

01173
3
2y



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

ANALISIS DEL PROCESO DE LAMINACION DE
PRODUCTOS PLANOS Y DETERMINACION DE LAS
PROPIEDADES DE CHAPA COMERCIAL

ARMANDO ORTIZ PRADO

T E S I S

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
(MECANICA)

TESIS CON
FALLA FE OR:GEN

Ciudad Universitaria

Marzo de 1991



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.

I N D I C E

	PAGINA
1. INTRODUCCION	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Situación de la Industria Siderúrgica	1
1.3. Razón del trabajo	3
1.4. Desarrollo experimental	7
2. METODOS DE PRODUCCION DE LA CHAPA DE ACERO PARA EMBUTIDO PROFUNDO	8
2.1. Antecedentes	8
2.2. Producción moderna de chapa para embutido profundo.	9
3. METODOS DE ESTUDIO DE CHAPA DELGADA DE ACERO PARA EMBUTIDO PROFUNDO.	27
3.1. Introducción	27
3.2. Caracterización de la chapa para embutido	29
3.2.1. Ensayos empleados para determinar el comportamiento del material durante el embutido.	29
3.2.2. Rugosidad	36
3.2.3. Dimensiones	37
3.2.4. Composición y microestructura.	37
4. EXPERIMENTACION	39
4.1. Introducción	39
4.2. Análisis Químico	39
4.3. Ensayo de tracción	39
4.4. Índice de embutido	42
4.5. Diagrama de límite de formado	42
4.6. Determinación de la rugosidad	45
4.7. Determinación del espesor de la chapa	45
4.8. Estudio metalográfico del material	51

5.	CONCLUSIONES	52
5.1.	Ensayos dimensionales	52
5.1.1.	Espesor	52
5.1.2.	Rugosidad	52
5.2.	Metalografía	53
5.3.	Pruebas mecánicas	53
5.3.1.	Ensayos de tracción	53
5.3.2.	Indice de embutido Erichsen	55
5.4.	Corolario	55
	REFERENCIAS	58

I N T R O D U C C I O N

1.1. Generalidades:

Para muchos podría parecer que la lámina de acero es un material barato y sencillo de producir, de modo que no hay necesidad de llevar a cabo alguna investigación al respecto, esto es una verdad a medias ya que industrias como la automotriz o aquellas donde se requiere alta capacidad de embutido demandan un nuevo material, dando como resultado que la chapa delgada de acero de principios de la presente década sea un producto de alta tecnología. Algunos la llaman incluso un nuevo material (1).

Pero lo que hace importante a éste material es:

- a) La chapa delgada de acero es un material de gran consumo, en primer lugar para la industria automotriz, la cual determina los mayores requerimientos que se imponen a la chapa, por ejemplo en lo que se refiere a la deformabilidad.
- b) La chapa de acero se considera un material de alto nivel tecnológico. En numerosos laboratorios industriales y/o universitarios se lleva a cabo investigación científica, de modo que hay una gran cantidad de información disponible en la literatura, además de que diversos investigadores profundizan en el estudio teórico de los mecanismos de la recristalización, del desarrollo de texturas, del comportamiento mecánico, etc...
- c) El costo de la chapa de acero para embutido profundo se ha incrementado a nivel mundial permitiendo a las plantas productoras invertir en la investigación necesaria para mejorar la calidad de estos productos.

1.2. Situación de la Industria Siderúrgica:

La industria siderúrgica mundial sufrió un fuerte colapso en el periodo comprendido entre finales de la década de los 70's y el primer lustro de los 80's. como resultado de la crisis petrolera y la recesión. Esto motivo una reducción de los pedidos y por ende de los precios en el mercado internacional, que aunado a la fuerte competencia de los productores asiáticos (Japón) desencadenó un cambio de mentalidad y en las estructuras de fabricación de las empresas Europeas y Americanas.

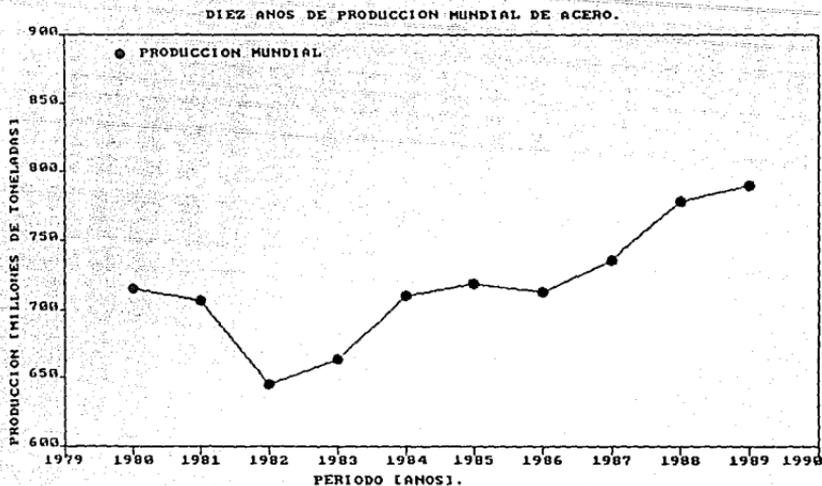


Figura 1.1
 Fluctuación de la producción mundial de
 acero en el periodo 1980-1982.
 (Datos tomados de ref. 2)

En los últimos cinco años (Fig. 1.1) los problemas han disminuido incrementándose la producción a la de finales de los 70's.

Por su parte la industria mexicana (Fig. 1.2) se vio envuelta desde 1982, en una doble crisis; la internacional, mencionada en líneas anteriores y la nacional, esto provocó una fuerte disminución de la demanda y por ende el cierre de plantas (Fundidora de Monterey, S.A.), así como retraso en proyectos (SICARTSA II) además de la necesidad de encontrar mercados en el exterior para los productos fabricados.

DIEZ AÑOS DE PRODUCCION NACIONAL DE ACERO.

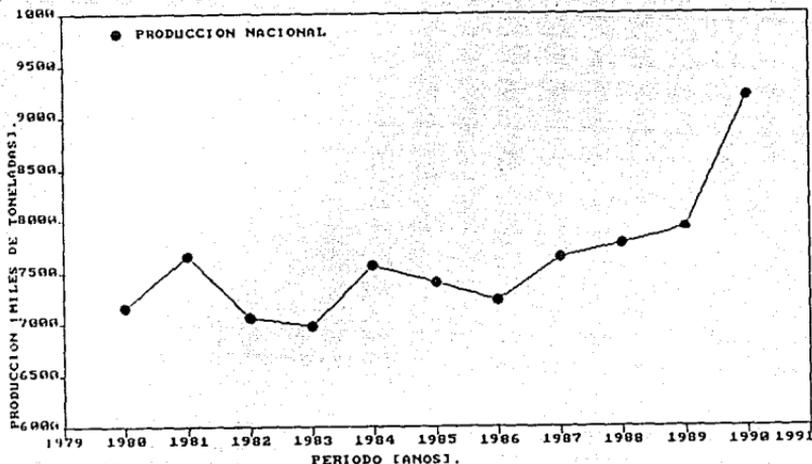


Figura 1.2
Producción nacional de acero 1980-1990
(Datos tomados de la ref. 2)

En general durante dicho periodo y hasta la fecha los precios de los perfiles (barra de refuerzo para concreto, viguetas, ángulo) han permanecido bajos, fundamentalmente por la competencia de plantas semintegradas. En cuanto a los productos planos éstos han incrementado su costo, sobre todo en lo que se refiere a la chapa para embutido profundo por la tecnología que llevan inmersa, y también por la calidad y propiedades demandadas, justificando así las inversiones necesarias para producirla.

1.3. Razón del trabajo

Es perfectamente demostrable que un país requiere básicamente de barras y perfiles para llevar a efecto su industrialización, y una vez alcanzado un grado adecuado de ésta, la proporción de consumo de productos planos debe ser dominante (Fig. 1.3), la lámina se empleará para; carrocerías de automóviles, elementos para envase y embalaje, aparatos domésticos, mobiliario para oficinas, señalización, entre otros usos.

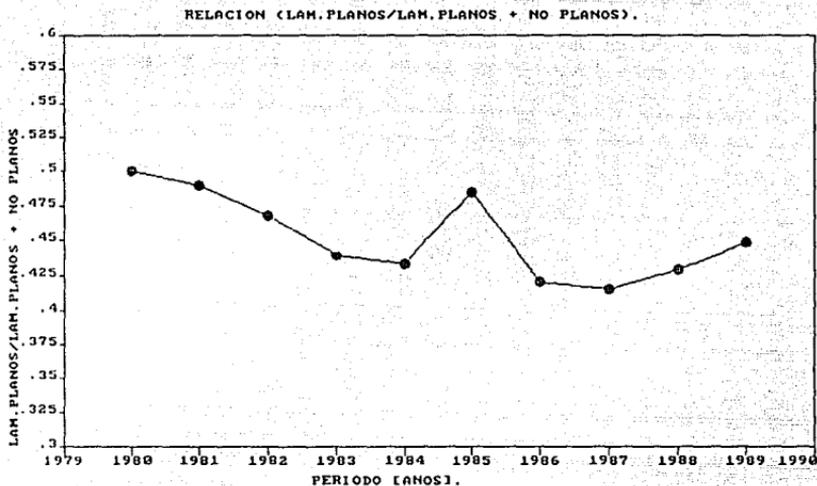


Figura 1.3
(Datos tomados de la ref. 2)

¿Cuál es el problema de México con respecto a éste producto? la producción de chapa de acero en el país representa alrededor del 50% del volumen total de acero producido, pero el total de lámina de alta embutición como la requerida por la industria automotriz se tiene que importar (figura 1.4), debido al bajo desarrollo tecnológico de la industria del área, con las consiguientes desventajas que acarrea.

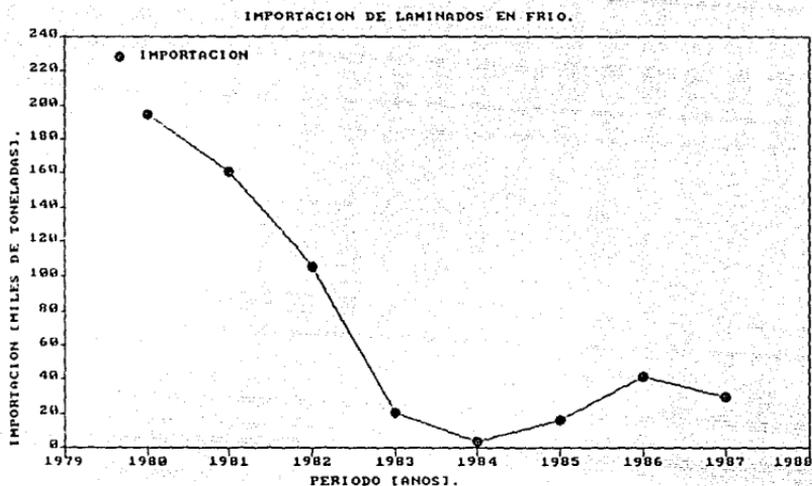


Figura 1.4
(Datos tomados de la ref. 3)

Es por tanto necesario incrementar la producción y la calidad de la chapa de acero, para esto es conveniente hacer una revisión sobre los métodos empleados en el país y la calidad del producto obtenido, comparando esto con lo que respecta a países desarrollados, en este caso la contraparte es la Siderúrgica Marítima -SIDMAR- compañía instalada cerca de la ciudad de Gante en Bélgica y dedicada exclusivamente a la fabricación de productos planos.

PRODUCCION NACIONAL DE LAMINADOS PLANOS.

