_0}{w \cdot L} \quad (10)$$

Sustituyendo en la ecuación de $\ln(1 + \epsilon_t)$ será:

$$\ln(1 + \epsilon_t) = \ln \frac{w_0 \cdot L_0}{w \cdot L} \quad (11)$$

Finalmente, reemplazando en la ecuación (6) se llega a la ecuación que define al parámetro R :

$$R = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{w_0 \cdot L_0}{w \cdot L}} \quad (12)$$

El cálculo de R se realiza para las tres orientaciones con las que se ha trabajado (0° , 45° y 90°), identificándolos como: R_{0° , R_{45° y R_{90° , respectivamente.

La anisotropía media y la anisotropía planar se calculan de la siguiente manera:

$$R_{prom} = \frac{R_{0^\circ} + 2 \cdot R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4} \quad \Delta R = \frac{R_{0^\circ} + R_{90^\circ} - 2 \cdot R_{45^\circ}}{2} \quad (13)$$

Una vez que se han llevado a cabo los 6 ensayos de tracción uniaxial, se toman las mediciones de los anchos w_f de las probetas (valores luego del recupero elástico) mediante calibre de corredera. Con el valor inicial del ancho w_i medido anteriormente, se calculan las deformaciones ingenieriles y luego las verdaderas, obteniéndose los gráficos de las Figuras 24 y 25.

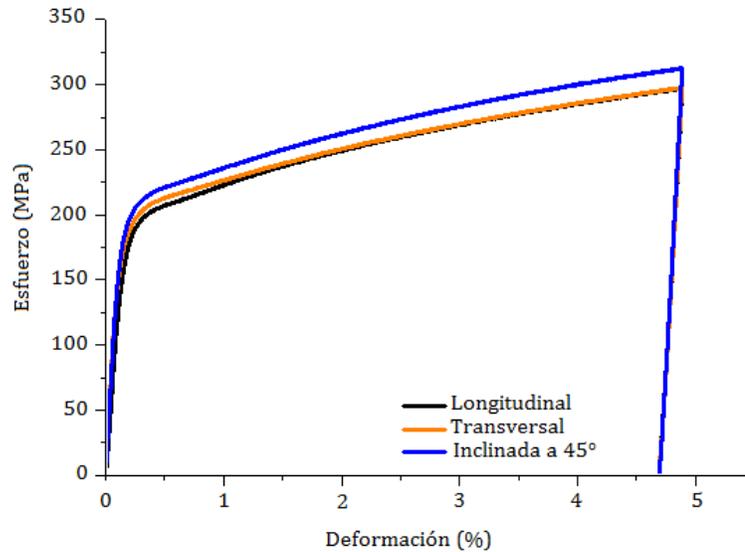


Figura 24. Curvas de esfuerzo-deformación verdaderas hasta un 4,88% de deformación.

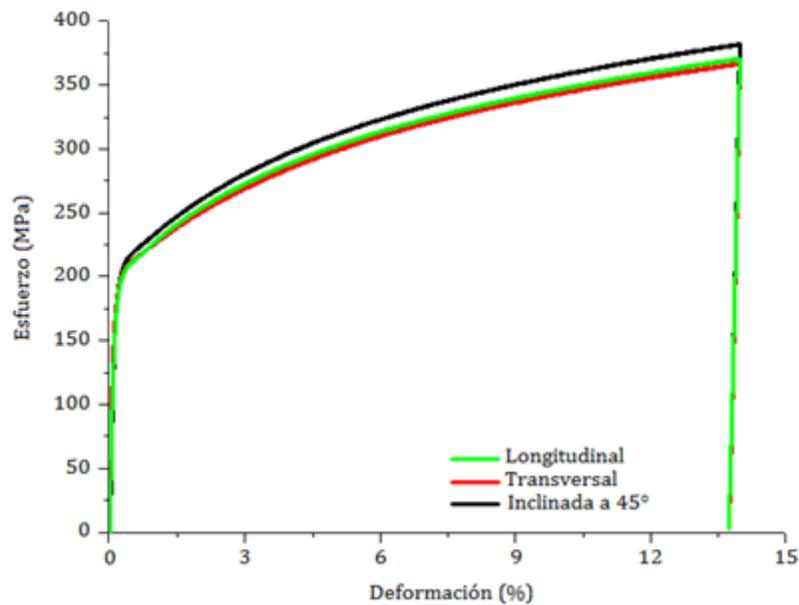


Figura 25 Curvas de esfuerzo-deformación verdaderas hasta un 13,98% de deformación.

El programa que gobierna el ensayo requiere del valor del intervalo de tiempo en función del cual se adquieren los datos. Durante la marcha del ensayo y en función del intervalo programado, se almacenan los valores de extensión (extensómetro) y carga aplicada (celda de carga). De acuerdo a los datos geométricos de la probeta y a los valores internos del equipo, éste calcula las deformaciones y esfuerzos correspondientes.

Según se aprecia del análisis de las figuras anteriores, para el 4,88% de deformación verdadera, se obtiene un valor de R de 1,852, 1,582 y 1,171 para las orientaciones longitudinal, transversal e inclinada 45°, respectivamente, y un elevado valor del parámetro ΔR igual a 0,55. Los valores de anisotropía así obtenidos no son confiables para este grado de deformación. En cambio, para valores de deformación mayores (13,98%) se obtienen mejores resultados, Tabla 6.

Orientación respecto de RD	R
Longitudinal	1,633 ± 0,100
Transversal	1,829 ± 0,200
Inclinada a 45°	1,244 ± 0,050
Anisotropía planar, ΔR	0,49 ± 0,20
Anisotropía media, R_{prom}	1,49 ± 0,10

Tabla 6. Valores de anisotropía para las tres orientaciones según valores de deformación de 13,98%.

Para las tres orientaciones analizadas, el valor de R es alto lo que indica, en principio, buena capacidad del material para ser deformado por estirado mecánico.

5. ENSAYOS DE ESTIRADO

Para obtener los datos referentes a los puntos de deformación que dan origen al DLC, se sometió al material a ensayos de estirado mecánico mediante un punzón hemiesférico de 40 mm de diámetro. Se trabajó con probetas tipo Reloj de Arena⁴, HG , cortadas en la dirección longitudinal, transversal e inclinada a 45° respecto de la RD, Figura 26. Todas poseen un diámetro único y constante de 80 mm. Se ha variado el ancho “a” en cada una de las probetas (Figura 27) para poder imponer caminos de deformación diferentes que generen distintos estados de deformación (uniaxial, plana y equibiaxial). Se utilizó politetrafluoroetileno, poliuretano y MoS₂ (en spray) como agentes lubricantes de acuerdo al valor de “a”.

⁴ Los planos de las probetas utilizadas se detallan en el ANEXO II.

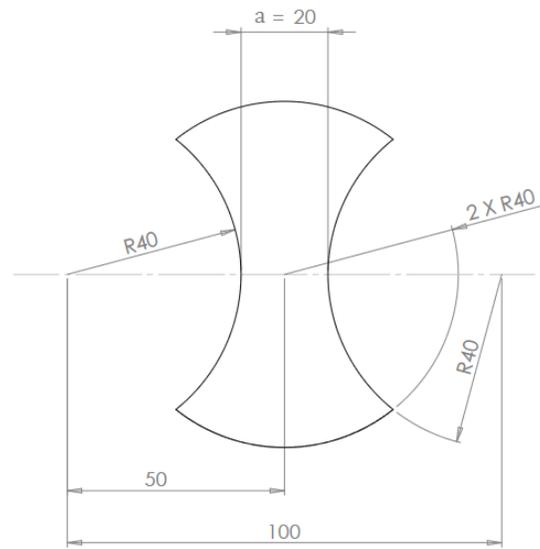


Figura 26. Geometría "Reloj de Arena" de las probetas utilizadas.

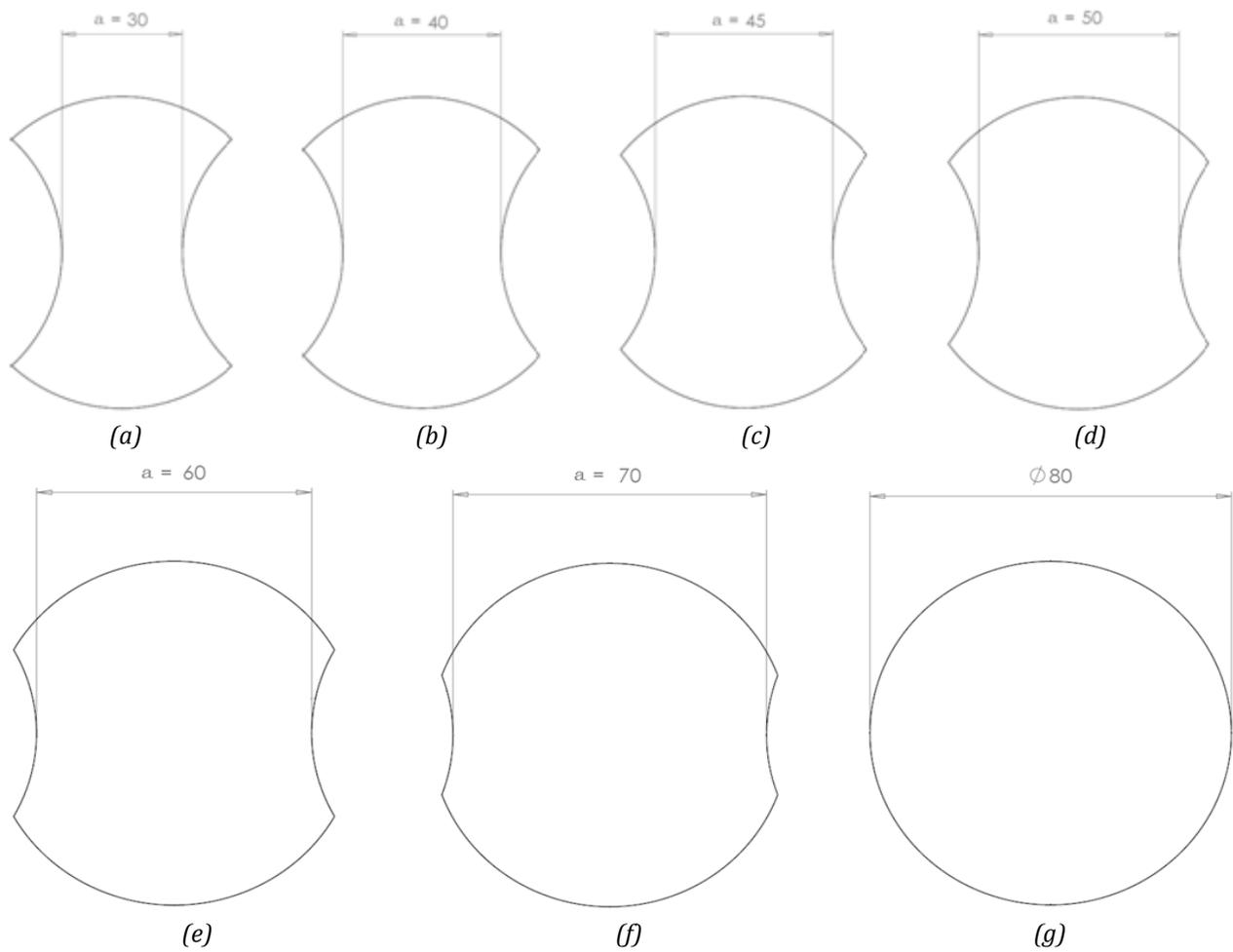


Figura 27. Diferentes anchos "a" en las probetas utilizadas.

Para poder realizar la identificación del total de probetas utilizadas se tuvo en cuenta el tipo de punzón con el que se trabajó, la geometría de la probeta y la dirección de extracción de la muestra respecto de la RD original del material. En la Tabla 7 se resume la nomenclatura empleada:

	Simbología utilizada
H	Punzón hemiesférico
G	Probetas reloj de arena
(T, L, I)	Dirección de extracción de la probeta respecto de la RD original
(20, 30, 40, 45, 50, 60, 70, 80)	Ancho “a” en mm
(01, 02)	Set de probetas

Tabla 7. Nomenclatura de las probetas.

- Ejemplo 1: **HGT 60-01** (probeta reloj de arena de 60 mm de ancho, transversal a la dirección de laminación, deformada con punzón hemiesférico, set 01).
- Ejemplo 2: **HGL 40-02** (probeta reloj de arena de 40 mm de ancho, paralela a la dirección de laminación, deformada con punzón hemiesférico, set 02).
- Ejemplo 3: **HGI 20-02** (probeta reloj de arena de 20 mm de ancho, inclinada a 45° respecto de la dirección de laminación, deformada con punzón hemiesférico, set 02).

En la Figura 28 se pueden ver las curvas de estirado obtenidas a partir de los ensayos sobre probetas con diferentes valores de “a”. La escala de desplazamiento del punzón muestra valores negativos debido al sistema de referencia utilizado por el equipo (considera desplazamiento positivo aquel originado en una separación de los barrales).

Se cortaron un total de 48 probetas geometría reloj de arena, pero para la construcción de los DLC sólo se trabajó con 24. Las 24 probetas restantes son utilizadas por cualquier eventualidad que se presente, sea porque no se obtuvo la respuesta deseada sobre el material una vez que ha sido ensayado (sin estricción localizada formada) o bien porque la cantidad de datos extraídos en una probeta es insuficiente (debido a un pequeño tamaño de la estricción).

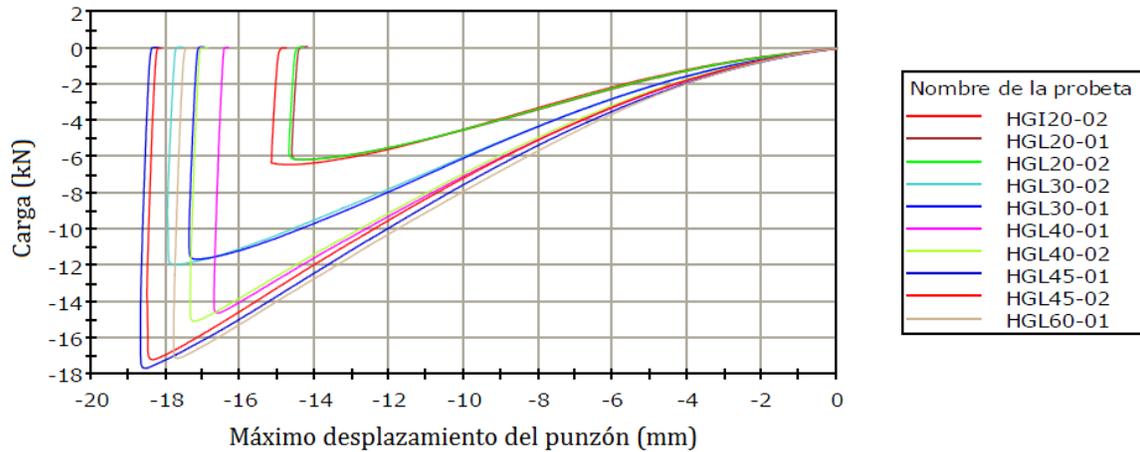


Figura 28. Curvas de estirado.

Como es de esperarse, un comportamiento que prácticamente se repite para la gran mayoría de las probetas es que a medida que aumenta el ancho “a”, aumenta la carga que éstas admiten. Por ejemplo, la probeta HGL20-01 resiste una carga de 6,13 kN, en cambio la HGL60-01 una de 21,76 kN. En la Tabla 8 se dan los datos de carga y desplazamiento del punzón para las probetas ensayadas que hacen referencia a la figura anterior.

Probeta	Carga	Máximo desplazamiento del punzón
	[kN]	[mm]
HGI20-02	6,40	14,66
HGL20-01	6,13	14,36
HGL20-02	6,13	14,33
HGL30-02	11,90	17,75
HGL30-01	11,61	17,12
HGL40-01	14,56	16,58
HGL40-02	15,01	17,21
HGL45-01	17,60	18,56
HGL45-02	17,13	18,36
HGL60-01	21,76	19,35

Tabla 8. Datos del ensayo de estirado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Charca Ramos, “Procesamiento termomecánico de una chapa de acero de ultra bajo carbono (IF) y evaluación de su conformabilidad”, (2010), 3er. Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales Concepción del Uruguay.
- [2] U. F. Kocks, J. S. Kallend, H.-R. Wenk, A. D. Rollett, S. I. Wright, “popLA, Preferred Orientation Package – Los Alamos”, (1995), Manual by S. I. Wright and U. F. Kocks. LA-CC-89-18. Los Alamos National Laboratory. Los Alamos, NM 87545, USA.
- [3] J. W. Signorelli, P. Turner, M. A. Bertinetti, L. Iurman, J. Insausti, A. Lucaioli, C. García, “Predicción de la curva límite de formabilidad en aceros utilizando plasticidad cristalina”, (2006), Proceedings Congreso SAM-CONAMET, Santiago de Chile.

Capítulo IV

DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

- Trabajo previo a la obtención de las BLC
- Ensayos de Estirado
- Determinación del estado de Deformación
- Construcción del DLC
- Estudio de Tiempos
- Perspectivas Futuras
- Presupuesto

En el presente capítulo se dan las bases que permiten construir las BLC. Se relacionan aspectos de texturas cristalográficas con parámetros de formabilidad para poder explicar los comportamientos observados del material para cada una de las curvas límites obtenidas.

1. TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DE LAS BANDAS LÍMITE DE CONFORMADO

Dentro de esta etapa deben llevarse a cabo un conjunto de procedimientos para poder obtener las probetas en las condiciones óptimas que permitan ser ensayadas y posteriormente, en base a un grillado sobre las mismas, realizar las mediciones correspondientes de los círculos y/o elipses deformados de acuerdo a un criterio de selección adoptado.

1.1. Proceso de corte

Se cortaron un total 48 probetas HG y 9 de tracción sub-size (ASTM E8M) a 0°, 45° y a 90° respecto de RD. En la Figura 1 se observa la disposición de las muestras en el plano de la chapa.

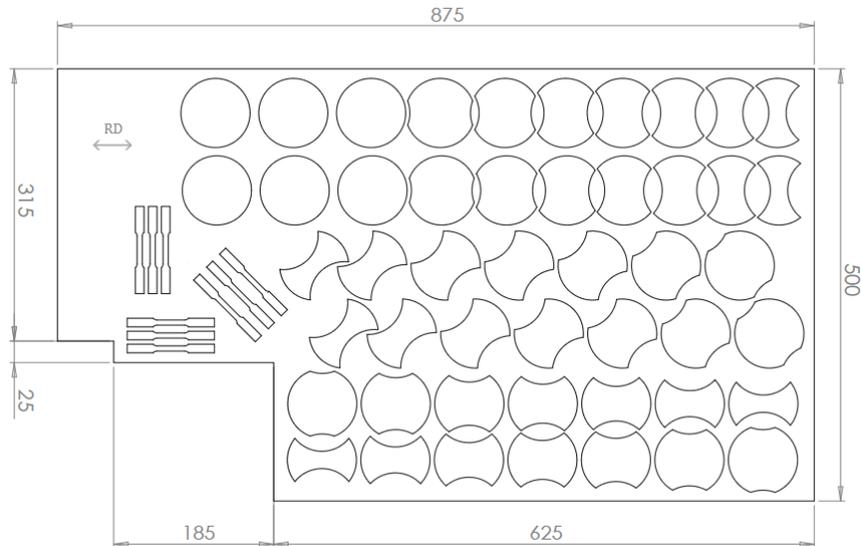


Figura 1. Set de probetas para ensayos de tracción uniaxial y estirado mecánico.

