



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

“ESTUDIO DE FORMABILIDAD EN ACEROS PLANOS”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

Luis Rodrigo Palomera Rodríguez



Ciudad Universitaria, CD. MX

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Teresita del Niño Jesus Robert Núñez**

VOCAL: **Profesor: Jose Guadalupe Ramírez Vieyra**

SECRETARIO: **Profesor: Figueroa Vargas Ignacio Alejandro**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Octavio Lozada Flores**

2° SUPLENTE: **Profesor: Diego Enrique Gonzalez Gonzalez**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: CIUDAD DE MÉXICO

ASESOR DEL TEMA:

TERESITA DEL NIÑO JESUS ROBERT NUÑEZ

SUSTENTANTE (S):

LUIS RODRIGO PALOMERA RODRÍGUEZ

Resumen

Se estudió el comportamiento durante estampado de dos tipos de acero de cinco molinos diferentes, con la intención de generar un método que describa, de manera cuantitativa, la posibilidad de defectos o fallas durante proceso de estampado a escala industrial. La principal herramienta es el uso de diagramas de formabilidad (FLD, por sus siglas en inglés).

A escala industrial se ha observado que esta herramienta no es totalmente confiable, pues se observan comportamientos que no corresponden con el obtenido mediante ensayos de laboratorio. Esto es principalmente debido a la velocidad a la que ocurre la deformación, y a la variación que existe entre distintos lotes de material, así como su origen, composición química, y demás características metalúrgicas.

Se trazó el FLD para cada una de las muestras, en condiciones equivalentes, utilizando como referencia las normas ASTM E2218 y JIS G3141. Posteriormente, se definió un nuevo criterio, nombrado 'ventana de formado' ó criterio de Marziniak: mediante la transposición de la curva obtenida del material, se definen regiones bajo la curva formada por los puntos obtenidos durante ensayo, para después ajustar una recta, integrar la ecuación resultante y sumar las áreas bajo curva. Este valor de área bajo la curva de formado es una representación cuantitativa del comportamiento del acero durante proceso.

Se compararon los valores obtenidos para cada acero, obteniendo como resultado que el comportamiento observado en proceso (medido como número de partes con defecto) es inversamente proporcional al valor numérico de la ventana de formado.

Índice

Índice de tablas y figuras	4
1. Introducción	6
2. Objetivo	12
3. Siderurgia básica y proceso de fabricación de la lámina de acero	13
3.1. Alto horno	13
3.2. Aceración y colada continua	15
3.3. Rolado y revestimiento	20
4. Propiedades mecánicas y su relación con el estampado	27
4.1. Tipos de estampado	33
4.1.1. Plantilla y punzonado	35
4.1.2. Doblado	36
4.1.3. Dobleces en sección	37
4.1.4. Estirado	37
4.1.5. Expansión de punzón	38
4.1.6. Draw die forming	39
4.1.7. Embutido profundo	39
5. Bases matemáticas de la deformación	41
5.1. Condición de volumen constante	42
5.2. Criterios de deformación	43
5.2.1. Criterio de Tresca	43
5.2.2. Criterio de von Mises	43
6. Diagrama FLD	45
7. Deformación de una lámina no perfecta	48
8. Procedimiento	51
8.1. Trazado de FLD	52
8.2. Transposición	52
8.3. Trazado de curvas directoras	53
8.4. Trazado de curva alfa	53
8.5. Ajuste de rectas	54
9. Resultados	55
9.1. Acero rolado en frío	55
9.2. Acero galvanizado	57
10. Conclusiones y recomendaciones	62
11. Bibliografía	64

Índice de tablas y figuras

Tablas

1. Tipos de acero y sus propiedades mecánicas	7
2. Nombres de los componentes del BIW	9
3. Relaciones entre control de proceso y propiedades del material	26
4. Relaciones entre el tipo de formado y propiedades mecánicas	40
5. Valores de las ventanas de formado	61
6. Comparativo de valores para cada ventana de formado y caso (M1 – M5)	64
7. Simbología para desempeño del acero	64
8. Comparativo de formalidad para cada molino	64
9. Desempeño para material rolado en frío en distintas plantas	65
10. Desempeño para material galvanizado en distintas plantas	65

Figuras

1. Materiales utilizados en la industria automotriz	6
2. Tipos de acero utilizados en la industria automotriz	7
3. Partes que conforman la carrocería	8
4. Panel interno de una puerta frontal	9
5. Comportamiento y criterios de selección de material para un panel de puerta	10
6. Proceso general de manufactura para vehículos automotores	11
7. Alto horno, el primer paso de fabricación de acero	14
8. Diagrama general del proceso BOF	16
9. Producto de colada continua con defectos de porosidad	17
10. Comparativo entre los distintos tipos de procesos de desgasificado	17
11. Concentración real de hidrógeno comparado con estimado	19
12. Proceso secundario de aceración y colada continua	19
13. Diagrama general del molino caliente	20
14. Diagrama del horno de recalentado	21
15. Dependencia del tiempo de decapado con concentración ácida y temperatura	22
16. Diagrama general del proceso de rolado en frío	23
17. Sección transversal de la capa de aleación para el sistema Fe/Zn	23
18. Diagrama general de la línea de galvanizado continuo	23
19. Comparativo de spangle	24
20. Disposición general de línea de producción de lámina	25
21. Probeta para ensayo de tracción	27
22. Carga de fluencia, carga máxima y elongación de fractura	27
23. Definición de YP	28
24. Marcas en material estampado	29
25. Curva esfuerzo – deformación real	30
26. Etapas del estampado	31
27. Representación gráfica de n para un acero bajo carbono	33
28. Representación física del parámetro de Lankford	34
29. Borde de una plantilla	35
30. Detalle del proceso de corte	35
31. Deformación en borde	36
32. Sección de un chasis automotriz	37
33. Deformación por stretching	38
34. Proceso de hole expansion	38
35. Parte interna de una puerta frontal automotriz	39

36. Esfuerzo uniaxial y plano	41
37. Espacio geométrico de esfuerzo plano para criterio de von Mises	44
38. Ejemplo de un diagrama FLD	45
39. Tipos de probeta para cada región del FLD	46
40. Dependencia del FLD con el valor de n	46
41. Dependencia del FLD con la velocidad de deformación	47
42. Definición de esfuerzos dentro de una lámina no perfecta	48
43. Diferencia en la curva s - n para región uniforme y región no perfecta	48
44. Ampliación de un FLD para mostrar defectos de proceso	49
45. Comparativo de FLD para acero rolado en frío y galvanizado	51
46. FLD para acero M1	52
47. Transposición de curva	52
48. Trazado de curvas directoras	53
49. Trazado de curva alfa	53
50. Ajustes de recta para cada curva	54
51. Obtención de áreas para la ventana de formado	54
52. FLD para acero rolado en frío M1	55
53. FLD para acero rolado en frío M2	55
54. FLD para acero rolado en frío M3	56
55. FLD para acero rolado en frío M4	56
56. FLD para acero rolado en frío M5	57
57. Ventana de formado para acero rolado en frío M1	55
58. Ventana de formado para acero rolado en frío M2	55
59. Ventana de formado para acero rolado en frío M3	56
60. Ventana de formado para acero rolado en frío M4	56
61. Ventana de formado para acero rolado en frío M5	57
62. FLD para acero galvanizado M1	57
63. FLD para acero galvanizado M2	58
64. FLD para acero galvanizado M3	58
65. FLD para acero galvanizado M5	59
66. Ventana de formado para galvanizado M1	57
67. Ventana de formado para galvanizado M2	58
68. Ventana de formado para galvanizado M3	58
69. Ventana de formado para galvanizado M5	59
70. Ajuste de recta para acero rolado en frío M1	59
71. Ajuste de recta para acero galvanizado M1	59
72. Ajuste de recta para acero rolado en frío M2	60
73. Ajuste de recta para acero galvanizado M2	60
74. Ajuste de recta para acero rolado en frío M3	60
75. Ajuste de recta para acero galvanizado M3	60
76. Ajuste de recta para acero rolado en frío M4	61
77. Ajuste de recta para acero rolado en frío M5	61
78. Ajuste de recta para acero galvanizado M5	61
79. Caso I (CR, M1)	62
80. Caso II (CR, M3)	63
81. Caso III (CR, M2)	63

1. Introducción

La lámina de acero es un material muy versátil. Aporta buena resistencia y alta rigidez a un costo razonable, y permite altas velocidades de fabricación. Adicionalmente, tiene alta resistencia a la fatiga, buena resistencia a la corrosión cuando tiene revestimiento, alta capacidad de absorción de energía, buen coeficiente de trabajo en frío y excelente pintabilidad, todas estas características requeridas en la fabricación de vehículos automotrices. Una visión general de los materiales utilizados en esta industria y su relación costo/peso de vehículo se muestra en la Figura 1.

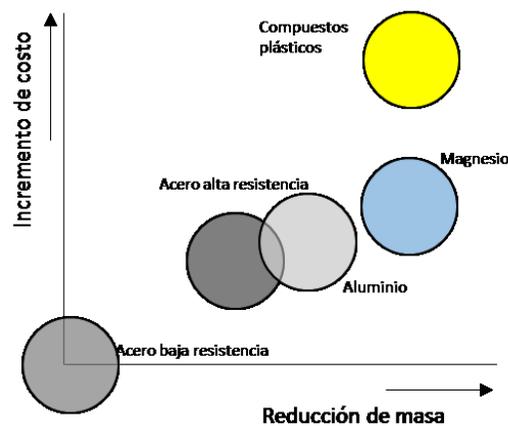


Figura 1. Materiales utilizados en la industria automotriz (1)

Estas características, junto con la disponibilidad comercial de una amplia gama de aceros de baja, media y alta resistencia y formabilidad, junto con diferentes características químicas, de acabado superficial y posibilidad de recubrimientos orgánicos e inorgánicos han hecho de la lámina de acero el material por excelencia dentro de la industria automotriz.

Una de las clasificaciones más comunes consiste en dividir los aceros en base a su contenido de carbono; un acero bajo carbono es considerado cuando el requerimiento principal es la formabilidad del mismo, mientras que para un acero **HSLA (High Strength Low Alloy)** los valores de punto de fluencia (**Yield Point, YP**) y esfuerzo máximo a la tracción (**Tensile Strength, TS**) son los criterios de decisión. Un acero de alta resistencia es útil para aplicaciones que requieran resistencia a las abolladuras, para mayor capacidad de carga de trabajo, mejorar la distribución de energía durante impacto, o incluso para reducción de masa de un vehículo, al sustituir aceros de alto calibre y baja resistencia por un acero de alta resistencia y menor calibre.

De manera general, al incrementar la resistencia del acero, otras propiedades como la formabilidad se ven reducidas (Fig. 2). Se necesita especial cuidado al momento de seleccionar grados, herramientas y procesos de fabricación para obtener el beneficio óptimo de un acero de alta resistencia.

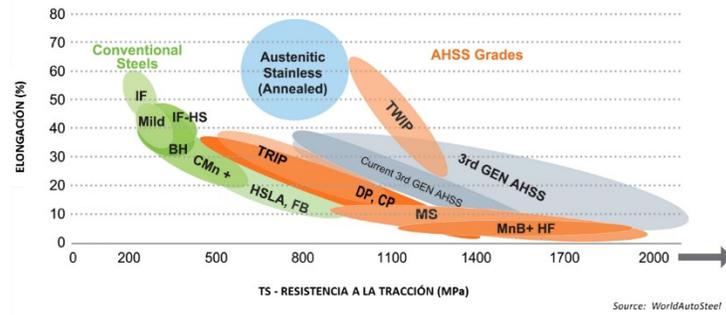


Figura 2. Tipos de acero usados en la industria automotriz (2)

La resistencia del material puede ser modificada mediante elementos aleantes, ó mediante procesos especiales. Estos incluyen técnicas de rolado mecánico, control de temperatura durante el rolado caliente, o controles de temperatura y tiempo durante el recocido continuo para los aceros rolados en frío. Un resumen general se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de acero y sus propiedades mecánicas

Descripción del acero	Resistencias disponibles (MPa)
Resistencia al abollado, no BH	180, 210, 250, 280 (YP)
Resistencia al abollado, BH	180, 210, 250, 280 (YP)
Alta resistencia, refuerzo por solución	300, 340 (YP)
HSLA	300, 340, 380, 420, 490, 550 (YP)
Alta resistencia con recocido	490, 550, 700, 830 (YP)
UHSS DP	500, 600, 700, 800, 900, 1000 (TS)
TRIP	600, 700, 800, 1000 (TS)
UHSS Low C Martensite	900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500 (TS)

Las definiciones para los materiales descritos en la Tabla 1 son:

BH: Bake Harden (el material sube su YP después de horneado)

UHSS DP: Ultra High Strength Steel Double Phase, material con TS > 980 MPa, estructura combinada de ferrita + martensita

TRIP: Transformed Induced Plasticity, transformación inducida por deformación plástica ($\gamma_{ret} \rightarrow \text{Mart}$)

Usando de aceros de alta resistencia se logran reducciones de peso de vehículo, las cuales mejoran el rendimiento de combustible; no obstante, para optimizar el proceso de selección, se requiere una planeación coordinada entre las características del material, geometría de la parte y capacidad del equipo de estampado. Como se mencionó anteriormente, al incrementar la resistencia del material, se reduce la formabilidad; esto se ve reflejado principalmente en el valor del parámetro n , conocido como el coeficiente de endurecimiento por trabajo en frío (n , **work hardening coefficient**). Desde el punto de vista de la microestructura, un valor menor de n crea un gradiente de deformación mayor y adelgazamientos locales mayores durante el estampado. Tomando estas características en cuenta, tanto el diseño de la parte como del proceso deben tomar en cuenta los parámetros del material para producir de manera satisfactoria una parte a nivel industrial (alto volumen y alta velocidad).

Para utilizar de manera efectiva los aceros de alta resistencia, se requieren herramientas específicas para el proceso de formado requerido por la parte. Se requiere que el acero se doble (**bend**) y se estire (**stretch**) pero minimizando las secciones con compresión, que son comunes en esquinas y zonas cerradas de un herramental tradicional.

A continuación se muestra (Figura 3) la distribución de partes en un vehículo tipo sedán, para ubicar la posición y el nombre asignado a las partes que conforman la carrocería.

Los nombres, su traducción aproximada y la abreviatura se muestran en la tabla 2.

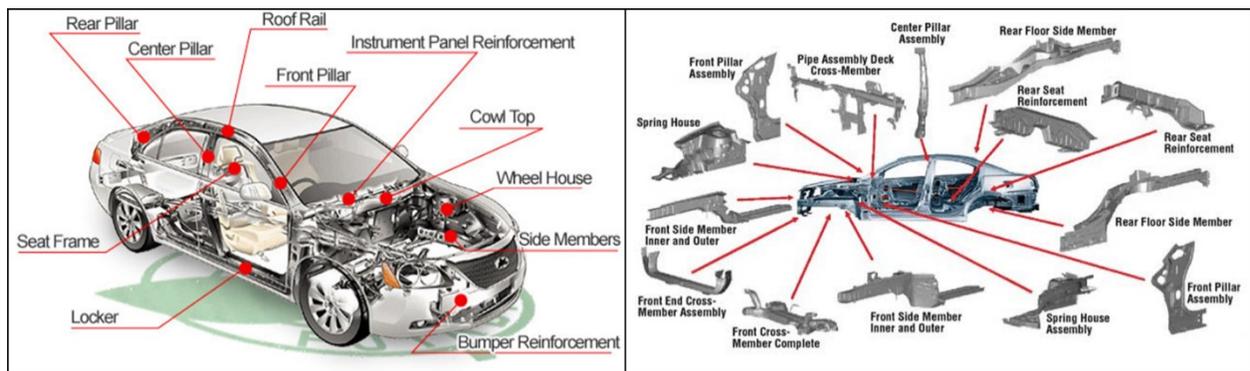


Figura 3. Partes que conforman la carrocería (Body in White, BIW) de un vehículo (3)

Tabla 2. Nombres de los componentes del BIW (3)

Nombre	Traducción aproximada	Abreviatura
Roof Rail	Riel de techo	ROOF RAIL
Front Pillar	Pilar A	PLR FR
Instrument Panel reinforcement	Refuerzo de tablero	CPM REINF
Cowl Top	-	-
Wheel House	Salpicadera	W/H INR
Side Members	Miembro lateral	SIDE MBR
Bumper Reinforcement	Refuerzo de defensa	BMPR REINF
Locker (SILL)	-	SILL
Seat Frame	Estructura de asiento	-
Rear Pillar	Pilar C	RR PLR
Center Pillar	Pilar B	CTR PLR
Center Pillar Assembly	Ensamble Pilar B	CTR-ASSY PLR
Rear Floor Side Member	Miembro lateral de piso trasero	RR FLOOR SIDE MBR
Rear Seat Reinforcement	Refuerzo trasero de asiento	RR SEAT REINF
Front Pillar Assembly	Ensamble Pilar A	FR-ASSY PLR
Spring House Assembly	Ensamble torre de suspensión	STRUT HSG
Front Side Member	Miembro lateral frontal	MBR FR SIDE
Front Cross-Member	-	MBR FR CROSS
Front End Cross-Member	-	MBR FR CROSS

Cuando la combinación entre el desempeño de la parte y la geometría es tal que no se puede utilizar un acero suave, las características propias de un material de alta resistencia deben tenerse en consideración durante el diseño del proceso de manufactura; esto es especialmente crítico para partes de gran tamaño y complejidad, como los paneles internos de una puerta.

**Figura 4. Panel interno de una puerta frontal (FR DOOR INR) para un sedán genérico (3)**

En ocasiones, para cumplir el requerimiento aparentemente contradictorio de una parte de este tipo, es necesario utilizar materiales BH ó TRIP; este tipo de aceros tienen una formabilidad inicial alta, pero aumentan su resistencia ya sea durante el proceso de horneado de pintura (BH) o durante el proceso de estampado (TRIP). De estas consideraciones se desprende la necesidad de hacer un balance entre desempeño y proceso de manufactura. Un ejemplo de evaluación para el panel externo de una puerta (DOOR OTR) se muestra en la gráfica 1.

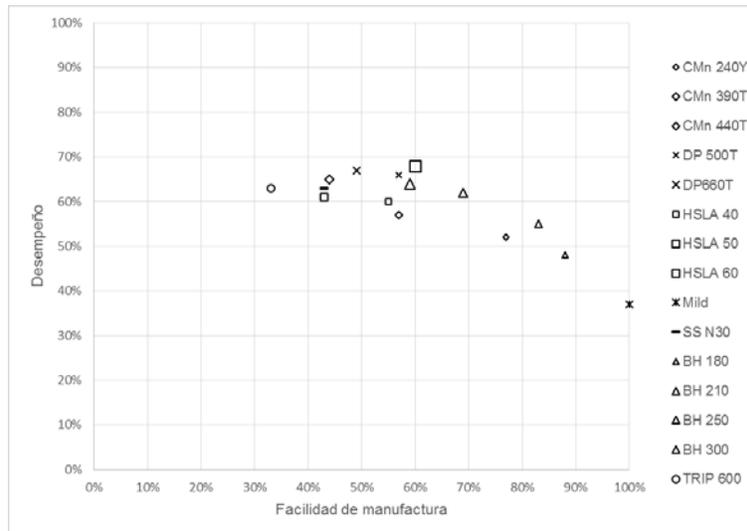


Figura 5. Comportamiento y criterios de selección de material para un panel de puerta (2)

Adicionalmente a la facilidad de manufactura, la superficie del acero debe ser de alta calidad (baja rugosidad), resistencia a la abolladura y, en el caso de paneles externos o de closure (partes móviles para sellado), buena capacidad de engargolado (**hemming**). El material utilizado para el panel interior debe de contar con excelente formabilidad, buena soldabilidad y alta resistencia.

