



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.

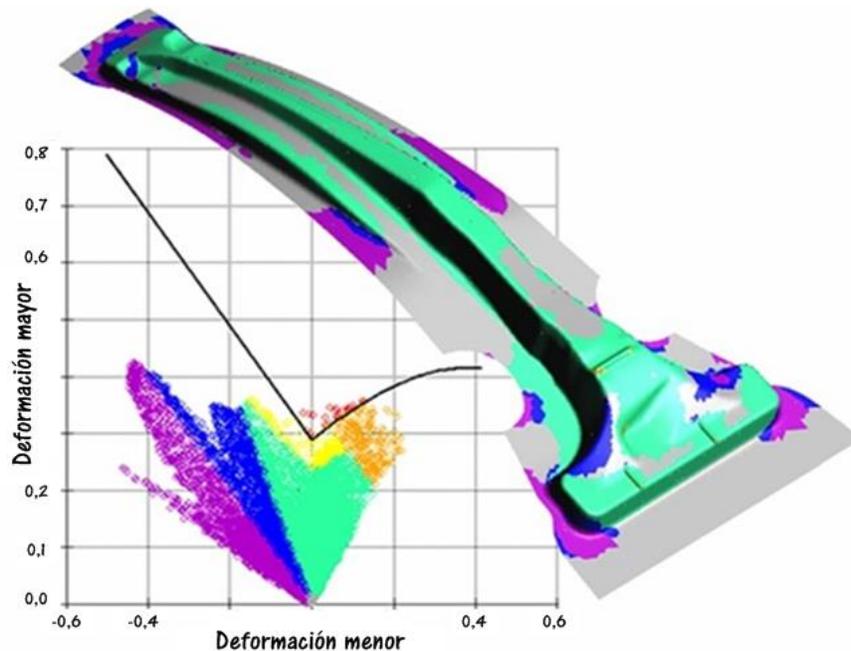


Figura 1. Diagrama Límite de Conformado de una pieza metálica.

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	Direcci3n de Laminaci3n
R_{prom}	Valor medio de anisotropía
ρ	Relaci3n de deformaci3n
$R_{0^\circ}, R_{45^\circ}, R_{90^\circ}$	Valor de anisotropía evaluado a 0°, 45° y 90° respecto de RD
s	segundos
σ	Tensi3n verdadera
σ_{eng}	Tensi3n ingenieril
σ_f	Tensi3n de fluencia
σ_r	Tensi3n de rotura
$\sigma_{0,2\%}$	Límite elástico convencional
t_0	Espesor inicial de la probeta
UTS	Resistencia máxima a la tracci3n
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