1.2. Limpieza superficial de las probetas

Debido a que generalmente las chapas poseen líquidos grasos (aceite del proceso de laminación) y suciedad consecuencia del manipuleo, se debe someter a las probetas a un proceso de limpieza superficial. Para el mismo puede utilizarse cualquier solvente que no altere la superficie de la chapa, por ejemplo alcohol etílico, y así poder eliminar restos de suciedad superficial que puedan llegar a disminuir la calidad posterior del grillado.

1.3. Proceso de grillado electroquímico

Esta es sin duda una de las tareas más importantes y que requiere mayor habilidad por parte de operador, ya que la calidad del grillado obtenido en las probetas influirá sobre las mediciones que se realizarán al momento de evaluar deformaciones en el proyector de óptico de perfiles. Un buen grillado genera bordes de círculos bien definidos que son fácilmente distinguibles en el equipo de medición.

Como se mencionó en el Capítulo II existen en el mercado una gran cantidad de diseños de estencils que se pueden utilizar. En este caso se optó por el diseño de círculos inscritos dentro de cuadrados (Figura 2) por ser éste el que facilita el procedimiento de medición posterior.

DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

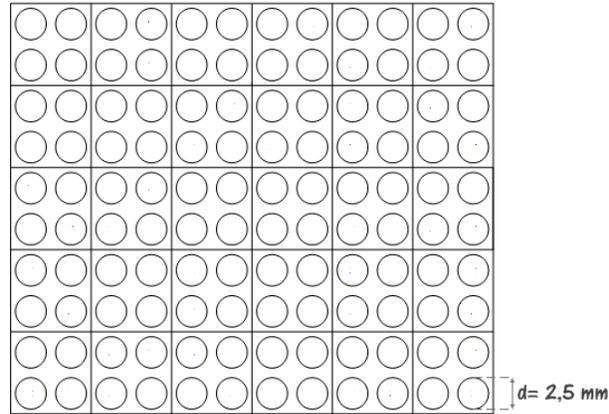


Figura 2. Diseño del estencil.

En base a las especificaciones del manual de uso del equipo (Metaetch Electrochemical Marking Equipment, ME3000T), se encontró que para el acero en estudio (acero galvanizado de bajo contenido en carbono calidad embutido), los parámetros óptimos de grillado son los especificados en la Tabla 1:

Nombre del programa: PRUEBA-ER 1	
Tiempo de retardo en aplicar la corriente	2 [s]
Duración de aplicación de la corriente	2,25 [s]
Intensidad de corriente	7 a 9 [A]
Tensión	6 [V]
Función grillado	Electrolítico
Electrolito	ME8 (contiene NaNO_2)

Tabla 1. Parámetros de grillado.

En la Figura 3 se muestran parte de los accesorios utilizados para llevar adelante el grillado. Se distinguen el estencil, el marcador de mano, los contactos y la muestra de acero. Como factor a tener en cuenta, la cantidad de electrolito con la que se trabaja debe ser la justa y necesaria para no causar grillados defectuosos. Esta cantidad se logra cuando se observa un paño humedecido homogéneamente en toda su superficie. El esquema completo del equipo de grillado electrolítico se puede observar en la Figura 34 del Capítulo II.

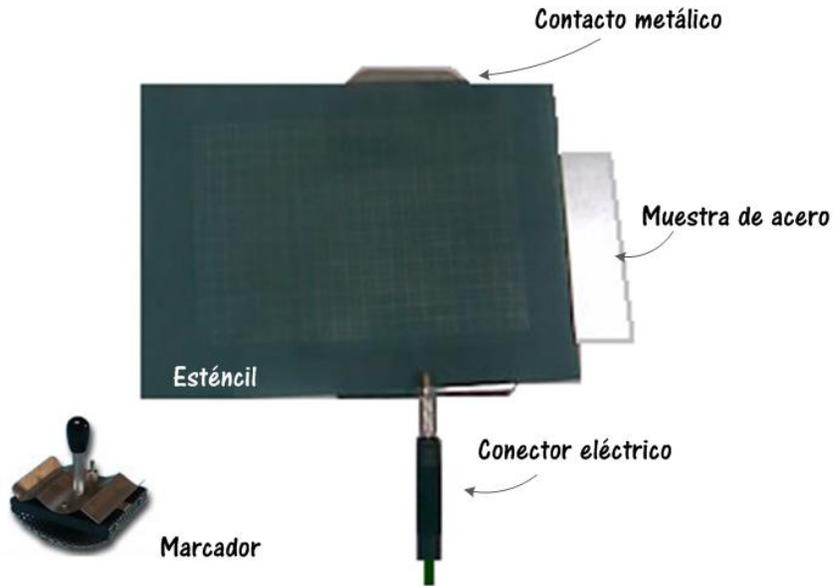


Figura 3. Accesorios del equipo grillador con el que se trabajó.

La Figura 4 muestra el aspecto que adquieren las probetas una vez que han sido grilladas:

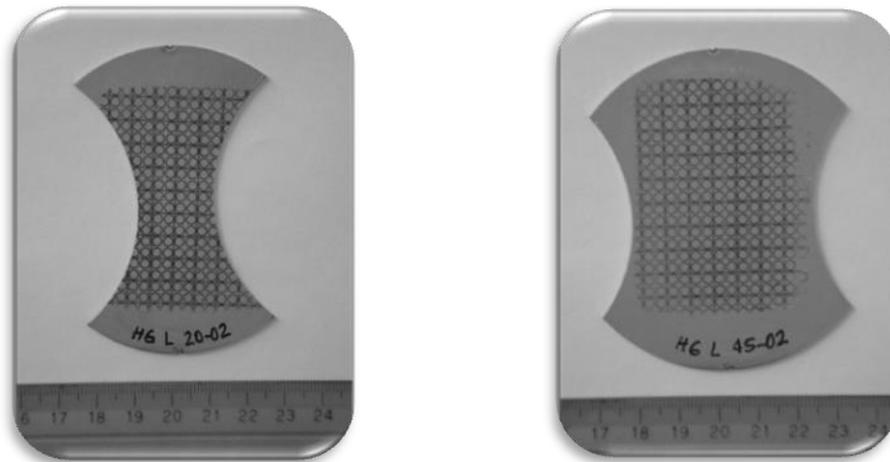


Figura 4. Probetas grilladas.

Uno de los factores que tiene mayor importancia al momento de obtener un buen grillado es la presión que se ejerce sobre el marcador. Es por ello que para el desarrollo del presente proyecto se trabajó con un marcador de geometría convexo capaz de impartir una presión uniforme sobre la superficie de la chapa metálica, Figura 3.

1.4. Entallas de las probetas

Una vez que las probetas han sido cortadas, limpiadas con alcohol etílico y grilladas, el siguiente paso es efectuar sobre las mismas la entalla necesaria para generar las condiciones de estirado buscadas durante la realización del ensayo. Para esto se coloca el aro centrador y la muestra con la parte grillada hacia abajo en la matriz inferior, como se observa en la Figura 5(a). Luego se ubica la parte superior de la matriz y se ajustan los tornillos en forma cruzada con la fuerza necesaria para marcar la ranura en la muestra, Figura 5(b).



Figura 5. Secuencia para la obtención de la entalla; (a) Aro centrador, (b) Ajuste de los tornillos de la parte superior de la matriz.

La entalla formada debe ser simétrica respecto de la probeta para evitar desgarres durante el estirado. Esto generaría zonas con deformaciones heterogéneas las cuales podrían inducir la presencia de defectos de localización. En la Figura 6, se puede ver que las probetas poseen un canal (entalla) perfectamente concéntrico.



Figura 6. Entallas efectuadas sobre las probetas.

El paso siguiente consiste en aplicar el lubricante seleccionado sobre la superficie de las probetas.

1.5. Aplicación de los lubricantes

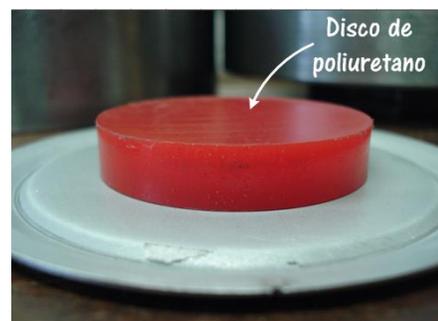
Los efectos que produce la fricción han sido estudiados ampliamente por Nakazima et al. [1] los cuales evaluaron la altura de deformación en ensayos de estirado para varios tipos de aceros y diferentes lubricantes, obteniéndose mayores alturas disminuyendo la fricción con la ayuda de lubricantes. La lubricación juega un papel preponderante y será éste uno de los factores que regulen la variación de espesor del material durante el ensayo.

Para poder lograr dicho efecto en la realización de nuestros ensayos, se emplearon 3 lubricantes de diferente naturaleza:

- Exceptuando a las muestras HG(L-I-T) 80-02, se aplicó sobre todas una delgada capa de Molykote® (spray líquido que contiene partículas de MoS_2) el cual se debe dejar fraguar unos 20 minutos una vez aplicado sobre el lado opuesto al del grillado de las probetas.
- También se trabajó con láminas de politetrafluoretileno, Teflón®, consistentes en delgadas láminas blanquecinas que se cortan de manera que, posteriormente, las mismas actúen en la zona efectiva (algo menor a la geometría completa) para evitar el deslizamiento en el canal durante el ensayo. Dichas láminas se colocan por encima de la capa de Molykote® aplicada, Figura 7(a). Se debe evitar que los extremos de las mismas se ubiquen entre las sujeciones de las probetas.
- Solamente las muestras HG(L-I-T) 80-02 se ensayaron con lubricante polimérico en forma de disco, de igual diámetro que el del punzón, es decir 40 mm, y 4 mm de espesor, Figura 7(b).



(a)



(b)

Figura 7. Lubricantes empleados.

2. ENSAYOS DE ESTIRADO

Como se comentó en apartados anteriores, se realizaron ensayos de estirado del tipo Nakazima sobre probetas HG, mediante el empleo de punzón hemiesférico de 40 mm de diámetro. Para ello se empleó

DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

una máquina de ensayos universal Instron modelo 3382 y se trabajó como en un ensayo de compresión, deformando la muestra a medida que el punzón desciende, a una velocidad de 2 mm/min. Un esquema representativo del conjunto matriz⁵ y el punzón se aprecia en la Figura 8.

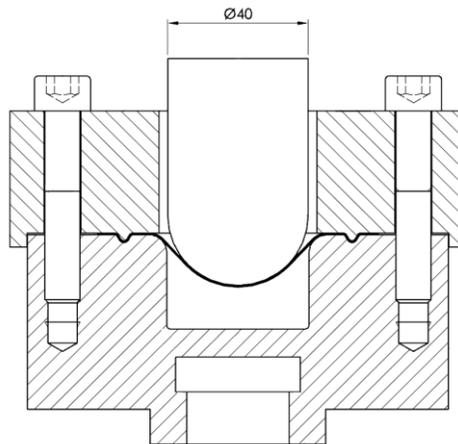


Figura 8. Matriz y punzón de trabajo. Esquema de ensayo tipo Nakazima

En la Figura 9 se observa el dispositivo real de ensayo, detallándose por separado la parte superior e inferior de la matriz, y el punzón hemisférico con el que se trabajó. La parte superior de la matriz posee un agujero pasante por donde se deslizará el punzón. En tanto que la parte inferior posee un agujero ciego, espacio por el cual deformará la chapa ensayada.

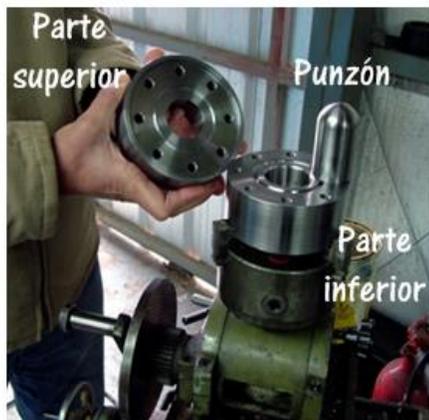


Figura 9. Matriz y punzón hemisférico utilizados para realizar los ensayos de estirado.

En la Tabla 2 se especifican las condiciones que se deben ingresar en el programa de ejecución de la máquina de ensayos.

⁵ El plano de la matriz se detalla en el ANEXO III.

DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

Parámetros a considerar durante para los ensayos de estirado mecánico	
Diámetro del punzón	40 mm
Velocidad de ensayo	2 mm/min
Diámetro de trabajo	50 mm
Longitud	0,60 mm
Etiqueta de la probeta	(por ejemplo: HGL 20-01)

Tabla 2. Parámetros para el ensayo de estirado.

Para realizar los ensayos de estirado mecánico, una vez que ha sido colocada la matriz y el punzón hemiesférico en la máquina de ensayos (Figura 10), se hace descender el barral superior, primeramente con velocidad normal y cuando éste se encuentra a unos 2 mm de distancia con el punzón, se lo hace bajar con velocidad reducida. Luego, se deben llevar a cero los valores de carga y extensión observados sobre la pantalla y se da comienzo al ensayo.

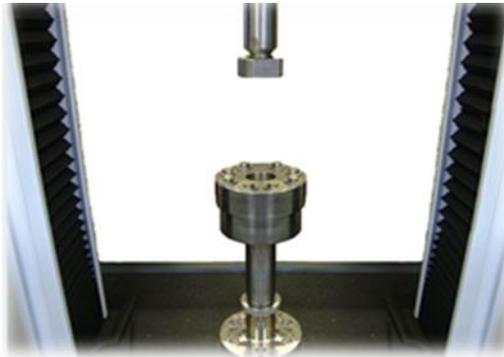


Figura 10. Disposición de la matriz en la máquina de ensayos.

El avance del ensayo se sigue a través de la curva carga-desplazamiento sobre la pantalla de la computadora que monitorea la máquina. Se detiene al mismo cuando se observa una leve caída en la carga. En la Figura 11 se muestra la pantalla del programa utilizado para efectuar los ensayos.

DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

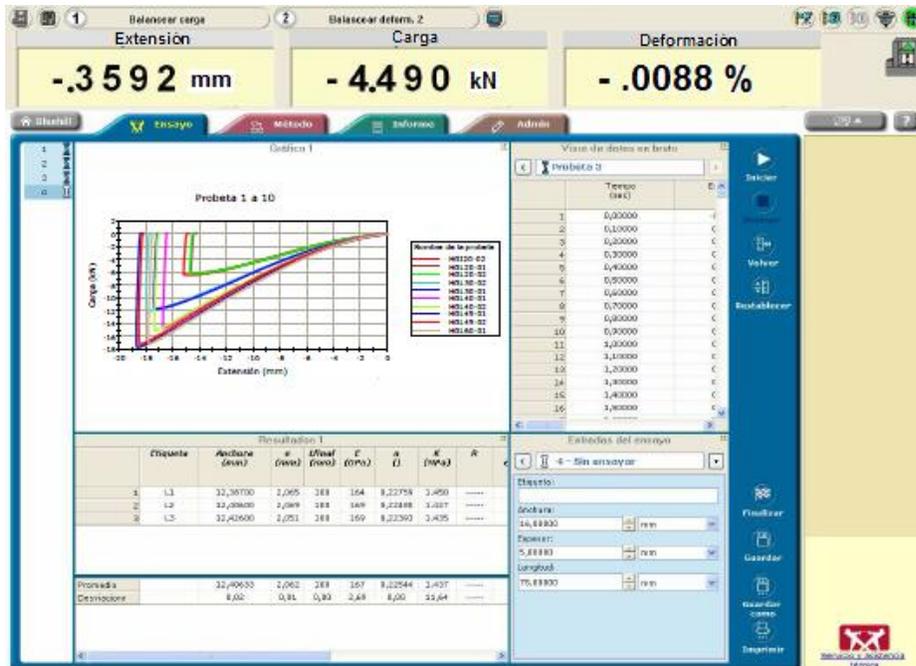


Figura 11. Pantalla del programa de control para la realización del ensayo de estampado.

Una vez finalizado el ensayo, para poder retirar la matriz debe utilizarse velocidad reducida de ascenso durante los primeros 5 segundos, y luego sí, con velocidad normal se procede a elevar el barral superior hasta que éste se encuentre a una distancia considerable del punzón de ensayo. Se retira el conjunto armado (matriz superior e inferior, punzón y muestra) de la máquina de ensayos universal. Se desajustan los tornillos, se saca la matriz superior y se retira la muestra ensayada (Figura 12). De acuerdo al criterio de selección de puntos adoptado para seleccionar los círculos y/o elipses de interés, la muestra ya se encuentra de condiciones para ser llevada al proyector óptico de perfiles donde se medirán las longitudes principales de los círculos deformados.



Figura 12. Probetas deformadas.

3. DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE DEFORMACIÓN

La metodología de selección de los puntos para la construcción del DLC se basó en el criterio de Ziegler et al. [2] teniendo en cuenta las deformaciones experimentadas por el material, aclarando que se marcó con rojo las elipses con estricción localizada, llamando primeros vecinos (azules) a aquellas con estricción difusa, y verdes a aquellas que son segundos vecinos de la estricción, Figura 13(a).

Sobre las probetas en las que se generó una fisura, a las elipses que fueron atravesadas por la misma no se las consideró como datos para la obtención del DLC. En este caso, se marcó con rojo a las elipses que se encuentran muy próximas a los puntos de rotura. El criterio para asignar colores azul y verde está en consonancia con el explicado para el caso de la estricción, Figura 13(b).

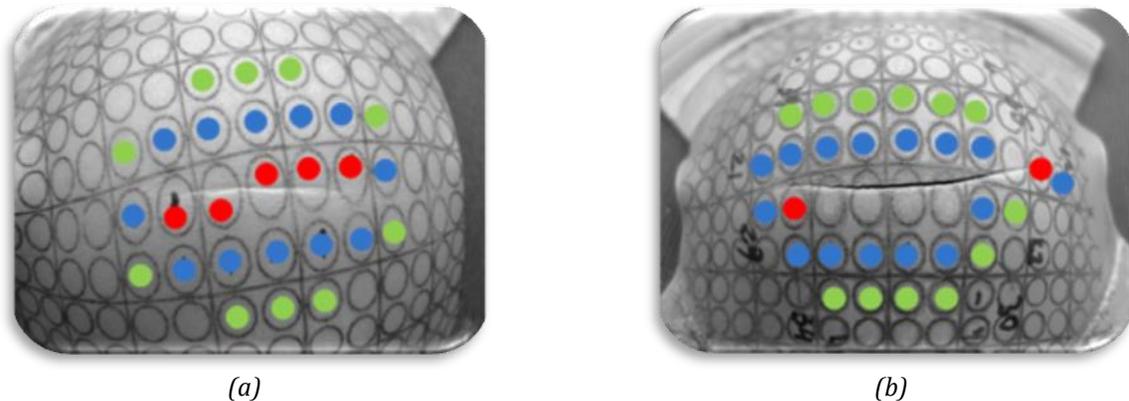


Figura 13. Selección de puntos en presencia de: (a) estricción localizada, (b) grieta.

En su trabajo sobre la determinación de la CLC de un acero de bajo carbono, Campos en [3] presenta una descripción detallada acerca del procedimiento de selección de los círculos deformados.