Un proceso de estampado mediante dobléz (**bending**) no podrá producir un incremento uniforme de resistencia en un panel de acero si el material utilizado aumenta su resistencia principalmente por formado en frío. Para procesos de embutido o estirado (**draw or stretch**), los aceros BH obtienen un incremento de entre 30-40 MPa después del proceso de horneado. Algo similar ocurre con un acero DP, pero durante el proceso de estampado. Un diagrama general del proceso de fabricación de vehículos se muestra en la Figura 6.

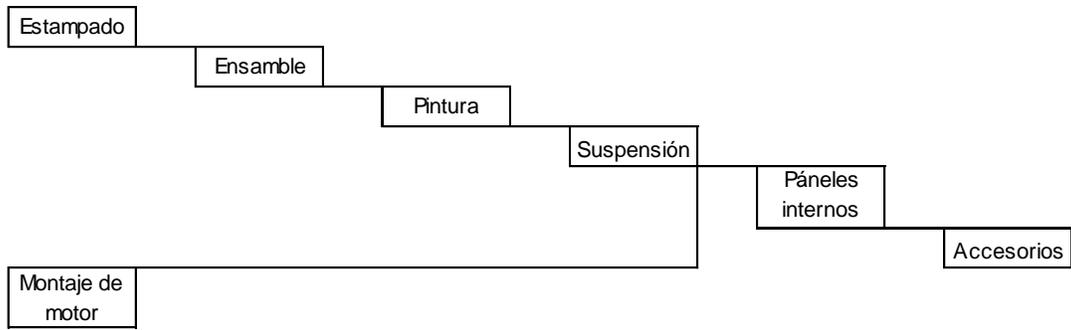


Figura 6. Proceso general de manufactura para vehículos automotores (4)

2. Objetivo

Determinar si el criterio de ventanas de formado propuesto por Marziniak (5) es adecuado para predecir el comportamiento de las láminas de diferentes aceros durante el proceso de estampado de piezas para la industria automotriz.

3. Siderurgia básica y proceso de fabricación de lámina de acero (6)

3.1. Alto horno

El primer paso para la producción del acero consiste en la reducción del mineral de hierro, rico en sílice y otros óxidos, en arrabio, una aleación eutéctica Fe-C, la cual es utilizada como materia prima para el siguiente proceso.

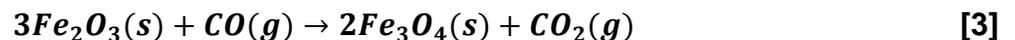
De manera general, el proceso se puede explicar químicamente como sigue:



Esta reacción puede ser dividida en varias etapas, siendo la primera la reacción del aire sobrecalentado con el carbón dentro del coque para formar monóxido de carbono y calor:



El monóxido caliente funciona como agente reductor para el mineral de hierro y reacciona con el óxido férrico, produciendo hierro fundido y dióxido de carbono. Dependiendo de la temperatura en cada sección del alto horno (la parte más caliente es la inferior), el hierro se reduce en varios pasos. En la parte superior, donde la temperatura está usualmente entre 200 °C - 700 °C (dependiendo del diseño del horno), el óxido es parcialmente reducido en magnetita,



A 850 °C, en una sección inferior del horno, la magnetita se reduce, formando óxido ferroso,



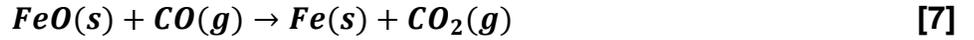
El dióxido de carbono, junto con el monóxido sin reaccionar, y el nitrógeno del aire avanzan hacia la parte inferior del horno. El gas precalienta la carga, y también descompone el mineral de calcio,



El óxido de calcio reacciona con varias impurezas del mineral de hierro, formando una capa de escoria mayormente compuesta por silicato de calcio,



Conforme el óxido de hierro se mueve a zonas más calientes (~1200 °C) se reduce a hierro elemental,



Y el dióxido de carbono generado es reducido nuevamente a monóxido con el coque,



El equilibrio de la atmósfera gaseosa está controlado por la reacción de Boudouard,

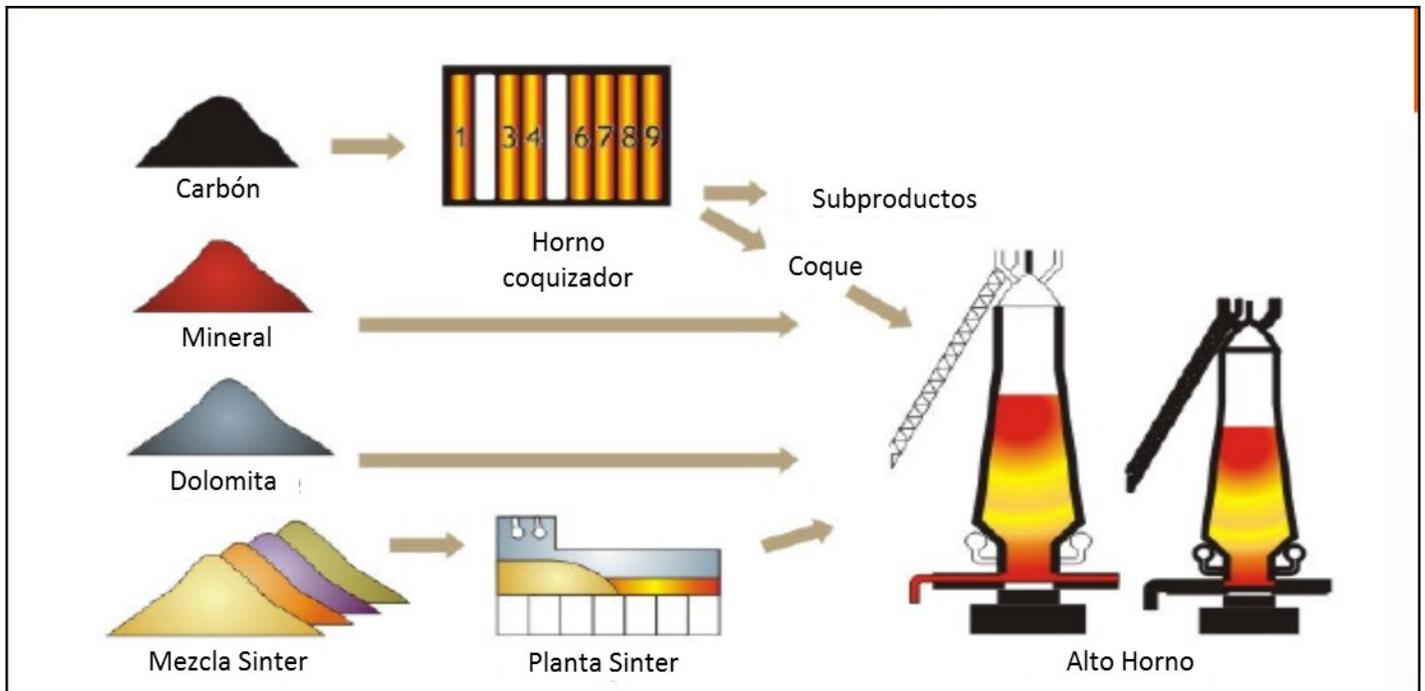


Figura 7. Alto horno, el primer paso de fabricación del acero (7)

3.2. Aceración y colada continua

El proceso siguiente consiste en la conversión del arrabio en acero, para la fabricación de planchones. Después de obtener hierro líquido, el primer paso es la eliminación de impurezas en el convertidor de oxígeno (**Basic Oxygen Furnace o BOF**) (8).

Las reacciones que describen el proceso son las siguientes,



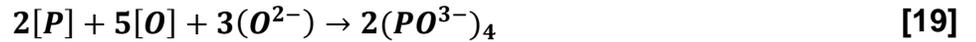
Después de la oxidación inicial, el oxígeno reaccionante se combina con el carbono, formando bióxido, el cual reacciona con los óxidos de hierro, reduciéndolos y formando hierro elemental,



Otros elementos presentes en el baño líquido, como el silicio o el manganeso, son también removidos por el oxígeno presente,



Los elementos más críticos para remover son el fósforo y el azufre; el primero reacciona con el oxígeno y, en función de la basicidad del baño, este se distribuye en la escoria,



Mientras que el azufre reacciona con dos especies: con el oxígeno para formar el óxido correspondiente, y con el manganeso del baño para formar un sulfuro que flota a la escoria,

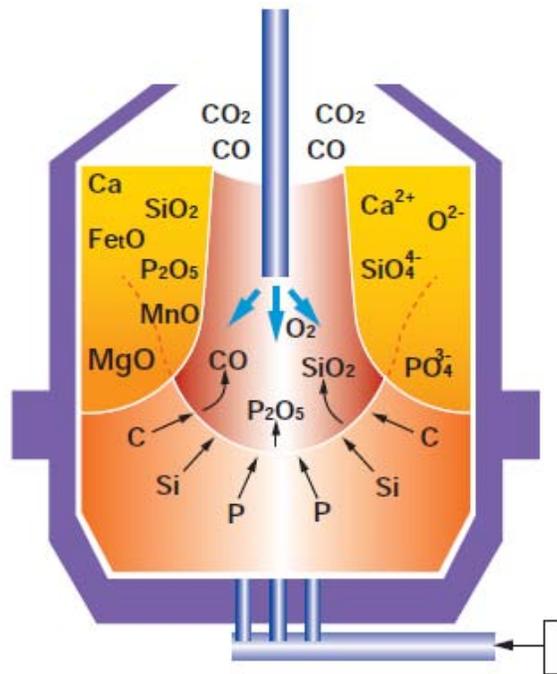


Figura 8. Diagrama general del proceso BOF, indicando especies químicas y flujos. (6)

El siguiente proceso es el desgasificado, el cual permite fabricar aceros IF (Intersticial Free) y ULC (Ultra-Low Carbon), los cuales son requeridos para aplicaciones automotrices. El principal elemento a remover es el hidrógeno, el cual, en concentraciones de 4-6 ppm en la olla (**ladle**) o de 6-9 ppm en el tundish pueden generar fracturas en la orilla del planchón. Adicionalmente, altas concentraciones de otras especies gaseosas (N, O) pueden causar problemas de porosidad diseminada en la parte central.

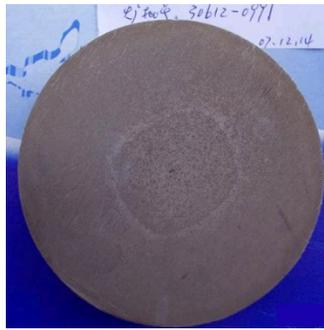


Figura 9. Producto de colada continua con defectos de porosidad y composición. (9)

Existen varios tipos de desgasificado (7) (8) (9), los cuales se escogen dependiendo del monto de inversión disponible y el tipo de acero a fabricar:

- Vacuum Gas Degassing (VTD)
- Vacuum Arc Degassing(VAD)
- Vacuum Oxygen Decarburization (VOD)
- Vacuum Degassing – Oxygen Blowing (VD-OB)
- Dortmund - Horder (DH)
- Ruhrstahl – Heraeus (RH)

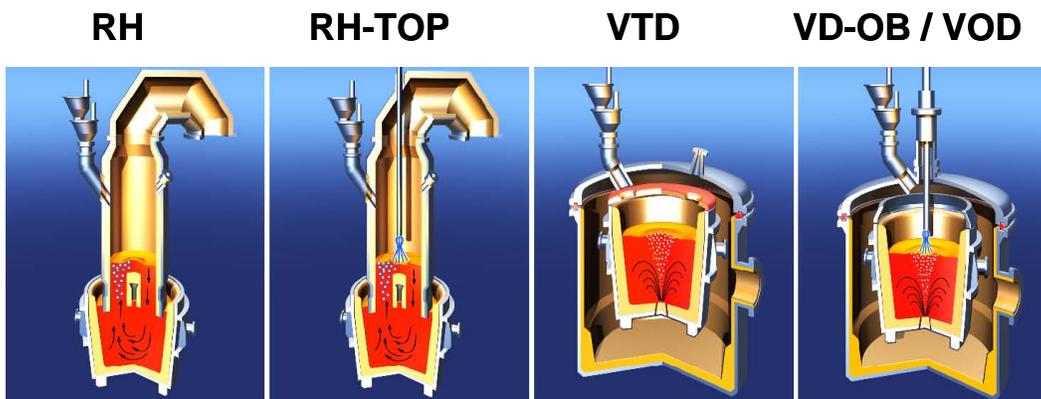


Figura 10. Comparativo entre los distintos tipos de procesos de desgasificado.

El proceso de remoción de gas está controlado por la ley de Sievert, la cual expresa la dependencia de la concentración de gas al equilibrio en función de la presión parcial del gas en la mezcla:

$$C_{at} = K\sqrt{p_{mol}} \quad [22]$$

En el caso de moléculas gaseosas bipolares (como el hidrógeno y el nitrógeno), la concentración a una temperatura determinada es proporcional a la raíz de la presión absoluta en la mezcla. En el caso específico del hidrógeno, esta ecuación describe acertadamente la condición en el baño metálico, ya que este tiene una alta difusión dentro del acero, y no forma especies estables rápidamente con los otros elementos en aleación. En el caso del nitrógeno, la remoción depende de la concentración de otros elementos, como el azufre y el oxígeno.

Entonces, la constante **K** indicada en la ecuación anterior viene determinada por los siguientes parámetros de producción:

- Contenido inicial
- Velocidad de bombeo del gas
- Presión de vacío
- Temperatura del baño metálico
- Cantidad de escoria (para proceso VTD)

La velocidad de remoción de gas se puede expresar con la ley de Fick:

$$\ln \frac{[X]_t}{[X]_0} = -k_x \cdot t \quad [23]$$

Si se considera una presión de vacío baja, y una concentración baja de equilibrio, la ecuación resultante describe la concentración del gas en cuestión al tiempo t :

$$[X]_t = [X]_0 \cdot e^{-k_x t} \quad [24]$$

Cuando se grafica la concentración de hidrógeno en función de la cantidad de gas utilizada, el comportamiento es asintótico:

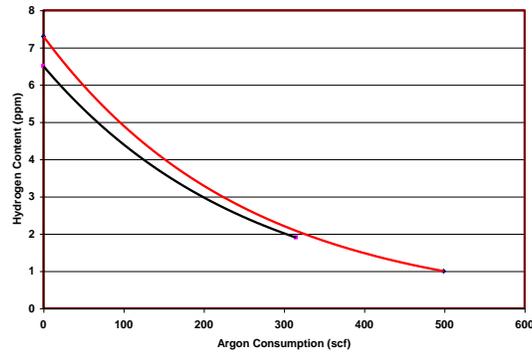


Figura 11. Concentración real de hidrógeno (línea inferior) comparado contra el estimado por la ecuación [24] (línea superior)

El proceso utilizado en aceros automotrices es el RH, el cual ofrece las siguientes ventajas:

- Tiempo de ciclo corto (~25 min)
- Capacidad de lograr la menor cantidad práctica de carbono (~0.002%)
- No se requiere proceso de remoción de escoria por 'decantado'
- Alta eficiencia para plantas de alta productividad y volumen

El proceso final es la colada continua, durante la cual el acero líquido al molde, donde el metal es agitado mediante corrientes magnéticas, (**EMS: electromagnetic stirrer**) para después iniciar la solidificación mediante espreas (**mist cooling**).

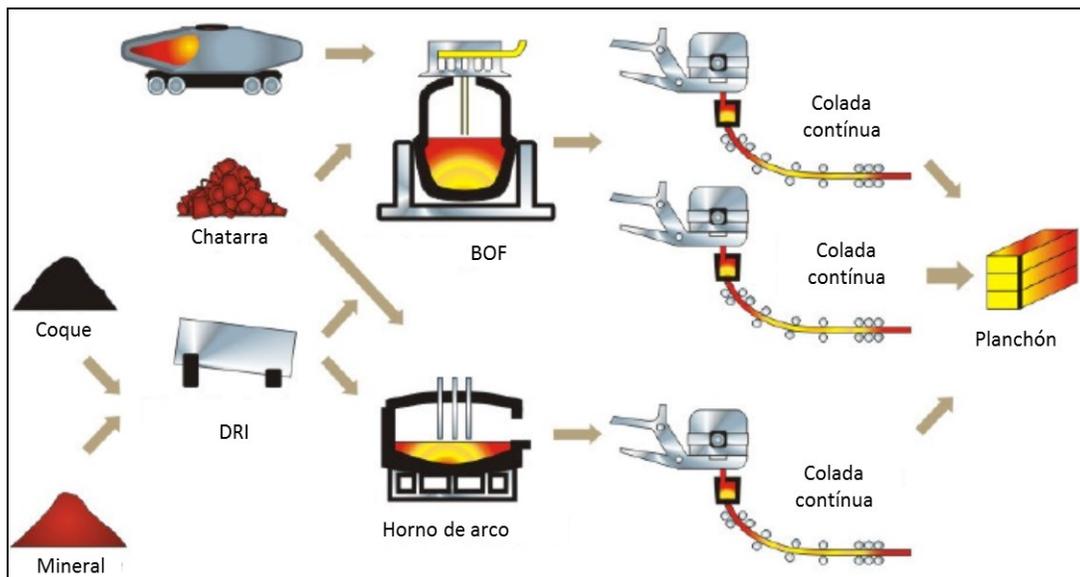


Figura 12. Proceso secundario de aceración y colada continua

3.3. Rolado y revestimiento

Una vez que se cuenta con planchón, este se utiliza como materia prima para los procesos de rolado caliente y frío, los cuales deforman la placa caliente de manera continua, para disminuir el espesor. El producto inicial (planchón) tiene un espesor habitual de 250 mm; después del rolado caliente, el rango de espesores va desde 2 y hasta 26 mm. La temperatura utilizada durante proceso depende del espesor del material y el % de reducción requerido, pero usualmente se encuentra entre el 70-80% de la temperatura de fusión.