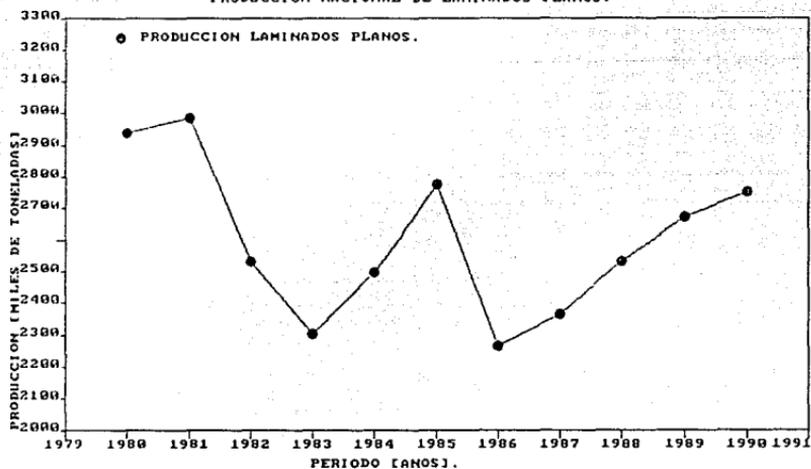


Figura 1.5
(Datos tomados de la ref. 3)

CONSUMO NACIONAL DE LAMINADOS PLANOS.

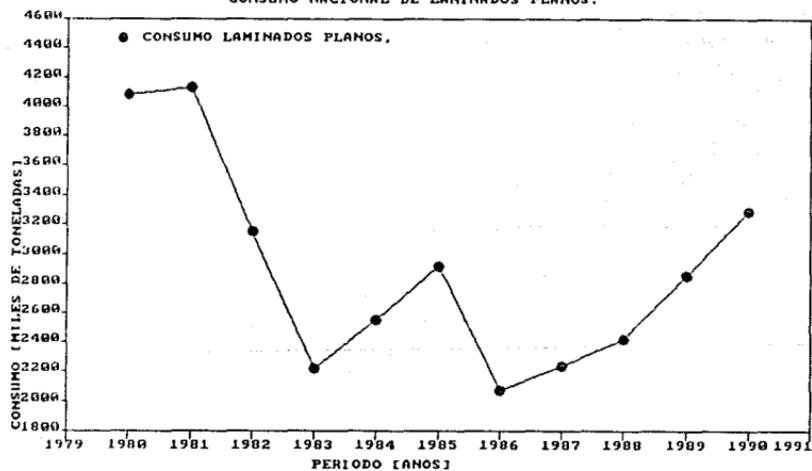


Figura 1.6
(Datos tomados de la ref. 3)

1.4. Desarrollo experimental:

El motivo del trabajo es presentar los procesos de fabricación de tal forma que sea posible la comparación de los métodos de producción de las empresas altamente tecnificadas con los empleados en nuestro país, a la vez de evaluar la calidad de los productos obtenidos, es por esto que la parte experimental corresponde a la evaluación de las propiedades mecánicas de la chapa, desgraciadamente no se pudo contar con muestras del material producido por SIDMAR o alguna empresa similar, haciendo entonces el estudio comparativo considerando únicamente datos reportados en la bibliografía.

2. METODOS DE PRODUCCION DE LA CHAPA DE ACERO PARA EMBUTIDO PROFUNDO.

2.1. Antecedentes:

Los métodos de producción de la chapa de acero para uso automotriz y en general para embutido profundo han sufrido grandes modificaciones en todas las etapas del proceso, esto motivado por la necesidad de la industria de mejores materiales a un menor costo. La calidad demandada no solo se refiere a mejores propiedades mecánicas y a un control más cerrado de estas, sino también a sus acabados y tolerancias dimensionales, esto ha dado lugar al desarrollo de un nuevo material, que es la lámina de acero de principios de la década de los noventa.

La crisis sufrida por la industria siderúrgica al inicio de la pasada década representó para los productores el reto de ofrecer una mayor calidad a un menor costo, esto motivado en mucho por las necesidades de la industria automotriz de un material más resistente y dúctil, que permita entonces su estampado, para dar lugar a las complejas partes requeridas para la carrocería de los automóviles modernos.

La mayor resistencia del material permite el empleo de láminas más delgadas conservando y aún incrementando las condiciones de seguridad de los ocupantes, todo esto acompañado de una disminución del peso del vehículo y por ende del consumo de combustible.

El material utilizado por la industria automotriz durante largo tiempo para la producción de las carrocerías fue del tipo AISI 1006 efervescente, bloqueado ya sea mecánica o químicamente. Con la aparición y desarrollo de la colada continua, tuvieron que emplearse aceros calmados, primordialmente desoxidados con aluminio.

Entre otros problemas se hizo necesario un control más preciso en el grado de oxidación del hierro en el convertidor ya que al desoxidar con aluminio esto se traduce en un incremento de las inclusiones, menoscabando la capacidad de embutido del material. Para auxiliar en la limpieza, así como también para lograr una mayor homogeneidad es usual la inyección de argón.

En general es común en México el control del material básicamente a través de su composición. El resultado es un acero, que aunque está de acuerdo a las especificaciones de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) no es empleado por las empresas establecidas en el país, la pregunta es ¿porqué? la respuesta es que el material está 10 ó 15 años atrasado tecnológicamente con respecto al producido para el mismo fin en EUA, Europa o Japón. A la fecha las condiciones económicas que se prevén, generadas por una zona de libre comercio, EUA-

Canadá-México hacen necesario que la industria siderúrgica nacional modifique sus procesos, ya no para que puedan surtir éste producto a las armadoras instaladas en el país, sino simplemente para sobrevivir.

Hay que considerar también que los productos planos tienen un mayor precio que los perfiles tales como la varilla de refuerzo para construcción, ángulos, rieles para ferrocarril, viguetas, etc., debido sobre todo a la fuerte competencia de plantas no integradas.

2.2 Producción moderna de chapa para embutido profundo.

La fabricación de la lámina de acero para embutido profundo (diagramas 2.1 y 2.2) presenta peculiaridades que abarcan desde que el acero se encuentra en el convertidor hasta el enrollado, dichas diferencias involucran tanto el control del proceso como el propio equipo utilizado, a manera de ejemplo se describirá lo hecho por la planta SIDMAR (1).

Las modificaciones al proceso se tienen ya en el BOF, donde se inyectan gases inertes (nitrógeno o argón) por unas pequeñas toberas que se encuentran en el fondo del convertidor ayudando así a la limpieza del material.

Colada:

Una vez lograda la composición deseada del acero, se procede a la colada. Sidmar (Ref.1) dispone de dos métodos distintos: la colada en lingoteras y la colada continua.

El método convencional es la colada en lingoteras, en éste se vacía la cuchara por el fondo a las lingoteras (Fig. 2.1). En función del grado de desoxidación del acero hay diferentes fenómenos durante la solidificación: el acero puede ser del tipo calmado, semicalmado o efervescente. Esta diferencia es de suma importancia para la calidad y el comportamiento mecánico del mismo.

La principal ventaja que se obtiene de la inyección de gases inertes es la reducción del contenido de oxígeno en el acero. De esta manera es posible disminuirlo de 700 ppm usual a unas 400 ppm. Menos oxígeno en el acero líquido lleva a menos óxidos en el acero sólido. Esto es especialmente importante para los aceros producidos en colada continua, ya que tienen que ser aceros calmados. Además, la agitación del acero líquido mejora la homogeneidad del producto.

La inyección de gas inerte también permite una reducción del contenido de carbono, por ejemplo hasta 0.020%, con el mismo grado de oxidación de un acero al 0.040% sin inyección por el fondo. Los bajos contenidos en carbono son interesantes para la producción de aceros de alta deformabilidad.

DIAGRAMA DE FABRICACION DE LA CHAPA DE ACERO. LAMINACION EN CALIENTE

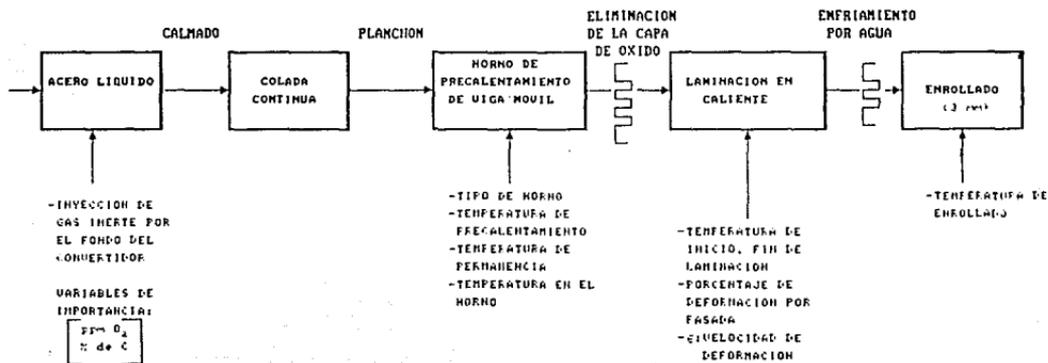


DIAGRAMA 2.1

DIAGRAMA DE FABRICACION DE LA CHAPA DE ACERO. LAMINACION EN FRIO

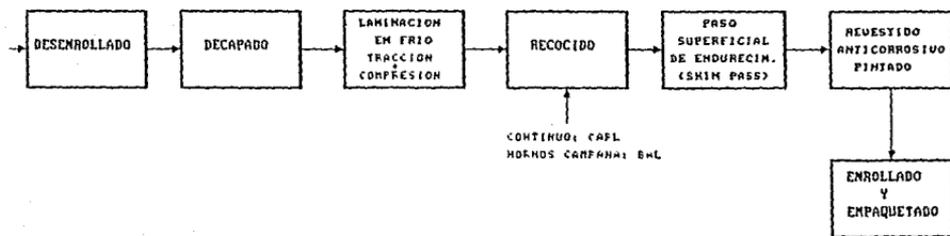


DIAGRAMA 2.2

La selección del tipo de gas a inyectar y la duración del tratamiento son parámetros de gran importancia en la producción.

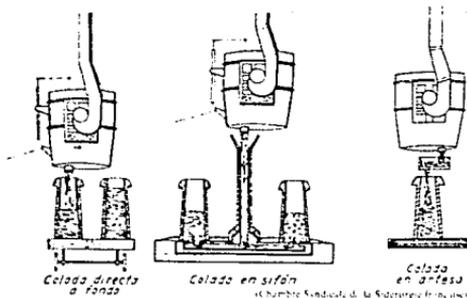


Figura 2.1
Colado en Lingoteras
(Ref. 4)

Una vez encajada la composición, la desoxidación final se hace con alambre de aluminio (esto ya en la olla).

La diferencia entre el acero calmado y el acero efervescente reside en el grado de desoxidación; el acero líquido de alto contenido en oxígeno tiene una solidificación efervescente debido a la reacción de este elemento con el carbono del acero, formándose burbujas de monóxido de carbono que hacen "hervir" al metal líquido.

El acero calmado tiene un grado de desoxidación (generalmente con aluminio) bastante avanzado, de modo que la solidificación ocurre sin producción de monóxido de carbono. El acero calmado tiene mayor cantidad de impurezas, principalmente óxidos. Para la colada en lingoteras, se prefiere el acero efervescente,

mucho más puro, pero para la colada continua, el acero tiene que ser calmado. Para lograr la misma pureza de acero, hay entonces que eliminar el oxígeno por lavado con un gas inerte como fue ya mencionado.

Colada continua:

En el proceso de colada continua (Fig. 2.2) se producen directamente los planchones, en este caso se transporta la cuchara con unas 250 a 300 toneladas de acero líquido hasta la torre giratoria en la cual se pone en posición de colada. Se vierte el acero en un distribuidor que puede contener unas 56 toneladas de metal líquido y de ahí pasa a la lingotera. Debido a la capacidad del distribuidor, es posible cambiar la cuchara vacía por una llena sin interrumpir el proceso de colada.

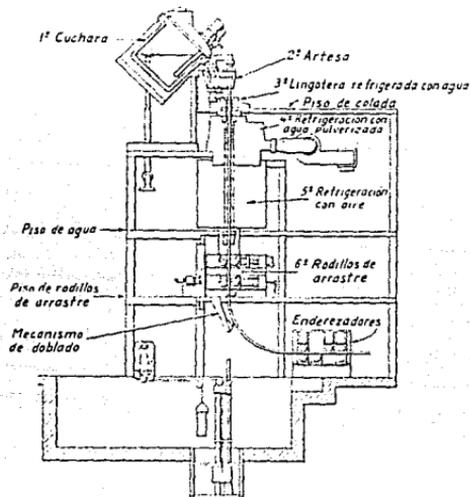


Figura 2.2
Descripción esquemática del proceso de colada continua
(Ref. 4)

En la lingotera se produce la solidificación de una cáscara del material, terminando esta mediante la acción de los aspersores de agua de la zona de enfriamiento secundario.