3.1. Método de medición del grillado post-deformación

Las mediciones de las longitudes principales de las elipses deformadas se midieron utilizando un Proyector Óptico de Perfiles PRAZIS PO-360-VT⁶ de disposición vertical, Figura 14. La técnica de medición desarrollada por Inés et al. [4] se fundamenta en las mediciones de los diámetros externos mayor y menor de las mismas.

Una vez que han sido identificados los puntos de interés sobre la probeta, se miden los diámetros principales en el equipo de medición.

⁶ En el ANEXO I se detallan el protocolo y principio de medición utilizando el proyector óptico (Inés, 2010).

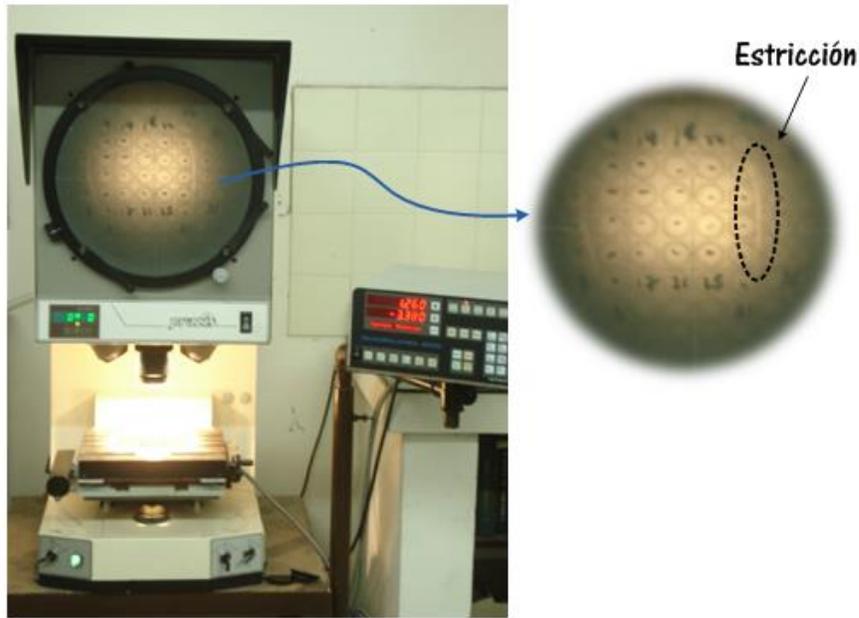


Figura 14. Proyector Óptico de Perfiles.

En la figura anterior se puede observar al equipo de medición, con su correspondiente sistema adquisidor de datos (QUADRA-CHEK), una mesa de coordenadas con movimiento en dos direcciones perpendiculares y una pantalla que es donde se ve reflejado el grillado de las muestras.

Debido a que las probetas que se miden son de geometría convexa se debe trabajar con un dispositivo que permita mantener en todo momento el paralelismo entre los círculos deformados que se medirán y la lente del equipo de medición. La condición mencionada se ejemplifica en la Figura 15. Si no se respeta la misma, no se estará midiendo en verdadera magnitud y por lo tanto las mediciones serán erróneas. También hay que saber delimitar bien los bordes de las elipses. Para un operador bien entrenado la precisión máxima obtenida por engrase es de aproximadamente 0.002 mm.

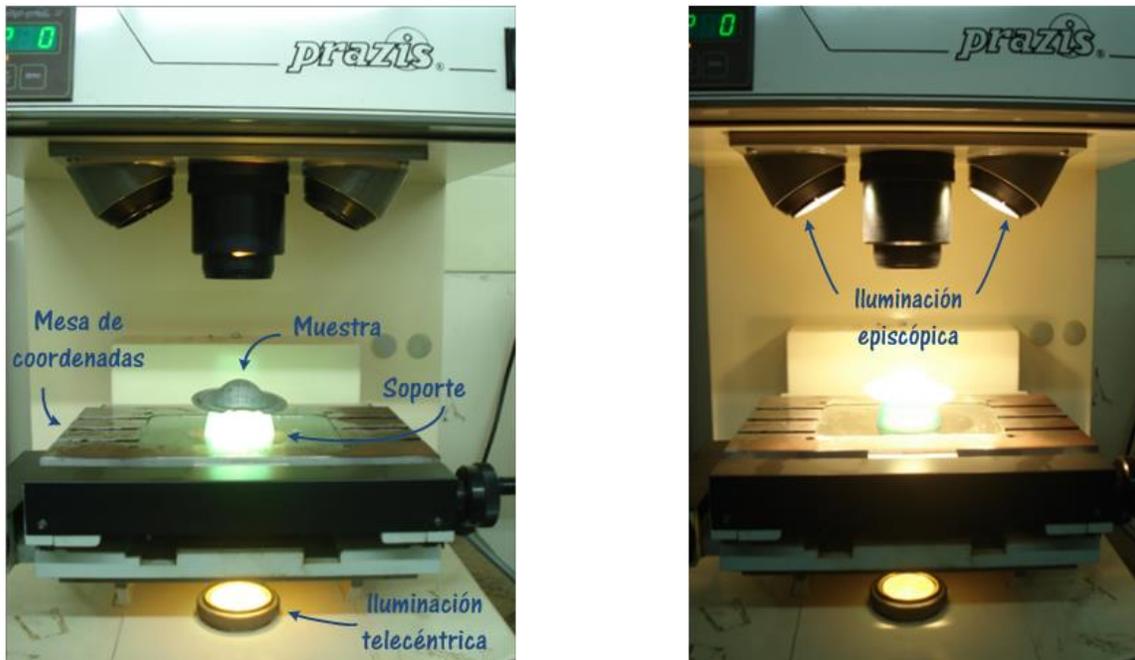


Figura 15. Montaje de la muestra en la mesa de coordenadas. Ajuste del sistema de iluminación.

Habiendo realizado previamente las mediciones de varios de los diámetros d_1 y d_2 del grillado inicial (Figura 16) sobre una de las muestras planas tomada al azar se pudo determinar un único diámetro de acuerdo a la concordancia (exactitud) en las mediciones de cada uno de los diámetros efectuadas. Dicho valor resultó ser: $d_1 = d_2 = 2,627$ mm.

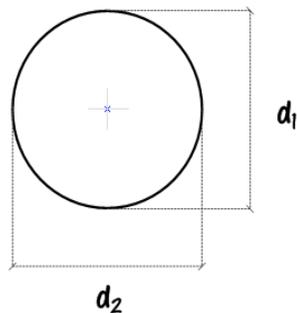


Figura 16. Diámetros d_1 y d_2 iniciales del grillado.

Posteriormente se miden los diámetros principales de los círculos deformados, es decir, las longitudes mayores (d'_1) y las menores (d'_2), Figura 17.

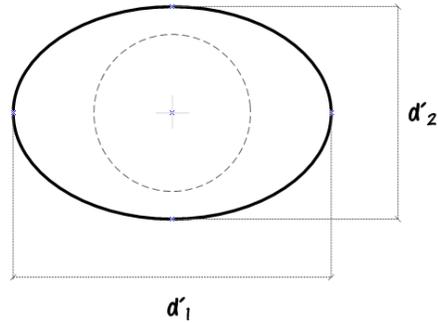


Figura 17. Estado final del los círculos deformados.

Una vez que han sido medidos todos los puntos seleccionados de las probetas longitudinales, inclinadas a 45° y transversales respecto de RD, se cargan dichos valores en una planilla de cálculo, luego se calculan las deformaciones mayores y menores, y se grafican éstas para así obtener las curvas límites.

4. CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA LÍMITE DE CONFORMADO

En aplicaciones industriales, la variabilidad de ciertos parámetros de la materia prima como lo son las propiedades mecánicas, espesor, calidad superficial, etc., son una fuente de incertidumbre en relación con la posición de la CLC [5]. A su vez, las propiedades del acero no son constantes en todos los lotes por más que la química y los tratamientos termomecánicos a los que fue sometida la chapa sean los mismos. Siempre existen pequeñas variaciones durante los procesos productivos. Es por ello que una CLC no puede ser tenida en cuenta como una correcta descripción del límite de conformabilidad para un material en particular. Varios investigadores ([6], [7]) han propuesto un concepto más general, el de la formación de una banda límite de conformado (BLC) basada en una región que cubre toda la dispersión de las CLCs. Una BLC puede ser predecida con éxito usando la distribución estadística normal encontrada en diferentes lotes de producción.

Para el desarrollo del presente trabajo, se han trazado las BLC correspondientes a cada una de las direcciones analizadas, teniendo en cuenta la variabilidad en los valores de las deformaciones obtenidas. Las curvas límites superiores se trazaron considerando que no deben quedar por debajo de ellas puntos rojos (con estricción). La curva límite inferior queda definida al considerar que deben situarse por encima de ella el 95% de los puntos indicados como azules. El ancho de banda queda definido por la región comprendida entre estas dos curvas límites.

Las Figuras 18(a), 18(b) y 18(c) representan las BLC obtenidas para las direcciones longitudinal, inclinada a 45° y transversal respecto de RD, respectivamente.

DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

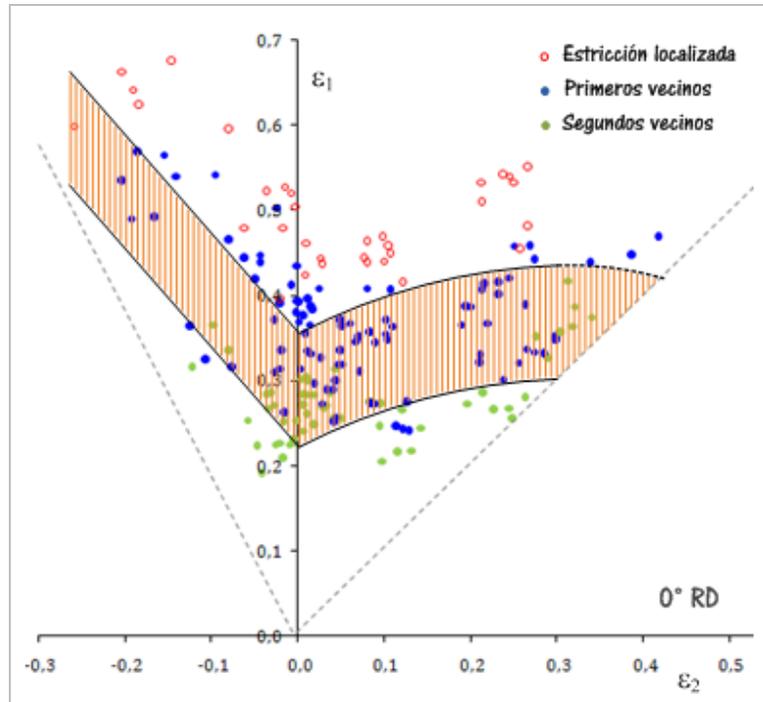


Figura 18(a). Banda límite de conformado a 0° de RD.

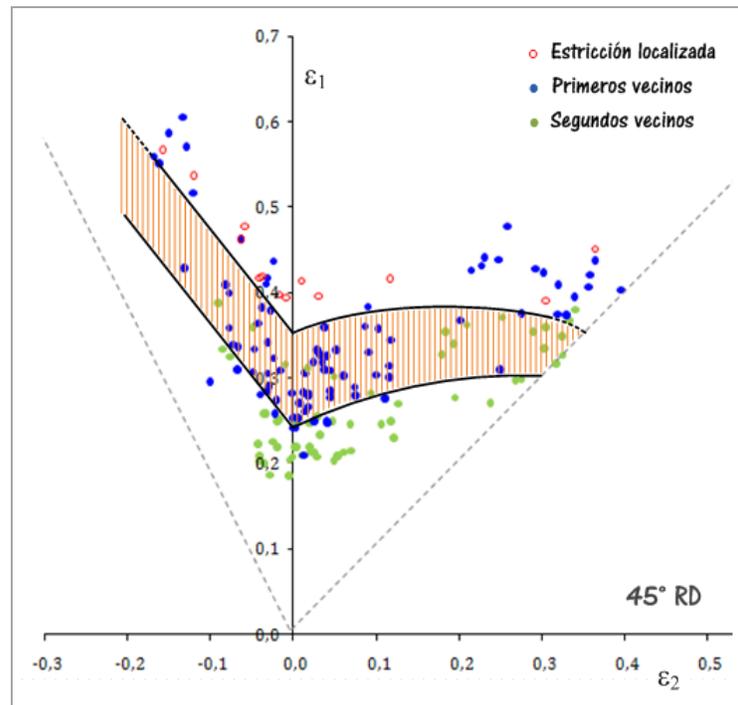


Figura 18(b). Banda límite de conformado a 45° de RD.

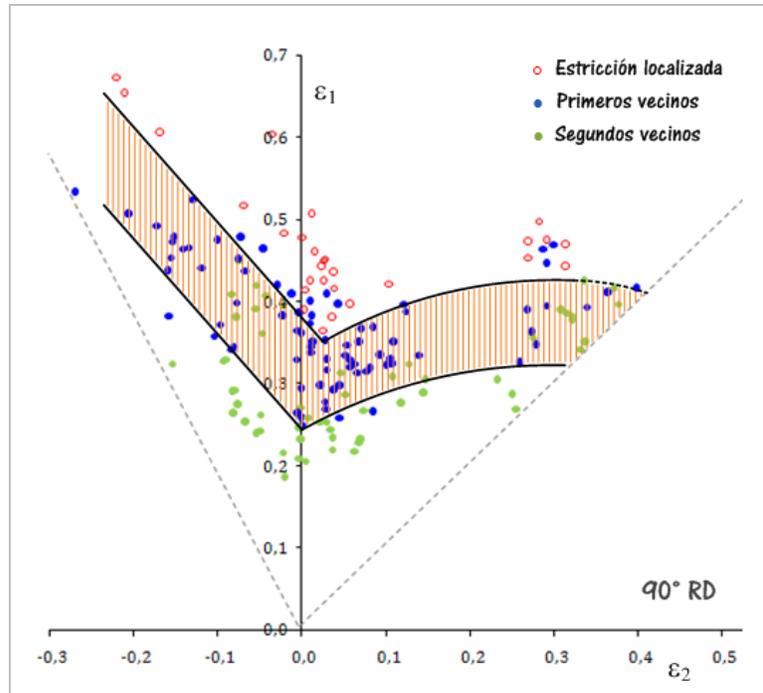


Figura 18(c). Banda límite de conformado a 90° de RD.

Siguiendo las consideraciones de Aretz [8], las deformaciones relativas a las estricciones son causales de mucha dispersión en cuanto a los valores de deformación se refiere, dependiendo aquellas de pequeñas variaciones en la geometría de la probeta, sus propiedades y de las condiciones de borde durante el ensayo, como lo es la fricción. Según se observa en la Figura 18(a), ha quedado un punto considerado como rojo (con estricción) por debajo de la CLC superior trazada. Para dicho caso en particular la estricción es tangente a la elipse; con esto se demuestra que el método DLC genera bastante dispersión en los datos, debido a la falta de un criterio único al momento de evaluar las deformaciones generadas por las estricciones.

A los efectos de comparar la influencia de la orientación del corte respecto de la dirección de laminación, se representaron la tres BLC en un mismo gráfico, Figura 19.

DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

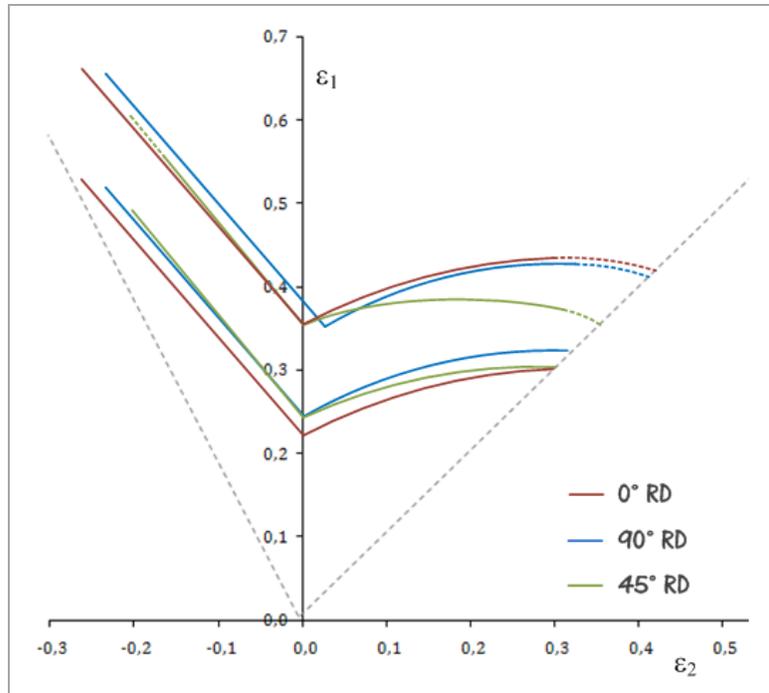


Figura 19. Bandas límite de conformado (0°, 45°, 90°).

Las líneas de trazo discontinuo que se aprecian indican cuales serían los posibles comportamientos del material debido a que no se obtuvieron datos de estricción en dichos sectores. Los resultados indican que existe una ligera variación en la formabilidad en función de la orientación del material con la cual se trabaje.

El valor mínimo de deformación correspondiente a las curvas límites superiores, CLC_0 , se encuentra cercano a 0,35-0,36 de ϵ_1 . Se observa que en el caso de la curva límite superior a 90°, el punto CLC_0 está desplazado hacia la derecha del eje ϵ_1 . En este punto, la deformación límite se alcanza para estados diferentes de los correspondientes a deformación plana ($\epsilon_2=0$). De acuerdo al trabajo presentado por Leppin et al. [9], el corrimiento que muestra esta curva puede ser explicado en relación a una característica inherente al tipo de ensayo con punzón hemiesférico utilizado. En el mismo se trabajó con dos tipos diferentes de aleaciones de aluminio (AA6016 DR100 y con un nuevo desarrollo de la serie 6xxx) empleadas por las industrias automotrices para estampado. Las deformaciones fueron registradas por el sistema estéreo-óptico de medición de deformaciones Aramis a partir de Técnicas de Medición Ópticas GOM sobre ensayos Nakazima y Marciniak. Al graficar los caminos de deformación de cada una de las muestras ensayadas se observa que la mayoría de los mismos no son perfectamente proporcionales. De acuerdo a la Figura 20, sobre el lado izquierdo del mencionado diagrama, los caminos de deformación siguen inicialmente un camino hacia la equi-biaxialidad antes de girar la curva de manera pronunciada hacia la dirección deseada.

DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

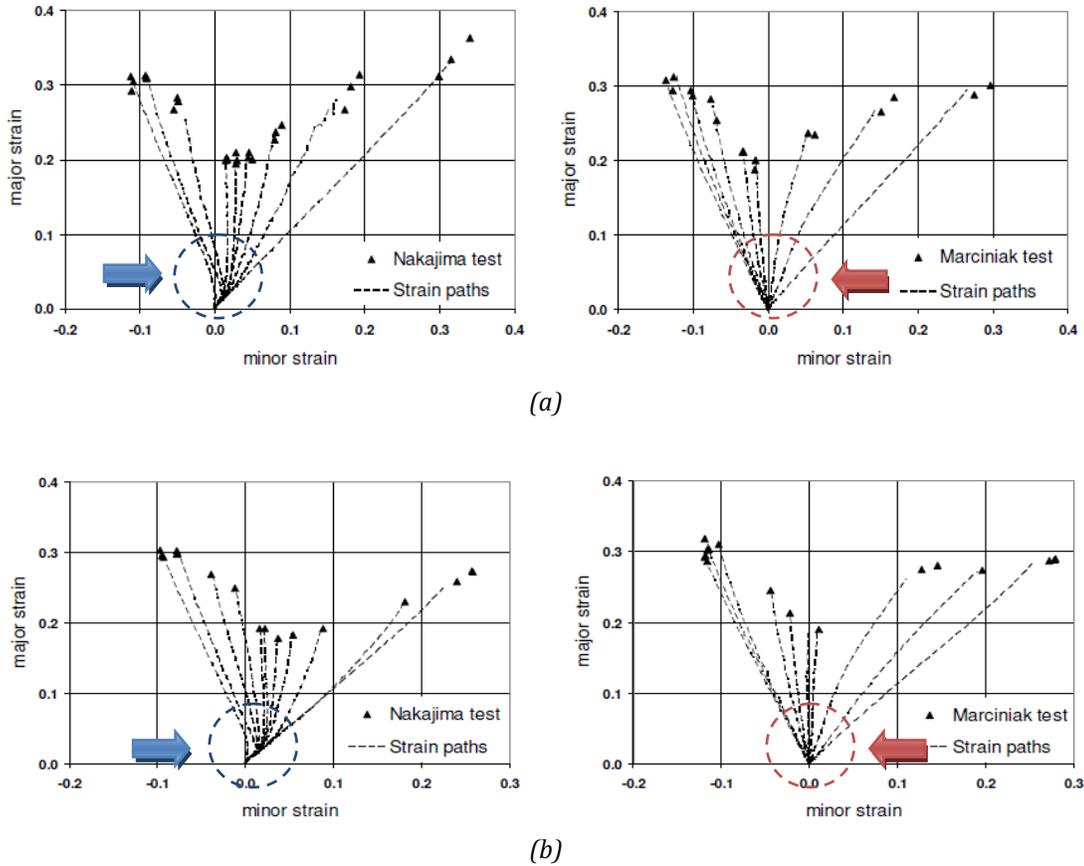


Figura 20. Ensayos Nakajima y Marciniak – caminos de deformación para: (a) AA6016 DR100 y (b) nuevo desarrollo de la aleación 6xxx. [9].

En general, estos gráficos demuestran una tendencia de curvado hacia la izquierda de los caminos de deformación correspondientes a ensayos Nakajima y hacia la derecha para los de Marciniak. Las CLC graficadas en la Figura 21 para ambos tipos de ensayos demuestran una notable diferencia en la localización del punto CLC₀; la curva se desplaza hacia la derecha (en Nakajima) y hacia la izquierda (para Marciniak).

DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

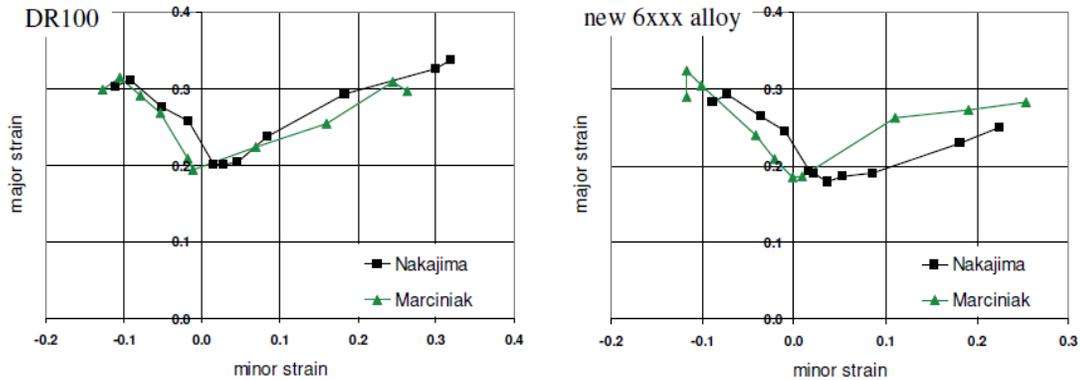


Figura 21. Comparación de las CLC obtenidas mediante ensayos Nakajima y Marciniak par ambos materiales. [9].

Para fines de investigación, los anchos de bandas de las Figuras 18(a), 18(b) y 18(c) son coherentes (30% - 38%) aunque no dejan de ser un poco elevados. No obstante, ello permite un mayor control acerca del entendimiento que se tiene del material cuando es sometido a procesos de deformación. Sin embargo, estos valores distan de ser los considerados por las industrias para el diseño de las matrices utilizadas en los ensayos de embutición profunda y estampado. En la actualidad, los ingenieros tienen en cuenta la variabilidad de la curva límite de una manera puramente empírica. De hecho, dejan sin utilizar cerca del 10% - 20% de la distancia entre los más altos valores de la combinación de deformación ϵ_1 , ϵ_2 y la curva límite. Consideran que una cinta o banda de seguridad del 20% es suficiente para evitar la aparición de defectos [10]. Sin embargo, es posible que la misma se estreche aún más, obteniéndose para este caso un DLC que toma un completo beneficio de la formabilidad de la chapa metálica.

Regularmente en las industrias se trabaja con un ancho de banda de entre el 10% y el 20% para tratar de aprovechar al máximo el material y minimizar las pérdidas. Dicha variación se torna sumamente subjetiva al momento de definir un rango de deformabilidad relativamente homogéneo y de este modo construir la BLC. Debido a ello y como complemento al análisis anterior, se han trazado las BLC correspondiente a cada una de las orientaciones con las que se trabajó, pero considerando que la curva límite inferior queda definida un 10% por debajo de la curva límite superior medida en valores de deformación mayor ϵ_1 , (ver Figuras 22(a), 22(b) y 22(c)).

DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

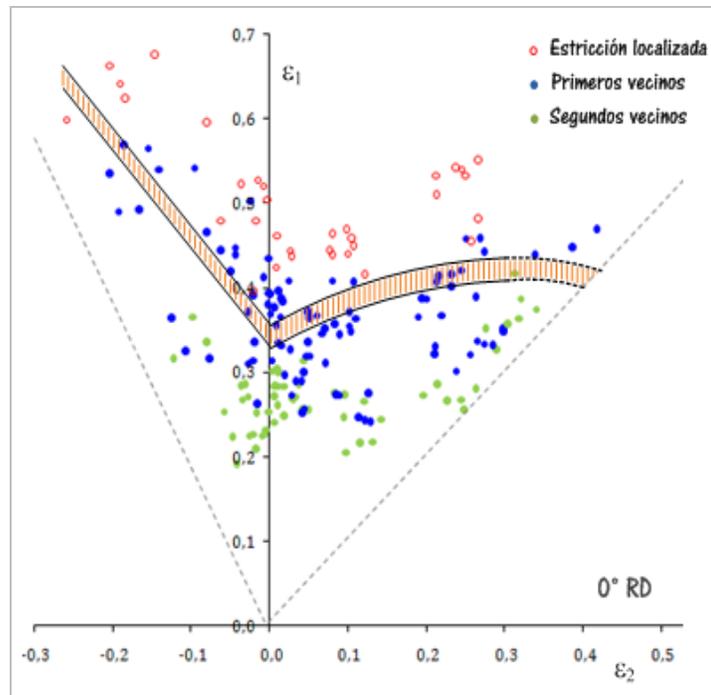


Figura 22(a). Banda límite de conformado 0° .

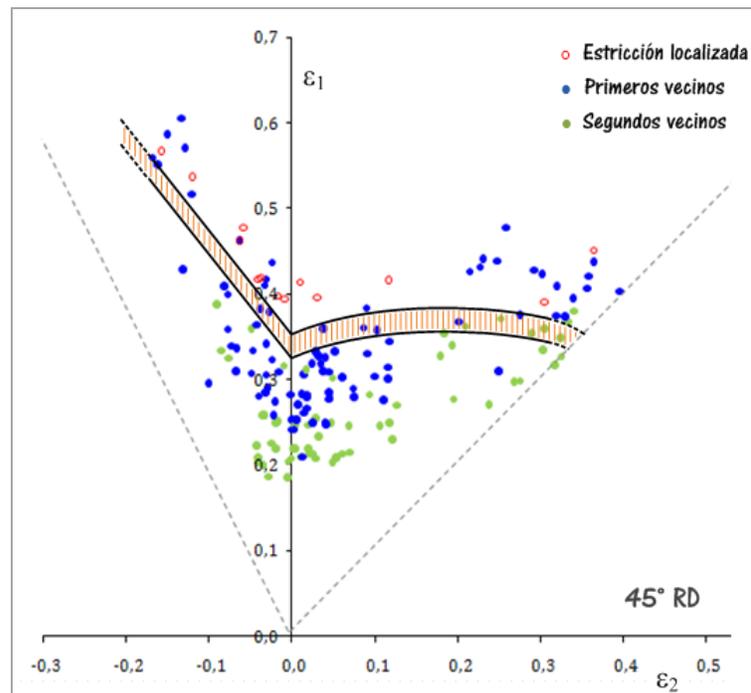


Figura 22(b). Banda límite de conformado 45° .

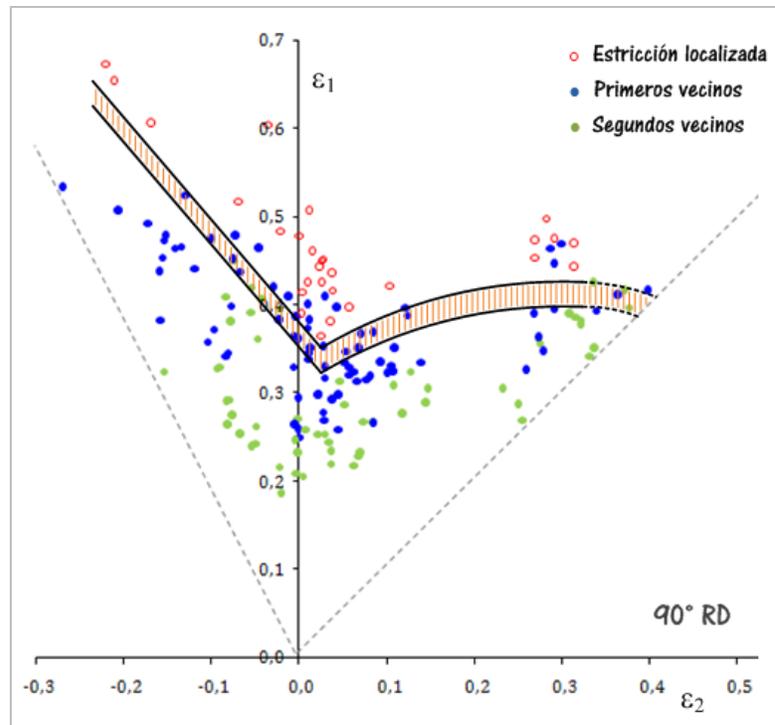


Figura 22(c). Banda límite de conformado a 90°.

Esta variación en el trazado de las mismas permite tener un mayor control y aprovechamiento del material, al definir un rango óptimo de trabajo en el cual se maximizan sus propiedades de conformabilidad.

4.1. Análisis de texturas cristalográficas

De acuerdo al trabajo realizado por Signorelli et al. [11], las orientaciones que se ubican en la fibra γ ($\{111\}\langle 110\rangle$ y $\{111\}\langle 112\rangle$) junto a las orientaciones de las componentes ϵ ($\{554\}\langle 225\rangle$) favorecen la formabilidad de la chapa, mientras que las orientaciones situadas en la fibra α ($\{001\}\langle 110\rangle$ y $\{112\}\langle 110\rangle$) la deterioran. Analizando la fracción volumétrica de las componentes favorables de textura (inicial del material) se encuentra que para el caso analizado no se observan diferencias significativas en las mismas (25-28%), presentándose la siguiente distribución para las tres inclinaciones consideradas: (longitudinal: $\gamma_1=11\%$, $\gamma_2=7\%$, $\epsilon=9\%$; inclinada: $\gamma_1=11,2\%$, $\gamma_2=9\%$, $\epsilon=5\%$; transversal: $\gamma_1=12,5\%$, $\gamma_2=7,5\%$, $\epsilon=7\%$).

Para el sector izquierdo del diagrama BLC ($\rho < 0$) de la Figura 19, se nota que el comportamiento del material es lineal, no se aprecian diferencias significativas, aquí el efecto de textura es menos relevante. En cambio, en las zonas de deformaciones ϵ_2 positivas ($\rho > 0$), se aprecian diferencias en cuanto al comportamiento de conformabilidad se refiere. Los resultados indican que existe una baja influencia del valor de anisotropía sobre la variabilidad de las deformaciones. De acuerdo con [12], la

anisotropía no resulta determinante en la relación de las deformaciones particularmente para el lado derecho del DLC. En ese trabajo, se realizaron ensayos de acopado hidráulico, en las direcciones longitudinal y transversal respecto de la RD del material, utilizando máscaras elípticas con diferentes relaciones de diámetros para tratar de obtener las trayectorias de deformación correspondientes al sector $0 < \rho < 1$.

Aunque la mayor diferencia se localiza sobre las curvas longitudinales y transversales que son superiores en comparación con la inclinada a 45 grados, dicha conducta podría explicarse atendiendo a la mayor fracción volumétrica de componentes γ y ε que presentan las orientaciones en cuestión. Así mismo, esta mayor concentración en las fibras γ y ε es coincidente con los mayores valores de anisotropía obtenidos para las orientaciones antes mencionadas.

No obstante, debido a que estas diferencias son mínimas para las tres orientaciones de la chapa, sería interesante analizar la textura del material posterior a la deformación. El análisis de textura realizado ha podido justificar, en parte, el comportamiento del material frente a estados de deformación tanto uniaxiales como biaxiales. El estudio realizado también resulta coherente con los resultados teóricos reportados utilizando modelos de simulación micromecánicos de plasticidad [13].

5. ESTUDIO DE TIEMPOS

El trabajo de obtención de las curvas límites no es sencillo, requiere dedicación y tiempo. La idea de este punto en particular no es calcular tiempos con precisión sino hacer un análisis cualitativo de la participación de cada ítem involucrado en la actividad, para poder plantear acciones correctivas sobre el problema que permitan desarrollar estrategias de reducción de recursos.

Se considera para ello las 24 probetas geometría reloj de arena que se ensayaron para poder construir las BLC, Figuras 18(a), 18(b) y 18(c). En la Tabla 3 se detalla la duración parcial de cada una de las etapas constitutivas.

DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

Etapa	Tiempo [hs]
Preparación del software	0,5
Desbarbado y limpieza	1,5
Grillado	2,5
Acanalado de las probetas	3
Corte de lubricante polimérico. Aplicación lubricante en spray	1,3
Ensayos	5,5
Selección de círculos deformados	1
Mediciones	24
Procesamiento de datos, análisis y construcción de las BLC	12

Tabla 3. Tiempos insumidos durante el proceso de obtención de las BLC.

Para una mayor comprensión de los tiempos utilizados, se construye el gráfico de la Figura 23.

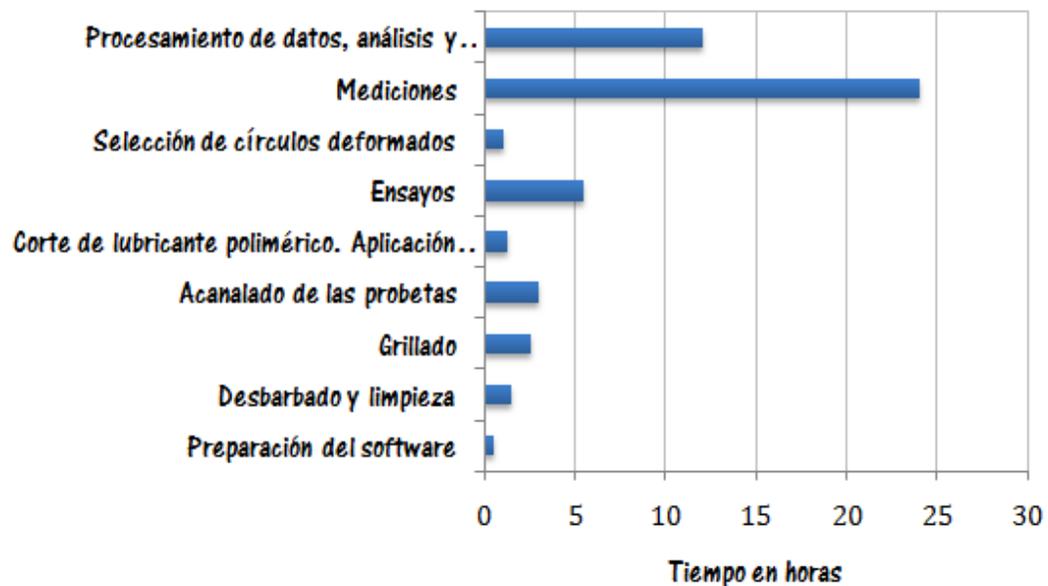


Figura 23. Gráfico de tiempos insumidos.

Según se aprecia, las etapas que mayor cantidad de tiempo demandan son las de las mediciones propiamente dichas y las de procesamiento de datos, análisis y trazado de las BLC. De ahí que la disponibilidad de un equipamiento óptico para determinar el campo de deformación sería de suma utilidad, tanto en reducción del tiempo empleado como precisión en el procedimiento.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Nakazima, T. Kikuma, K. Hasuka, "Study on the formability of steel sheets", (1968), Yawata Technical Report. Vol. 264, 8517–8530.
- [2] D. Ziegler, J. Pedraza, G. Bergé, J. Insausti, A. Lucaioli, P. Monesterolo, M. Puccinelli, "Relación entre parámetros mecánicos y curvas límite de conformado de chapas de acero de bajo carbono", (2007), Congreso SAM/CONAMET, 261–266.
- [3] C. R. Campos, Proyecto Final de Ingeniería Metalúrgica, "Determinación de la Curva Límite de Conformado de un Acero de Bajo Carbono Utilizando Probetas con Diferentes Geometrías", (2010), Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás.
- [4] M. N. Inés, C. R. Campos, G. A. Mansilla, "Propuesta de un método de medición para el grillado de chapas aplicado a ensayos de embutición profunda", (2010), 3º Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales, Concepción del Uruguay.
- [5] D. Banabic, M. Vos, "A new Method to Increase the Robustness in the Simulation of Sheet Metal Forming Processes", (2007), Annals of the CIRP Vol. 56/1/2007, 249–252.
- [6] K. Janssens, F. Lambert, S. Vanrostenberghe, M. Vermeulen, "Statistical evaluation of the uncertainty of experimentally characterised forming limits of sheet steel", (2001), Journal of Materials Processing Technology, 112, 174–184.
- [7] M. Strano, B.M. Colosimo, "Logistic regression analysis for experimental determination of forming limit diagrams", (2006), International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, 673–682.
- [8] H. Aretz, "An extension of Hill's localized necking model", (2010), International Journal of Engineering Science, No. 48, 312–331.
- [9] C. Leppin, J. Li, D. Daniel, "Application of a method to correct the effect of non-proportional strain paths on Nakazima test based forming limit curves", (2008), Numisheet, Interlaken, Switzerland, 217–221.
- [10] B. Carleer, M. Sigvant, "Process Scatter with Respect to Material Scatter. In: New Developments in Sheet Metal Forming", (2006), Editor: M. Liewald, Institute for Metal Forming Technology, University of Stuttgart, 225–239.
- [11] J. W. Signorelli, P. Turner, M. A. Bertinetti, L. Iurman, J. Insausti, A. Lucaioli, C. García, "Predicción de la curva límite de formabilidad en aceros utilizando plasticidad cristalina", (2006), Proceedings Congreso SAM-CONAMET, Santiago de Chile.
- [12] J. Insausti, A. Lucaioli, G. Bergué, D. Ziegler, L. Iurman, M. Puccinelli, "Análisis de la trayectoria de deformación en acopado hidráulico con máscara elíptica", (2010), 5ª Conferencia Sobre Usos del Acero, IAS, Rosario, Santa Fe, Argentina, 433–439.