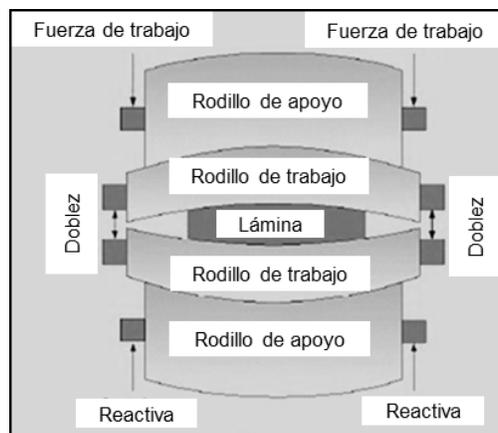


Figura 13. Diagrama general del molino caliente

Para tener capacidad de producción de aceros avanzados de alta resistencia (**AHSS, Advanced High Strength Steel**), el molino debe poder cumplir con los siguientes requerimientos y tecnologías:

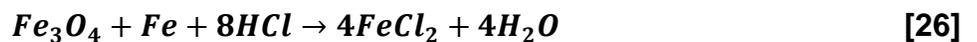
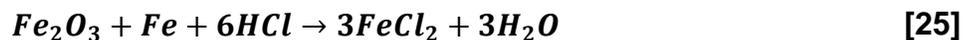
- Alta capacidad de molino, junto con alta eficiencia y buen rendimiento
- Bajo requerimiento de mantenimiento
- Bajo consumo de energía
- Mejora de la calidad del producto, mediante el correcto control de espesores y tolerancias en los perfiles
- Horno de recalentado (Figura 11): eleva la temperatura del planchón mediante hornos móviles (**walking beam furnace**)
- Eliminador de cascarilla: garantiza una superficie tersa en el material final; utiliza agua a alta presión y en algunos casos trabajado mecánico

- Prensa dimensional: ayuda al mejor control de la forma de la lámina en secciones grandes
- Control automático de ancho y espesor: compuesto de dos módulos, AGC (**automatic gauge control**) y HGC (**hydraulic gap control**), sirven para ajustar la presión y posición de los rodillos de manera dinámica
- Lubricación de rodillos de trabajo
- Enfriamiento controlado y control de temperatura de orilla



Figura 14. Diagrama del horno de recalentado; cuenta con tres zonas para garantizar material homogéneo. (9)

Debido a la temperatura usada, el metal caliente genera una capa de óxido en la superficie, el cual se remueve en un baño de ácido clorhídrico agitado y cepillos de nylon que decapan la superficie. El proceso general de decapado es descrito químicamente por las ecuaciones siguientes:



Para minimizar el impacto ambiental generado por los licores desechados del proceso, algunas plantas cuentan con sistemas regeneradores de ácido; el proceso general es:



Como cualquier proceso ácido, existe una fuerte dependencia con la temperatura, por lo que al incrementar ésta, el proceso se hace más rápido. No obstante, al incrementar la temperatura, se pueden generar gases que dañen los equipos.

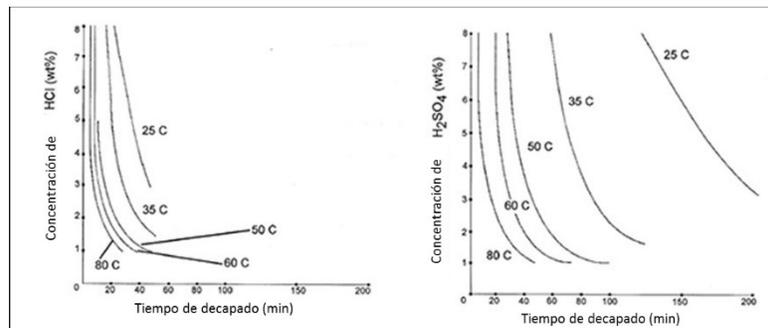


Figura 15. Dependencia del tiempo de decapado con la concentración ácida y la temperatura.

Posteriormente, la lámina es rolada en frío (Figura 16). Este proceso genera un producto de mayor calidad, dado que permite un mayor control de espesores, forma, anchos, rugosidad y algunas otras características que les permite ser utilizadas en aplicaciones de alto desempeño. Mediante este proceso, se diseñan láminas con propiedades metalúrgicas específicas, como alta formabilidad, embutido profundo, alta resistencia (hasta 1.2GPa), alta resistencia a la abolladura (**dent resistance**), propiedades magnéticas específicas y buena soldabilidad. Este proceso se lleva a cabo a una temperatura menor a la de recristalización, usualmente a temperatura ambiente. No se aplica calor a la lámina, pero la fricción entre los rodillos y el material se convierte en calor, por lo que el acero eleva rápidamente su temperatura desde 50 °C y hasta alrededor de 250 °C. En el rolado, la reducción de espesor viene dada por la deformación plástica mediante el desplazamiento de dislocaciones en el material. Dado este mecanismo, la resistencia del acero aumenta (mediante trabajo mecánico) hasta en un 20%, lo cual reduce la ductilidad de la lámina, y de esta manera sería imposible de utilizar para estampado. El proceso posterior es un recocido, que auxilia con la recristalización del material y la recuperación de sus propiedades metalúrgicas. Asimismo, otro punto de control es el % de reducción en frío realizado por los rodillos, ya que esto afecta directamente la estampabilidad del material final.

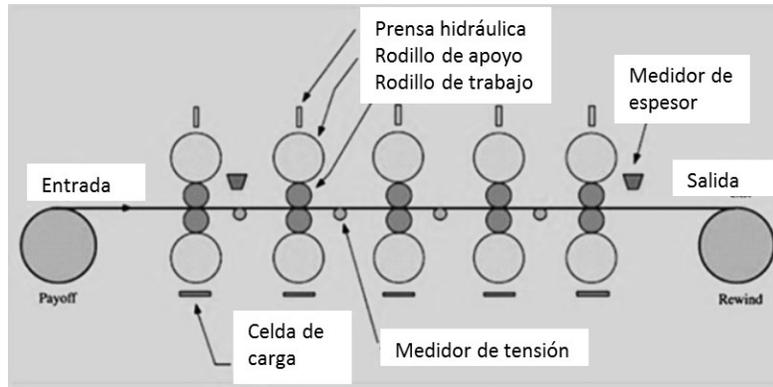


Figura 16. Diagrama general del proceso de rolado en frío. (9)

Para algunas aplicaciones que requieren resistencia a la corrosión, la lámina caliente puede ser revestida con algún metal que sirva como ánodo de sacrificio, usualmente Zn. Este proceso genera una capa de aleación Fe/Zn, con diferentes propiedades químicas y mecánicas:

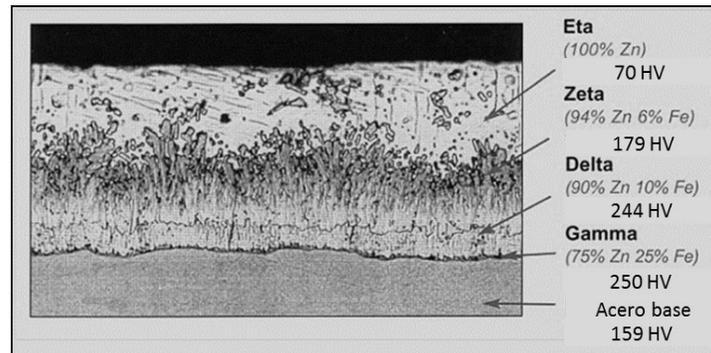


Figura 17. Sección transversal de la capa de aleación para el sistema Fe-Zn (9)

Un diagrama general de una línea de galvanizado se muestra en la figura 18:

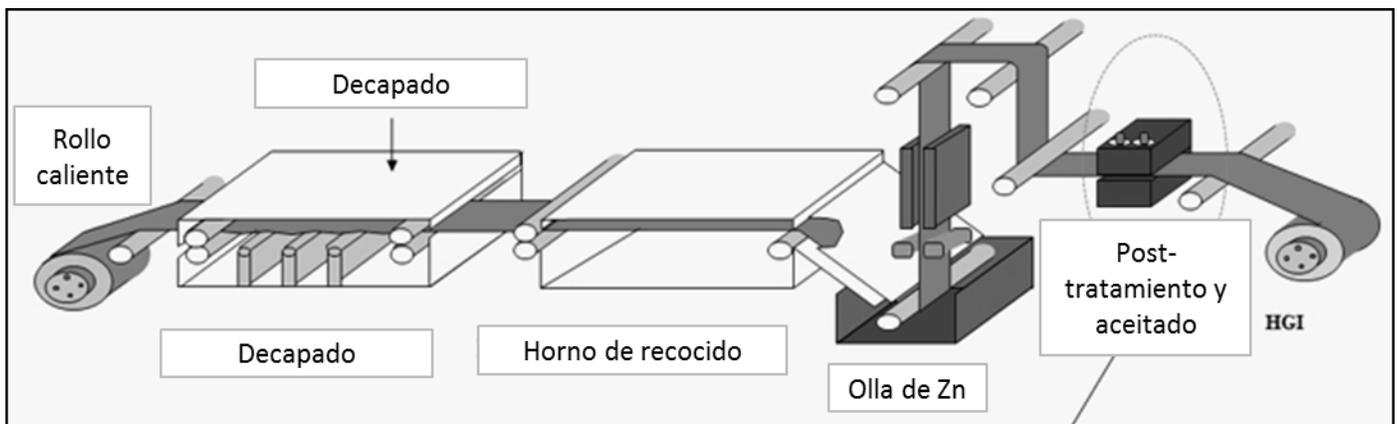


Figura 18. Línea de galvanizado continuo (9)

Después de salir de la línea de decapado, el material entra a un horno de recocido para lograr las propiedades mecánicas requeridas. Posteriormente, la lámina caliente (a una temperatura similar a la del baño metálico) entra a una olla de zinc fundido, donde este se adhiere a la superficie metálica. Cuchillas de aire golpean la superficie del material para controlar el espesor de la capa, y dependiendo del material final que se requiera, la lámina puede pasar por un horno vertical, para generar capa de aleación, lo que se conoce como **galvanneal**. En caso de que este proceso no se lleve a cabo, el producto final es llamado simplemente galvanizado.

Los parámetros a controlar en el galvanizado son los siguientes:

- Composición del baño de aleación (**Zn pot**)
- Gramaje y/o espesor del revestimiento
- Calidad superficial
- Rugosidad superficial
- Tolerancias en forma y dimensiones

La capa de zinc contiene aluminio, el cual se encuentra en un rango de 0.2 - 0.3%. Este elemento se añade al baño de zinc para controlar la velocidad de crecimiento de cristal en la interfase Fe – Zn, y mejora la adherencia al sustrato. En aplicaciones no automotrices, el baño incluye plomo y/o antimonio para control de flor (**spangle, Figura 19**); este término se utiliza para describir el tamaño del grano de Zn en el acero. De manera general, para lámina automotriz se prefiere el material con flor mínima.

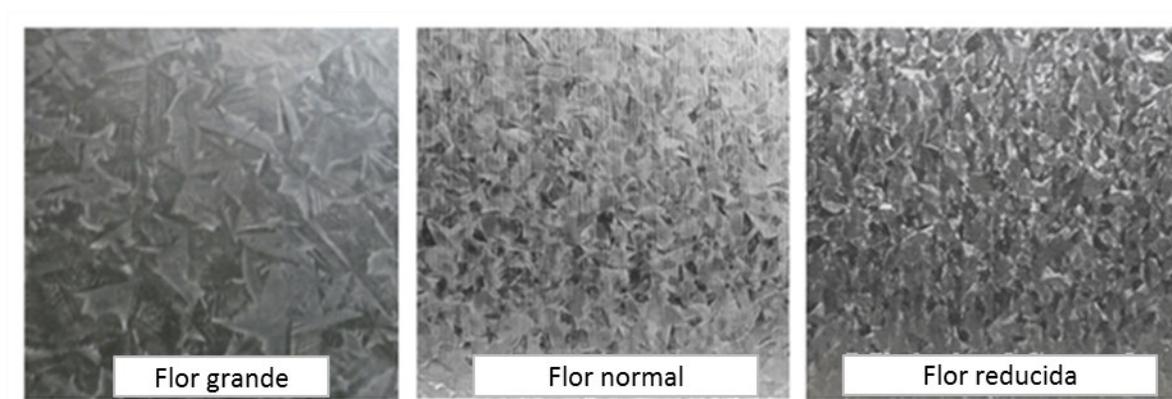


Figura 19. Comparativo de spangle

En resumen, todas las etapas del proceso de producción del acero (Figura 20) afectan la calidad del producto final. La Tabla 3 muestra, para cada etapa del proceso, la propiedad mecánica y/o característica relacionada en el producto final.

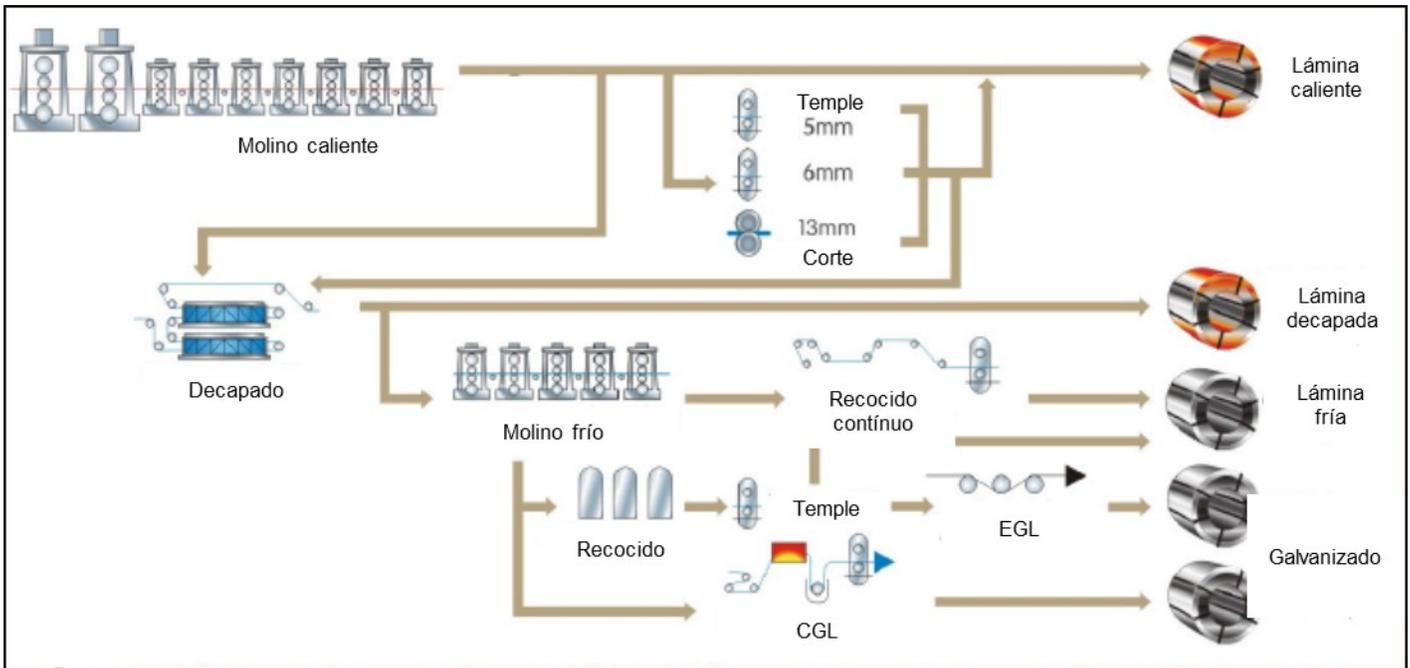


Figura 20. Disposición general de una línea de producción de lámina, desde el rolado caliente hasta el enrollado.

Tabla 3. Relaciones entre control de proceso y propiedades del material (6) (7) (9) (10) (11)

Proceso		Composición química C, Si, Mn, P, S..	Propiedades mecánicas YP, TS, %EI, n, r	Espesor y ancho	Textura superficial			Propiedades del revestimiento Gramaje, %Fe
					Defectos superficiales	Óxido	Rugosidad	
Fabricación de hierro	Alto horno	•						
Aceración	BOF	•	•					
	Metalurgia secundaria	•	•					
	Colada continua			•	•			
Rolado caliente	Decapado				•		•	
	Rolado		•	•	•			
	Enfriado		•		•			
Decapado					•			
Rolado frío				•	•		•	
Recocido	Tratamiento térmico		•					
	Aceitado				•	•		
	Skin pass mill		• (YP)	•	•		•	
Revestimiento	Tratamiento térmico		•					
	Revestimiento							•
	Aceitado					•		
	Skin pass mill		• (YP)	•	•		•	

4. Propiedades mecánicas y su relación con el estampado

Debido a su importancia histórica, y la facilidad para llevarla a cabo, varias propiedades del acero se obtienen del ensayo de tracción (**tensile test**). Una probeta estándar se muestra en la Figura 21.

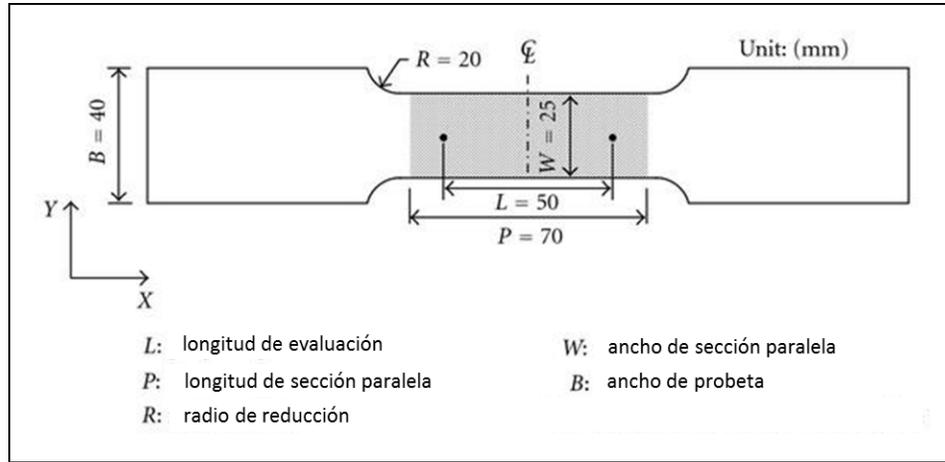


Figura 21. Probeta para ensayo de tracción; se muestran la probeta JIS Núm. 5 (12)

La prueba estándar se realiza en 3 direcciones con respecto a la dirección de rolado (0° , 45° y 90°); la longitud instantánea y la carga son medidas con el equipo utilizado (extensómetro y celda de carga), los cuales son capturados en un archivo para después graficarlos mediante software. La primer gráfica obtenida es un diagrama carga - elongación (P , Δl), la cual debe ser convertida a un diagrama esfuerzo – deformación (σ , ε) mediante las siguientes consideraciones:

Para un diagrama general carga – elongación como el mostrado en la Figura 22,

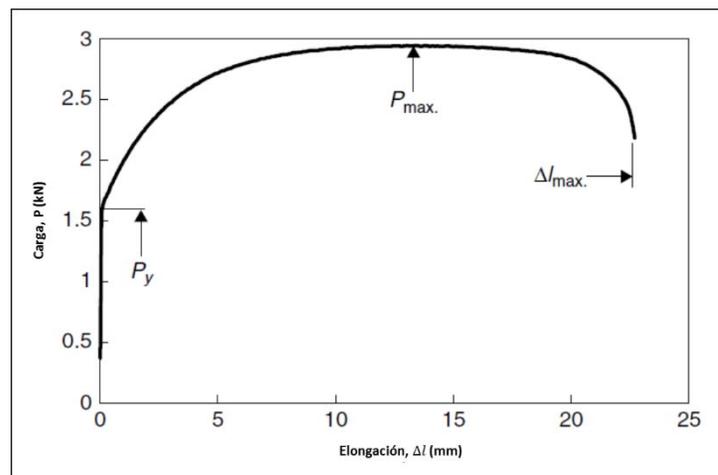


Figura 22. Carga de fluencia (P_y), carga máxima (P_{max}) y elongación de fractura (Δl_{max})

El esfuerzo (**engineering stress**) viene definido por:

$$\sigma_{eng} = \frac{P}{A_0} \quad [30]$$

Y la elongación (**engineering elongation**):

$$\varepsilon_{eng} = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\% \quad [31]$$

El esfuerzo de tracción máximo (**tensile strength**) se define con:

$$TS = \frac{P_{max}}{A_0} \quad [32]$$

Esta es sólo una aproximación, ya que cuando el material está sometido a la carga P_{max} , el área es menor a la inicial. La elongación a la carga máxima se conoce como la elongación uniforme máxima (E_u)

En materiales con alto contenido relativo de carbono libre (~0.01%), la transición de la zona elástica a la zona plástica no está claramente definida, por lo que el cálculo del esfuerzo de fluencia (**YP**) resulta difícil de determinar. En este caso, se define un esfuerzo máximo de fluencia en base al punto máximo alcanzado por el material (Figura 23).