Evidentemente la colada continua tiene grandes ventajas en lo que se refiere a economía y productividad, pero al utilizar acero calmado requiere de un mayor conocimiento y control del proceso. Sus ventajas radican principalmente en el carácter continuo del proceso así como en la eliminación de la caja de desbaste de laminado en caliente.

Pre calentamiento:

Para calentar los planchones que se van a laminar en caliente, se dispone de tres hornos empujadores convencionales (Fig. 2.3) y de hornos de viga móvil (Fig. 2.4). La función de éstos es el calentamiento desde temperatura ambiente hasta la temperatura de laminación (aproximadamente 1200°C). Esta temperatura es un parámetro muy importante en el proceso de fabricación, porque determina el grado de disolución de los nitruros de aluminio, presentes en el acero, y al mismo tiempo el contenido de nitrógeno disuelto.

Los hornos de viga móvil garantizan mayor homogeneidad en la temperatura del planchón así como una mejor calidad superficial. De hecho las guías enfriadas por agua sobre los cuales deslizan los planchones en los hornos empujadores causan un enfriamiento local y un cierto deterioro a la superficie, afectando la calidad de la chapa producida. En el horno de viga móvil, los planchones se levantan de una posición a la siguiente (Fig. 2.4) evitando dichos inconvenientes.

Laminación en Caliente.

Al salir de los hornos empujadores, los planchones tienen una cascarilla de óxido que se elimina por medio de un chorro de agua de alta presión (140 bar). A continuación pasan por el tren de desbaste, constituido por cajas de tipo cuarto reversible, dicho tren consta de 4 cajas, en donde se reduce el espesor del planchón de 20 cm. a unos 3 cm. en la placa por medio de 5 a 7 pasos de laminación.

Las placas se dirigen inmediatamente hacia el tren de acabado compuesto de seis cajas donde, después de despuntarlas y de eliminar la capa de óxido, la chapa se reduce hasta un espesor final de 1.5 hasta 12.7 mm, según la aplicación.

La importancia del proceso de laminación es evidente para la obtención de las propiedades mecánicas del material. Los parámetros que tienen mayor efecto en la laminación en caliente son: la temperatura de pre calentamiento en el horno empujador, las temperaturas de inicio y sobre todo de fin de laminación (fin de laminación en zona γ o en zona $\alpha+\gamma$), el grado de deformación de cada paso, la velocidad de deformación y las cargas aplicadas. Normalmente se mide la temperatura después de cada paso por medio de pirómetros infra-rojos. Estas señales son digitalizadas y comparadas por la computadora central para hacer los ajustes necesarios.

Al salir de la última caja de laminación la chapa tiene la temperatura de "fin de laminación". La operación siguiente es normalmente el enrollado de la chapa caliente en rollos de un peso aproximado al del planchón original. Sin embargo, debido



Figura 2.3
Horno empujador para precalentamiento.
(Ref.5)

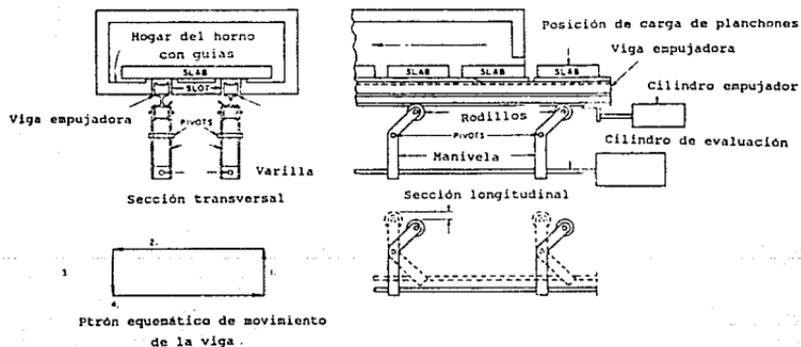


Figura 2.4
Horno de viga móvil para precalentamiento.
(Ref.5)

a las dimensiones (por ejemplo 1.5 m diám. x 1 m. de ancho) y masa del rollo, su enfriamiento al aire es muy lento, lo que favorece entonces la formación de precipitados de aluminio, disminuyendo así la ductilidad y por consecuencia la capacidad de embutido de la chapa. En el caso de que el recocido posterior a la laminación en frío se efectúe en hornos de tipo continuo este fenómeno puede ser eliminado por la acción de un enfriamiento rápido después del recocido. Para la chapa que será tratada en los hornos de campana hay que evitar esta precipitación, ya que el ciclo térmico del horno no favorece la disolución, de modo que es preciso enfriar el acero antes de enrollarlo. Por tanto otro de los parámetros de importancia en el proceso es la "temperatura de enrollado".

Antes de ser laminda en frío, se manda la chapa a la instalación de decapado continuo, la cual trabaja con una solución de ácido clorhídrico a 85°C. Se lava, se seca y se enrolla de nuevo, después de haber sido recubierto de una capa de aceite delgada.

La deformación en frío se realiza normalmente en cajas cuarto, aunque se han efectuado desarrollos para obtener mejores controles sobre el espesor y la calidad en general del material. Para esto se han desarrollado cajas de 5 rodillos (laminador quinto), 6 rodillos y actualizaciones de arreglos en racimo, en Z o Sendzimir (Fig. 2.5.a,b,c). En particular Sidmar dispone de 2 trenes equipados con cajas cuarto, en donde se reduce el espesor entre 0.2 a 3 mm.

En general durante esta etapa de la laminación se aplica además de la carga de compresión una de tracción por medio de una diferencia de velocidad entre las cajas consecutivas. La proporción entre compresión y tracción es también importante para el comportamiento del acero.

Después de la laminación en frío, la chapa presenta una dureza y resistencia mecánica muy alta, pero muy poca ductilidad. Es preciso llevar a cabo un proceso de recocido durante el cual se recristaliza el acero para lograr la deformabilidad necesaria para la mayoría de las aplicaciones industriales. Esto se puede efectuar mediante dos procedimientos diferentes para este fin: el recocido en lotes que se efectúa en hornos de tipo campana y el recocido continuo (Fig. 2.6 a,b). Se habla entonces de los procesos BAF (batch annealing furnace) y CAPL (continuous annealing and processing line).

En el proceso BAF, se colocan 3 ó 4 rollos en una horno de campana (Fig. 2.7) que se calienta hasta la temperatura de recocido. Pasado el tiempo de tratamiento, se deja enfriar la campana. El proceso es muy simple y las inversiones son modestas, pero es un proceso muy lento y la chapa no experimenta el mismo ciclo térmico (Fig. 2.8) en la zona externa e interna, lo cual evidentemente afecta sus propiedades y calidad.

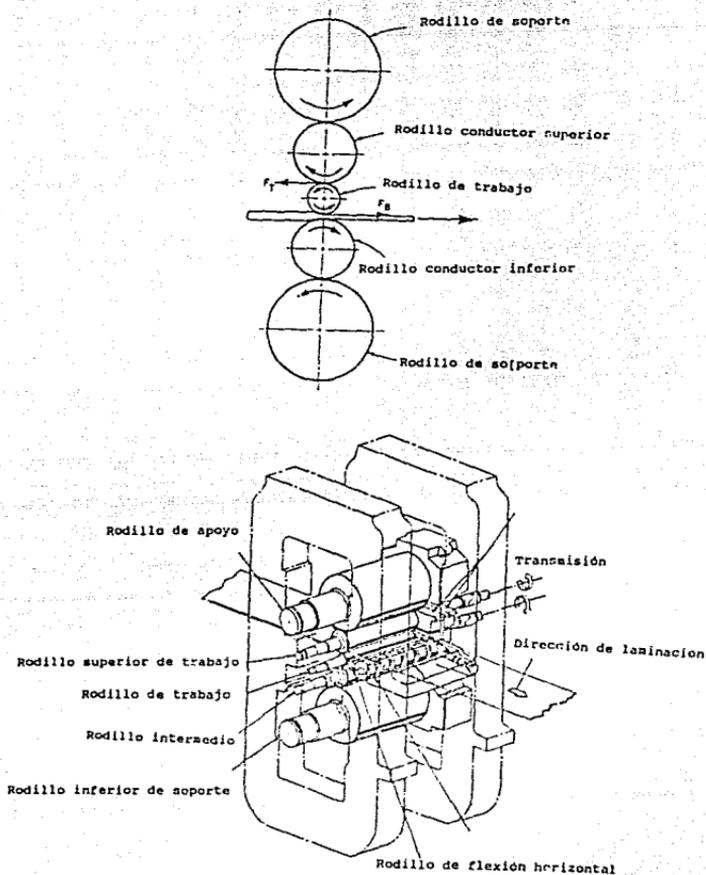


Figura 2.5 a.

Configuración básica de un arreglo quinto o Taylor,
 construcción del mismo arreglo
 (Ref. 5)

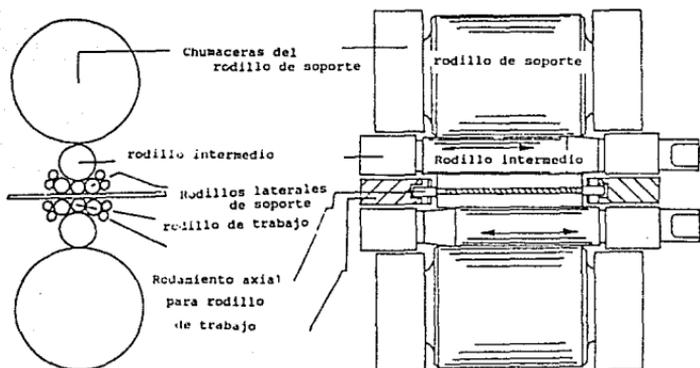
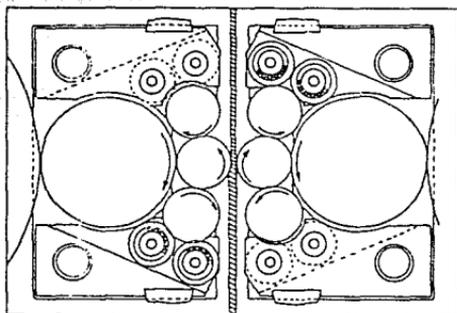


Figura 2.5b.

Arreglo en "Z", diferentes aspectos
(Ref. 5)

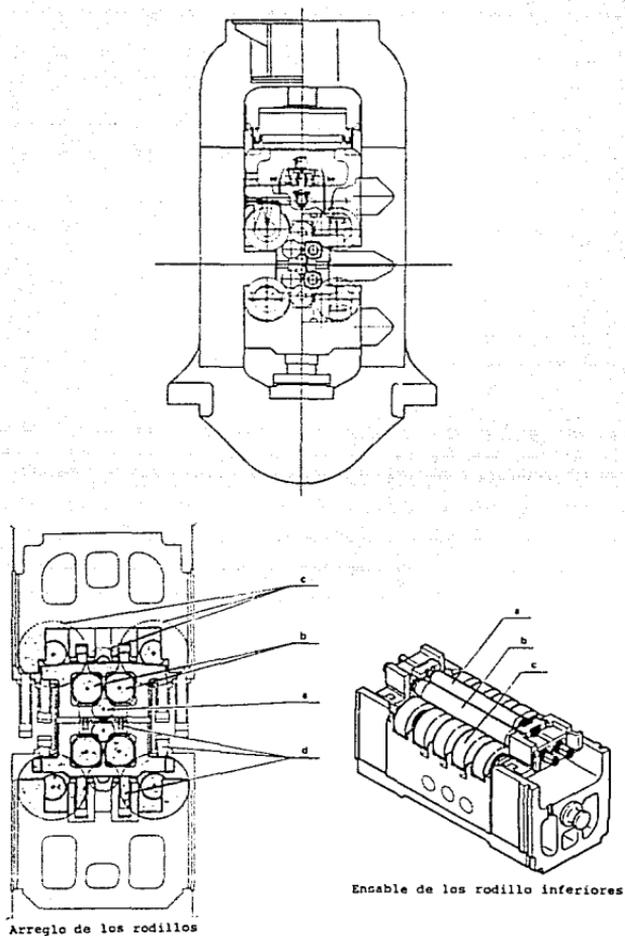


Figura 2.5c

Diferentes aspectos del arreglo en racimos
 desarrollados por Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
 (Ref. 5)