[13] J. W. Signorelli, M. A. Bertinetti, P. A. Turner, "Predictions of forming limit diagrams using a rate-dependent polycrystal self-consistent plasticity model", (2009), *International Journal of Plasticity*, 25,1-25.

Capítulo V

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- Perspectivas Futuras

Si bien los resultados indican que existe una ligera variación en la formabilidad en función de la orientación del material con la cual se trabaje, el comportamiento del mismo es muy similar para los tres casos.

Se propone un nuevo método para la obtención de las CLC, basado en el ensayo sobre un número reducido de probetas. Se demuestra la eficiencia de éste último en la predicción de la CLC. Se correlacionan resultados con propiedades mecánicas y valores de texturas cristalográficas.

La caracterización mecánico-metalúrgica llevada a cabo sobre el material permite justificar ciertos comportamientos observados en el mismo. Es un recurso altamente indispensable a la hora de llevar adelante cualquier proyecto de estas características.

Según las curvas σ - ϵ graficadas en la Figura 13 del Capítulo III, claramente se observa que el material estudiado posee muy buena ductilidad. Dicha propiedad es connatural del mismo y es justificada por el bajo contenido en carbono que posee el acero (0,07%). Así mismo, el alto valor de tenacidad que posee el acero le permite tener una alta conformabilidad a través de procesos de estirado mecánico y de

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

embutición. La gran proporción de fase ferrítica presente en la estructura (93% aproximadamente) le otorga también una muy buena ductilidad y maleabilidad. Esta ductilidad le permite deformarse más a expensas de una reducción en su resistencia.

El 7% de perlita que posee el acero estudiado se encuentra bajo la forma globular. Esta perlita mejora aún más las propiedades de conformabilidad del acero. La globulización de la misma está directamente relacionada con las temperaturas y los tiempos de los tratamientos térmicos a los que fue sometida la aleación ferrosa. Se sabe que a medida que éstos aumentan, se produce una disminución en la resistencia y un aumento de la ductilidad consecuencia de la transformación de éste microconstituyente (perlita).

Si bien el valor de n calculado para el 15% de deformación ingenieril es elevado para cada una de las orientaciones con las que se trabajó (0,198; 0,199; 0,199 para 0°, 90° y 45° respectivamente), no se observa gran contraste entre éste y la dirección de extracción de las muestras, es más, el coeficiente de endurecimiento permanece prácticamente invariable para cada una de ellas, lo que hace pensar que para este material, el mencionado parámetro es insensible a la dirección de laminación. En este caso en particular, la variación en la forma de los DLC depende exclusivamente del valor de R . Sus altos valores para cada una de las orientaciones a 0°, 90° y 45° (1,633; 1,829 y 1,244) proporcionan buena capacidad del material para ser deformado por embutido profundo.

Atendiendo a la fracción volumétrica de componentes favorables de texturas $\{111\}\langle 110\rangle$, $\{111\}\langle 112\rangle$ y $\{554\}\langle 225\rangle$, y de la componente desfavorable $\{001\}\langle 110\rangle$ - $\{112\}\langle 110\rangle$, ambas con relación al parámetro R , se construye la Tabla 1 relacionando estos datos con el valor de anisotropía del material para cada una de las direcciones estudiadas.

Orientación de la chapa	$\gamma + \epsilon$ [%]	α [%]	R
Longitudinal	27	7	1,633
Transversal	27	3,5	1,829
Inclinada a 45°	25,2	8	1,244

Tabla 1. Comparación entre componentes de texturas y los valores correspondientes de R .

En el rango de deformaciones uniaxiales, $\rho < 0$, se observa un comportamiento absolutamente lineal para las tres orientaciones, Figura 1. Aquí el fenómeno de textura es menos relevante que para el lado derecho del mencionado diagrama. Aunque según se detalla en la Tabla 1, el alto porcentaje de las fibras $\gamma + \epsilon$, acompañados de un bajo valor de fibra α , son consistentes con la buena formabilidad para la orientación transversal en el lado mencionado.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Analizando el rango de deformaciones ε_2 positivas, la menor formabilidad que se observa para la curva límite correspondiente a la orientación a 45° , podría deberse a una mayor concentración en la fibra α que alcanza valores cercanos al 8% para las componentes $\{001\}\langle 110 \rangle$ y $\{112\}\langle 110 \rangle$. No debe descartarse tampoco que haya existido algún error en el proceso de medición, como así también en el procedimiento de selección de los puntos deformados

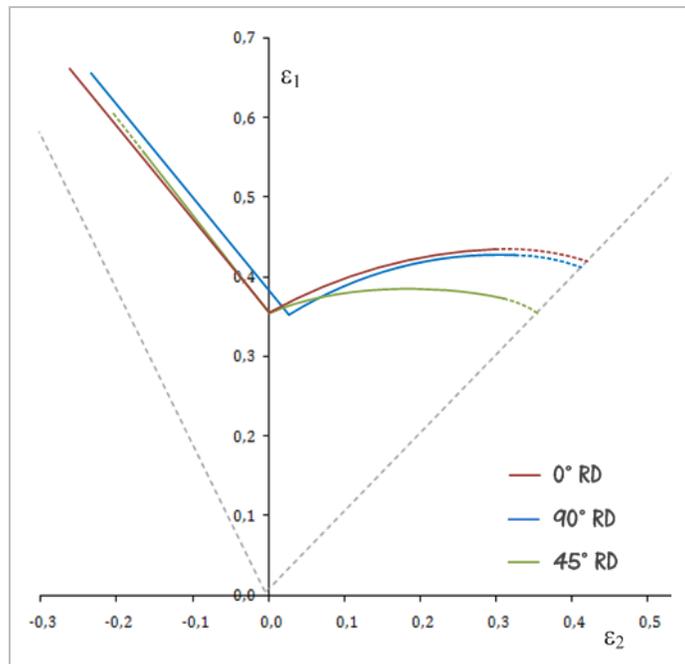


Figura 1. Curvas Límite de Conformado a 0° , 45° y 90° .

Se ha podido determinar, gracias al sistema de análisis de las deformaciones empleado por Leppin et al. [1] en ensayos Nakazima efectuados sobre probetas de aluminio, que durante los primeros instantes en que el material se deforma, el mismo pareciera seguir un camino hacia la equi-biaxialidad para luego girar la curva de manera pronunciada hacia la dirección deseada. Ahora bien, analizando el desplazamiento que presenta la curva límite para la orientación transversal del acero, Figura 1, se podría justificar un efecto relativamente similar al relatado por Leppin. El punto de mínima deformación se encuentra desfasado 0,025 respecto de ε_2 . Para las tres curvas límites graficadas (0° , 45° y 90°), la correspondiente a la orientación transversal es la que posee los dos puntos con estricción de menor deformación mayor ε_1 (0,365 - 0,382) para estados que no son los correspondientes a los de deformación plana ($\varepsilon_2=0$) sino que se ubican en el campo de deformaciones de $\varepsilon_2 > 0$. Como comenta Aretz, es común que las deformaciones experimentales relativas a los puntos de estricción muestren una notable dispersión. Esto se debe a la sensibilidad de la estricción localizada a pequeñas variaciones en la geometría de la probeta utilizada ("*blank geometry*"), a las propiedades del material y a las

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

condiciones de borde en el ensayo como la fricción. Con relación al punto rojo situado por debajo de la curva límite superior correspondiente a la Figura 18(a) del Capítulo IV, en dicho caso en particular la estricción es tangente a la elipse; con esto se demuestra que el método DLC genera bastante dispersión en los datos, debido a la falta de un único criterio al momento de evaluar las deformaciones generadas por las estricciones.

Desde otro punto de vista y considerando la aplicación industrial que poseen estos diagramas, se propone construir el mismo en base a un conjunto mínimo necesario de probetas que permitan obtener los puntos de deformación uniaxial, plana y equi-biaxial, optimizando el procedimiento de construcción, de manera eficiente y confiable. Se demuestra que mediante la correcta selección de las mismas, se obtienen curvas límites muy similares a las que se viene trabajando hasta el momento.

La propuesta de trabajo consiste en ensayar bajo estirado mecánico cuatro probetas geometría reloj de arena (HG 20-45-50-70), cortadas en la dirección longitudinal, transversal e inclinada a 45° respecto de la RD. Todas con un diámetro único y constante de 80 mm, siendo estiradas con un punzón de 40 mm de diámetro. Si bien la probeta equibiaxial HG 80 es muy importante y varios investigadores la proponen como punto de calibración (Banabic, Aretz), en el ensayo de las mismas no se obtuvo la suficiente cantidad de datos (puntos con estricción) que el análisis merece para poder trazar la curva considerando a esas cuatro probetas solamente.

En las Figuras 2 se muestran las CLC obtenidas para cada orientación (0° , 45° y 90° respecto de RD) de acuerdo a este nuevo criterio.

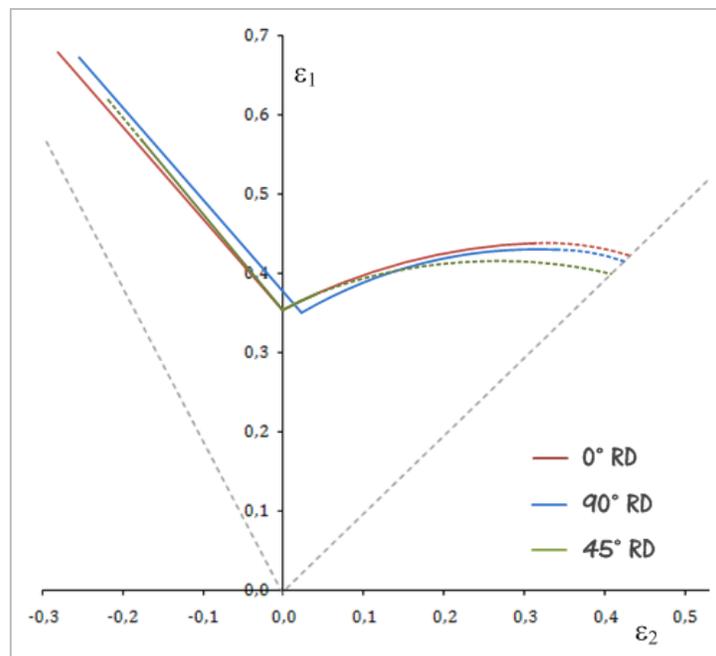


Figura 2. Curva Límite de Conformado (0° , 45° , 90°).

Se ha podido comprobar que las curvas límites graficadas anteriormente no muestran una variación significativa en la formabilidad y son consistentes con las predichas en la Figura 1, no obstante tanto los tiempos insumidos como los costos involucrados para su obtención se han reducido cerca del 50%.

Haciendo eco de las consideraciones anteriormente planteadas, se concluye que:

- Se han determinado las CLC para distintas orientaciones de la chapa (0° , 45° y 90°) respecto de la dirección original de laminado, mediante la realización de ensayos de estirado tipo Nakazima (debido a su mayor disponibilidad con relación a los ensayos de acopado hidráulico) con una máquina Instron 3382, sobre un acero de calidad embutido.
- Se desarrolló la metodología de medición de las deformaciones en un proyector óptico de perfiles.
- Se calcularon los valores de los coeficientes R y n .
- Se observa cierta insensibilidad de la CLC a la orientación con la que se trabaje. Dicho comportamiento puede explicarse al analizar las componentes de texturas ideales del material, las cuales se mantienen en un rango constante de concentraciones relativas de entre 25% y el 27%.
- Las altas concentraciones de las componentes $\{111\}\langle 110\rangle$, $\{111\}\langle 112\rangle$ y $\{554\}\langle 225\rangle$ para las orientaciones longitudinal y transversal favorecen el aumento de R . Dicho comportamiento es inducido por la química del acero y por el tratamiento termomecánico al que fue sometido.
- La menor formabilidad de la orientación inclinada a 45° se debe fundamentalmente a la mayor fracción volumétrica de la Fibra α (8%) la cual es desfavorable para el Lankford en esa dirección ($R=1,244$).
- La influencia de la textura cristalográfica en la variación de los valores de deformación límite es baja. Aunque notoriamente su impacto más directo se aprecia en la zona de deformaciones que tienden a la equi-biaxialidad.
- El criterio de trazado de las bandas límites permite observar con mayor claridad el efecto que sobre la orientación del material produce la anisotropía del mismo. Se comprobó una escasa influencia de la anisotropía sobre la variabilidad de las deformaciones límite, particularmente contemplando el lado derecho del DLC. Sin embargo, la incidencia del valor de anisotropía se pone de manifiesto al considerar el lado izquierdo del mencionado diagrama.
- El criterio de trazado de un ancho de banda del 10% en las Figuras 22(a), 22(b) y 22(c) del capítulo IV, indica un mayor aprovechamiento del material, minimizando las pérdidas económicas causadas por la generación de defectos de localización sobre el mismo.

Debido a la necesidad actual de las industrias de poder contar de manera rápida y confiable con la información brindada por estos diagramas al momento de realizar un nuevo diseño de una pieza o bien, para completar el análisis que se tiene respecto de un producto (para un grado de acero determinado), se sugiere una nueva metodología de trabajo con miras a reducir tiempos y costos asociados. En base al mismo, se puede concluir que:

- Se eligieron las probetas HG 20-45-50-70 porque son ellas la que mejor describen los puntos críticos para este tipo de material.
- Las curvas límites obtenidas muestran gran similitud con aquellas construidas utilizando ocho probetas por diagrama (HG 20-30-40-45-50-60-70-80).
- Con este procedimiento de trabajo, se han reducido cerca de un 50% los tiempos y costos asociados en la obtención de los DLC.

PERSPECTIVAS FUTURAS

En el presente trabajo se han determinado las principales propiedades mecánicas de un acero de bajo contenido en carbono de calidad embutido. También se realizó la medición de la textura cristalográfica del material y el análisis de componentes ideales para poder inferir presencia de fibras deseables frente a la conformabilidad de cada una de las orientaciones de la chapa con las que se trabajó (0°, 45° y 90°).

Un paso siguiente sería poder evaluar, mediante la modelización del conjunto matriz-punzón, las condiciones óptimas de ensayo para tratar de reducir al mínimo los rechazos de las piezas que se generan en cualquier proceso productivo. De este modo se minimizarían las pérdidas económicas y serían mayores los beneficios para las empresas manufactureras.

Otra posible línea de trabajo sería analizar la textura del material posterior a la deformación por estirado, debido a que las diferencias encontradas en las texturas cristalográficas del material laminado son mínimas para las tres orientaciones de la chapa y pueden deberse a pequeños cambios en el desarrollo de la textura.

Finalmente, no es menor el tema de los tiempos insumidos en las mediciones de las deformaciones utilizando un proyector óptico de perfiles. Es ésta la etapa que mayor cantidad de tiempo insume. Es por ello que se propone la compra de otro sistema de medición. El autor sugiere la compra de un equipo de medición óptico o cualquier otro de medición automática de las deformaciones reales experimentadas por el material durante o al finalizar el ensayo⁷.

⁷ Se dispone de información acerca del ARAMIS. No obstante el precio de este equipamiento es intermedio, en orden de 50.000 dólares (<http://www.trillion.com/Products/aramis.html>).

BIBLIOGRAFÍA

[1] C. Leppin, J. Li, D. Daniel, "Application of a method to correct the effect of non-proportional strain paths on Nakazima test based forming limit curves", (2008), Numisheet, Interlaken, Switzerland, 217 – 221.

ANEXOS

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL PROYECTOR DE PERFILES

Un proyector óptico de perfiles es una máquina que combina elementos ópticos y mecánicos de alta precisión. Los proyectores ópticos de proyección vertical resultan más adecuados para controlar piezas pequeñas que pueden apoyarse simplemente sobre la platina de cristal de la mesa de coordenadas. Este equipo se ilustra en la Figura 1.

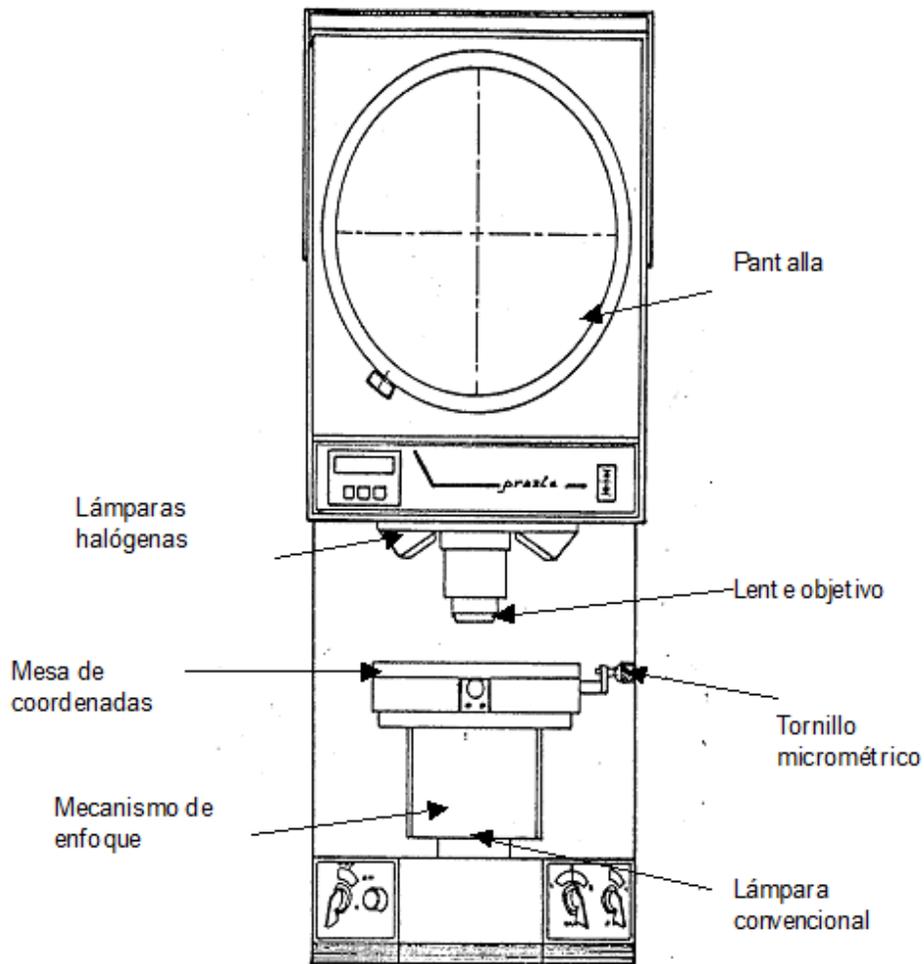


Figura 1. Vista frontal del proyector de perfiles PRAZIS

La Figura 2 muestra esquemáticamente el camino óptico e ilustra el principio de funcionamiento en el modo de proyección de perfiles (diascópico). La pieza a proyectar se coloca sobre la platina de cristal de la mesa de coordenadas, en tanto que una lámpara halógena de alta intensidad y un condensador de dos elementos especialmente diseñados proveen un haz de luz paralela. Esta particular condición de iluminación se denomina telecéntrica, y tiene la importante característica de que un ligero desenfocado de la pieza proyectada no modifica el tamaño de su imagen sobre la pantalla.