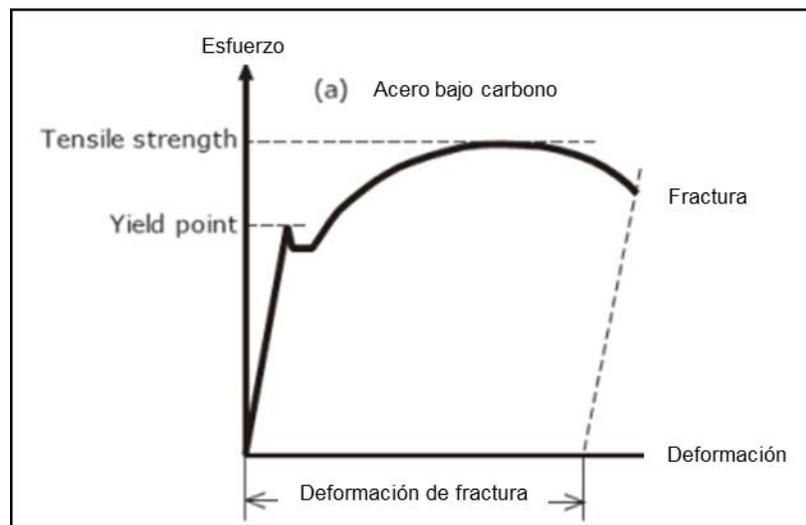


Figura 23. El YP se define como el punto máximo en la sección elástica del material (7)

En caso de que el material se trabaje por debajo de este punto, la deformación ocurre de manera discreta, creando el defecto conocido como **bandas de Lüders**. Existen algunos aceros que presentan una deformación mayor al 1% durante la fluencia; estos materiales no son aptos para ser formados en aplicaciones automotrices dado que no se comportan de manera homogénea y tienden a formar marcas en la superficie (**stretch-strain marks**).

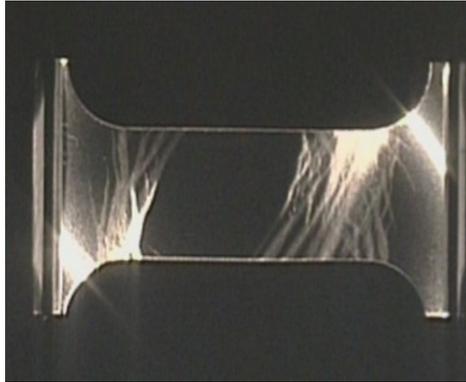


Figura 24. Marcas como la mostrada representan partes no recuperables, y un gasto para el estampador (13)

En el caso del análisis de procesos de formabilidad, el esfuerzo utilizado se calcula en base al área inicial (A_0). Esta no es una representación real del proceso, por lo que se usa el esfuerzo real instantáneo, que se definen como sigue:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [33]$$

Donde A es el área instantánea de la probeta. El esfuerzo real se puede determinar de la curva mostrada en la Figura 23, en la sección comprendida entre el esfuerzo de fluencia y la carga máxima. Si se considera que, durante la deformación plástica, el volumen del metal se mantiene constante, entonces el volumen de la sección de prueba es también constante:

$$A_0 l_0 = A l \quad [34]$$

Sustituyendo el valor de A en la ecuación para el esfuerzo real:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \frac{l}{l_0} \quad [35]$$

Si, durante la prueba, la distancia entre marcas incrementa en dl , una definición adecuada es decir que el *incremento de deformación* es la extensión por unidad de longitud:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad [36]$$

En el caso de deformaciones muy pequeñas, en las que $l_0 \approx l$, el incremento de deformación, es muy similar a la deformación de ingeniería, pero para deformaciones grandes, existe una diferencia importante. Si la deformación es continua y uniaxial, como ocurre en el ensayo de tracción, este incremento se puede integrar para obtener la deformación real:

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad [37]$$

La curva de esfuerzo - deformación real se muestra en la Figura 25.

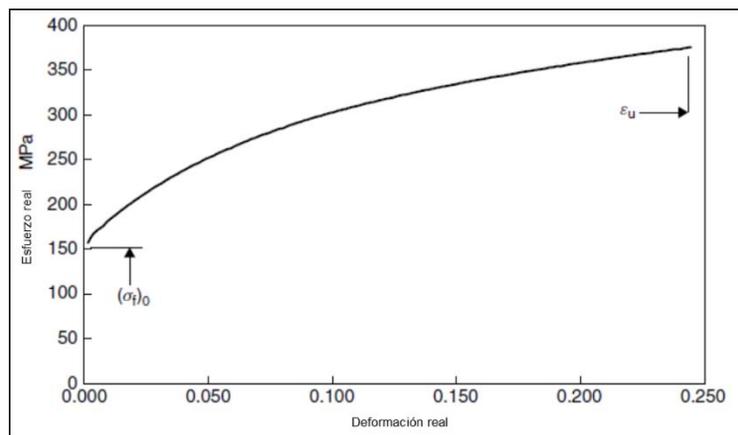


Figura 25. Curva esfuerzo - deformación real

Esta curva puede ser también calculada con la curva esfuerzo – deformación ingenieril, utilizando las siguientes relaciones:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} \frac{A_0}{A} = \sigma_{eng} \frac{l}{l_0} = \sigma_{eng} \left(1 + \frac{\varepsilon_{eng}}{100} \right) \quad [38]$$

$$\varepsilon = \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_{eng}}{100} \right) \quad [39]$$

Cuando inicia la estricción (**necking**) del material, la deformación ya no es uniforme, por lo que la ecuación anterior (integral) ya no es válida. De aquí se desprende que la curva anterior no puede ser calculada después de la elongación correspondiente a la carga máxima; esta deformación se define como deformación uniforme máxima:

$$\varepsilon_u = \ln\left(1 + \frac{E_u}{100}\right) \quad [40]$$

Si el esfuerzo y la deformación reales se grafican en escala logarítmica, se obtiene otra propiedad; el parámetro n , o coeficiente de endurecimiento por trabajado mecánico. Este se define como el incremento de resistencia en un metal por deformación plástica. Este fenómeno ocurre debido al movimiento y generación de dislocaciones en la estructura cristalina del material. Varias aleaciones no compatibles con tratamientos térmicos, como el acero bajo carbono, son trabajadas de esta manera. El incremento de propiedades en el material es similar al obtenido por tratamiento térmico. A diferencia del trabajado en caliente, las inclusiones y los granos se distorsionan siguiendo el contorno de la superficie, lo que resulta en propiedades anisotrópicas.

Las partes trabajadas en frío presentan un fenómeno conocido como rebote elástico (**elastic springback**) (2). Después de remover la carga de deformación, la pieza tiene un ligero 'rebote'. El 'rebote' es proporcional al YP del material.

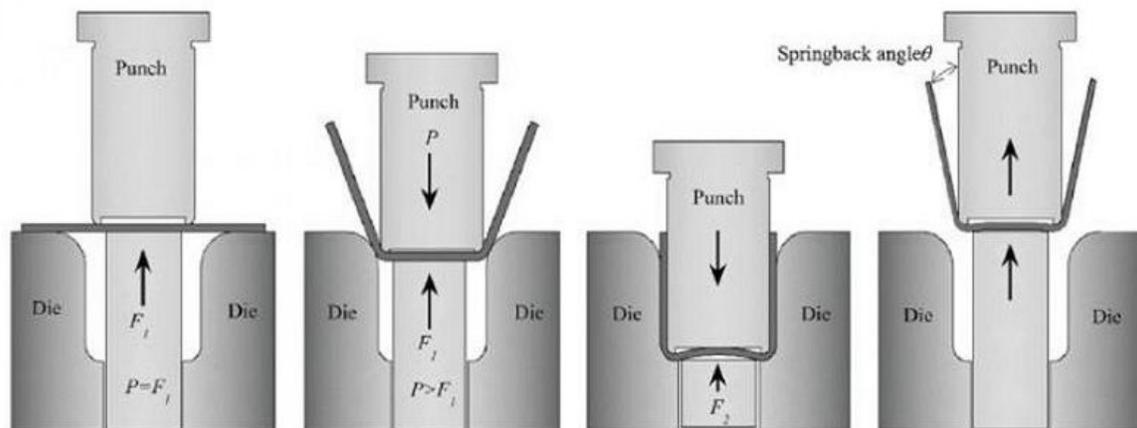


Figura 26. Etapas de estampado: 1. Fijado de plantilla; 2. Dobleza en U; 3. Formado de fondo; 4. Descarga (con ángulo de rebote α)

La susceptibilidad de un material al work hardening puede ser predicho mediante del análisis de su curva esfuerzo - deformación, o mediante pruebas de dureza antes y después del proceso de manufactura.

Existen dos formas de expresar el work hardening de manera matemática. La ecuación de Hollomon muestra la relación entre el esfuerzo y la deformación plástica

$$\sigma = K \varepsilon_p^n \quad [41]$$

En donde σ es el esfuerzo, K es un parámetro dependiente del material, ε_p es la deformación plástica y n es el coeficiente de endurecimiento por trabajado.

La ecuación de Ludwik incluye el punto de fluencia:

$$\sigma = \sigma_y + K \varepsilon_p^n \quad [42]$$

Si el material ha sido deformado anteriormente a baja temperatura, entonces el punto de fluencia se incrementa de la manera siguiente:

$$\sigma = \sigma_y + K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad [43]$$

Las constantes K y n dependen del material, y normalmente se encuentra en un rango de 0.2–0.5. Como se indicó, esta se puede ser calculada a partir de la curva σ - ε

$$n = \frac{d \log(\sigma)}{d \log(\varepsilon)} = \frac{\varepsilon}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad [44]$$

Esta ecuación puede evaluarse con la pendiente de una curva $\log(\sigma) - \log(\varepsilon)$. Rearreglando términos, esto permite calcular el valor de n a un esfuerzo y deformación específicos:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [45]$$

Un método sencillo para encontrar el valor de n utilizando el diagrama de esfuerzo deformación consiste en medir al menos 10 puntos desde el YP y hasta la de carga máxima. Denomine a estos puntos σ_N y ε_N . Posteriormente, se realizan las siguientes conversiones:

$$\sigma = (1 + \varepsilon_N) \sigma_N \quad [46]$$

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_N) \quad [47]$$

Por último, graficando estos puntos, tomando como eje horizontal la deformación, y como vertical el esfuerzo, la pendiente de la recta resultante corresponde al valor de **n**.

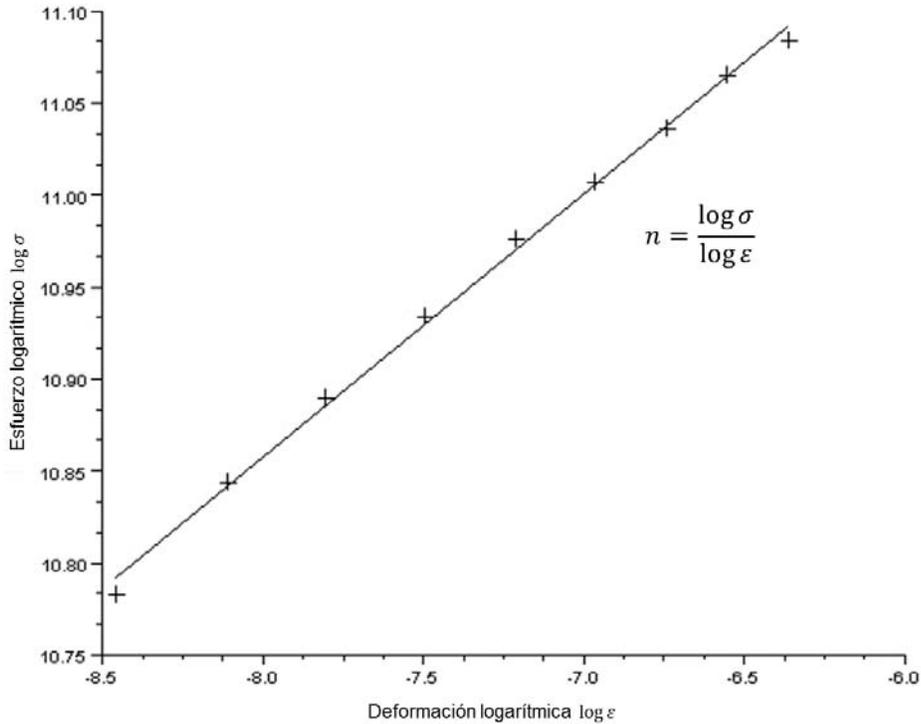


Figura 27. Representación gráfica del valor n para un acero bajo carbono

Para tomar en cuenta la anisotropía del material, y como medida numérica de la formabilidad del acero, se define **el coeficiente de Lankford** (conocido también como valor R). Este se define como el cociente entre la deformación en el ancho (**width strain**),

$$\epsilon_w = \ln W/W_0 \quad [48]$$

Y la deformación en el espesor (**thickness strain**)

$$\epsilon_t = \ln t/t_0 \quad [49]$$

Si se asume un volumen constante durante la prueba,

$$wtl = w_0 t_0 l_0 \quad [50]$$

Rearreglando términos:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{w_0 l_0}{wl} \quad [51]$$

El valor de R vienen dado por

$$R = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{w_0 l_0}{wl}} \quad [52]$$

Si se mide el cambio de espesor durante el ensayo (mediante un extensómetro), el valor de R se puede determinar de manera continua, y se observa cierta variación que depende de la cantidad de deformación. En el caso de lámina, el valor de R se determina en 3 diferentes direcciones del plano de carga (x, y) a 0°, 45° y 90° (Figura 28). La razón para evaluar en tres direcciones es debido a la fuerte dependencia del valor R con la orientación del grano en el material. De estos valores se calcula el \bar{R} como

$$\bar{R} = \frac{1}{4}(R_0 + 2R_{45} + R_{90}) \quad [53]$$

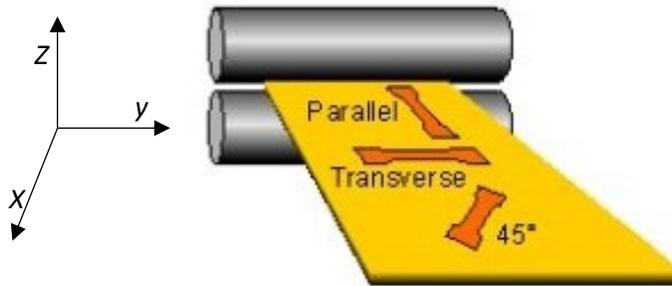


Figura 28. Representación física del parámetro de Lankford, y la posición de probetas para el cálculo de \bar{R}

4.1. Tipos de estampado (3) (14) (15) (16) (17)

Los molinos de rolado producen grandes cantidades de lámina de acero a bajo costo. Una importante fracción de todo el metal producido es transformada en acero rolado en caliente o frío; este es luego troquelado para partes automotrices, aeronáuticas, industriales, línea blanca y hasta latas y contenedores para perecederos. Las partes hechas de lámina tienen un alto módulo elástico y YP, lo que les da rigidez y una excelente relación resistencia/peso (Strength-to-weight ratio). El método usual de formado de lámina es el estampado. Existen varios procesos dentro de este método, pero en general estos se reducen a una combinación de 7 procesos básicos, descritos a continuación.

4.1.1. Plantilla y punzonado (blanking and piercing)

Dado que la lámina se entrega en rollos de entre 12-20MT, el primer paso consiste en cortar una plantilla, o **blank**, para alimentar la prensa; subsecuentemente el material puede ser trabajado para remover bordes e incluir barrenos (**trim and pierce**). Cuando se examina a detalle, el proceso de blanking se transforma en una combinación de corte (**shearing**) y fractura (**Figuras 29 y 30**).

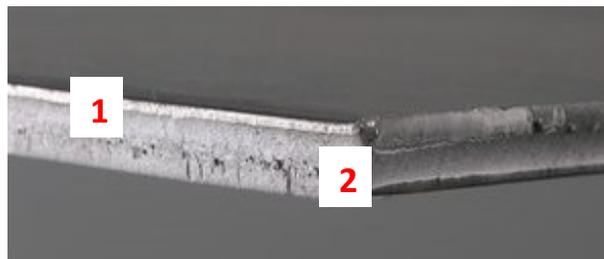


Figura 29. Borde de una plantilla; se observa la región de corte (1) y la falla por fractura (2)

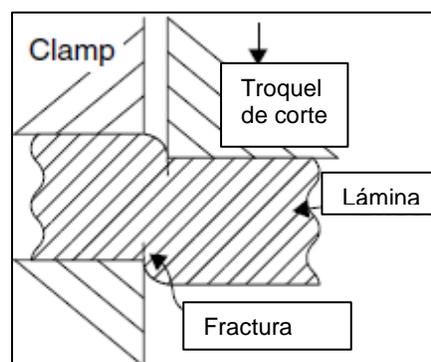


Figura 30. Detalle del proceso de corte.

4.1.2. Doblado (bending)

El proceso más sencillo es hacer un doblado (**bending**) recto, como se muestra en la Figura 31. Existe deformación plástica sólo en la sección del doblado, y el material adicional no sufre cambio alguno. Si el material tiene baja ductilidad, pueden aparecer fracturas en el radio del doblado, aunque la principal dificultad es obtener el ángulo deseado, y el posible **springback**.

Existen varios métodos de bending, según el tipo de herramienta que se utilice:

- a) **Folding**: doblado simple en perpendicular al plano de la lámina
- b) **Press brake**: doblado en ángulo con mandril y herramienta
- c) **Roll forming**: el doblado se hace con rodillos
- d) **Flanging**: se hace un doblado en el borde de la lámina

Si el doblado no se hace en línea recta, o si la lámina no es completamente plana, puede existir deformación no sólo en el doblado, sino también en la sección cercana a la deformación. A esto se le conoce como **stretch flanging**.

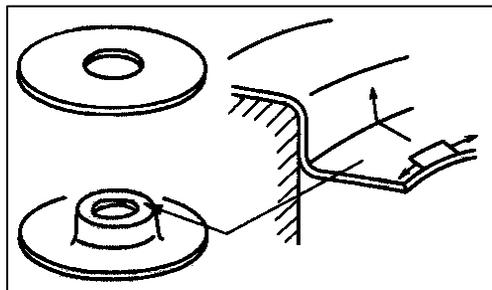


Figura 31. Deformación en borde, mostrando la sección de doblado y de estiramiento.

4.1.3. Doblez en sección (section bending)

En el caso de secciones más complicadas, como partes de chasis, se requiere un proceso de doblado en secciones no continuas, ya sea con curvas o ángulos. Este proceso implica complicaciones no presentes en otros procesos; principalmente la existencia de una diferencia entre la altura del doblado entre secciones. En la Figura 32 se ilustra esta condición: del lado derecho, el material presenta arrugas, lo que aumenta la altura (h) del borde; en contraste, del lado izquierdo existe estiramiento de la lámina y la altura h es menor.