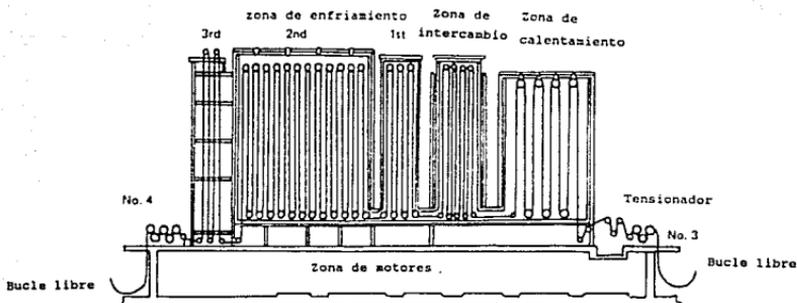


Figura 2.6a
Horno de recocido de tipo continuo
(Ref. 5)

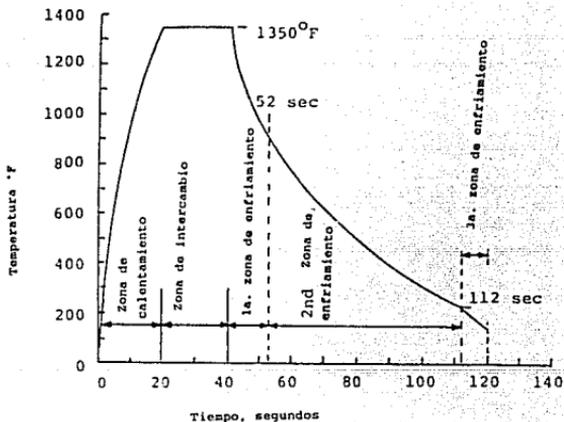


Figura 2.6b
Ciclo térmico de la chapa con un horno de recocido continuo.
(Ref. 5)

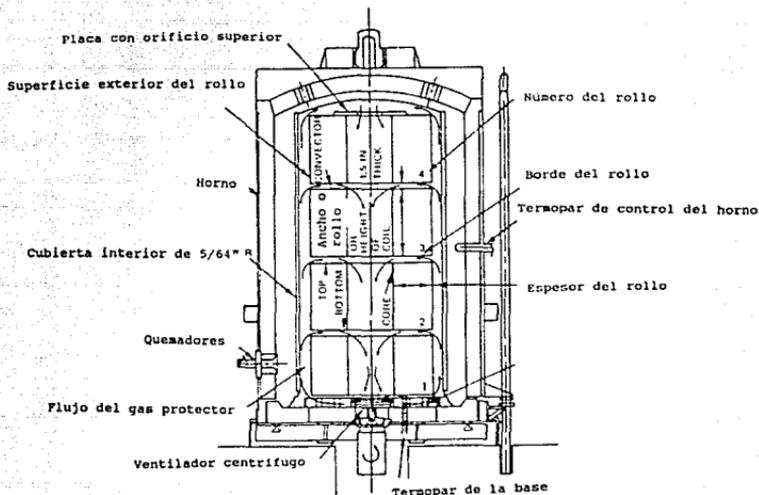


Figura 2.7
Horno para recocido en lotes (tipo campana)
(Ref. 5)

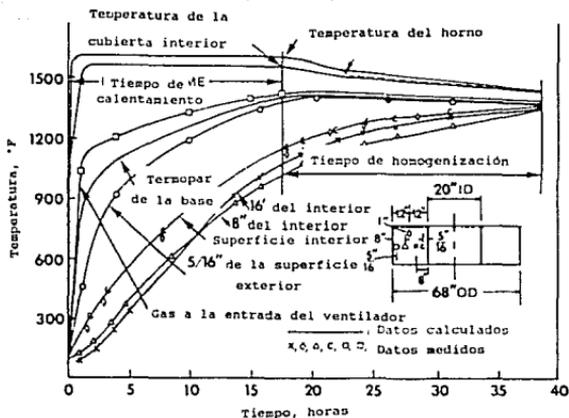


Figura 2.8
Ciclo térmico para el recocido de rollos en horno de campana.
(Ref. 5)

En el método CAPL, la chapa de acero se procesa de manera continua a través de un horno muy grande (Fig. 2.6a), con diferentes zonas de calentamiento y de enfriamiento. El ciclo térmico respectivo se muestra en la Fig. 2.6b.

Es evidente que el tratamiento térmico que la chapa experimenta en los dos tipos de horno es muy diferente y por tanto las propiedades mecánicas obtenidas así como la homogeneidad de éstas.

Al salir del horno de recocido continuo, a la chapa se le da una ligera reducción en una última etapa de laminación (paso de acabado o calibración), proporcionándole planeidad, rugosidad controlada y eliminando a la vez la aparición de las líneas de Hartmann, (deformación no homogénea), que provocan inconvenientes durante el embutido.

La rugosidad que se ha generado durante esta leve deformación es muy importante para la deformabilidad del acero, ya que juega un papel primordial para la lubricación. Durante el

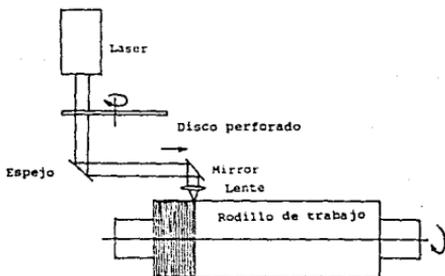


Figura 2.9

Generación del acabado superficial de un rodillo de trabajo, mediante un haz de Laser (Ref. 5)

embutido, el aceite de lubricación tiene que encontrarse entre la matriz y el acero. Sería muy difícil mantener aceite sobre una superficie perfectamente lisa, de modo que una

cierta rugosidad es necesaria. Sin embargo, un alto grado de rugosidad podría ser desfavorable para el proceso y en el acabado de las piezas embutidas.

El proceso convencional para dar la rugosidad a la chapa, es tratar la superficie de los cilindros de la caja de acabado por chorreado con granalla. Sin embargo, la rugosidad obtenida es poco reproducible y difícilmente descriptible. Sidmar desarrolló un sistema revolucionario basado en el uso de un rayo laser (Fig. 2.9) para generar una rugosidad muy reproducible sobre los cilindros de laminación.

Después del paso de acabado el acero puede enrollarse para su expedición. Sin embargo, algunas variedades de acero se recubren con productos anticorrosivos mediante tratamientos de electrodeposición, fosfatado o pinturas, terminando entonces con éste el ciclo de producción de la chapa.

Métodos Empleados en México.

La chapa de acero es producida en México por dos compañías Hylsa y Altos Hornos de México, S.A. esta última ofrece la chapa en 3 categorías; Calidad Comercial, Calidad Troquelado Profundo y Calidad Embutido profundo, en esta última clase la compañía ofrece un acero calinado con la siguiente composición: (Datos tomados de información comercial)

Carbono	-	0.04 a 0.06%
Manganeso	-	0.20 a 0.30%
Fósforo	-	0.02% máximo
Silicio	-	0.015% máximo
Cobre	-	0.15% máximo
Aluminio	-	0.2 a 0.45%

Dicho acero de colada continua, aún cuando presenta restricciones en cuanto a composición deja mucho que desear tanto en comportamiento mecánico como en el control de su espesor y rugosidad, todo esto debido a los procesos de fabricación seguidos así como a la falta de adecuados sistemas de garantía de calidad. El método de fabricación se muestra en la (Fig. 2.10) de la cual se puede observar que el

PROCESO DE FABRICACION DE AHMSA
PARA CHAPA DE ACERO

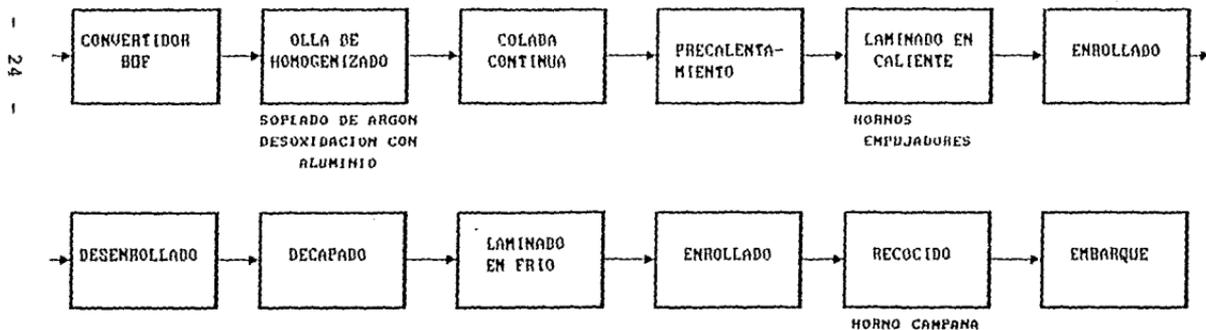


FIGURA 2.10

PROCESO DE FABRICACION SICARTSA II PARA PLACA DE ACERO

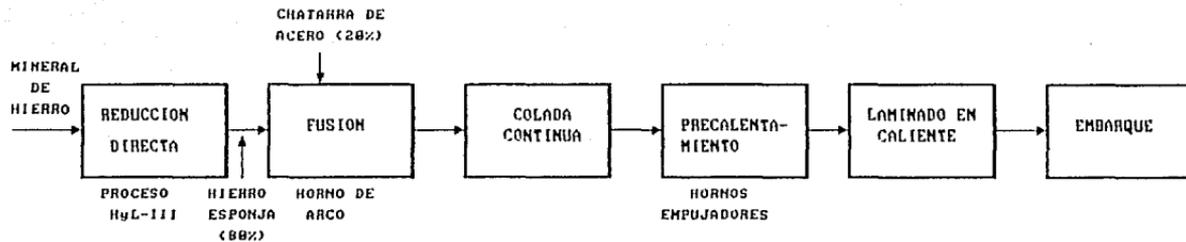


FIGURA 2.11

precalentamiento se efectúa en hornos empujadores, con la consiguiente heterogeneidad que esto acarrea al material y el recocido se produce en hornos campana, lo que aunado a un mayor contenido de inclusiones, da como resultado un acero con propiedades mecánicas deficientes a la vez de heterogéneas, que no puede ser utilizada por la industria automotriz entre otras. La segunda etapa de SICARTSA (Fig. 2.11) se avocará a la producción de placa de 6 a 75 mm con anchos hasta de 4.1 m, ya que sólo cuenta con instalaciones para laminado en caliente, enfocando su producción a la fabricación de tubo con costura, barcos y estructuras pesadas en general.

3. METODOS DE ESTUDIO DE CHAPA DELGADA DE ACERO PARA EMBUTIDO PROFUNDA.

3.1 Introducción.

La chapa de acero se forma mediante métodos diversos dependiendo de la geometría, tamaño, número de piezas a fabricar y características del propio material. En general alcanza su forma final mediante procedimientos de:

- a. Corte
- b. Dobleza
- c. Embutido

En el caso de corte se tienen todas las operaciones de troquelado cizallado y punzonado, tales como lanceteado (punzonado parcial de un agujero), cercenado (marcado para corte posterior), ranurado y desbarbado entre otras operaciones.

Los métodos de formado que involucran dobleza son por ejemplo el rolado, formado de perfiles, formado con rodillos, engargolado y rechazado entre los más comunes.

El embutido por su parte se define como la operación mecánica en la cual una chapa metálica se transforma en un cuerpo hueco por la acción ejercida por un punzón y la matriz (figura 3.1), normalmente éste cambio de forma se efectúa sin variación en el espesor del material. De acuerdo a la relación del diámetro inicial del material al diámetro del producto, puede ser necesario realizar el proceso en varias etapas, denominándose entonces como embutido profundo.