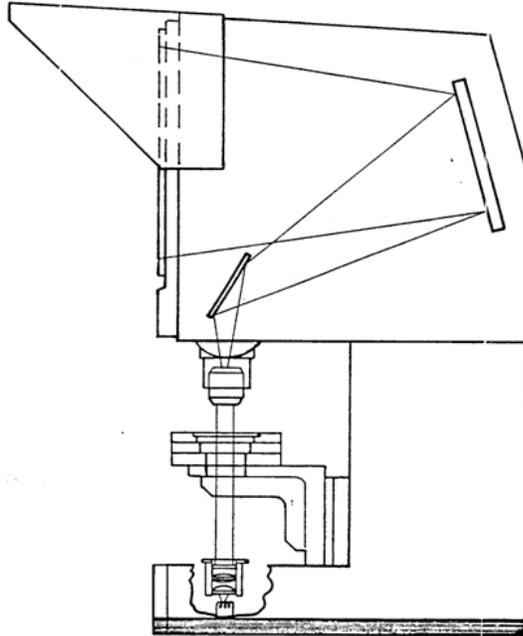


Figura 2. Camino óptico para iluminación telecéntrica

El contorno de la pieza, iluminado por el haz paralelo, se proyecta mediante un objetivo de alta precisión y baja distorsión. Un par de espejos frontales de calidad óptica reflejan los rayos de luz hacia la pantalla para una inspección cómoda y conveniente. La pantalla tiene dos trazos grabados en el vidrio. Estos son rigurosamente paralelos a los ejes de movimiento de la mesa de coordenadas. Las líneas de referencia en la pantalla son de trazo discontinuo, eliminándose así el error visual de enrase, ya que es posible observar el contorno entre trazos, y verificar que esté realmente en el centro delimitado por el espesor de los mismos. Se elimina así el error sistemático usual de un operador que enrase primero con la sombra por debajo de la línea y después con la sombra por arriba de la misma.

Los objetivos standard con los que cuenta el equipo son de 10x, 20x, 50x y 100x.

El sistema de iluminación por reflexión episcópico (Figura 3) permite la realización de mediciones alternativas. Este sistema es particularmente adecuado para la medición episcópica de la superficie de la pieza, o bien para la inspección de situaciones para las cuales la proyección diascópica no es visible. Se ilumina la superficie de la pieza mediante dos potentes fuentes oblicuas laterales, y la luz frontalmente reflejada por el objeto es tomada por el objetivo y proyectada sobre la pantalla.

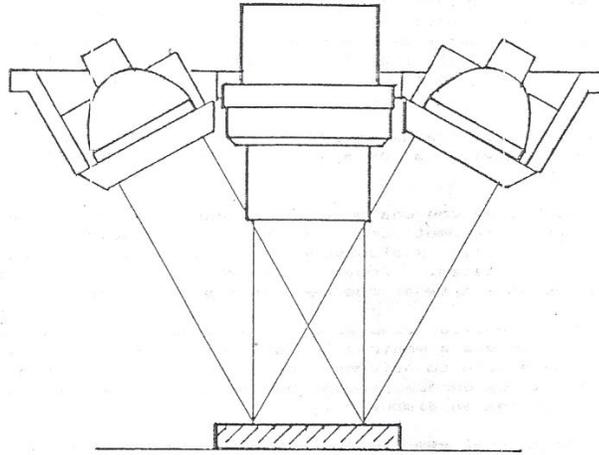


Figura 3. Camino óptico para iluminación episcópica

La medición se realiza desplazando la mesa de coordenadas juntamente con la pieza a medir a lo largo de sus ejes, Figura 4. Sobre cada brazo móvil está montado un tornillo micrométrico con display que permite efectuar mediciones relativas o absolutas y observar en el visor las mismas. La lectura entre dos enrases sucesivos realizados a ambos lados de la pieza determina su dimensión.

La mesa de coordenadas tiene una superficie de trabajo de 290mm x 180 mm, con una platina central de cristal de 158mm x 108mm. Los desplazamientos son sobre pistas rectificadas y rodamientos a rodillos aguja. El enfoque (movimiento vertical de la mesa de coordenadas) se encuentra motorizado y se comanda mediante una llave pulsadora ubicada en el frente del equipo

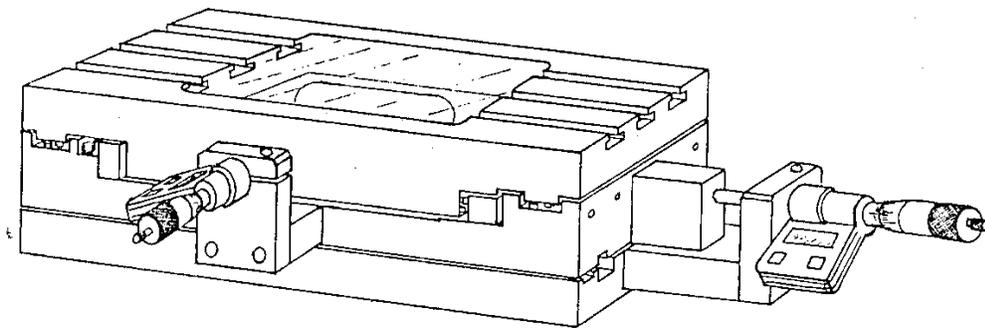


Figura 4. Mesa de coordenadas donde pueden apreciarse también los tornillos micrométricos.

Para un operador bien entrenado la precisión máxima obtenida por enrase es de aproximadamente 0.002 mm.

MEDICIÓN SOBRE SUPERFICIES CURVAS

Cuando se deben realizar mediciones en probetas que han sido deformadas (embutidas) la medición se torna más compleja que cuando se mide el grillado inicial en muestras planas. Para efectuar la medición debe tenerse en cuenta que la elipse que se medirá debe quedar perfectamente perpendicular al haz de luz reflejado por la muestra (emitido por el sistema de iluminación episcópico). Esta condición se hace muy difícil de obtener sin la ayuda de un soporte que posea la misma geometría que la de la probeta, es decir, para nuestro caso debe poseer una superficie convexa que se adapte perfectamente a la misma, Figura 5.

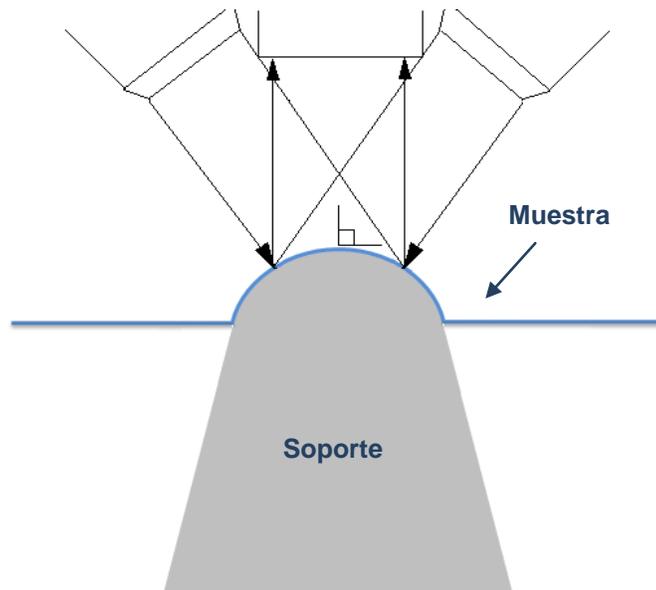


Figura 5. Soporte para mediciones sobre muestras que han sido previamente deformadas

Una vez colocada la muestra sobre el soporte, se siguen los lineamientos planteados a partir del punto 4 del “Protocolo de medición en Proyector de Perfiles”.

Cada vez que se midan las dimensiones de las distintas elipses sobre la muestra, se deberá tener en cuenta que debe existir perpendicularidad entre las mismas y el haz, lo que se logra moviendo manualmente la probeta sobre el soporte hasta lograr dicha condición.

MÉTODO DE MEDICIÓN EN PROYECTOR ÓPTICO DE PERFILES

Como se observa en la Figura 6, el conjunto de la pieza con el soporte se coloca sobre la platina de cristal de la mesa de coordenadas del proyector. Posteriormente, se encienden los sistemas ópticos de luz, episcópico y diascopico.

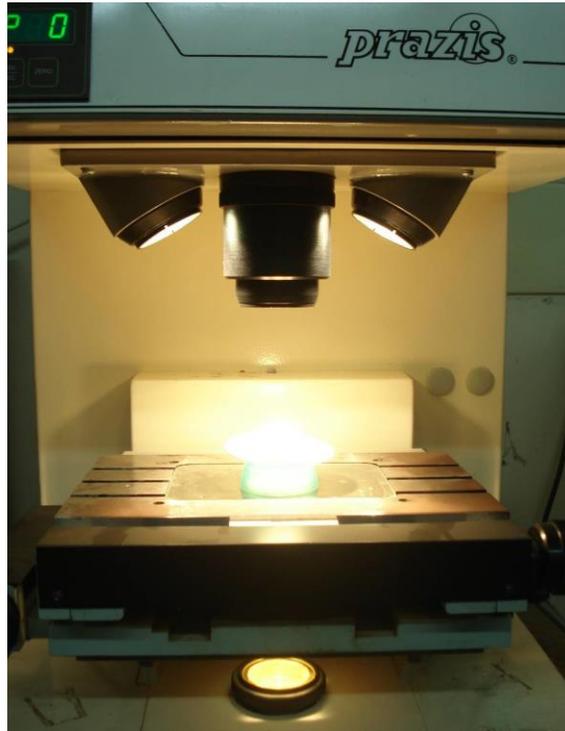


Figura 6. Ubicación del conjunto soporte-muestra sobre la mesa de coordenadas del proyector. Sistemas de iluminación activos.

Para obtener un buen enfoque sobre la superficie de la probeta, se debe realizar un movimiento vertical de la mesa de coordenadas, la cual se encuentra motorizada. Focalizada la elipse que se medirá sobre la pantalla esmerilada del proyector, respetando la perpendicularidad antes mencionada, se ubican las líneas de referencia del mismo sobre el borde externo de la elipse - tangente a la misma - (sea que se quiera medir el diámetro mayor ó el menor). Luego se lleva a cero el sistema adquisidor de datos (según el eje que se quiera medir) y a través del movimiento del tornillo micrométrico, se desplaza la mesa de coordenadas hasta que se observe sobre la pantalla del equipo que se llegó al extremo opuesto de la elipse (también tangente al borde externo).

Se observa sobre el sistema adquisidor de datos cual es valor del diámetro medido, se anota el mismo y se procede a medir el diámetro restante siguiendo la misma metodología empleada anteriormente, pero esta vez desplazando el tornillo micrométrico restante y llevando a cero el eje correspondiente (eje X ó eje Y) en el Quadra-Chek.

En base a múltiples mediciones que se han llevado a cabo considerando los diámetros internos, interno y externo, medios, o bien, ambos externos, se ha llegado a la conclusión que la manera más precisa es medir considerando los diámetros externos de las elipses [1].

PROTOCOLO DE MEDICIÓN EN PROYECTOR DE PERFILES

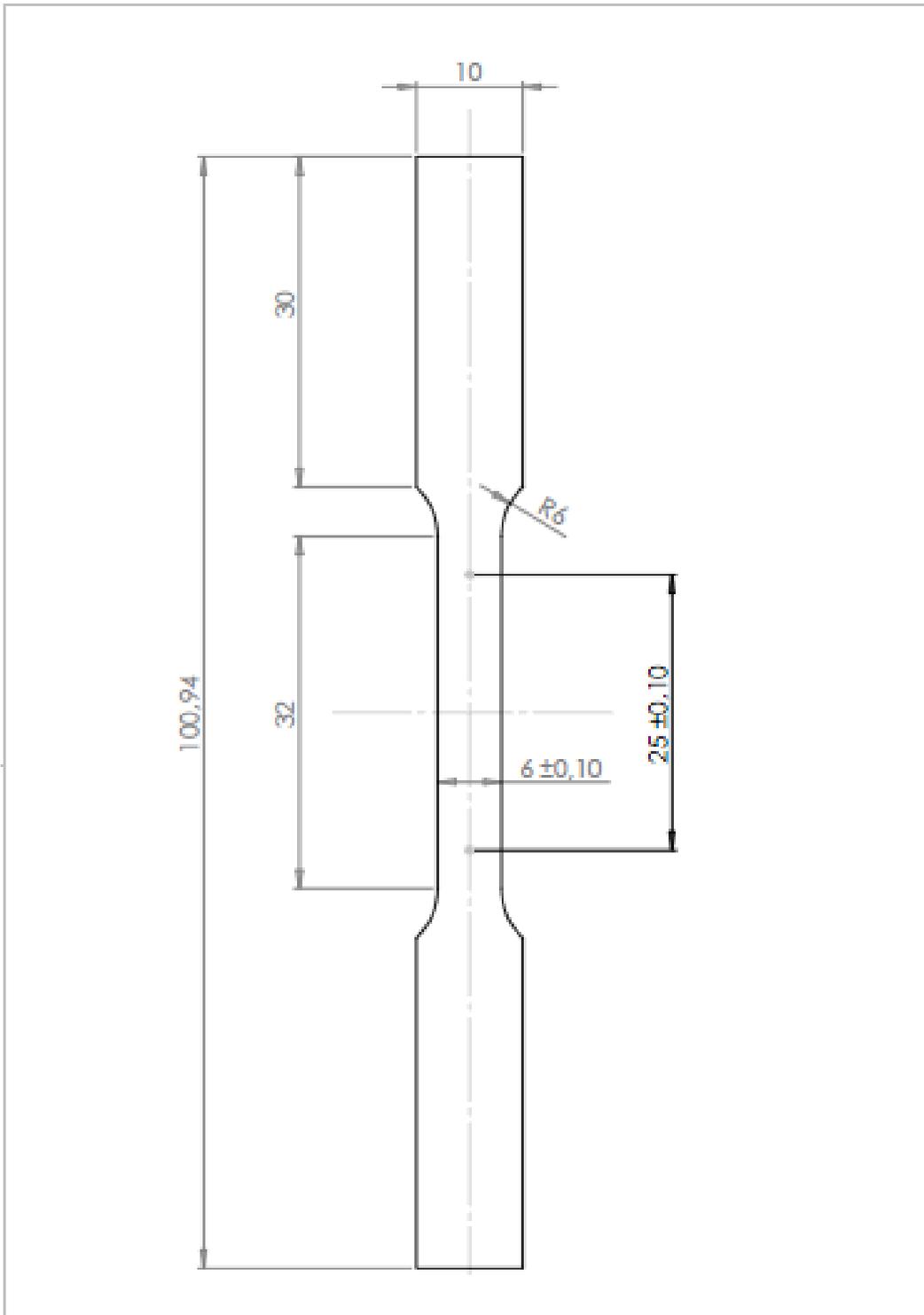
1. Encender el QUADRA-CHEK.
2. Etapa de calibración del equipo adquirente de datos QUADRA-CHEK.
 - a. Presionar tecla "SET UP" (dos veces).
 - b. Luego presionar la tecla "ENTER".
 - c. Buscar en la pantalla del display la inscripción "SUPER" (descendiendo con la flecha) y luego presionar "ENTER".
 - d. Escribir el código de seguridad "(xxxxxx)" y luego presionar "ENTER".
 - e. Buscar en la pantalla del display del QUADRA-CHEK la inscripción "PRESCALE" (descendiendo con la flecha), presionar "ENTER" y luego oprimir la tecla número 1 del teclado.
 - f. Luego oprimir la tecla "ENTER" (dos veces) y después la tecla número 2 del teclado.
 - g. Presionar "ENTER", "QUIT" y por último "FINISH".
 - h. Seleccionar el sistema de medición (pulgadas o mm).
3. Encender el Proyector de Perfiles.
4. Ubicar la probeta sobre la mesa de coordenadas.
5. Encender la luz Episcópica mediante la llave "EPI", ubicada en el frente del Proyector sobre la parte inferior derecha del mismo. Dicho dispositivo óptico emplea un sistema de luz por reflexión que permite observar el grillado sobre la pantalla de cristal esmerilado del Proyector de Perfiles.
6. Ajustar la altura de la mesa de coordenadas mediante la llave que permite desplazar a la misma en sentido vertical ascendente y vertical descendente hasta que se pueda observar con nitidez el grillado sobre la pantalla.
7. Ajustar con la luz Diascópica la luminosidad sobre la probeta, girando la perilla "DIA", la cual está ubicada en el frente del Proyector sobre la parte inferior derecha del mismo. Se recomienda siempre, en la medida de lo posible, trabajar con la intensidad menor, ya que así se extiende la vida útil de la lámpara. Dicha luz utiliza un sistema óptico de transmisión para mejorar la luminosidad sobre la probeta.
8. Ubicar las líneas de referencia de la pantalla de cristal esmerilado en el centro de la elipse y una vez hecho esto, mover el micrómetro del eje "x" hasta que el punto de intersección de dichas líneas de referencia coincida con el borde externo de la elipse.
9. Luego presionar la tecla "X" del QUADRA-CHEK para fijar el cero de medición.

10. Una vez definido el cero, mover el micrómetro del eje “x” hasta hacerlo coincidir con el extremo opuesto de la elipse y registrar en forma manual el valor dado en la pantalla del QUADRA-CHEK. De esta manera queda definido el valor de la longitud en el eje “x”.
11. Repetir los pasos 7, 8 y 9, pero trabajando con el eje “y”. Los desplazamientos se efectúan con el micrómetro correspondiente a dicho eje y presionando la tecla “Y” del display del QUADRA-CHEK.
12. Al finalizar, apagar primeramente el QUADRA-CHEK, luego los sistemas ópticos y por último el Proyector de Perfiles utilizando la llave que se encuentra en el frente del proyector, sobre la parte inferior izquierda del mismo.

REFERENCIAS

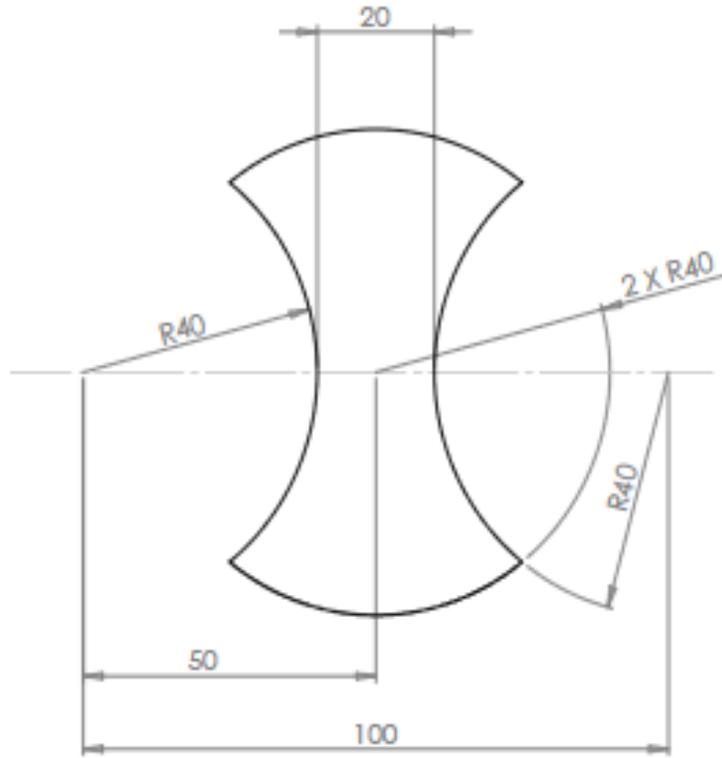
[1] M. N. Inés, C. R. Campos, G. A. Mansilla, “Propuesta de un método de medición para el grillado de chapas aplicado a ensayos de embutición profunda”, (2010), 3er. Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales, Concepción del Uruguay.