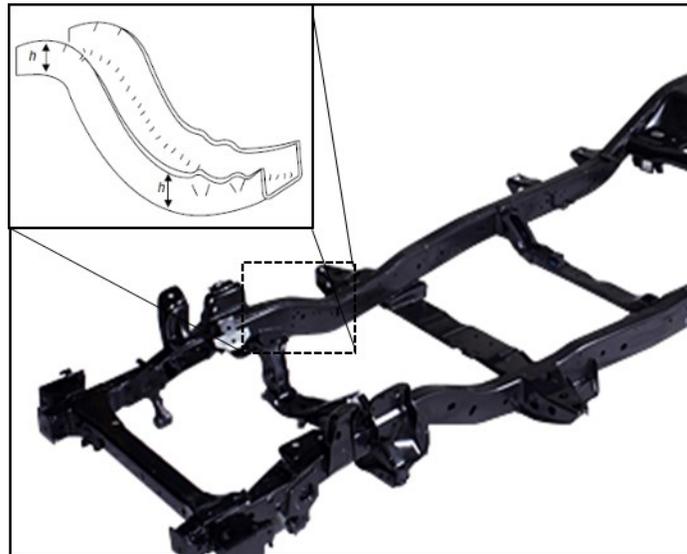


Figura 32. Sección de un chasis automotriz, mostrando la diferencia de alturas en la sección con doblez.

4.1.4. Estirado (stretching)

El proceso de estiramiento (**stretching**) más simple se muestra en la figura 33. Cuando el herramental empuja la lámina, se forma un esfuerzo de tensión en el centro y estiramiento en dos dimensiones. Este esfuerzo es el que causa la deformación, y el esfuerzo generado por el contacto del herramental con la lámina es usualmente mucho menor que el esfuerzo de fluencia del acero. Dado que existe tendencia a las arrugas en el borde de la deformación, se requiere que la lámina esté sujeta.

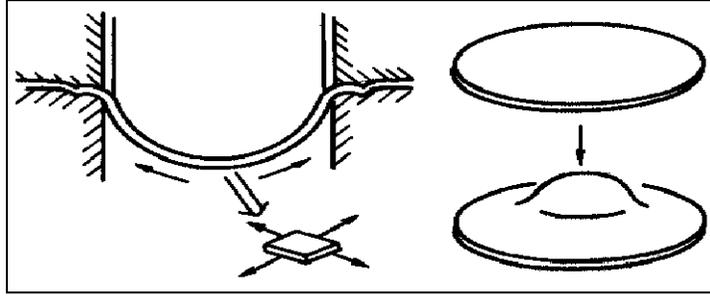


Figura 33. Stretching. En el centro de la lámina se aprecia el estiramiento en dos dimensiones.

4.1.5. Expansión de punzón (hole expansion) (18)

Si se hace un punzonado, y después la sección se deforma con un mandril de diámetro menor, el borde del material forma un 'labio', como se muestra en la figura 34.

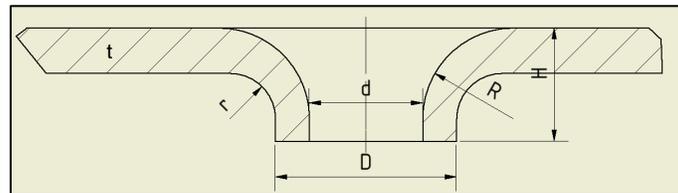


Figura 34. Proceso de hole expansion. (18)

Dependiendo de la altura del labio, se pueden presentar fracturas o grietas en el borde de la deformación. Se define la propiedad mecánica (λ) como la relación porcentual entre el diámetro original y el final del barreno:

$$\lambda = \frac{D_f - D_0}{D_0} * 100$$

[54]

4.1.6. Draw die forming

Cuando se requiere formar una parte de sección complicada, se utiliza un herramental especial. El principio utilizado es similar al descrito arriba, pero en el borde de la pieza el acero fluye bajo carga, y alimenta la forma de la parte. Este proceso es el de uso más común para la fabricación de paneles automotrices y de línea blanca. La mayor parte del borde se corta como desperdicio, por lo que no es un proceso muy eficiente en cuanto a uso de acero. No obstante, con buen diseño tanto del herramental como de la pieza, se puede reducir el desperdicio y tener buen control dimensional.

4.1.7. Embutido profundo (deep drawing)

Dado que existe un límite máximo al cual se puede deformar la lámina de acero sin fracturar, las piezas suelen tener poca profundidad. Para partes con mucha profundidad, se requiere que el material de la periferia fluya más, y esto es conocido como embutido profundo (**deep drawing**). Para evitar que existan deformaciones en el borde de la pieza, se utiliza un holder que aplique un esfuerzo al menos similar al del mandril.

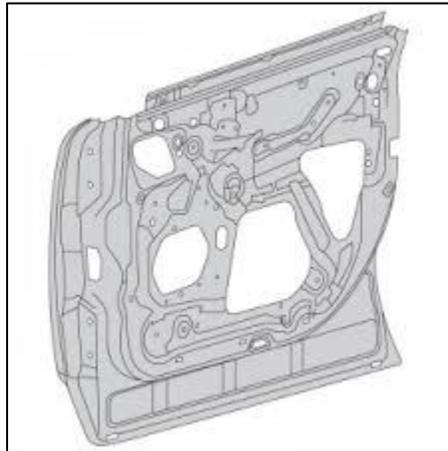


Figura 35. Parte interna de una puerta frontal automotriz. El embutido profundo es notorio en la zona central de la pieza. (2) (3)

La Tabla 4 muestra la relación entre las características del material y el tipo de formado.

Tabla 4. Tipo de formado y propiedades mecánicas que lo afectan

Modo de formado	Propiedades mecánicas					
	YP	TS	%EI	n	R	λ
Deep Draw	Precisión dimensional			↑↑	↑↑↑	
Stretch form		↑	↑↑	↑↑↑	↑	
Stretch flange		↑	↑↑	↑	↑↑	↑↑↑
Bending		↑	↑↑	↑		↑↑

Nota: el número de flechas indica mayor o menor dependencia

5. Bases matemáticas de la deformación

En contraste con la prueba de tensión, en la que el esfuerzo en dos direcciones es esencialmente cero, en un proceso estándar de estampado el material se verá deformado por los esfuerzos σ_1 y σ_2 , los cuales son diferentes de cero. En el caso del tercer esfuerzo σ_3 , el cual es perpendicular a la superficie de la lámina, usualmente es muy pequeño y el esfuerzo requerido para iniciar deformación es mucho menor que el YP del material. Si se asume este tercer esfuerzo como 0, tenemos un caso de **deformación de esfuerzo plano** (Figura 36); si adicionalmente consideramos que los esfuerzos son proporcionales, como en un ensayo de tracción, se tiene un modelo simple que describe la deformación del material. Se muestran las diferencias entre la (a) tensión uniaxial y (b) la deformación de esfuerzo plano.

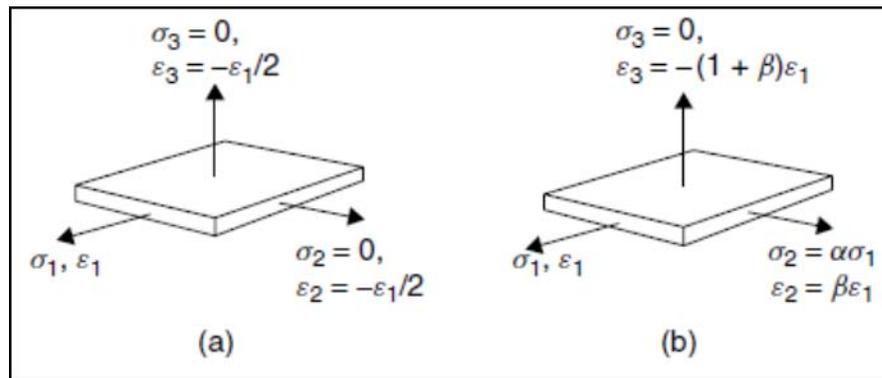


Figura 36. Esfuerzo uniaxial (a) y esfuerzo plano (b) (5), (19)

Para simplificar la descripción de los esfuerzos, se pueden definir dos coeficientes: la relación de deformación (**strain ratio**) β y la relación de esfuerzo (**stress ratio**) α . En el caso de un proceso simplificado como el descrito anteriormente, ambos coeficientes son constantes. La manera usual es definir las direcciones del vector esfuerzo de manera tal que $\sigma_1 > \sigma_2$ y la tercera dirección como el esfuerzo perpendicular a la superficie, esto es $\sigma_3 = 0$. Entonces el modo de deformación en un elemento unitario viene definido como:

$$\epsilon_1; \quad \epsilon_2 = \beta\epsilon_1; \quad \epsilon_3 = -(1 + \beta)\epsilon_1 \quad [55]$$

$$\sigma_1; \quad \sigma_2 = \alpha\sigma_1; \quad \sigma_3 = 0 \quad [56]$$

Considerando un volumen constante, se obtiene el tercer componente del esfuerzo. En el caso particular de la tensión uniaxial, los valores de las constantes son $\beta = -1/2$, $\alpha = 0$. (5) (8)

5.1. Condición de volumen constante (incompresibilidad)

Se ha mencionado en varias ocasiones que la deformación plástica ocurre a volumen constante. Sin cambio en el volumen, el diferencial en el volumen de la sección es esencialmente cero,

$$d(lwt) = d(l_0 w_0 t_0) = 0 \quad [57]$$

Separando variables:

$$dl \times wt + dw \times lt + dt \times lw = 0 \quad [58]$$

Y dividiendo por lwt :

$$\frac{dl}{l} + \frac{dw}{w} + \frac{dt}{t} = 0 \quad [59]$$

Lo cual se reduce a:

$$d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = 0 \quad [60]$$

De donde se deduce que, para volumen constante, la suma del incremento de deformación en cada dirección es igual a 0.

5.2. Criterios de deformación: Tresca y von Mises

Para iniciar fluencia en la lámina el esfuerzo aplicado depende del YP y el valor del coeficiente α descrito en las ecuaciones [55] y [56]. Existen varias teorías y criterios para predecir los esfuerzos bajo los cuales el material iniciará deformación plástica; cada uno tiene diferentes consideraciones y simplificaciones. A continuación se describen dos de los más sencillos, los criterios de Tresca y von Mises.

5.2.1. Criterio de Tresca

Una hipótesis es considerar que el material fluye después de que el esfuerzo mayor de corte alcanza un valor crítico. En la prueba de tensión, en la que dos esfuerzos son 0 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), el esfuerzo máximo de corte al momento de fluencia viene dado por $\tau_{crit} = \sigma_f/2$, donde σ_f es el punto de inicio de deformación de acuerdo al diagrama esfuerzo - deformación. Con estas consideraciones, el **Criterio de Tresca** indica que la fluencia inicia cuando se cumple la siguiente condición:

$$\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma_f}{2} \quad [61]$$

En este caso, el esfuerzo σ_1 es el esfuerzo máximo, y $\sigma_3 = 0$.

5.2.2. Criterio de von Mises

Otro criterio de uso común indica que la deformación plástica inicia cuando la raíz del promedio de la suma de los cuadrados de los esfuerzos máximos de corte alcanza un valor máximo. Tomando en cuenta que, durante la prueba de tensión, existen dos esfuerzos cortantes máximos con magnitud igual a $\sigma_f/2$, mientras que el tercero es 0, este criterio se puede expresar matemáticamente como:

$$\sqrt{\frac{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2}{2}} = \sqrt{\frac{2(\sigma_f/2)^2}{3}} \quad [62]$$

$$\sqrt{2(\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2)} = \sigma_f \quad [63]$$

Si se definen los valores de esfuerzos cortantes como:

$$\tau_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}; \quad \tau_2 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}; \quad \tau_3 = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \quad [64]$$

Y sustituyendo en la ecuación anterior:

$$\sqrt{2((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} = \sigma_f \quad [65]$$

Para el esfuerzo plano especificado en la ecuación reducida de esfuerzos, el criterio es:

$$\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} = (\sqrt{1 - \alpha + \alpha^2}) \sigma_1 = \sigma_f \quad [66]$$

Al ser graficado, este esfuerzo presenta una forma elíptica, como se muestra en la figura 37.

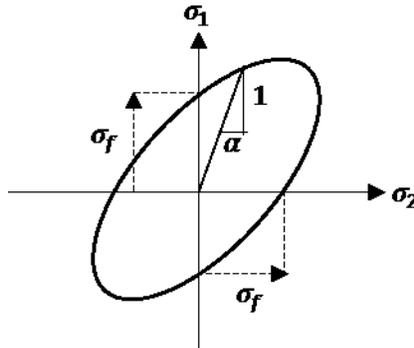


Figura 37. Espacio geométrico de esfuerzo plano para criterio de von Mises.

Utilizando estas herramientas, y los coeficientes descritos anteriormente (R y n), se cuenta con una herramienta para evaluar la formabilidad de un material durante el estampado: el diagrama FLD.

6. Diagrama FLD: Definición y dependencias matemáticas

Un diagrama de formabilidad (por sus siglas en inglés, Forming Limiting Diagram, **Figura 38**) es una representación gráfica del comportamiento del material durante el estampado. Para poder determinar si una región específica en una parte estampada está sujeta a falla durante su manufactura, se dibuja sobre la superficie de la plantilla (esto es, la parte antes de la deformación) una mallado circular, el cual será medido después de deformado. Mediante la repetición de esta prueba a distintos rangos de deformación, se grafican los puntos donde se observa una fractura.

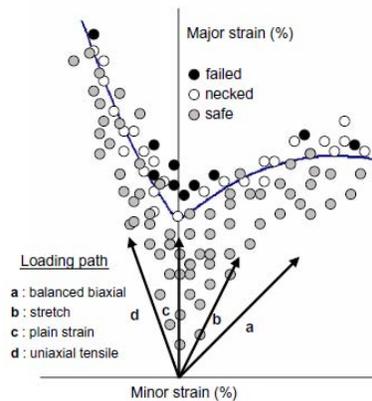


Figura 38. Ejemplo de un diagrama FLD (20)

Los semiejes de la elipse formada permiten la medición de la deformación en dos direcciones, conocidas como la dirección mayor y menor. Asumiendo un esfuerzo independiente del vector de dirección, se alcanza un valor crítico en el cual se inicia el proceso de deformación. Mediante la repetición de este procedimiento, se obtiene el diagrama. Una vez obtenido, se convierte en una herramienta para determinar si un proceso de estampado puede o no resultar en una falla (fractura, arrugas, etc.). Esta información es crítica para el diseño de procesos de producción, y por lo tanto fundamental para la producción de herramientas y piezas terminadas.

Para obtener un FLD completo (**Figura 39**), se preparan varias muestras de geometría variada, las cuales son embutidas hasta que se presenta una fractura. Se utilizan aceites y hojas de grafito para reducir la fricción entre la pieza y el herramental. Mediante un sistema óptico automático, las deformaciones se evalúan y se obtienen los valores de la deformación máxima y mínima.

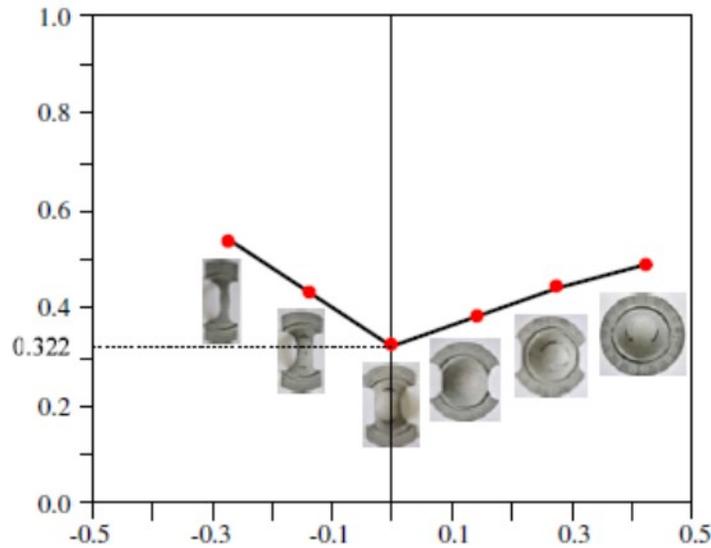


Figura 39. Tipos de probeta para cada región del FLD (21)

Existen varios factores, tanto del material como de las características de la prueba, que pueden modificar la curva. A continuación se describen los que la afectan de manera crítica.

6.1. Strain-hardening (trabajo en frío)

El vértice de la curva en un FLC intersecta al eje y (major strain) usualmente en el valor de n del material. Si este valor decrece, la curva se acerca más al eje x (minor strain). Aplicaciones que requieren una deformación biaxial hacen uso de un material con un valor de n alto (**Figura 40**); dado que durante el proceso de fabricación se utiliza el recocido para aumentar este coeficiente, las propiedades mecánicas tienden a ser bajas (TS, YP); como contraste, las opciones existentes para incrementar la resistencia del material (como el trabajo en frío), reducen drásticamente el valor de n .

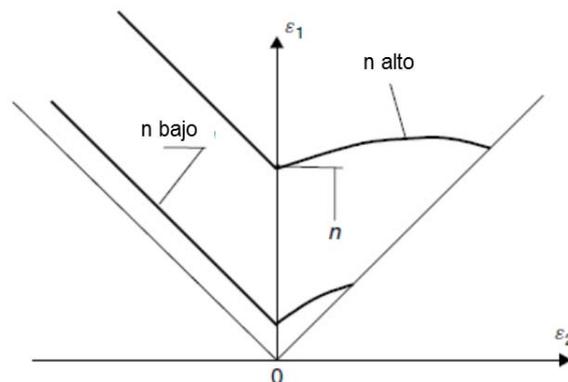


Figura 40. Dependencia del FLD con el valor de n (22)

6.2. Velocidad de deformación

Durante el ensayo de tensión, la velocidad de prueba no afecta el valor de deformación al cual la tensión alcanza su valor máximo (TS), pero tiene influencia sobre la velocidad de formación de estricciones. En un estiramiento biaxial (stretching) el proceso de estricción tiene un progreso gradual, iniciando desde el punto de más alta carga, la cual depende del sitio en el cual se inicia la misma. En esta región, la velocidad de deformación (**Figura 41 a**) reducirá la velocidad de crecimiento de la estricción, y el FLD de un material sensible a la velocidad de deformación puede cruzar el eje y en un valor mayor al de n (**Figura 41 b**).