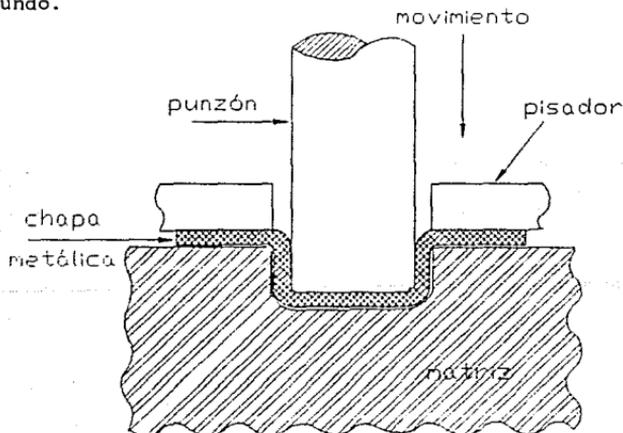


Figura 3.1 Operación de embutido

En el embutido la deformación se efectúa por la acción de esfuerzos de tracción en el plano de la hoja, razón por la cual las propiedades de un material para ser sometido a éste método de conformado estarán determinadas por su ductilidad.

Durante el proceso se llegan a presentar inconvenientes que provocan el rechazo de la pieza, entre los defectos más usuales se tienen:

a). Fractura de la pieza

Se debe generalmente a una baja calidad del material (ductilidad muy limitada), holgura entre punzón y matriz más pequeña de lo recomendada (holgura = 1.2 espesor), presión del planchador mayor de lo recomendada (produce estirado del material), radios del punzón o de la matriz muy pequeños (menores al espesor del material). Por último éste problema se puede deber a una insuficiente lubricación de las herramientas, lo que conlleva al estirado y por ende fractura del material.

b). Presencia de bordes irregulares (orejas)

Se producen por una mal ajuste de las herramientas (punzón fuera de centro), por desbalanceo de la presión ejercida por el pisador, holgura menor de lo recomendada, así como por anisotropía del material.

c). Adelgazamiento severo en la pared del recipiente

Este problema se debe a que el índice de Langford o de anisotropía planar del material (veáse ecuación 3.3), es muy bajo (del orden de la unidad).

d). Superficie rugosa (aspecto de cascara de naranja)

Este defecto de la pieza embutida se presenta cuando el tamaño de grano del material es mayor de lo recomendado (0.1 mm diámetro promedio).

De lo expuesto en líneas anteriores se tiene que las fallas o problemas que pudieran surgir en un proceso de embutido se deben a dos causas básicas:

1. Material con propiedades inadecuadas o fuera de dimensiones
2. Diseño del herramental; holgura punzón-matriz pequeña o desigual, radios de punzón o de embocadura demasiado pequeños y reducción en la etapa demasiado severa.

En virtud de que los objetivos del presente trabajo están enfocados a estudiar la calidad del material no será discutida entonces la problemática del diseño del troquel para embutir.

3.2 Caracterización de la chapa para embutido.

La evaluación de la calidad del material se puede analizar desde dos diferentes ópticas; ésto por una parte permite determinar la posibilidad de que el material pueda ser empleado para los fines que se demandan, por ejemplo producir una lata o alguna parte de la carrocería de un automóvil, mientras que por otro lado es necesario relacionar sus propiedades con las características del proceso de producción seguido, de tal forma que se fijen los parámetros óptimos de fabricación, como son; las condiciones de prealentamiento, reducciones por etapa, temperaturas de enrollado, ciclos de recocido, reducción en el paso después del recocido, así como composición del material y prácticas durante el proceso de fusión.

Existen diversos métodos para evaluar de forma más o menos precisa la aptitud que tiene el material para ser procesado, la aproximación a la realidad que éstos ofrecen está relacionada con la complejidad de los mismos, los más sencillos se basan en la aptitud de la chapa para ser estirada, éstos son básicamente los ensayos de embutido, como por ejemplo el Erichsen, en donde el índice de embutido está dado por; "la profundidad o recorrido, expresado en milímetros, del penetrador desde la posición de contacto con la probeta, hasta el comienzo de la ruptura de ésta" (Ref.6).

3.2.1. Ensayos empleados para determinar el comportamiento del material durante el embutido.

Está demostrado que la capacidad del material para ser embutido depende de:

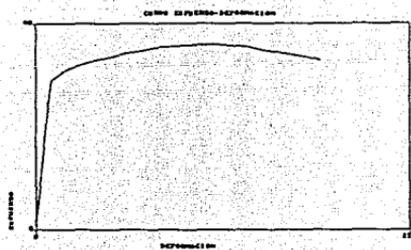
- a) Características del endurecimiento con la deformación
- b) El grado de anisotropía
- c) El acabado superficial

Lo antes mencionado se debe a que el proceso de embutido es un método de compresión indirecta, razón por la que la falla del material se producirá por los mismos mecanismo que en un ensayo de tracción, por lo cual el índice de anisotropía y el de endurecimiento se obtienen entonces de este tipo de pruebas.

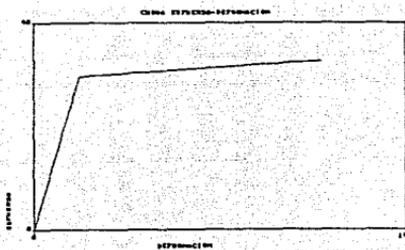
Los comportamientos típicos en un ensayo de tracción se muestran en la figura 3.1, en la 3.1a se observa uno del tipo (Ref. 7):

$$\sigma = \sigma_0 (1 + k\epsilon^n) \quad (3.1)$$

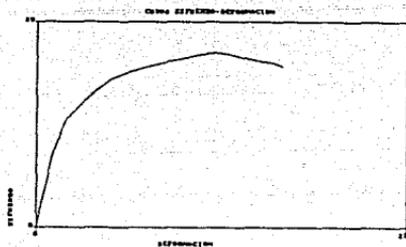
el cual corresponde a un material como el acero de alto carbono ó que ha sido con anterioridad trabajado en frío, la figura 3.1b



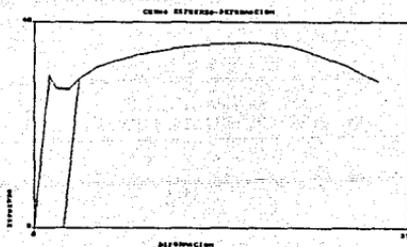
3.1 a



3.1 b



3.1c



3.1d

Figura 3.1
Curvas esfuerzo deformación para materiales elastoplásticos.
(Ref. 8)

muestra un comportamiento del tipo (Ref. 8):

$$\sigma = \sigma_0(1 + k\epsilon) \quad (3.2)$$

el que corresponde a un material fuertemente deformado en frío, la 3.1c (Ref. 8) indica una relación parabólica de la deformación con el esfuerzo de la forma:

$$\sigma = k\epsilon^n \quad (3.3)$$

La ecuación anterior muestra el comportamiento típico de los metales en la zona plástica; por último la figura 3.1d. presenta el caso en el que el material que tiene un límite de cedencia agudo. Este comportamiento ha sido relacionado con el de los aceros de bajo carbono aunque también se manifiesta en materiales como el molibdeno, algunas aleaciones de aluminio y de titanio así como en muestras monocristalinas de cadmio, zinc, aluminio y bronce a y β . En el acero dicho comportamiento se atribuye a la presencia de atmósferas de átomos intersticiales (Carbono y Nitrogeno) los cuales interactúan con las dislocaciones obstruyendo su movimiento. Una vez que la dislocación se ha liberado de la atmósfera de átomos intersticiales el esfuerzo necesario para desplazarla disminuye (lo cual explica entonces el límite elástico inferior), este movimiento se inicia de manera localizada en el material dando lugar a lo que se denomina como bandas de Luders o líneas de Hartmann, estas líneas normalmente tienen una orientación de 45° con respecto al eje de carga. Se inician en zonas de concentración de esfuerzos y de ahí se extienden a toda la muestra de tal forma que la deformación que a estas se atribuye es heterogénea. Una vez que se han extendido por todo el material la deformación prosigue de manera convencional.

Resulta evidente que el comportamiento antes mencionado no es idóneo para un material que será empleado en una operación de embutido, razón por la que es necesario determinar las condiciones que inhiban su aparición, esto se puede obtener al deformar el material hasta un punto como el marcado con "x" (figura 3.1d) en la práctica se logra mediante la adopción del paso de acabado en la laminación (reducción menor al 5% después del recocido), aun con esta operación se puede presentar todavía el límite elástico agudo ya que el material sufre el fenómeno conocido como envejecimiento. Esto se debe a que las atmósferas de átomos intersticiales se difunden nuevamente hasta atrapar a las dislocaciones, lo que da una vida de almacenamiento máxima de la chapa.

Otra forma de evitar o limitar el inconveniente del límite elástico agudo es a través de lograr que los átomos intersticiales sean precipitados mediante la formación de carburos, nitruros y carbonitruros, razón por la que serán aleados en pequeñas

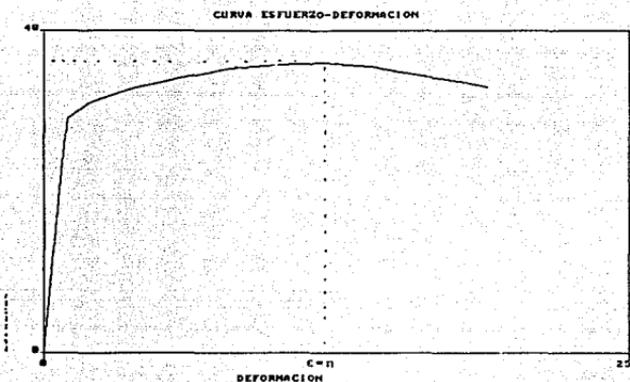


Figura 3.2.

El índice de endurecimiento del material corresponde a la deformación uniforme del mismo.
(Ref. 9)

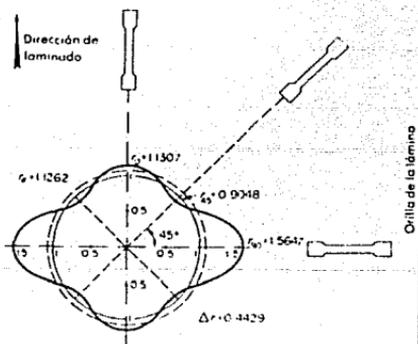


Figura 3.3

Variación típica del índice de anisotropía planar (r) en función de la orientación de la muestra con respecto al eje de laminado del material.

(Ref. 10)

proporciones al acero (menos del 0.1%) elementos formadores de dichos compuestos como son el Nb, Ti, B, V y Al.

En las ecuaciones 3.2 ó 3.3, se muestra el índice de endurecimiento "n", éste factor representa la velocidad con la que el material se endurece con la deformación, a la vez de corresponder con la posibilidad del material para deformarse de manera homogénea, por tanto corresponde a la magnitud de la deformación uniforme durante el ensayo de tracción (veáse figura 3.2), y puede ser determinado en la dirección de laminación y a 45° y 90° de la misma manera.

El índice de endurecimiento medio para el material se calcula como (Ref. 10):

$$\bar{n} = \frac{1}{3} (n_{0^\circ} + n_{90^\circ} + 2n_{45^\circ}) \quad (3.4)$$

Por tanto, que el incremento de "n" representa una mayor capacidad del material para ser embutido.

La chapa de acero laminada en frío presenta propiedades direccionales (anisotropía). Dicho comportamiento se debe a la orientación preferencial de los granos. El grado de diferencia en las propiedades en función de la dirección se mide a través del índice de anisotropía "r" ó de Langford (Ref. 10).

$$r = \frac{\text{deformación en el ancho}}{\text{deformación en el espesor}} \quad (3.5)$$

$$r = \frac{\ln (af/ai)}{\ln (ef/ei)}$$

af, ai - Anchos final, e inicial
 ef, ei - Espesor final, e inicial

De hecho "r" se puede tomar como un indicador de la resistencia del material a reducir su espesor durante el embutido.

Por la dificultad de una medición precisa del espesor y considerando que el volumen del material permanece constante se emplea (Ref. 10):

$$r = \frac{\ln (af/ai)}{\ln \frac{(li/ai)}{(lf-af)}} \quad (3.5')$$

li,lf - longitud inicial y final

El índice de anisotropía es función también de la dirección y puede graficarse según se muestra en la Figura 3.3, por la orientación de los cristales, éste toma valores máximos a 0° y 90°, con respecto al eje de laminación. El mismo Langford (Ref. 9) sugirió que el valor medio del índice de anisotropía planar (r) daba un valor más acorde a dicho comportamiento.

$$\bar{r} = \frac{1}{2} (r_{0^\circ} + r_{90^\circ} + 2r_{45^\circ}) \quad (3.6)$$

Los subíndices 0°, 45° y 90° indican el ángulo en que fue tomada la muestra con respecto a la dirección de laminado.