ANEXO II: PLANOS DE LAS PROBETAS



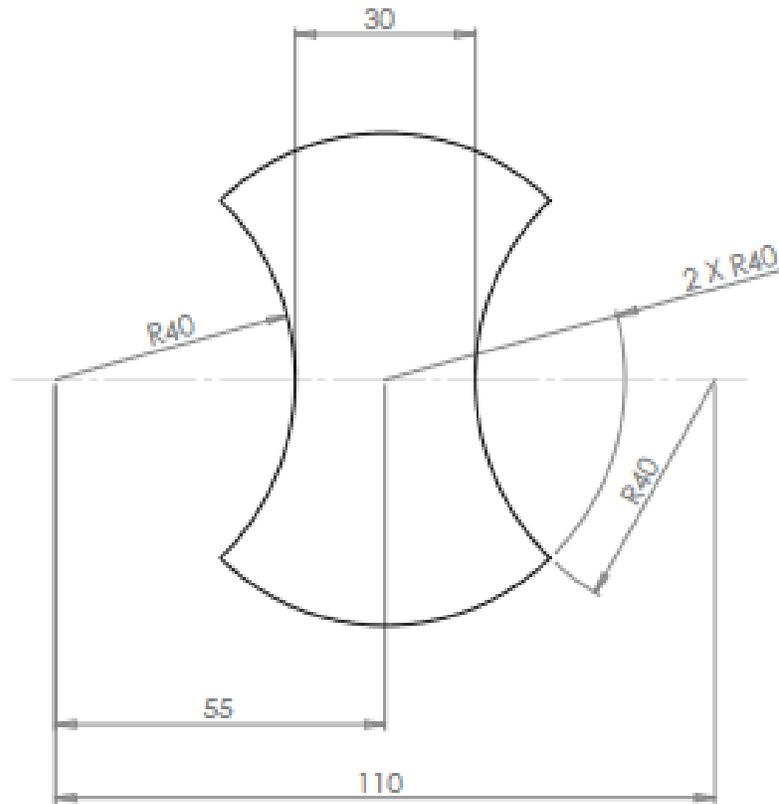
FECHA: 26/10/2009	REVISION:	ESTADO:	ASTM E8M
PROYECTISTA:			
IFIR INSTITUTO DE FÍSICA ROZARIO	MATERIAL:	PLANO N.º:	A4
	PROJ:	ESCALA: 1	HDSM 1 DE 1

ANEXO II: PLANOS DE LAS PROBETAS



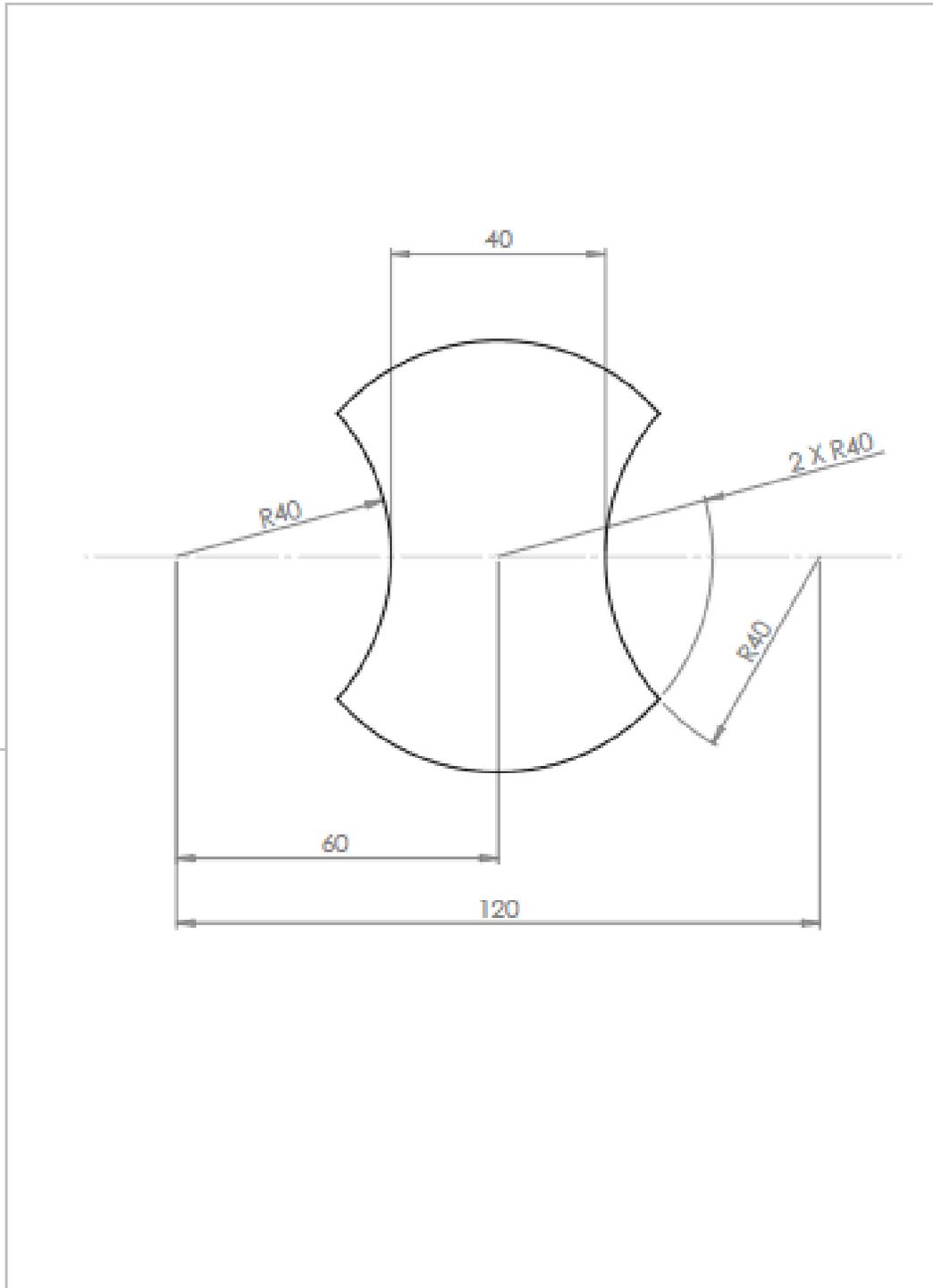
FECHA: 07/09/2009	REVISION	ESTADO:	HG20
PROYECTISTA:			
IFIR INSTITUTO DE FÍSICA ROSSARIO	MATERIAL:	PLANO Nº:	A4
	PROJ:	REVISOR:	HOGA 1 DE 1

ANEXO II: PLANOS DE LAS PROBETAS



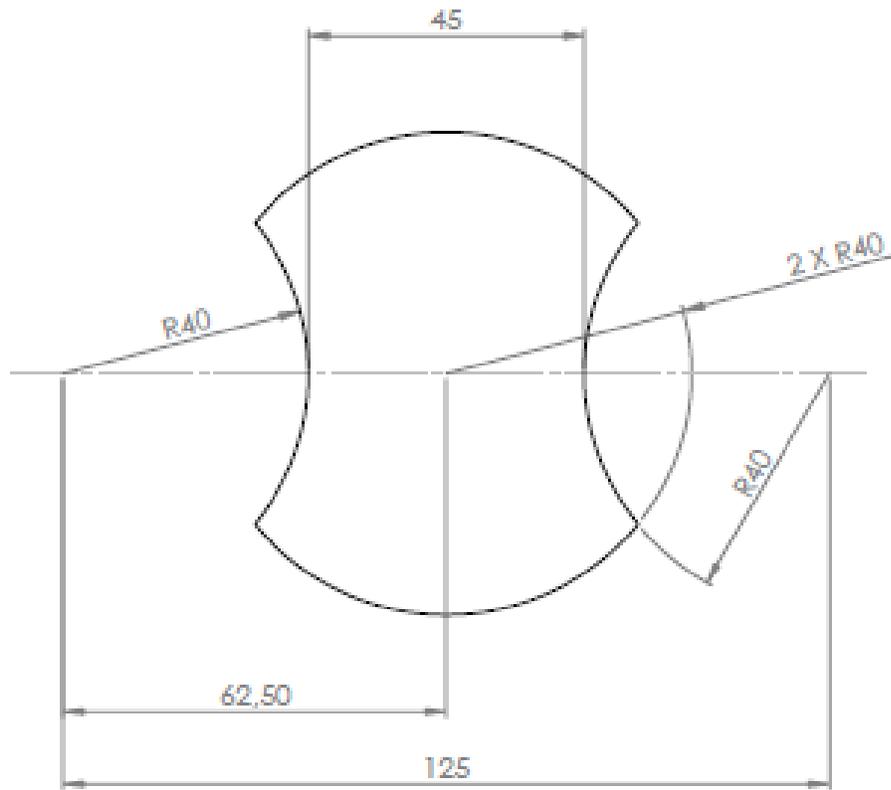
FECHA: 07/09/2009	REVISOR:	PROYECTO: HG30
PROYECTISTA:		
 INSTITUTO DE FÍSICA ROZARIO	MATERIAL:	PLANO N.º: A4
	PROJ:	ESCALA: 1:1
		FOLIA 1 DE 1

ANEXO II: PLANOS DE LAS PROBETAS



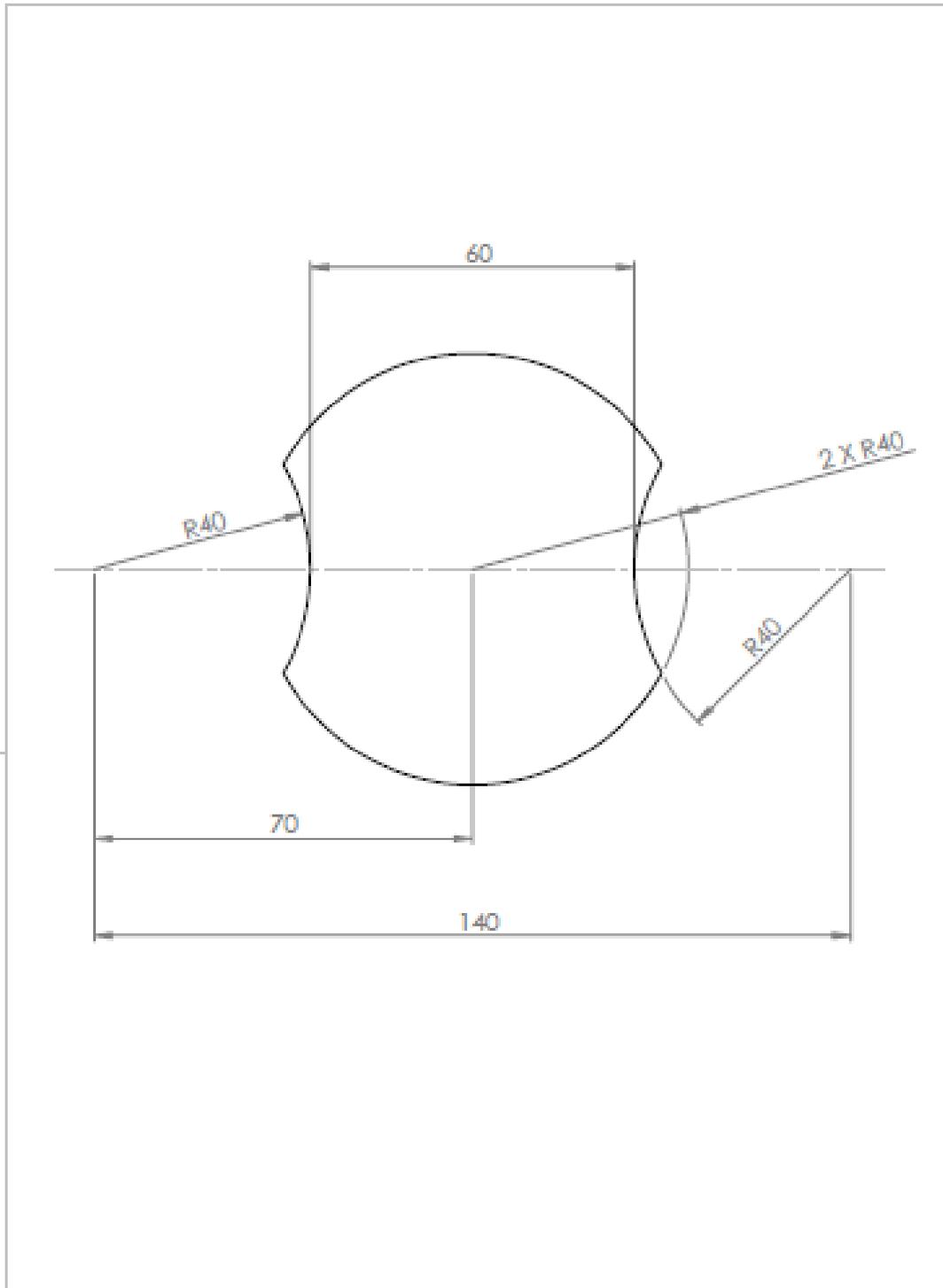
FECHA: 07/09/2009	REVISION:	TÍTULO: HG40	
PROYECTISTA:			
IFIR <small>INSTITUTO DE FÍSICA ROJARIÓ</small>	MATERIAL:	PLANO Nº:	A4
	FIG.:	ESCALA: 1:1	FOLIO 1 DE 1

ANEXO II: PLANOS DE LAS PROBETAS



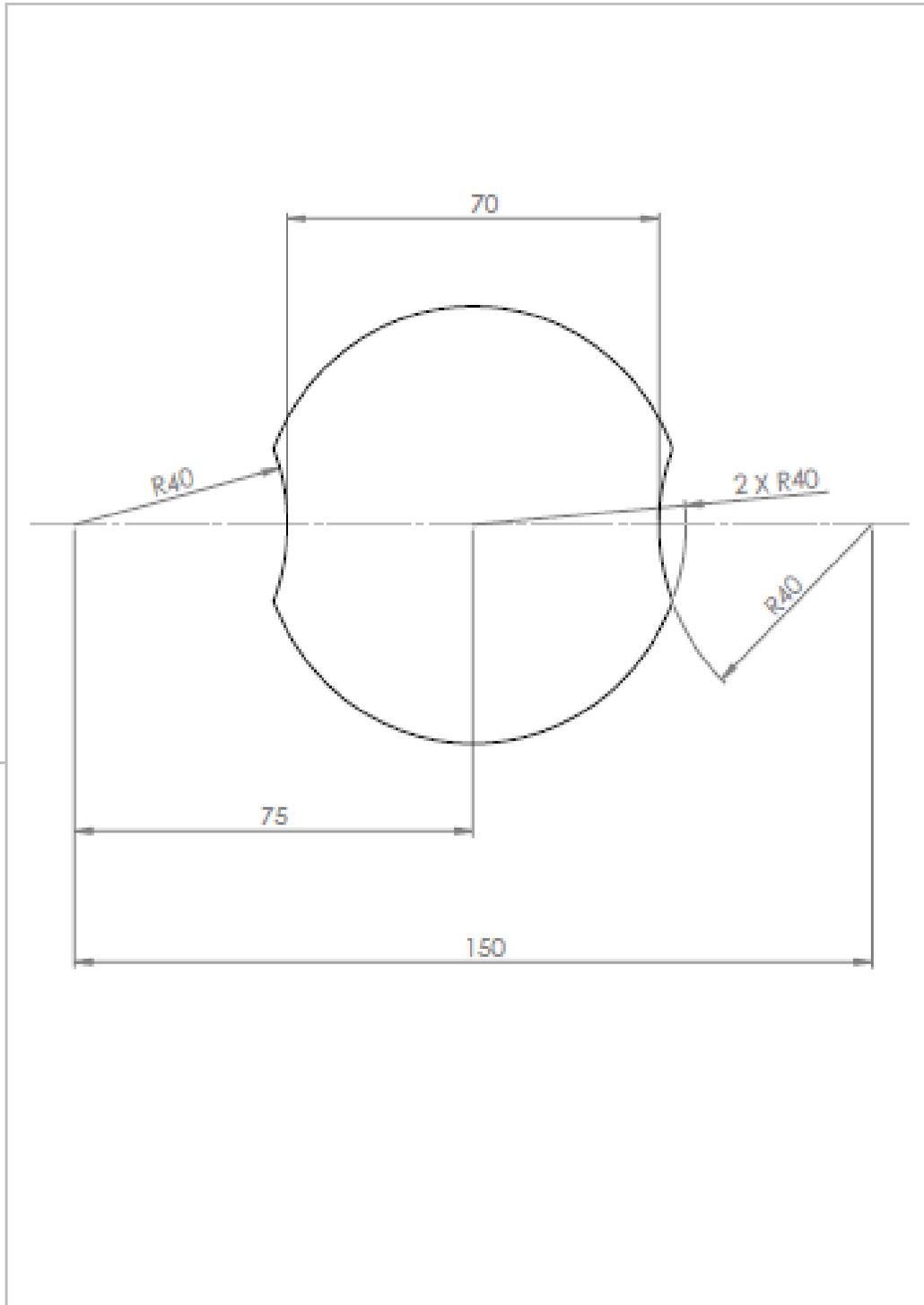
FECHA: 07/09/2009	REVISION:	BLD:	HG45	
PROYECTISTA:				
IFIR <small>INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FISIOLÓGICAS Y REOLÓGICAS</small>	MATERIAL:	PLANO Nº:	A4	
	FECH:	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1	