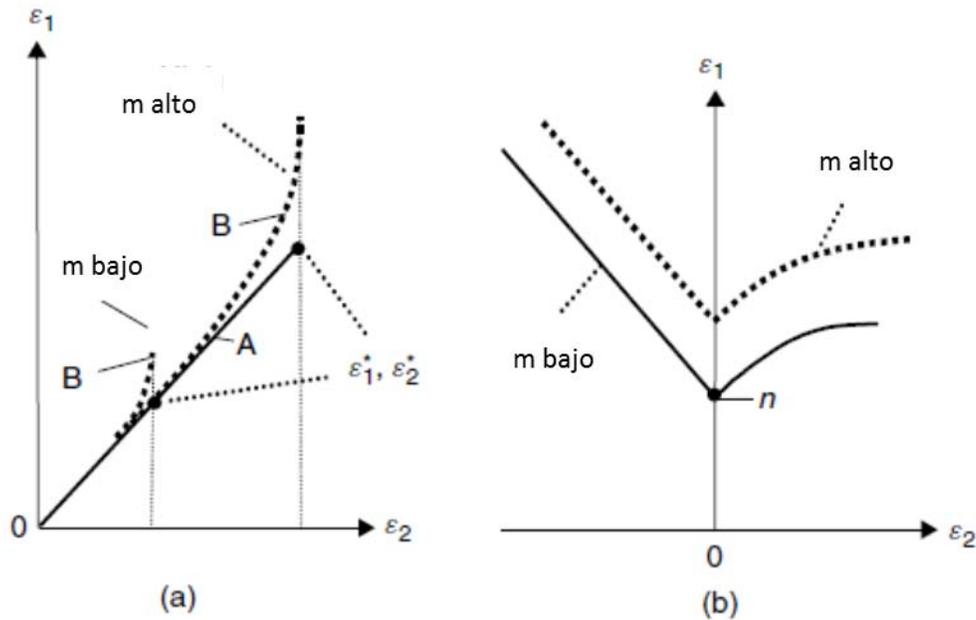


Figura 41. Dependencia del FLD con la velocidad de deformación m (23).

En resumen, el proceso de formado de lámina puede ser limitado por varios eventos. En los párrafos anteriores se describió la condición en la que el material falla por estricción y ruptura (**necking and tearing**), que es característico de una lámina dúctil; empero, también existe la posibilidad de que el material falle antes de que se presente una estricción. Otras restricciones o modos de fallo incluyen que la lámina se arrugue (**wrinkling**) bajo cargas de compresión. Para casos prácticos, la lámina sólo es deformada con esfuerzos de tensión y uno de los esfuerzos directores debe ser mayor o cuando menos igual a cero sobre el plano de deformación.

7. Deformación de una lámina no perfecta

Si se considera una lámina real (con alguna imperfección), una de las posibilidades de caracterización es con una región en la que su sección transversal es más pequeña; matemáticamente, podemos definir el área original como A_0 , y el área no perfecta como $(A_0 + dA_0)$, donde dA_0 es un valor negativo pequeño. En algún momento durante la deformación, el estado de la lámina será similar al indicado en la figura abajo.

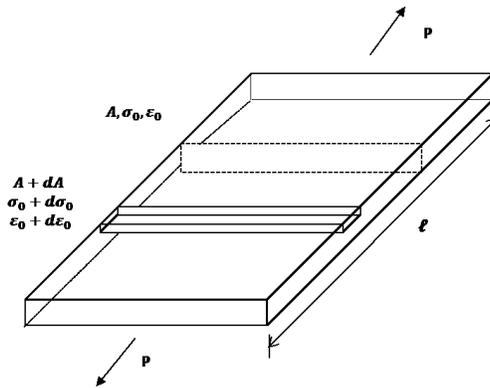


Figura 42. Definición de esfuerzos dentro de una lámina no perfecta (5)

En el caso del diagrama esfuerzo-deformación, la curva se vería modificada de la siguiente manera

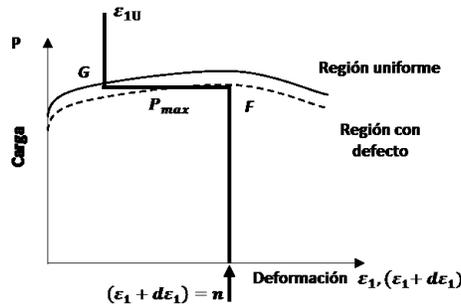


Figura 43. Curva para región uniforme, y una región con defecto (5)

Entonces, si el material se comporta de acuerdo a la ecuación [41], la carga requerida para deformar un material sin defectos sería:

$$P = \sigma_0 A = K \epsilon_0^n A_0 \frac{l_0}{l} = K A_0 \epsilon_0^n e^{(-\epsilon_1)} \quad [67]$$

Sustituyendo las diferencias mostradas en la Figura 43, la ecuación anterior se puede escribir como:

$$P = KA_0 \varepsilon_0^n e^{(-\varepsilon_1)} = K(A_0 + dA_0)(\varepsilon_0 + d\varepsilon_0)^n e^{[-(\varepsilon_0 + d\varepsilon_0)]} \quad [68]$$

La diferencia entre la carga presente en la región uniforme, comparada con la región con defecto, puede hallarse tomando nuevamente en cuenta que el material obedezca la ecuación [41]. Si, de acuerdo a la figura 43, se sustituye $(\varepsilon_1 + d\varepsilon_1) = n$ en la deformación a carga máxima en la zona con defecto, y ε_U por la deformación en la zona uniforme, la ecuación anterior se puede escribir como sigue:

$$\left(\frac{\varepsilon_U}{n}\right)^n e^{(n-\varepsilon_U)} = 1 + \frac{dA_0}{A_0} \quad [69]$$

Mediante esta ecuación, podemos definir una ‘**ventana de formado**’ (5), y observar cual es la región dentro del FLD en la que se pueden presentar varios tipos de defectos:

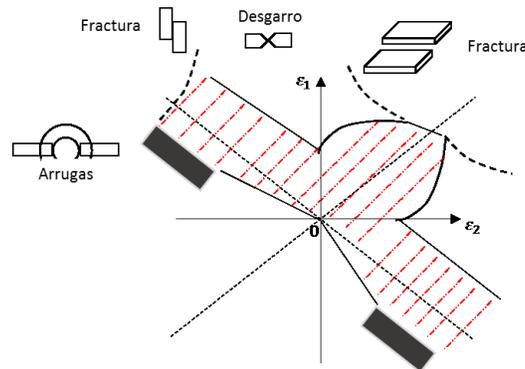


Figura 44. Ampliación de un FLD para mostrar defectos de proceso (5)

Rearreglando términos en la ecuación [69],

$$\left[1 - \frac{n - \varepsilon_U}{n}\right] e^{\left(\frac{n - \varepsilon_U}{n}\right)} = \left(1 + \frac{dA_0}{A_0}\right)^{\frac{1}{n}} \quad [70]$$

Dado que los valores de $(n - \varepsilon_U)$ y dA_0/A_0 son mucho menores que 1, la ecuación anterior puede ser aproximada como:

$$\left(1 - \frac{n - \varepsilon_U}{n}\right) \left(1 + \frac{n - \varepsilon_U}{n}\right) = 1 - \left(\frac{n - \varepsilon_U}{n}\right)^2 \approx 1 + \frac{dA_0}{A_0} \frac{1}{n} \quad [71]$$

De esta manera, podemos determinar la forma aproximada de la ventana de formado en base a parámetros obtenibles del FLD. A esta relación se le conoce como criterio de Marziniak.

8. Procedimiento

Se evaluó el comportamiento de formado de un acero rolado en frío (CR) y un acero galvanizado (GA), calidad DQ (drawing quality) para 5 distintos molinos, identificados como $M_1 \dots M_5$. Con la intención de tener mayor alcance, se utilizó una combinación de materiales de maquila nacional e importada.

Para cada material se midió el FLD mediante ensayo (realizado por cada proveedor), y las zonas de estricción y/o fractura fueron capturadas y medidas. Los gráficos iniciales se muestran en la figura 45, para acero rolado en frío y galvanizado.

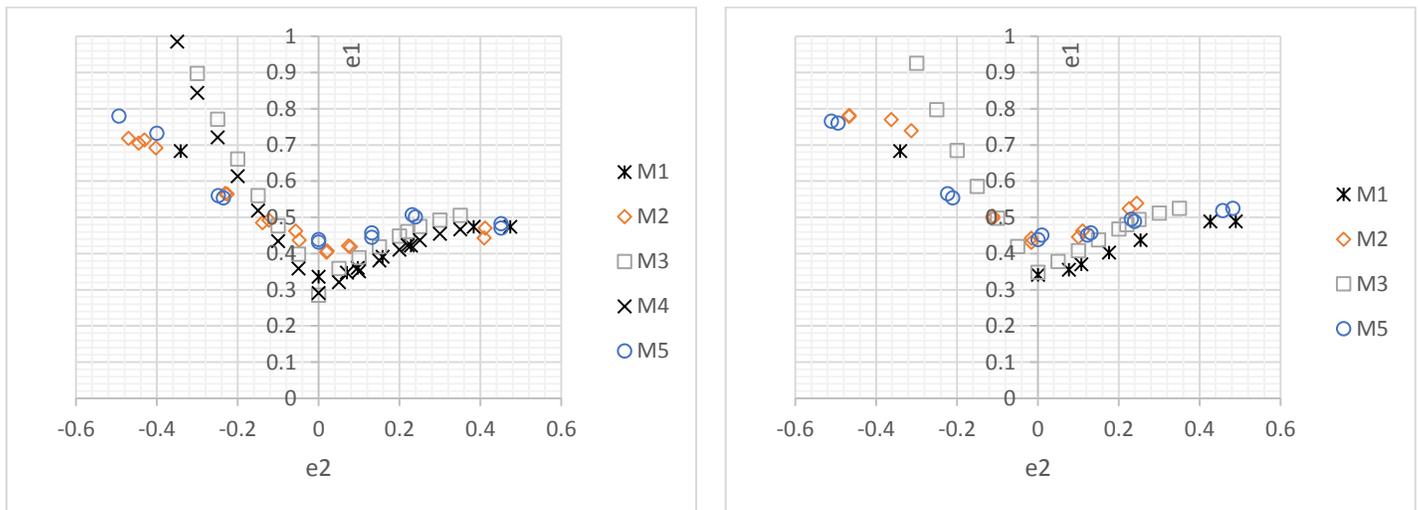


Figura 45. Comparativo de FLD para CR (izq.) y GA (der.)

Posteriormente, se realiza el siguiente tratamiento de datos (24) para obtener la ventana de formado:

- El FLD se transpone, de manera tal que los valores de e_1 y e_2 corresponden al eje x, y viceversa.
- Se trazan curvas 'directoras', dos diagonales a partir del origen a 45° ; sólo se utilizan como referencia y para facilitar la lectura del diagrama.
- Se trazan las curvas alfa para cada sección del FLD controlado por el valor de n ; estas son rectas, cuya pendiente es el promedio de la diferencia entre las deformaciones de cada punto en el diagrama ($e_1 - e_2$)
- Si la función es suave, se ajusta una curva, considerando un $0.9 \leq R$ válido para efectos de cálculo. En caso de que esto no sea factible, la curva se trabaja por intervalos, de manera que los límites permitan una función seccionalmente suave, generando una curva para cada intervalo.
- Mediante integrales, se calcula el área bajo la curva para cada área requerida, de manera que se considere el área total marcada.

A continuación, se representa gráficamente el procedimiento descrito anteriormente. Se utiliza como referencia la información de acero M1.

8.1. Trazado de FLD

Se trazan los valores medidos durante la prueba para los valores de diámetro de elipse, e_1 y e_2 .

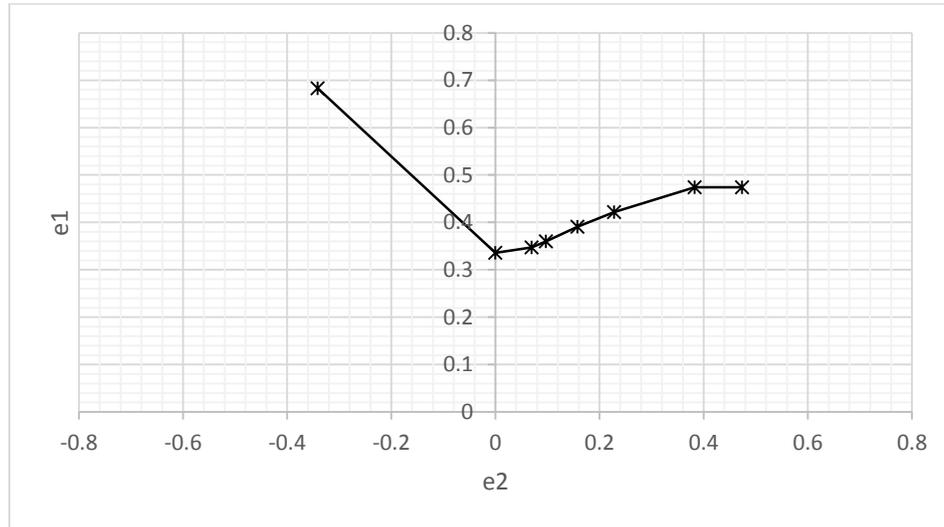


Figura 46. FLD para acero M1

8.2. Transposición del FLD

Los valores de e_1 y e_2 se transponen hacia los cuadrantes a la derecha del plano cartesiano, para generar una curva similar a una campana de Gauss con colas.

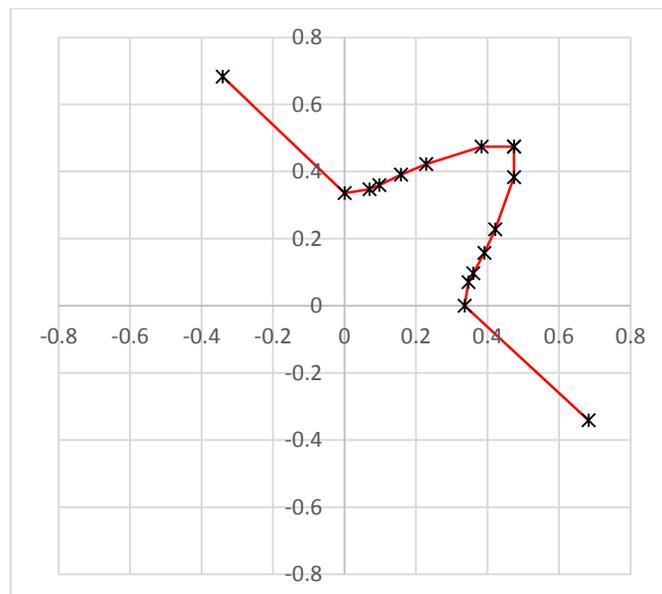


Figura 47. Intercambiando valores para cada par (x, y) se transpone la curva

8.3. Trazado de curva directora

Se traza un par de rectas con pendientes $m=1, -1$ (45°) para referencia y claridad de lectura.

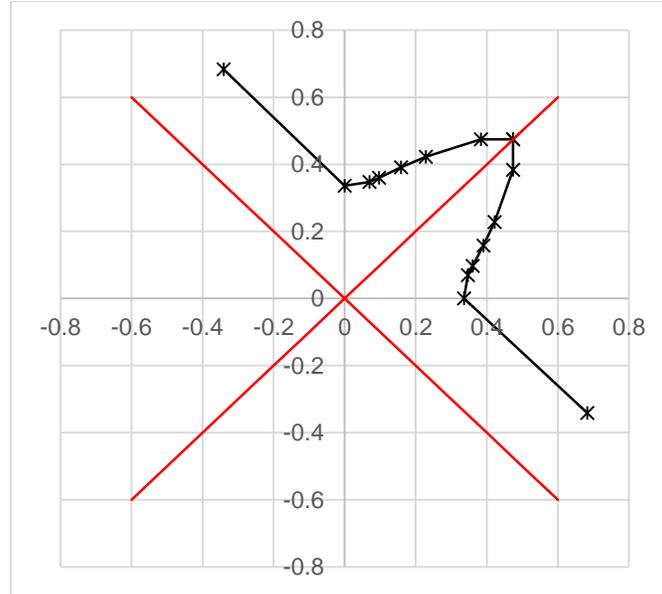


Figura 48. Trazado de curvas directoras

8.4. Trazado de curva alfa

Se calcula el promedio de las diferencias entre los valores de e_1 y e_2 , y este valor se utiliza como pendiente para la recta que determina el límite de deformación plana durante el proceso de estampado.

(5) La misma curva se transpone, quedando una imagen simétrica.

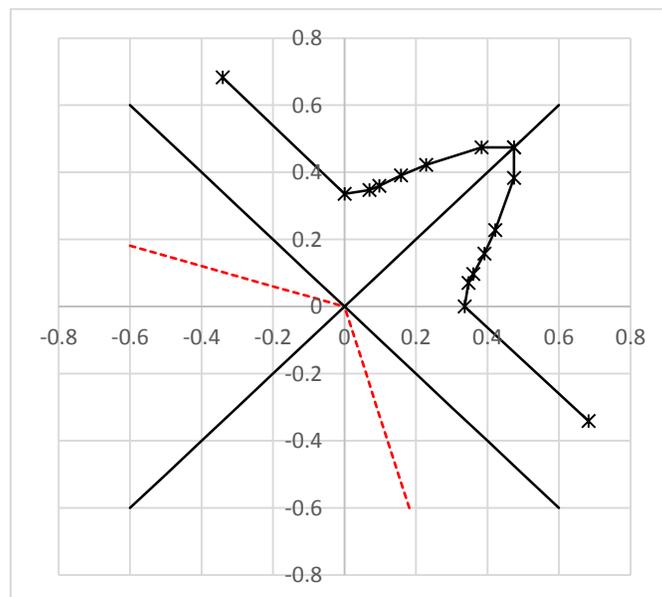


Figura 49. Trazado de curva alfa

8.5. Ajuste de rectas

Para cada curva mostrada anteriormente, se separa el FLD en secciones izquierda y derecha (con respecto al eje) y se ajusta una recta, En caso de que la curva no sea suave, se separa en intervalos seccionalmente suaves y se ajusta a la mejor curva

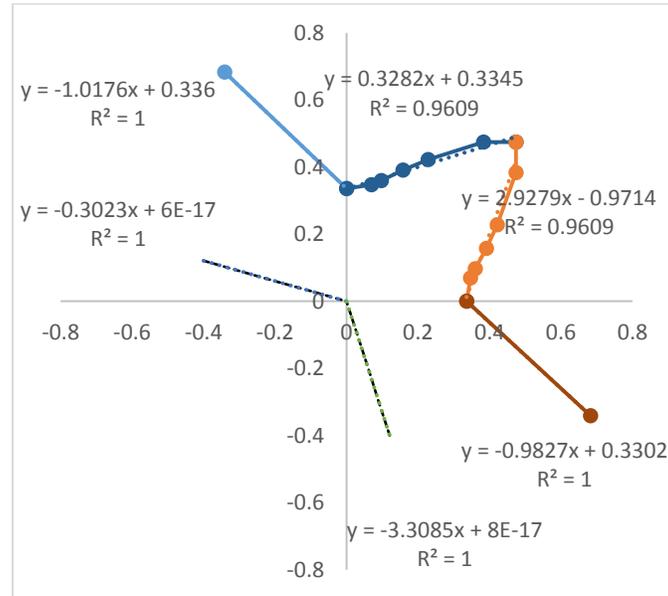


Figura 50. Ajustes de recta para cada curva

Con las rectas ajustadas para cada curva, se integra la función obtenida en los intervalos requeridos y se calcula el área bajo curva, la cual es una medida cuantitativa de la ventana de formado en cada acero.