Considerando la definición del índice (ecuación 3.5) se desprende la conveniencia de que éste tome valores mayores de la unidad ya que así se permitirá un mayor embutido sin que se presenten adelgazamientos o incluso fracturas, se considera entonces que cuando $r < 1$ el material no es aplicable para embutido, prefiriéndose aquellos productos con índices entre 1.5 y 1.8. Operaciones donde la pieza tiene relaciones de longitud a diámetro, mucho mayores de la unidad requieren los índices (r) del orden de 1.8 a 2.2.

El problema que se presenta con índices (r_ϕ) que difieren mucho entre sí es que el material tiende a formar orejas durante la operación, las que deberán ser entonces posteriormente eliminadas, con el consiguiente desperdicio de material e incremento en las operaciones. Para evaluar lo anterior Keeler (Ref. 10) sugirió el índice $\star r$, el cual está definido por:

$$\star r = r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2r_{45^\circ} \quad (3.7)$$

Es evidente que si $\star r = 0$, entonces el material no formará orejas durante el proceso, cuando $\star r > 0$, se presenta el problema a 0° y 90° de la dirección de laminación.

Como las determinaciones antes propuestas requieren de tiempo y recursos considerables, Willis y Blade (Ref. 10) propusieron un índice de anisotropía alterno:

$$A = \frac{h_e - h_z}{\frac{1}{2} (h_e + h_z)} \quad (3.8)$$

donde:

h_e - altura máxima de la pieza embutida
 h_z - altura en la zona sin oreja de la tacilla

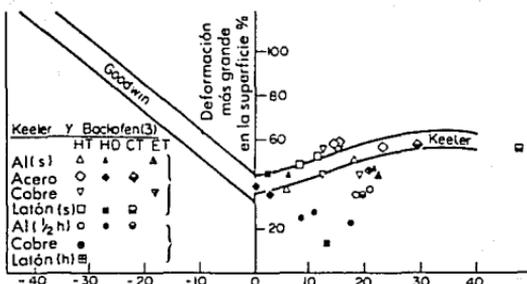
Desde hace muchos años y como un valor de comparación de la capacidad de embutido se desarrollaron pruebas del mismo tipo, de estos ensayos los más comunes son el Erichsen (Ref. 6), Dubois, Persoz, Olsen. En su mayoría se trata de evaluar la capacidad de formar un cuerpo hueco con la hoja antes de que esta se fracture.

El desarrollo de formas más complejas ha dado como resultado que los parámetros determinados a través de los ensayos antes comentados sean insuficientes para asegurar la operación exitosa de embutido, siendo entonces necesaria la implementación de pruebas que se aproximen a las condiciones de trabajo, uno de los métodos más aceptados consiste en el grabado, normalmente electroquímico, de un patrón de círculos sobre la superficie de la pieza a ser embutida, es posible entonces determinar las zonas críticas a través de la distorsión que sufre la red permitiendo así en caso de ser necesario la modificación del diseño de la pieza para disminuir la incidencia de deformaciones severas.

Considerando lo anterior y a partir de las experiencias de Keeler (11) y Goodwin (12) se han implementado los diagramas de límite de formado (DLF), dichos investigadores a partir de las condiciones de deformación para estrechamiento y falla propusieron la construcción de un diagrama de deformación mayor versus deformación menor, como puede observarse en la figura 3.4.

La determinación de la deformación se efectúa mediante el grabado de un patrón de círculos de 2.5 mm sobre el material, el cual posteriormente es embutido con auxilio de un punzón de 75 mm de diámetro. En esta primera etapa se considera una relación de embutido tal que no se produzcan fallas en el material midiéndose entonces los ejes mayor y menor de las elipses formadas a partir de los círculos, calculando a partir de dichos datos la deformación mayor y menor generada en cada elipse, dato el cual a su vez da lugar a una coordenada en el diagrama ϵ mayor vs ϵ menor, al unir estos puntos se obtiene entonces la característica de no falla del material. Un posterior incremento en la profundidad de embutido hasta que se presenta la fractura del material proveerá las coordenadas que al unirse indican las condiciones de falla del mismo, éstos son datos característicos del material y de su estado de tratamiento.

Es evidente que cualquier combinación de deformación mayor y menor que quede por encima de la línea de falla representará una condición indeseable, mientras que por abajo será viable. Inegable es la complejidad que involucra la construcción del DLF del material, lo cual se ve compensado con creces por la precisión de la información que éstos proveen.



Deformación superficial perpendicular a la deformación más grande en la superficie, %

Fig. 3.4

Diagrama de límite de formado típico
(Ref. 10)

Los datos del DFL pueden compararse con los obtenidos a partir de un programa, que mediante la aplicación del método del elemento finito a las relaciones constitutivas, determine las deformaciones críticas. Comparando estas con las obtenidas del DFL se puede predecir la posibilidad o imposibilidad de formar una parte de una geometría cualesquiera a partir de la chapa metálica.

3.2.2. RUGOSIDAD

El acabado superficial del material tiene efecto durante el embutido ya que la rugosidad permite que una capa de lubricante actúe entre las herramientas y la chapa reduciendo la fricción y disminuyendo así las cargas de trabajo y evitando el estirado.

Un material en exceso rugoso provocará inconvenientes con el acabado de las piezas producidas, así como también permitirá concentraciones de esfuerzos que limiten la ductilidad aparente del producto. En el extremo una chapa totalmente lisa limita la

formación de una película de lubricante, si la rugosidad no es uniforme entonces no hay razón para pensar que dicha película sea homogénea, con todos los inconvenientes que esto acarrea.

La rugosidad de la chapa se genera en el último paso de laminación y está determinado por el propio acabado de los rodillos de trabajo, razón por la cual es necesario controlar de forma precisa el grabado de éstos.

3.2.3. Dimensiones

Aún cuando el material cumpla con las propiedades y acabado que de él se demanden es necesario que se encuentre dentro de ciertas tolerancias dimensionales, considerando no solo su espesor sino la uniformidad que este parámetro tenga tanto en su ancho como longitud. Una variación del espesor con respecto al ancho de la chapa se puede deber a:

- a) Inadecuado coronamiento de los rodillos
- b) Desajuste en la separación de los rodillos

Se define coronamiento del rodillo a la convexidad presentada por éste en la parte media de la tabla, dicha convexidad tiene como función compensar la deformación elástica del rodillo (flexión) producto de la presión resultante de la deformación del material. Si éste parámetro no es determinado correctamente da lugar a que el material presente un mayor espesor en la parte media de la hoja con respecto a las orillas de la misma.

El desigual desplazamiento del rodillo de ajuste provoca que la separación de éste con el otro rodillo de trabajo no sea uniforme, produciendo entonces una hoja con espesores diferentes en sus orillas.

La variación del espesor con respecto al eje principal de la chapa (eje de laminación) es producto de desajustes en la separación del paso de acabado sirviendo entonces ésta última etapa también para la calibración de la chapa.

3.2.4. Composición y microestructura

Es indiscutible que las propiedades físicas del material están ligadas con la composición química y con su microestructura, ya que de aquí se puede desprender la incompatibilidad de éste para un determinado comportamiento. Es deseable entonces que el material tenga una composición química del siguiente orden (Ref. 5).

C ◀ 0.1%
Si ◀ 0.15%
Mn ◀ 0.3%
P,S ◀ 0.015%

Para garantizar así una mayor ductilidad.

Para mejorar las características mecánicas del material de acuerdo a lo discutido al inicio del tema es conveniente la presencia de elementos formadores de carburos y nitruros que inhiban el envejecimiento en la chapa, mayores adiciones dan lugar a la obtención de aceros microaleados, asimismo el enfriamiento súbito desde una temperatura de austenización incompleta favorecerá la aparición de martensita y bainita como componentes microestructurales y por ende la obtención de una estructura definida como de doble fase que es muy adecuada para operaciones de embutido por su bajo esfuerzo de cedencia inicial y su elevado índice de endurecimiento con la deformación, lo cual hace deseable este tipo de aceros para operaciones de estampado como las requeridas por la industria automotriz.

Otro índice de la calidad del acero son las inclusiones presentes, un volumen elevado de éstas, principalmente de óxidos da como resultado una disminución de la ductilidad y por ende de la capacidad de embutido, a la vez dichas inclusiones son un indicativo de prácticas siderúrgicas inadecuadas como; desoxidación incompleta del acero así como una falta de limpieza en el mismo al no eliminar a través de la escoria componentes no metálicos como son los sulfuros, silicatos y alumina.

4. EXPERIMENTACION

4.1. Introducción

De acuerdo a lo comentado en el capítulo anterior se caracterizó una chapa de acero AISI/SAE 1008 calidad comercial producida por AHMSA, para ésto se efectuaron las siguientes pruebas sobre el material.

- a) Análisis químico.
- b) Ensayo de tracción en muestras en la dirección del eje de laminación así como a 45° y 90° del mismo.
- c) Índice de embutido según Erichsen.
- d) Determinación del diagrama de límite de formado del material.
- e) Determinación de la rugosidad
- f) Determinación de la uniformidad en el espesor de la chapa.
- g) Análisis metalográfico

4.2. Análisis Químico

El ensayo se efectuó con un espectrómetro de chispa, reportando los siguientes resultados:

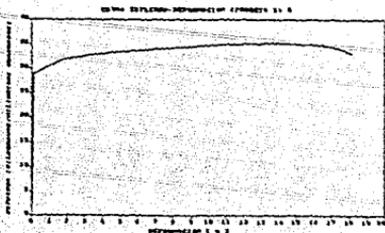
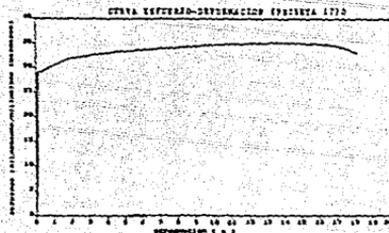
C	-	0.07%
Mn	-	0.36%
Si	-	0.12%
P	-	0.02%
Al	-	0.20%
Fe	-	el resto

de lo cual constata que el material en cuestión es un acero AISI 1008.

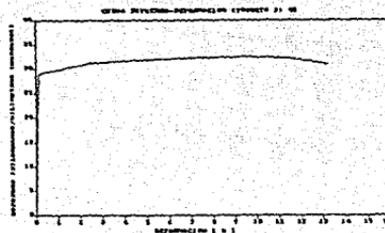
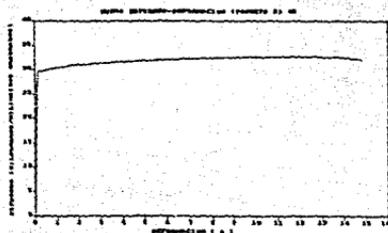
4.3. Ensayo de tracción

Para ésto se cortaron 16 muestras, 5 a 0° con el eje de laminación, 6 a 45° y 5 a 90°. Los ensayos se hicieron de acuerdo a la norma ASTM E-8, de dichos ensayos se determinó:

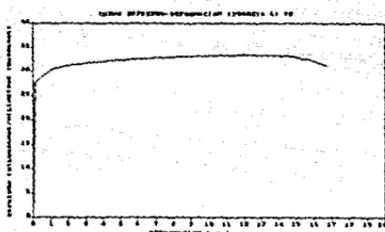
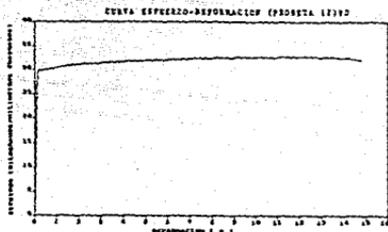
- a) Esfuerzo de cedencia (0.2% ϵ)
- b) Esfuerzo máximo
- c) Índice de endurecimiento
- d) Índice de Langford



4.1. a,b. Muestras colineales al eje de laminación



4.1. c,d. Muestras a 45° con respecto al eje de laminación.



4.1. d,e. Muestras perpendiculares al eje de laminación.

Figura 4.1

Gráficas esfuerzo-deformación para probetas tomadas con diferente ángulo de inclinación con respecto al eje de laminado.