ANEXO II: PLANOS DE LAS PROBETAS



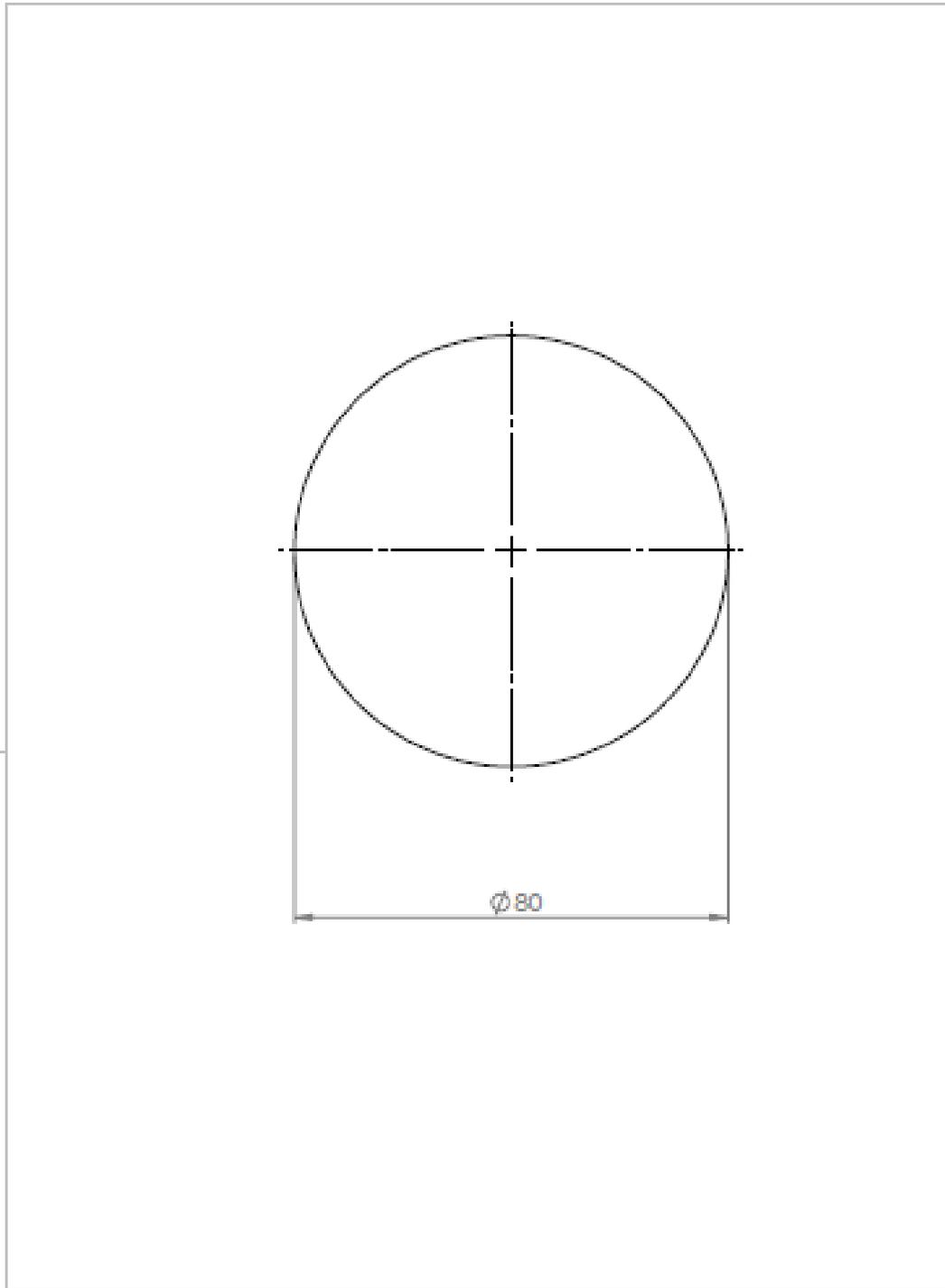
FECHA: 07/09/2009	REVISOR:	TÍTULO: HG60
PROYECTISTA:		
IFIR <small>INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS ROSARIO</small>	MATERIAL:	PLANO Nº: A4
	FECHA:	ESCALA: 1:1
		HORA: 1 DE 1

ANEXO II: PLANOS DE LAS PROBETAS



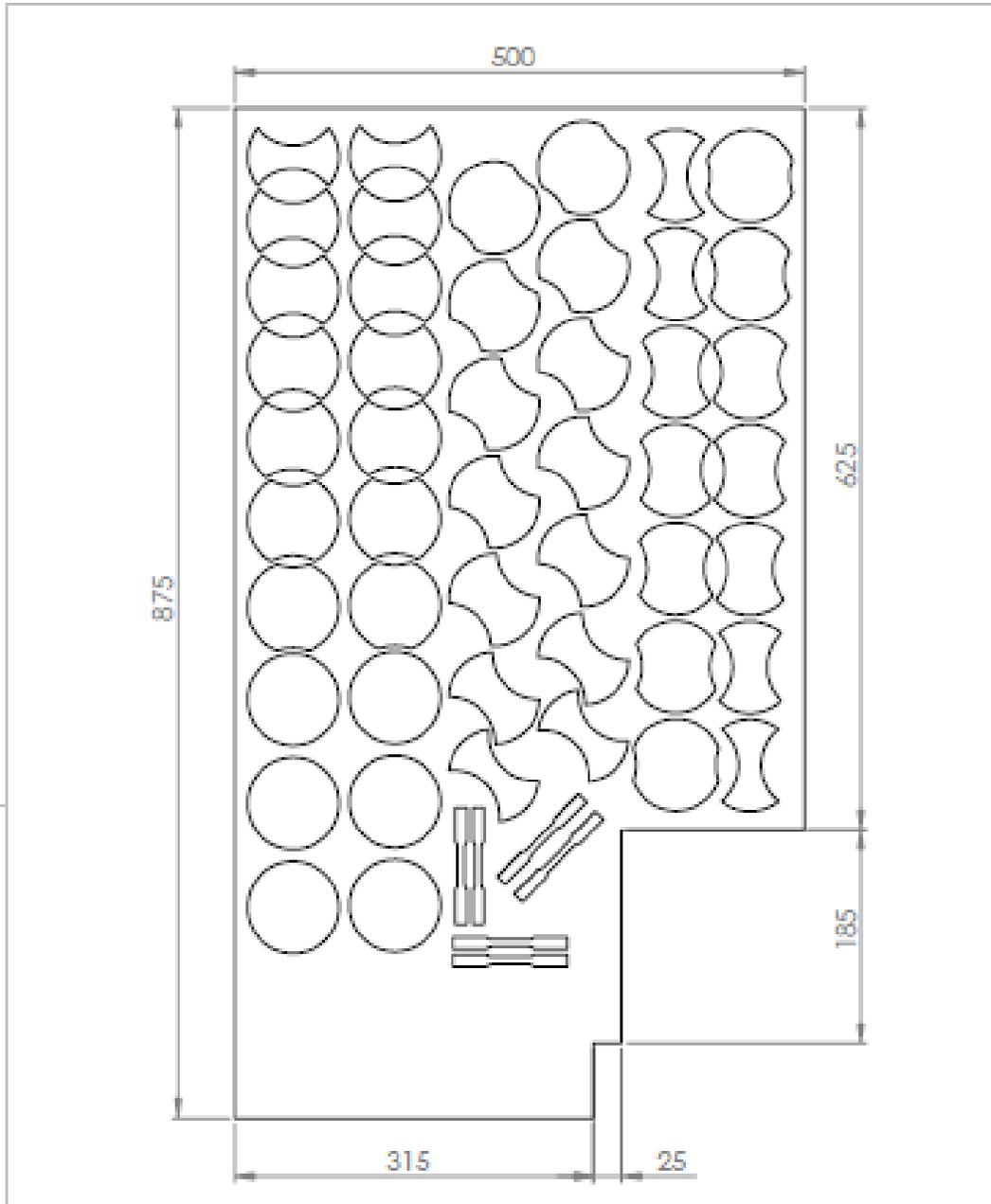
FECHA: 07/09/2009	REVISION:	ETIQUETA: HG70	
PROYECTISTA:			
IFIR <small>INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FISIOLÓGICAS</small>	MATERIAL:	PLANO Nº:	A4
	FECHA:	ESCALA: 1:1	FOLIO: 1 DE 1

ANEXO II: PLANOS DE LAS PROBETAS



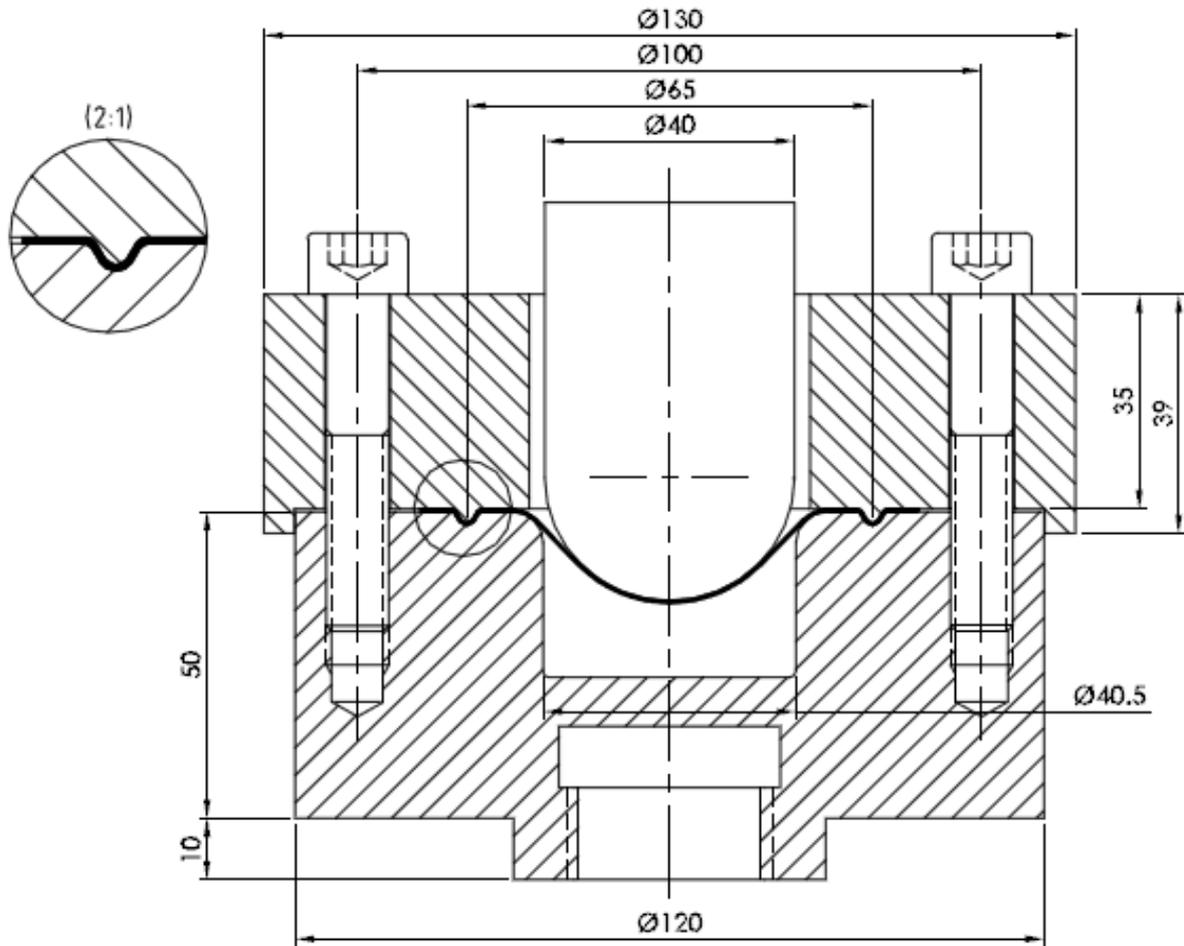
FECHA: 07/09/2009	REVISION:	TÍTULO: HG80	
PROYECTISTA:			
IFIR INSTITUTO DE FÍSICA ROCLARIO	MATERIAL:	PLANO Nº:	A4
	FECHA:	ESCALA: 1:1	FOLIA 1 DE 1

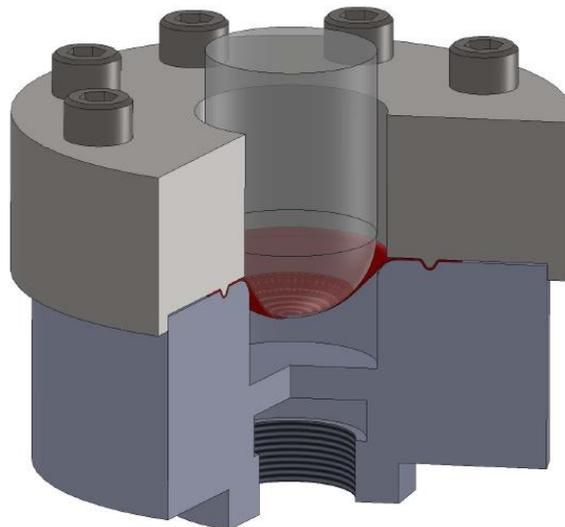
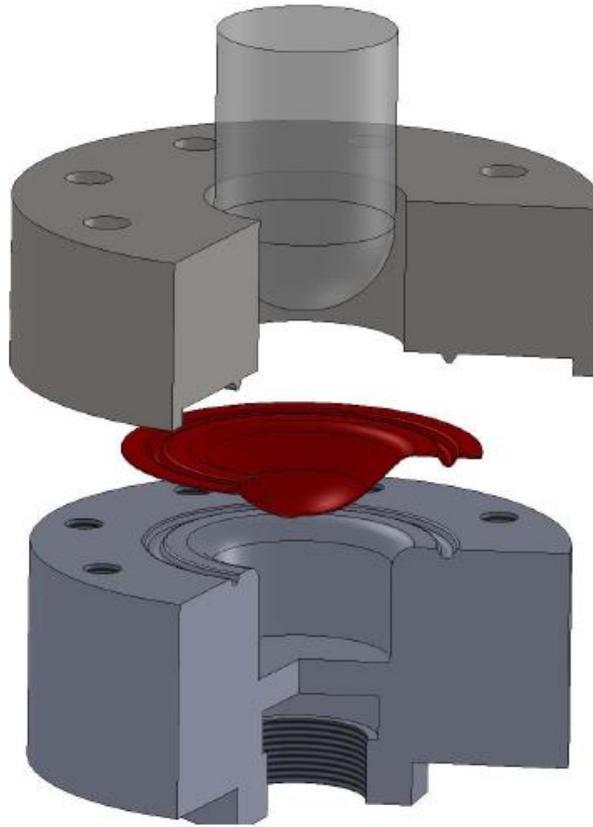
ANEXO II: PLANOS DE LAS PROBETAS



Nota: Las piezas caladas deben quedar en el marco con microsujeciones.

FECHA: 26/10/2009	REVISIÓN:	TÍTULO: Set de probetas M	
PROYECTISTA:			
IFIR INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FISIOLÓGICAS	MATERIAL:	PLANO Nº:	A4
	FED:	ESCALA: 1:20	NÚM. 1 DE 1





COSTO DEL PROYECTO

Se presenta el costo del proyecto, determinando el monto de los recursos económicos necesarios para realizarlo. Para calcularlo se han tenido en cuenta los costos de los bienes de consumo y de uso utilizados, como así también los de los servicios no personales requeridos para poder llevar adelante el trabajo. En el apartado de viáticos se contemplan los viajes realizados por el autor a la ciudad de Rosario para llegar a su puesto de trabajo. El costo energético asociado con la realización de los ensayos no se ha tenido en cuenta.

La clasificación de bienes y servicios se efectuó de la siguiente manera:

Bienes de consumo:

- Chapa de Acero
- Teflón ®
- Molykote ®
- Barra de Poliuretano

Bienes de uso:

- Corte por Láser de las Probetas
- Máquina de Ensayos Universal Instron 3382
- Proyector Óptico de Perfiles PRAZIS PO-360-VT
- Equipo de Difracción de RX Philips X'Pert Pro MPD
- Microscopio Óptico Olympus GX 51, analizador de imágenes IA32.

Servicios no personales:

- Microscopía Óptica
- Análisis de Componentes de Textura

En la Tabla siguiente se detallan los costos asociados con cada una de las etapas involucradas y al final se da el monto final derivado de este proyecto, el cual asciende a un total de \$6010,40.

ANEXO IV: COSTO DEL PROYECTO

Fase del Proyecto (concepto)	Actividad	Costo Unitario (\$)	Tipo de Unidad	Nº de Unidades	Costo Total (\$)
Inicial	Adquisición de la chapa	100	\$	1	100
	Corte por láser de las probetas	14,60	\$/probeta	24	350,40
Insumos para los ensayos	Teflón®	50	\$/m	0,6 m	15
	Barra de poliuretano	666,70	\$/m	0,03 m	20
	Molykote®	150	\$	1	150
Experimental	Ensayos de tracción	55	\$/probeta	9	495
	Ensayos de estirado	70	\$/probeta	24	1680
	Grillado de probetas	20	\$/probeta	24	480
	Preparación de muestra para análisis de texturas cristalográficas	50	\$/probeta	1	50
	Costo del ensayo de difracción de RX	200	\$/probeta	1	200
	Microscopía óptica	50	\$/h		50
	Medición en proyector óptico de perfiles	80	\$/h	24	1920
Varios	Papelería e insumos informáticos	100	\$	1	100
Viáticos	Viajes Rosario – San Nicolás, San Nicolás - Rosario	10	\$/viaje	40	400
COSTO TOTAL DEL PROYECTO					6010,40

Tabla 1. Costo del proyecto

IMPACTO AMBIENTAL

En este apartado se determina el impacto ambiental asociado con la realización de este proyecto. Se contemplan aspectos relacionados con los aceites de laminación empleados y características del electrolito utilizado como agente químico grillador. El procedimiento llevado a cabo con este último es un método sencillo, seguro y económico. La solución electrolítica es casi neutral en la escala pH y por lo tanto no daña la piel, la ropa, ni el equipo circundante. Las corrientes de bajo voltaje, son inofensivas. El mismo esténcil puede ser usado una y otra vez para grabaciones idénticas. Por lo tanto, no se producen descartes de material entre grillado y grillado.

En cuantos a los lubricantes empleados en laminación, los mismos son mayormente aceites de origen mineral y emulsiones de aceites-agua que minimizan la potencia requerida, formando mezclas estables en todo tipo de aguas. Estos agentes están formulados siguiendo las más modernas tendencias, cara a cumplir con los requisitos medio-ambientales más exigentes. Su elevada capacidad lubricante permite utilizarlos en bajas concentraciones, reduciendo aun más su impacto ambiental. Debido a la cantidad y a las altas temperaturas con las que se trabajan, se queman generando gases los cuales son no tóxicos. La buena calidad de los lubricantes empleados, así como la ausencia de productos dañinos en su formulación, minimizan el impacto ambiental de estas emulsiones, facilitando su tratamiento y eliminación de forma más ecológica y por sobre todas las cosas, respetando el entorno medio-ambiental.

También se encuentran los equipos de recirculación interna para las emulsiones utilizadas, las que además de utilizarse para reducir la fricción entre los cilindros y el propio material, se usan como fluidos refrigerantes para los cilindros de laminación. De esta manera se reduce notablemente la frecuencia de vaciado de los baños, rentabilizando al máximo su utilización y minimizando la carga medio-ambiental que supone su tratamiento y eliminación.

ANEXO VI: PRESUPUESTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL DLC CON 12 PROBETAS

Fase del Proyecto (concepto)	Actividad	Costo Unitario (\$)	Tipo de Unidad	N° de Unidades	Costo Total (\$)
Inicial	Corte de láser de las probetas	14,60	\$/probeta	12	175,20
Insumos para los ensayos	Teflón®	50	\$/m	0,2 m	10
	Molykote®	150	\$	1	150
Experimental	Ensayos de tracción	55	\$/probeta	6	330
	Ensayos de estirado	70	\$/probeta	12	840
	Grillado de probetas	20	\$/probeta	12	240
	Preparación de muestra para análisis de texturas cristalográficas	50	\$/probeta	1	50
	Costo del ensayo de difracción de RX	200	\$/probeta	1	200
	Medición en proyector óptico de perfiles	80	\$/h	12	960
	Papelería e insumos informáticos	15	\$	1	15
	COSTO TOTAL PRESUPUESTADO				