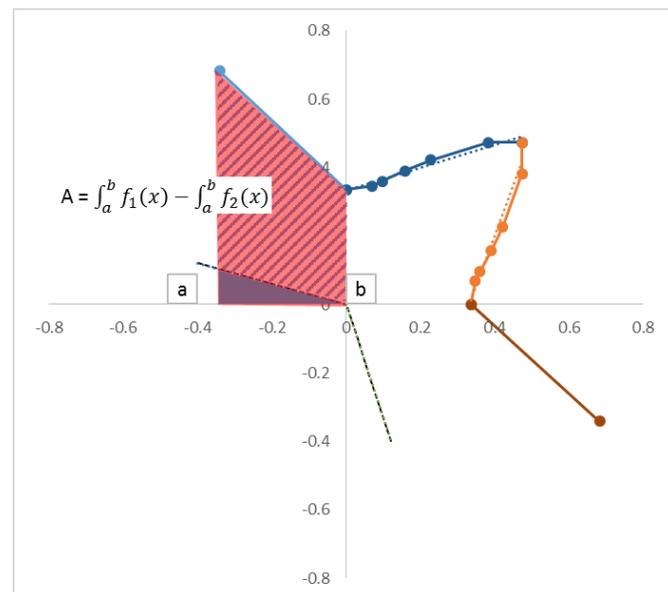


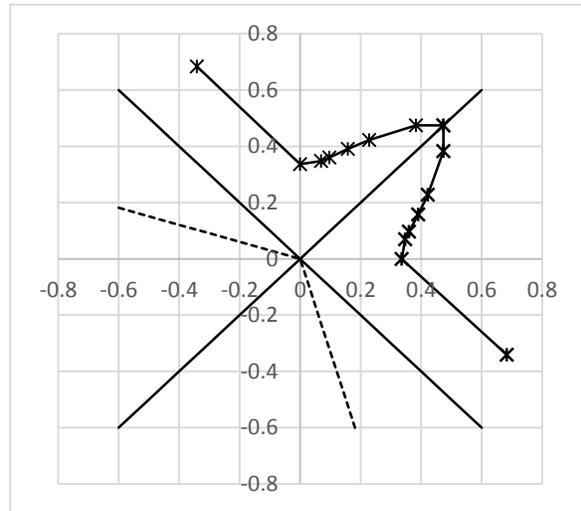
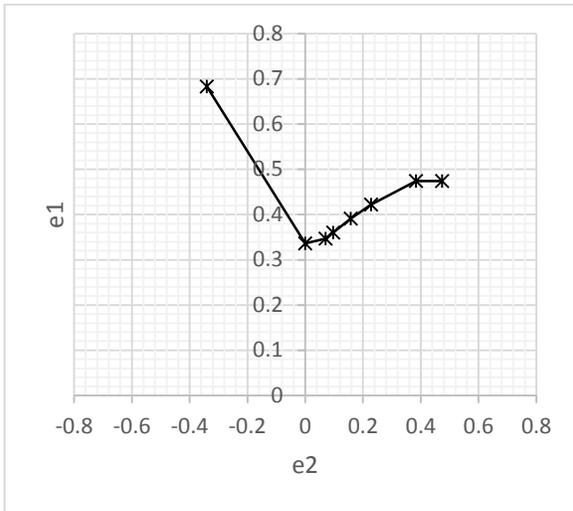
Figura 51. Obtención de áreas para la ventana de formado.

9. Resultados experimentales

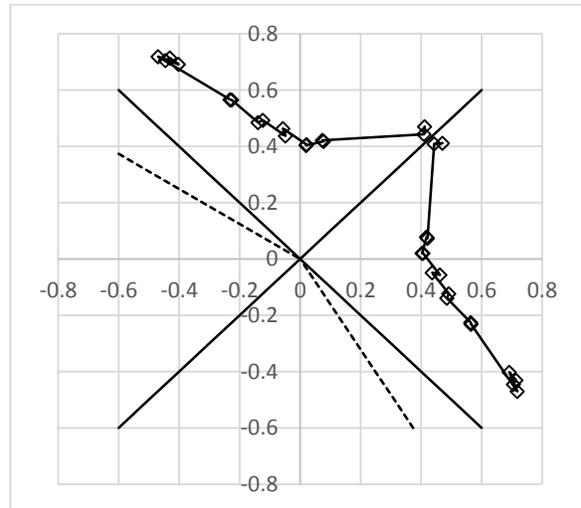
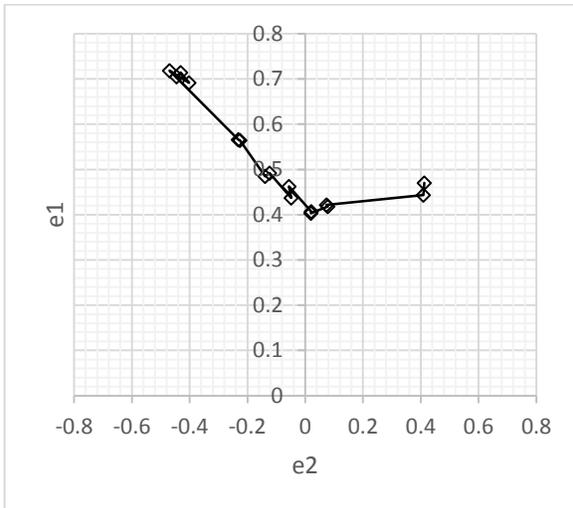
Según el procedimiento detallado, se muestran las curvas FLD de referencia, y las ventanas de formado obtenidas para cada material.

9.1. Acero CR

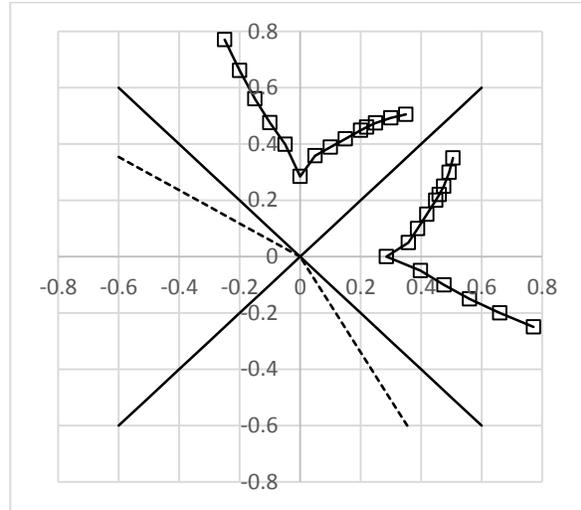
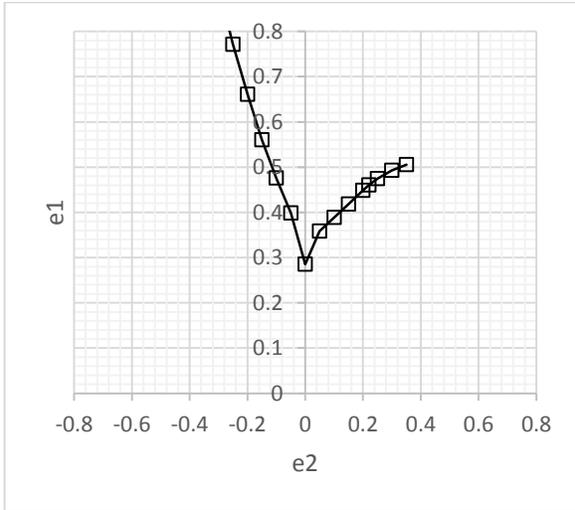
M1



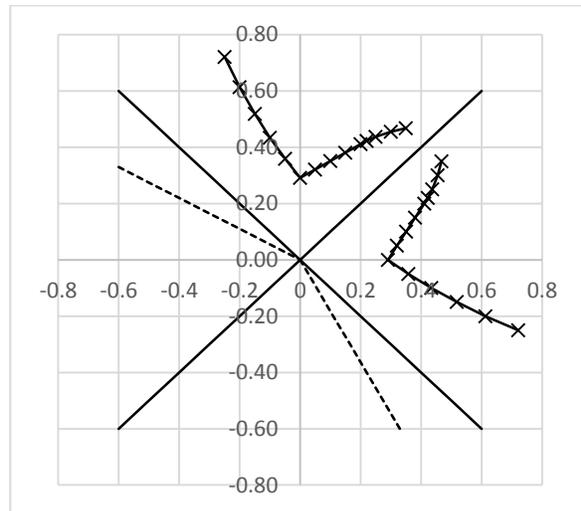
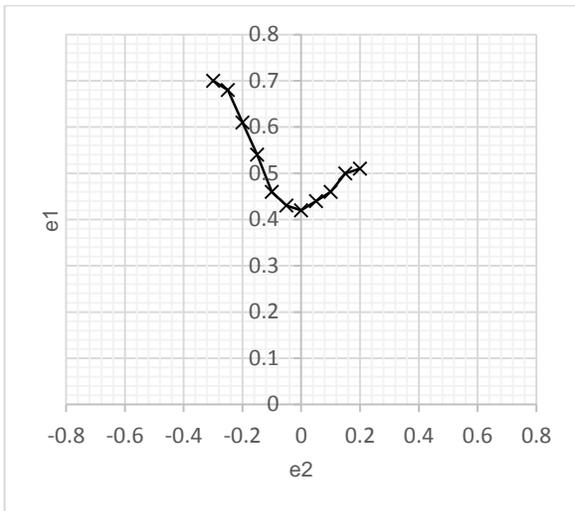
M2



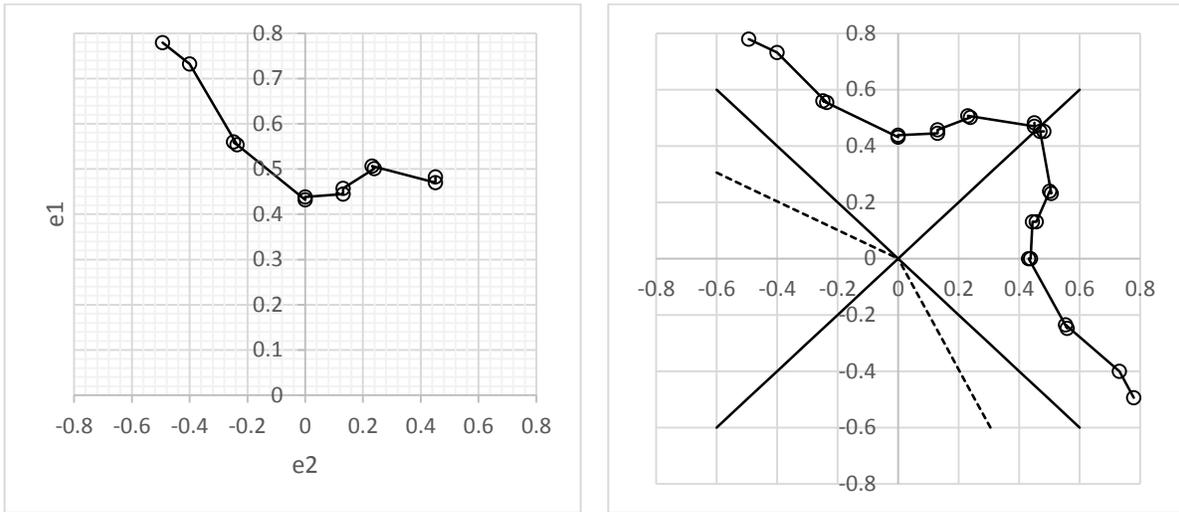
M3



M4



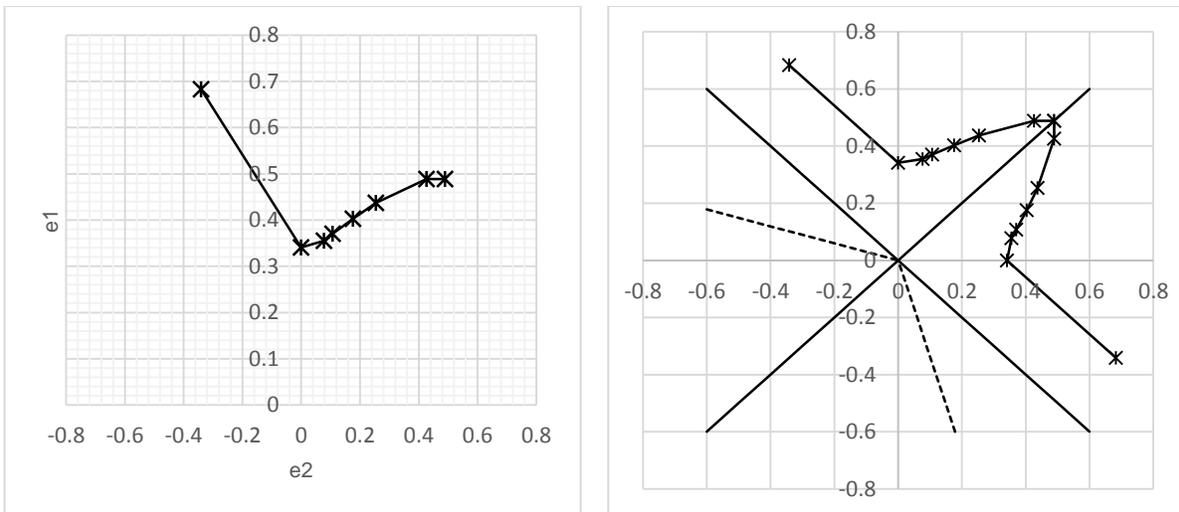
M5



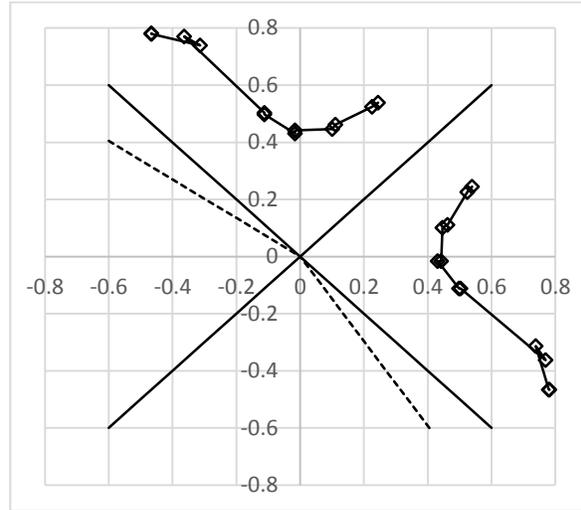
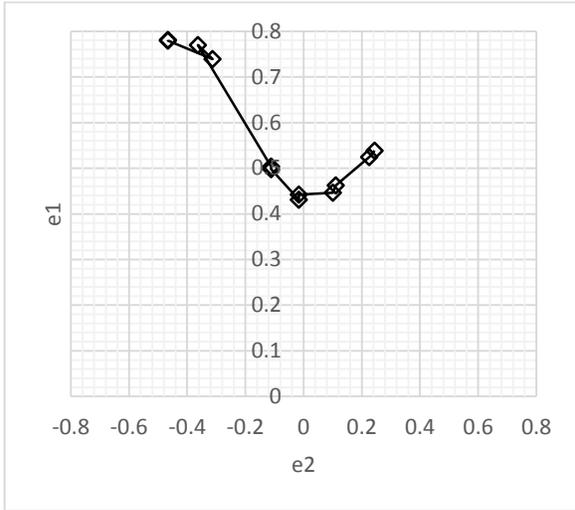
Figuras 52 a 61. FLD (izquierda) y ventana de formado (derecha) para aceros M1-M5

9.2. Acero GA

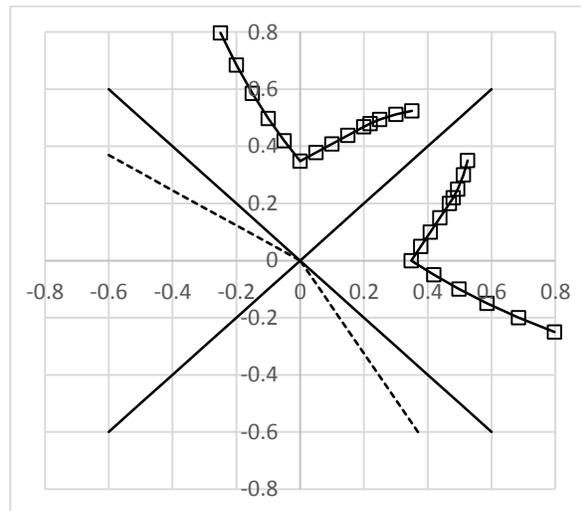
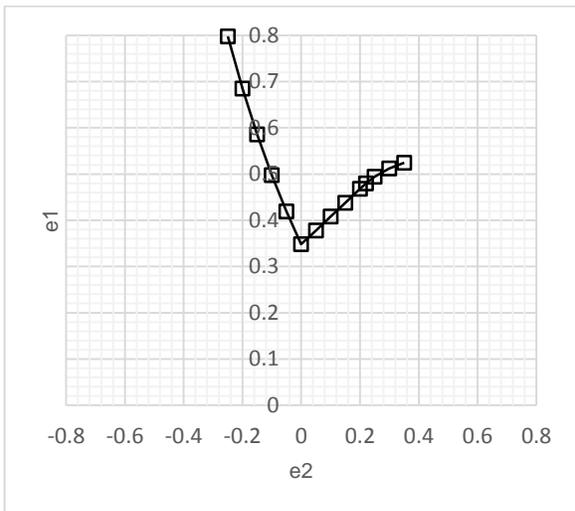
M1