T A B L A 4.1

NUMERO DE ENSAYO	ESFUERZO DE CEDENCIA σ_y (kg/mm ²)	ESFUERZO MAXIMO σ_{max} (kg/mm ²)	DEFORMACION MAXIMA ϵ_{max} (kg/mm ²)	INDICE DE EN DURECIMIENTO n	INDICE DE LANGFORD r	ANGULO CON RESPECTO AL EJE DE LA MINACION. β
1	31.76	32.64	15.41%	0.068	1.15	45°
2	29.67	33.76	15.98%	0.1225	0.9722	45°
3	29	32.39	14.45%	0.0941	0.8741	45°
4			14.26%		1.1876	90°
5	28.96	35.34	11.94%	0.1358	1.16	0°
6	27.81	34.52	17.44%	0.1217	1.045	90°
7	29.39	33.49	17.99%	0.12	0.5806	45°
8	28.6	33.29	19.61%	0.1392	1.1034	90°
9						
10	30	33.58	18.5 %	0.1193	0.7897	45°
11	31.29	37.6	22.58%	0.1335	1.1229	0°
12	27.93	32.62	20.52%	0.1270	0.9988	90°
13	29.66	33.96	21.25%	0.1367	0.8292	90°
14	31.86	38.18	21.95%	0.1550	1.125	0°
15	29.42	33.08	19.59°	0.1287	0.670	45°
16	32.26	37.81	20.06%	0.1310	1.2428	0°
17	30.36	37.56	15.87%	0.1175	1.069	0°

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.1, mientras que en la Figura 4.1 se observan seis de las gráficas esfuerzo-deformación para el material a 0°, 45° y 90° con respecto al eje de laminación

4.4. Índice de embutido.

El índice Erichsen se determinó según ISO-DIS 8490- Sheet and strip - Modified Erichsen Lapping, equivalente a la nacional DGN B131-1964.

De acuerdo a la norma se diseñó y construyó el herramental necesario (Figura 4.2), siendo empleado para esto una máquina servohidráulica Instron, modelo 1331. Los ensayos se realizaron en muestras del mismo lote de lámina que el empleado para las pruebas de tracción, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.2.

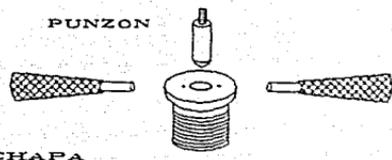
T A B L A 4.2

NUMERO DE ENSAYO	INDICE ERICHSEN DE EMBUTIDO (mm)
1	9.14
2	9.14
3	9.27
4	9.14
5	9.33
6	9.01
7	9.2
8	9.2

Ensayes de Embutido

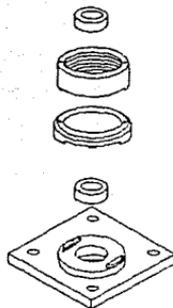
4.5. Diagrama de límite de formado.

Para la determinación del diagrama de límite de formado se utilizó el mismo herramental que para los ensayos de embutido, por facilidad de grabado y medición se seleccionó una malla circular de 5mm de diámetro, generada ésta por fotograbado, (fotografía 4.1) las hojas fueron cortadas en muestras de 9 x 24 cms. Se experimentó con la profundidad de fotograbado de tal forma que las marcas no actuaran como concentradores de esfuerzo favoreciendo la falla del material, ni tampoco desparacieran durante el ciclo de deformación imposibilitando la evaluación de la malla distorsionada, quedando



PRENSA CHAPA

Montaje del Aditamento
para Ensayos de Embutición



PLACA SOPORTE

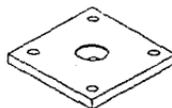


Figura 4.2

Ensamble del aditamento para ensayos de embutido según Erichsen.

(Esta herramienta fue diseñada para montarla en máquina servohidráulica Instron 1331)

T A B L A 4.3

NUMERO DE ENSAYO	DIAMETRO INICIAL	SEMILLA MAYOR	SEMILLA MENOR	DEFORMACION MAYOR	DEFORMACION MENOR	SE PRODUJO FRACTURA DEL MATERIAL	NUMERO DE ENSAYO	DIAMETRO INICIAL	SEMILLA MAYOR	SEMILLA MENOR	DEFORMACION MAYOR	DEFORMACION MENOR	SE PRODUJO FRACTURA DEL MATERIAL	
	ϕ_0 mm	a mm	b	ϵ_1	ϵ_2			ϕ_0 mm	a mm	b	ϵ_1	ϵ_2		
1.1	4.88			0.405	0.262	si								
1.2	4.88			0.965	0.226	si					0.448	0.207	no	
1.3	4.88			0.429	0.236	no					0.461	0.288	no	
1.4	4.88			0.361	0.296	no					0.478	0.268	no	
2.1	4.88			0.401	0.252	si					0.469	0.266	no	
2.2	4.88			0.394	0.257	si					0.453	0.225	no	
2.3	4.88			0.477	0.215	no					0.464	0.220	no	
2.4	4.88			0.440	0.336	no					0.346	0		
3.1	4.88			0.430	0.259	si					0.364	0.05		
3.2	4.88			0.438	0.287	si	10.1				0.375	0.07		
3.3	4.88			0.400	0.243	no					0.380	0.10		
3.4	4.88			0.420	0.260	no					0.410	0.15		
4.1	4.88			0.457	0.241	si	10.3				0.420	0.17		
4.2	4.88			0.450	0.288	si					0.430	0.19		
4.3	4.88			0.468	0.294	si	11.1				0.435	0.20		
4.4	4.88			0.477	0.223	si					0.440	0.22		
5.1	4.88			0.450	0.312	si	11.2				0.460	0.25		
5.2	4.88			0.449	0.231	si					0.470	0.27		
5.3	4.88			0.361	0.268	si	11.3				0.485	0.30		
6.1	4.88			0.460	0.288	no								
6.2	4.88			0.451	0.251	no								
6.3	4.88			0.414	0.243	no								
6.4	4.88			0.448	0.220	si								
7.1	4.88			0.477	0.263	no								
7.2	4.88			0.452	0.260	no								
7.3	4.88			0.448	0.279	no								
7.4	4.88			0.420	0.238	no								
8.1	4.88			0.468	0.257	no								
8.2	4.88			0.491	0.277	no								
8.3	4.88			0.423	0.260	no								

entonces que lo más favorable era un grabado de 0.01 mm de profundidad.

Determinado lo anterior se procedió a los ensayos de embutido, Fotografía 4.2, los resultados se ubicaron exclusivamente en el primer cuadrante de la gráfica $\epsilon_1 - \epsilon_2$, razón por lo que se decidió complementar los resultados obtenidos de muestras embutidas con los evaluados en muestras sometidas a tracción, igualmente fotografiadas. Las mediciones obtenidas en mallas distorsionadas tanto en ensayos de embutido como de tracción se presentan en la Tabla 4.3, con estos datos se generó entonces el diagrama de límite de formado para el material, Figura 4.2, los datos fueron ajustados mediante el programa energraphics, Figura 4.4, 4.5. para así lograr la calidad y precisión demandadas por éste.

4.6. Determinación de la rugosidad.

Si una superficie se corta por un plano normal a la misma se obtiene una curva denominada perfil de la superficie, a partir de la cual se examinan los diversos defectos que esta puede presentar los cuales se agrupan en cuatro ordenes de magnitud que son:

Defectos de forma - primer orden

Irregularidad en la envolvente de la superficie- segundo orden.

Estrias y Surcos - tercer orden

Defectos aperiódicos - cuarto orden

La rugosidad del material se caracteriza entonces por los defectos de tercer y cuarto orden, que son a final de cuentas las estrias y surcos tanto periódicos como aperiódicos. De éstas se pueden obtener una gran variedad de parámetros como son la profundidad máxima de la rugosidad (Rmax). el promedio de alturas de pico a valle (Rz), la desviación media aritmética con respecto a la media (Ra), la raíz cuadrática media de la desviación del perfil (Rq), entre otros. Dichos valores fueron determinados con un rugosímetro portátil de acuerdo a las normas DIN 4760, 4761, 4762, 4763, los resultados se presentan en la Tabla 4.4.

4.7. Determinación del espesor de la chapa.

Se tomaron muestras en las orillas y en el centro de la lámina de acuerdo a la Figura 4.3, con la finalidad de comprobar la uniformidad de espesores en el material.

La medición se efectuó con un micrómetro digital electrónico con una precisión de 0.001 mm.

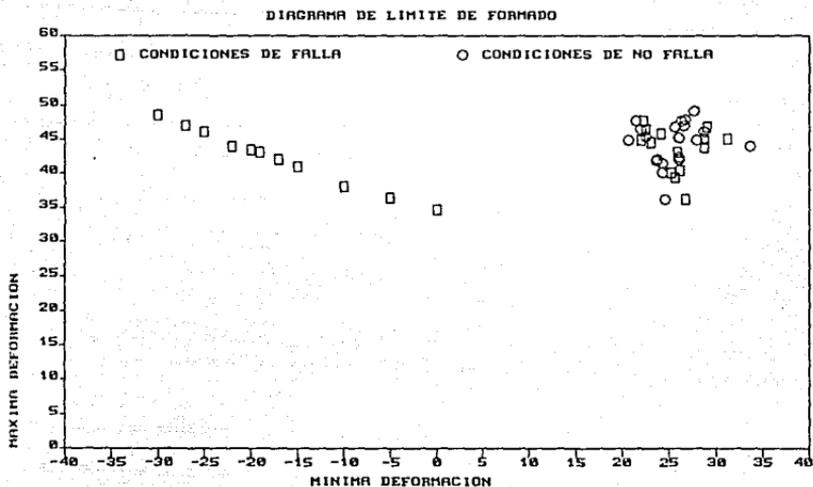


Figura 4.2
 Datos empleados para la generación del diagrama
 de limite de formado.

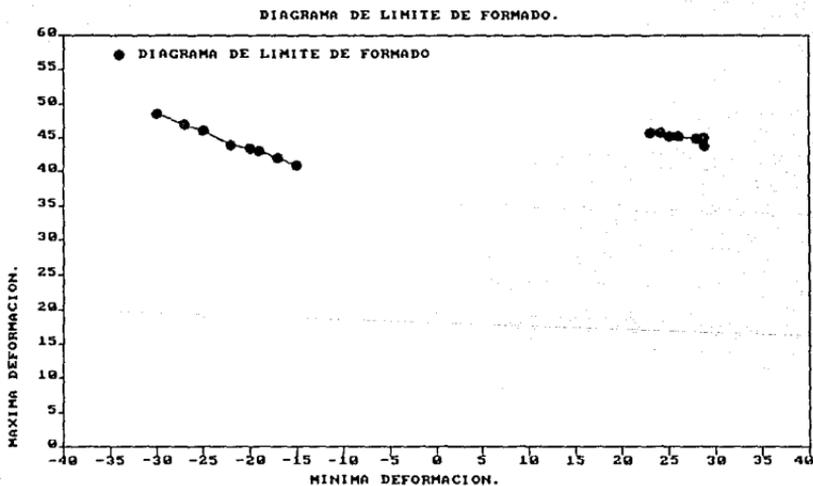


Figura 4.4
 Gráfica de limite de formado considerando datos de falla
 del material.

DISTRIBUCION DE ESPESORES EN CHAPA COMERCIAL
CALIBRE 22

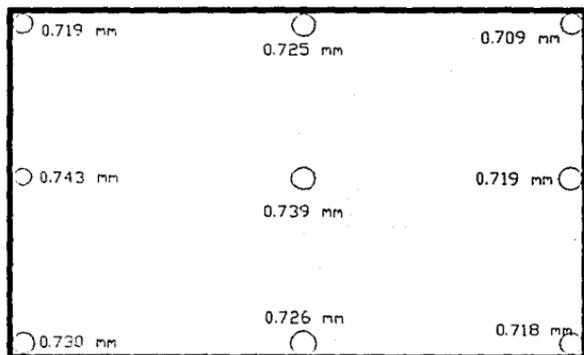


Figura 4.3

Diferentes espesores obtenidos en una chapa de acero
calibre # 22.