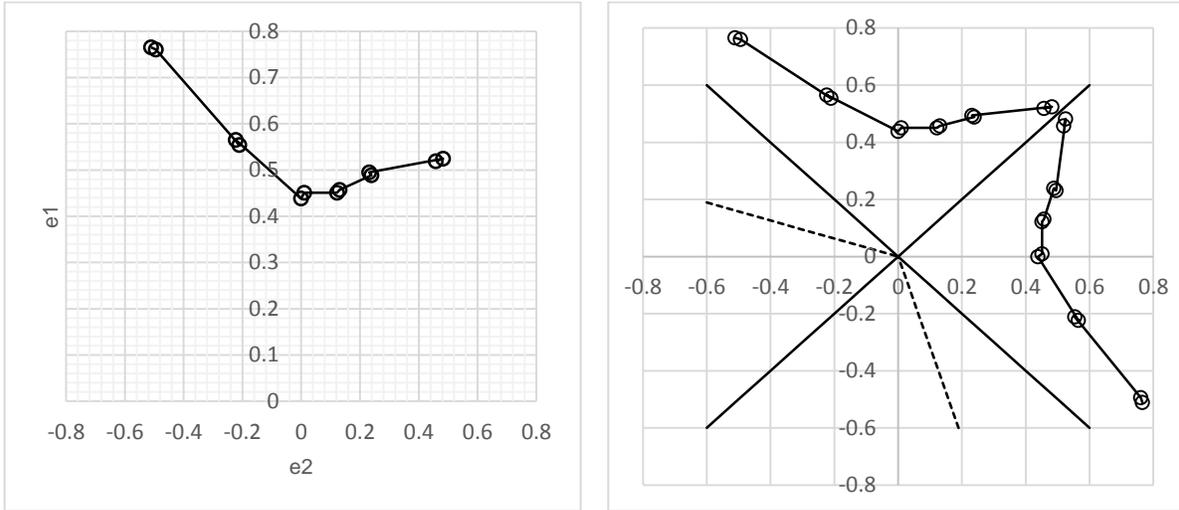
M2



M3



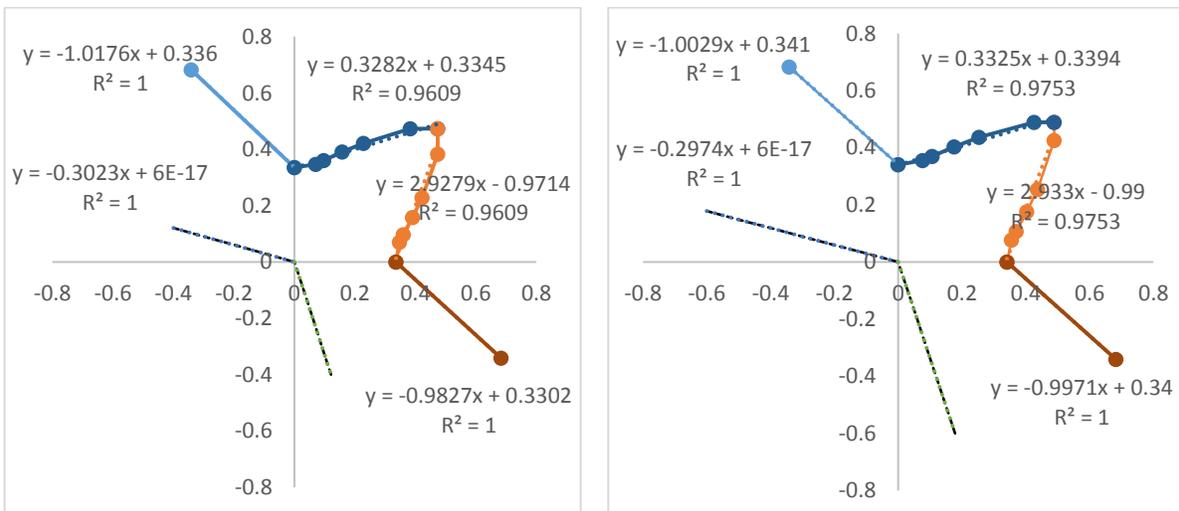
M5



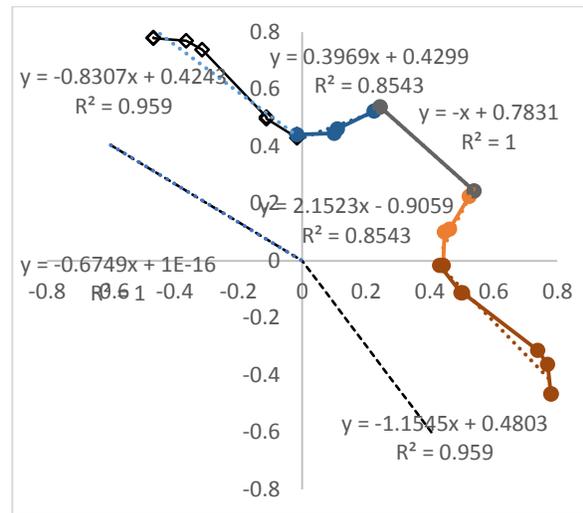
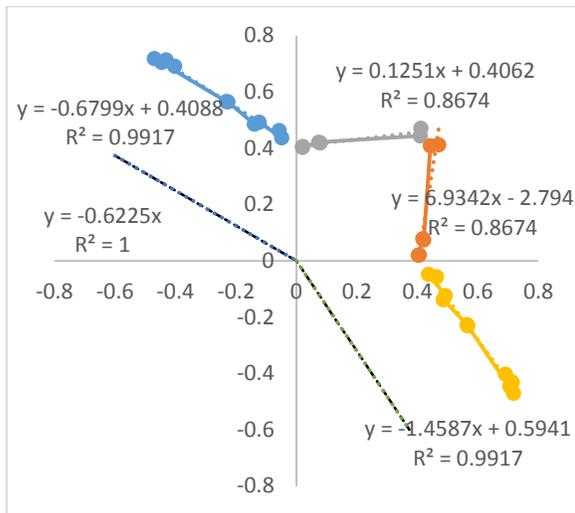
Figuras 62 a 69: FLD (izquierda) y ventana de formado (derecha) para aceros M1-M3, M5

Desafortunadamente, durante el ensayo del material M4 GA, las muestras resultaron dañadas, por lo que no se cuenta con la curva de este material.

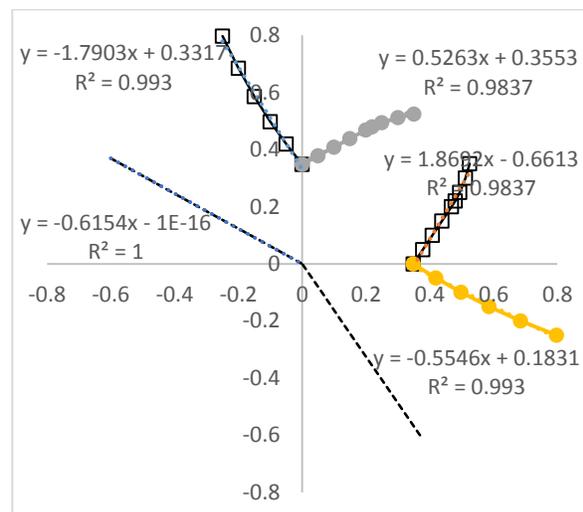
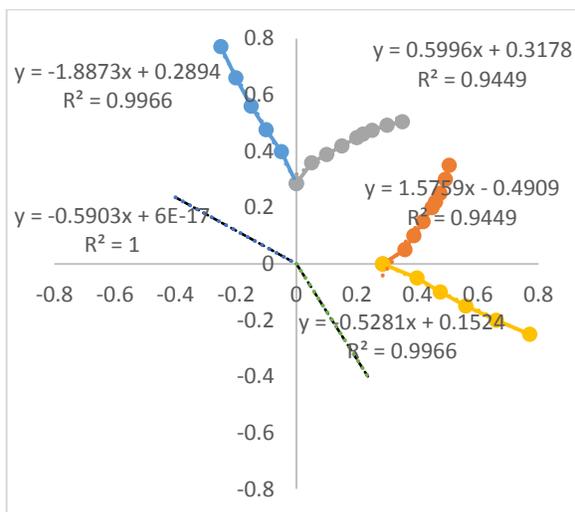
Abajo se muestran las curvas y rectas utilizadas para áreas bajo la curva.



Figuras 70 y 71. Aceros de molino M1 (CR izquierda, GA derecha)



Figuras 72 y 73. Aceros de molino M2 (CR izquierda, GA derecha)



Figuras 74 y 75. Aceros de molino M3 (CR izquierda, GA derecha)

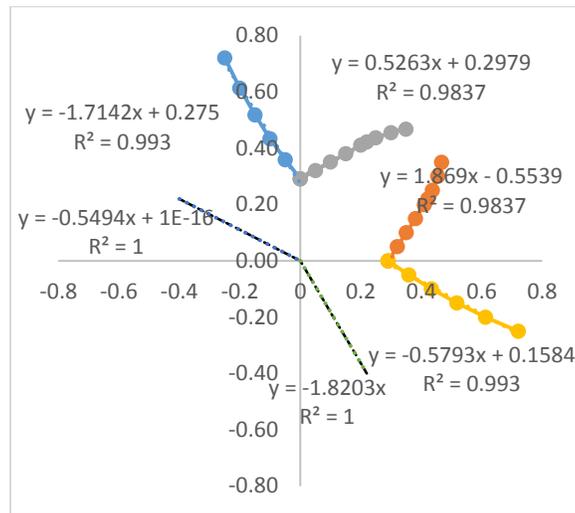
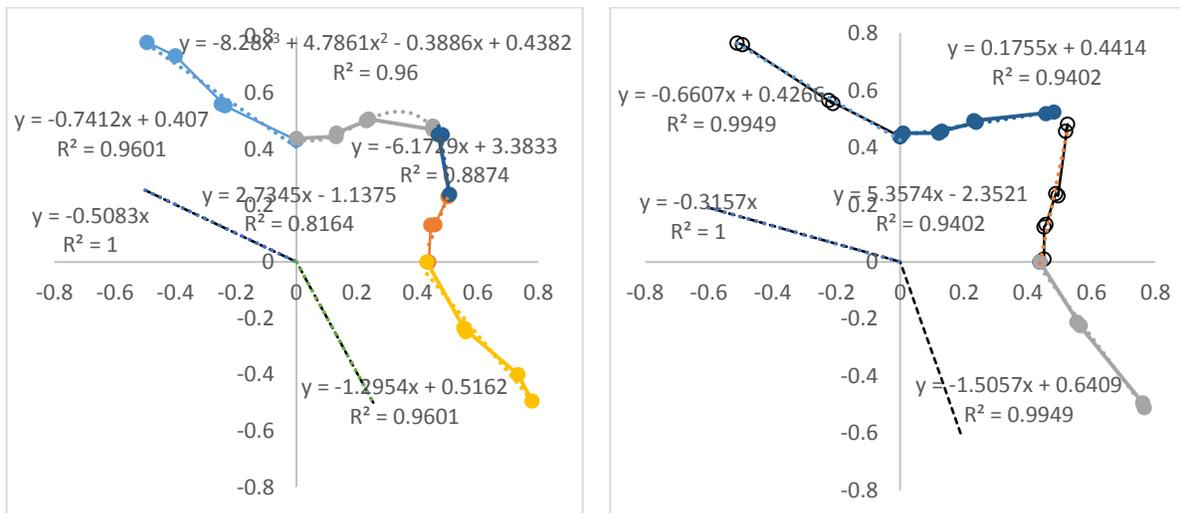


Figura 76. Acero de molino M4 (CR)



Figuras 77 y 78. Aceros de molino M5 (CR izquierda, GA derecha)

Los valores numéricos de las ventanas de formado, obtenidas integrando el área bajo la curva, se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparativo de valores para ventanas de formado de cada acero (M1 – M5)

	M1	M2	M3	M4	M5
CR	0.608	0.537	0.345	0.131	0.289
Galva	0.487	0.617	0.420	-	0.717

Caso II – Ventana de formado semiabierta

La ventana de formado tiene una cúpula abierta del lado derecho del FLD, pero son líneas no paralelas, las cuales de prolongarse eventualmente hacen que la 'cúpula' cierre. De esta manera, el error para el cálculo de área bajo la curva se reduce, aunque es mayor que en el caso I.

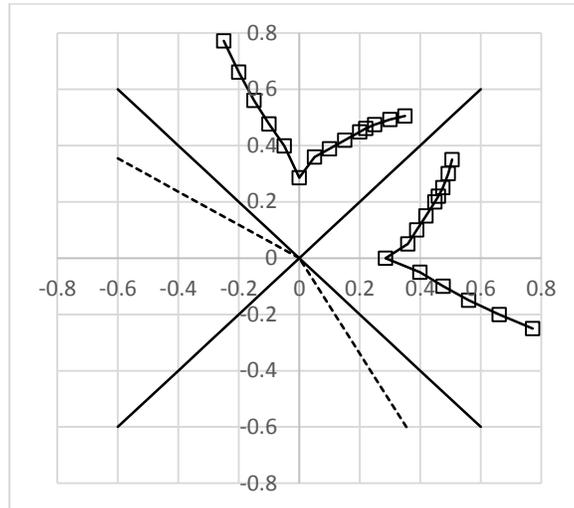


Figura 80. Caso II (CR, M3)

Caso III - Ventana de formado abierta

La ventana de formado tiene una forma irregular, por lo que se requiere introducir una línea adicional para estimar el área bajo la curva total. Este tipo de medición genera el mayor error.

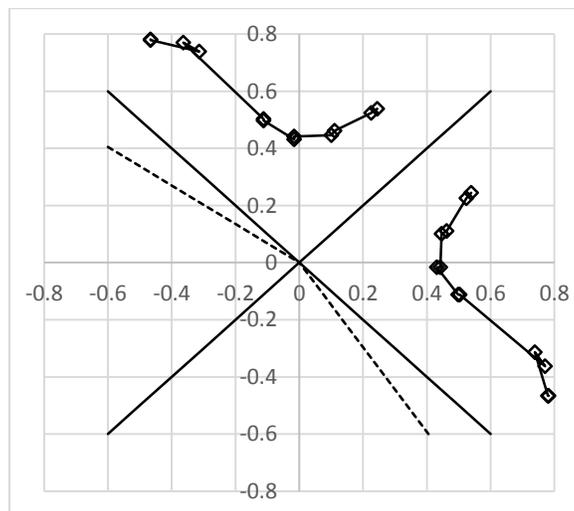


Figura 81. Caso III (CR, M2)

De esta manera, los datos obtenidos en la Tabla 5 se pueden reclasificar como sigue:

Tabla 6. Comparativo de valores para cada ventana de formado y caso (M1 – M5)

	M1		M2		M3		M4		M5	
	V.F.	Caso								
CR	0.608	I	0.537	I	0.345	II	0.131	II	0.289	I
GA	0.487	I	0.617	III	0.420	II	-	-	0.717	I

De esta tabla, se desprende que la formabilidad para cada tipo de acero es, en orden decreciente:

CR: M1 ← M2 ← M3 ← M5 ← M4

GA: M5 ← M2 ← M1 ← M3

En la Tabla 7 se muestra la simbología típica utilizada para definir de manera cualitativa el desempeño de cada acero y la Tabla 8 ordena el valor de ventana de formado con el mismo criterio.

Tabla 7. Simbología para desempeño del acero

Muy bueno	Bueno	Regular	Malo	Muy malo
◎	○	△	×	××

Tabla 8. Comparativo de formabilidad para cada molino de acero

	◎	○	△	×	××
CR	M1	M2	M3	M5	M4
GA	M5	M2	M1	M3	-

Como medida de validación de resultado, se comparó este resultado con el reportado por las plantas de estampado utilizando estos materiales. Esta información se incluye en las Tablas 9 y 10.

Tabla 9. Desempeño para material rolo en frío en distintas plantas.

Tabla 10. Desempeño para material galvanizado en distintas plantas.

NOTA: El dato numérico (confidencial) se relaciona con el valor de % de defectos

Comparando los valores numéricos en la Tabla 6 contra las tablas de desempeño en planta (Tablas 9 y 10), se observa que, para los aceros rolados en frío, el valor obtenido de la ventana de formado corresponde al desempeño observado durante el proceso de estampado en planta.

En el caso del material galvanizado, no se observa una tendencia similar en el desempeño durante estampado. Uno de los posibles factores es el efecto de la capa de Zn (no considerado en este estudio) presente en la superficie, la cual puede actuar como lubricante, modificando la interacción entre el herramental y la superficie metálica.

10. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- El criterio de ventana de formado describe correctamente el comportamiento del acero durante el proceso de estampado para la lámina rolada en frío (CR).
- El comportamiento de la lámina galvanizada no muestra un patrón similar, por lo que, con el tratamiento de datos hecho en este estudio, no se encontró relación directa entre la ventana de formado y el desempeño en estampado.
- En base a las Tablas 8-10, no se encuentra una relación entre la ubicación geográfica de la planta de fabricación del material y el desempeño del acero. Aun cuando el objetivo de este trabajo no es definir esta métrica, un punto a considerar es la pericia del operario del equipo durante el estampado, la velocidad de producción, el tipo de parte y los tipos de estampado presentes en la pieza.
- El uso de distintos equipos por cada proveedor puede ser un factor que afecte el resultado de FLD; aún con una evaluación estandarizada, la diferencia entre operadores, herramientas y metodología es factible que afecte el resultado final.

Recomendaciones

Dado que el comportamiento del acero es dependiente de la velocidad de deformación (situación no considerada dentro del cálculo de ventana de formado), una extensión a este estudio requiere evaluar el comportamiento real del material durante proceso productivo.

Mediante diseño de experimento, se puede plantear una matriz en la que las variables a considerar sean:

- Grado de acero (propiedades mecánicas)
- Gramaje de la capa de galvanizado
- %Al en la capa de galvanizado (proporcional a la dureza y adherencia)
- Tipo de estampado en cada sección de la parte
- Velocidad y tonelaje de la prensa

Para de esta manera generar un estudio similar al mostrado en (23). Desafortunadamente, un estudio de este tipo requiere de un presupuesto muy alto (sobre los \$3 MUSD) y un tiempo de evaluación comparativamente largo (alrededor de 1.5 años), lo cual es poco viable desde el punto de vista del negocio.

11. Bibliografía

1. **Tamarelli, Carrie.** *AHSS 101 - The evolving use of Advanced High Strength Steels for automotive applications.* Southfield, Michigan : Steel Market Development Institute, 2011.
2. **Auto/Steel Partnership.** *High Strength Steel Stamping Manual.* Southfield, Michigan : Auto/Steel Partnership, 2000.
3. **Morello, Lorenzo.** *The Automotive Body, Vol. 1.* s.l. : Springer, 2011.
4. **Hoyle, David.** *Automotive Quality Systems Handbook.* s.l. : Butterworth Heinemann, 2000.
5. **Marciniak, Z.** *Mechanics of sheet metal forming, 2nd edition.* s.l. : Butterworth-Heinemann, 2002.
6. **Tata - Corus.** *The Chemistry of Steel Making.* [Online] Tata. [Cited: January 16, 2016.] <http://resources.schoolscience.co.uk/Corus/14-16/steel/index.html>.
7. **Hosford, William.** *Metal Forming, Metallics and Metallurgy.* Ann Arbor, Michigan : Cambridge University Press, 2011.
8. **Smallman, R.E.** *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering.* s.l. : Butterworth-Heinemann, 1999.
9. **Sarna, Satyendra Kumar.** Ispat Guru. *Ispat Guru.* [Online] [Cited: January 21, 2016.] <http://ispatguru.com/>.
10. **Bringas, John.** *Handbook of comparative steel standards 3rd edition.* s.l. : ASTM DS67B, 2004.
11. *The relationship between tensile properties and hole expansion properties of C-Mn steels.* **Fang, X.** 2003, Journal of Materials Science, pp. 2-3.
12. **Japanese Industrial Standards Committee.** G3141. *Japanese Industrial Standards Committee.* [Online] JISC. [Cited: Enero 5, 2016.] <http://www.jisc.go.jp/eng/index.html>.
13. **Reimpell, Jörsen.** *The Automotive Chassis: Engineering Principles 2nd edition.* s.l. : Butterworth-Heinemann, 2001.
14. **Swift, K.G.** *Process Selection from Design to Manufacture.* s.l. : butterworth-Heinemann, 2003.
15. *Recent AHSS development for automotive applications.* **Matlock, David.** Golden, Colorado : Advanced Steel and Products Research Center, 2012. Workshop: Addressing Key Technology Gaps in Implementing Advanced High-Strength Steels for Automotive Lightweighting. pp. 10-12.
16. **Partech.** *Partech Stamping.* [Online] Partech. [Cited: January 23, 2016.] <http://www.partechfineblanking.com>.
17. *Advanced High-Strength Steel Stamping.* **Hsiung, Gene.** s.l. : Auto Steel Partnership Project LM063, 2012. Auto Steel Partnership Project LM063. pp. 5-8.
18. *A/SP Standarization of the Hole Expansion test.* **Huang, Mai.** s.l. : AutoSTEEL Partnership, 2014. Great Designs in STEEL Seminar. p. 3.
19. **Ashby, Michael.** *Engineering Materials, 2nd edition.* s.l. : Butterworth Heinemann, 1998.
20. *A numerical analysis of sheet metal formability for automotive stamping applications.* **Mehmet, Firat.** 2008, Computational Materials Science, p. 2.

21. *Application of a feasible formability diagram for the effective design in stamping processes of automotive panels.* **Ko, Dae-Cheol.** 2009, Materials and Design.
22. *Numerical determination of forming limiting diagrams.* **Pepelnjak, T.** 2006, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.
23. *How to change the unexpected into the expected with regard to sheet metal forming limits.* **Stoughton, Thomas.** s.l. : Steel Market Development Institute, 2012. STEEL Seminar.
24. **Bord, John.** *Engineering Mathematics.* s.l. : Newnes, 2003.