T A B L A 4.4

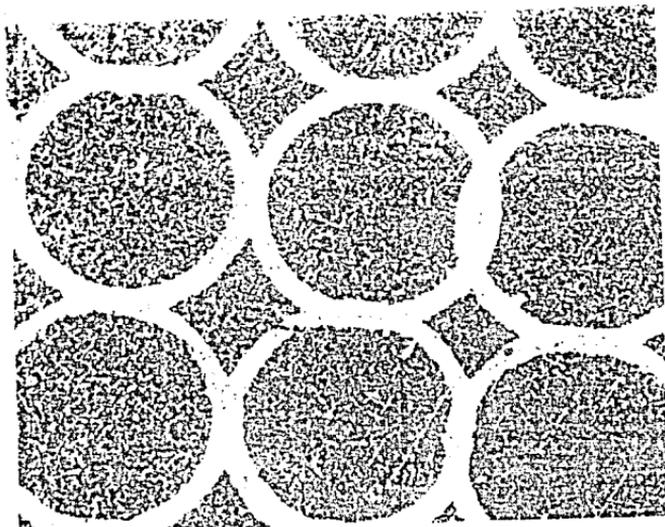
Número de Ensayo	Ra micras	Rq micras	Rmax micras	Observaciones
1	2.9	3.9	18.4	Lado A muestra 1
2	3.0	3.7	16.2	Lado A muestra 1
3	3.2	3.9	13.0	Lado A muestra 1
4	1.2	1.8	9.2	Lado B muestra 1
5	1.0	1.3	7.2	Lado B muestra 1
6	0.9	1.3	5.2	Lado B muestra 1
7	1.0	1.4	5.2	Lado B muestra 1
8	2.9	4.2	14.2	Lado A muestra 2
9	3.5	4.9	23	Lado A muestra 2
10	3.2	4.4	17.4	Lado A muestra 2
11	3.7	5.2	18.6	Lado B muestra 2
12	2.6	3.5	14.2	Lado B muestra 2
13	4.1	5.3	12.8	Lado B muestra 2

Tabla 4.4 Datos de rugosidad

Ra = Desviación media aritmética con respecto a la línea media

Rq = Profundidad de rugosidad.

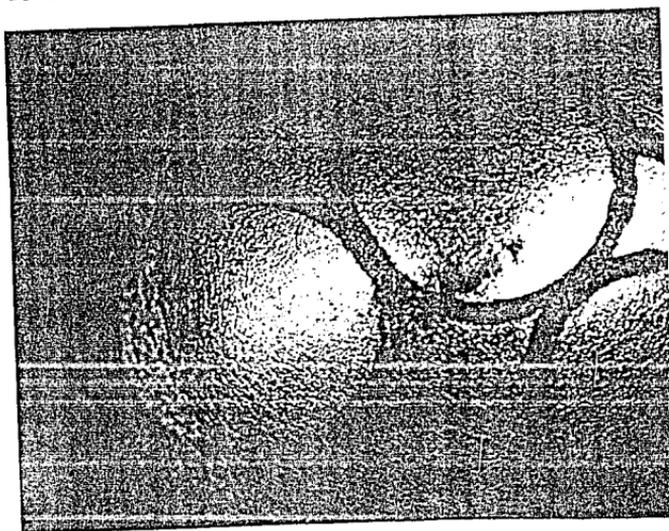
Rmax = Profundidad máxima de rugosidad.



ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Fotografía 4.1

Aspecto de la malla fotografada en una de las caras de la muestra



Fotografía 4.2

Aspecto de la malla después del ensayo de embutido.

DIAGRAMA DE LIMITE DE FORMADO.

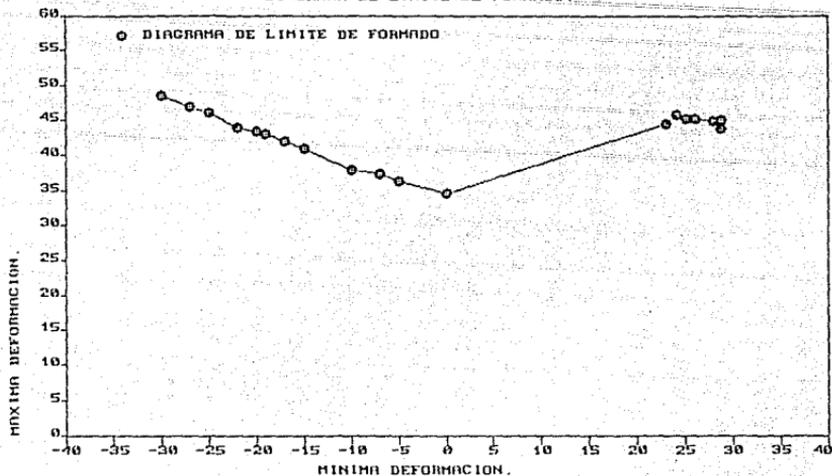
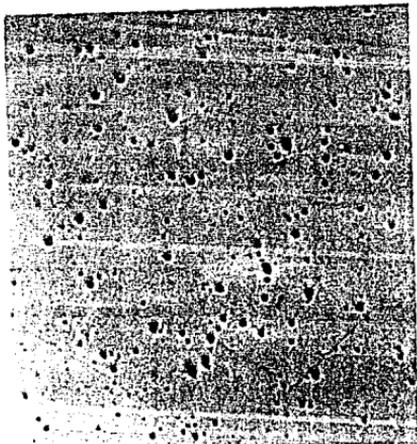
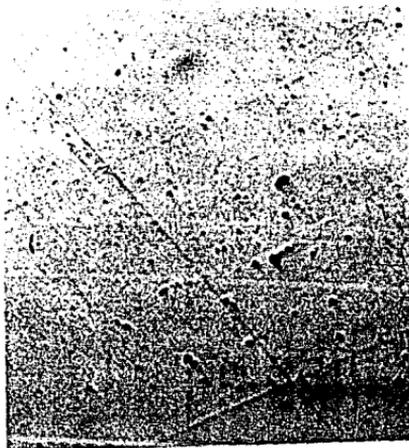


Figura 4.5

Gráfica de limite de formada generada al ensamblar los datos de ambos cuadrantes



Fotografía 4.3
Muestra sin ataque, 100x
Presenta una mezcla de
óxidos gruesos y finos
tipo 3 a 4
(ASTM E-45)

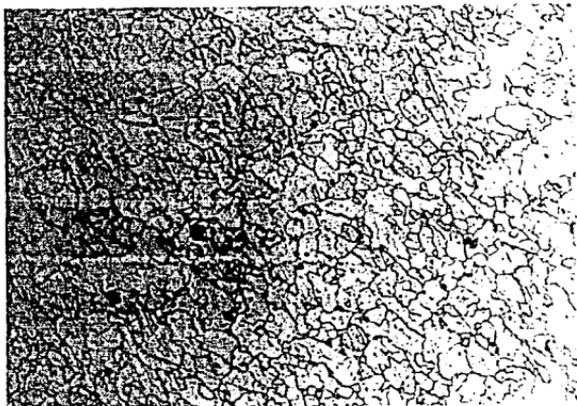


Fotografía 4.4
Muestra sin ataque, 100x
Presenta óxidos finos
tipo 1
(ASTM E-45)

4.8. Estudio metalográfico del material

Se prepararon muestras de la lámina en cortes tanto longitudinal como transversal al eje de laminado. Las muestras longitudinales se observaron sin ataque a 100 aumentos, para así determinar el tipo y clase de las inclusiones, de las que son ejemplo las fotografías 4.3 y 4.4. Fundamentalmente el material presenta óxidos en muy variada densidad así como eventualmente alumina.

Las muestras en corte transversal se atacaron con nital al 3%, en la fotografía 4.5, se observa que la microestructura está formada casi totalmente por ferrita, lo cual es evidente por el tipo de acero que se trata, además presentan gran heterogeneidad en el tamaño del grano.



Fotografía 4.5

Cristales de ferrita en un acero 1008
a 100 aumentos, ataque con nital al 3%.

5. CONCLUSIONES

De los resultados de los ensayos y análisis efectuados sobre el material a prueba proveniente de la empresa Altos Hornos de México, S.A., se desprende lo siguiente:

5.1 Ensayos dimensionales

5.1.1. Espesor

Se empleo hoja calibre # 22, la cual tiene un espesor normalizado de 0.76 mm., de las chapas evaluadas se encontraron en el mismo lote espesores promedio de 0.72 mm a 0.81 mm, con variaciones en las mismas del orden ± 0.02 mm, esto tanto en dirección transversal como longitudinal. En el caso particular del producto del cual se obtuvieron las probetas para tracción el espesor de éste fue de 0.81 mm con un rango de variación de + 0.03, - 0.01mm, lo que se aproxima más al calibre # 21 (no comercial) que al propio de procedencia. En parte éstas variaciones se pueden relacionar con la irregularidad del acabado de la chapa, además de mostrar inconvenientes en el ajuste del paso acabador ó de calibración del material. Dichas irregularidades provocan que en algunos casos el consumidor, si el volumen manejado así lo justifica, instale una caja para calibración del producto ya en su planta, con el consiguiente incremento en costo que dicho equipo y operación implica.

5.1.2. Rugosidad

El acabado del material es irregular y es muy diferente en ambas superficies lo que se debe al proceso de grabado de los rodillos, en este caso mediante granallado.

La variación de la rugosidad da como resultado inconvenientes, tanto durante el proceso de embutido, como en las operaciones de pintado.

En este caso se hace necesario diseñar normas para el grabado de los rodillos de trabajo de la última etapa de laminación, para que así aunque la rugosidad no sea perfectamente uniforme si se encuentre dentro de los rangos requeridos.

5.2. Metalografía

De las observaciones efectuadas a 100 aumentos en muestras longitudinales del material, se determinó lo siguiente; las inclusiones son básicamente óxidos, en base a ASTM E45, se trata de óxidos finos del tipo 1 al 4. Esto muestra una práctica de desoxidación deficiente y da como resultado un material de baja calidad y capacidad de embutido, así también se observó algo de alúmina clasificada como tipo 1 bajo la misma norma, lo que indica una práctica de desoxidación con aluminio, lo cual es de esperarse para un acero de este tipo. (acero calmado).

De las muestras transversales atacadas con Nital al 3% se confirmó que se trata de un acero AISI 1008, con tamaño de grano irregular, lo cual muestra entonces que el recocido posterior a la laminación en frío no se efectuó adecuadamente ya que no se produjo la recristalización total del material.

5.3 Pruebas Mecánicas

5.3.1. Ensayos de Tracción.

Estos se desarrollaron de acuerdo a la norma ASTM E-8. De los resultados se comprueba que se trata de un material previamente endurecido por trabajo, lo que se traduce en una reducida ductilidad y en un bajo exponente de endurecimiento por deformación (n). El material en general se comporta de acuerdo a la relación (Ref. 7):

$$\sigma = \sigma_y (1 + m\epsilon^n) \quad (5.1)$$

donde:

σ = esfuerzo de deformación plástica
 σ_y = esfuerzo de cedencia
 ϵ = deformación plástica
m,n = constantes adimensionales

El índice de endurecimiento promedio (\bar{n}) se calculó de acuerdo a (3.4.):

$$\bar{n} = 0.1273 \pm 0.0138$$

Se comprobó que el material es anisotrópico ya que sus propiedades varían aún en porcentajes mayores

al 10% en función de la dirección, condiciones éstas totalmente previsibles e inherentes a la fabricación de la chapa.

$$\sigma_{0^{\circ}} = 303.52 \text{ MPa} \quad \sigma_{\max 0^{\circ}} = 365.81 \text{ MPa} \quad \epsilon_{\max 0^{\circ}} = 20.11\%$$

$$\sigma_{45^{\circ}} = 293.02 \text{ MPa} \quad \sigma_{\max 45^{\circ}} = 325.2 \text{ MPa} \quad \epsilon_{\max 45^{\circ}} = 16.98\%$$

$$\sigma_{90^{\circ}} = 279.58 \text{ MPa} \quad \sigma_{\max 90^{\circ}} = 329.51 \text{ MPa} \quad \epsilon_{\max 90^{\circ}} = 18.61\%$$

Los esfuerzos de cedencia ($\bar{\sigma}_y$) y máximo ($\bar{\sigma}_{\max}$) promedio así como la deformación máxima ($\bar{\epsilon}_{\max}$) son:

$$\bar{\sigma}_y = 292.92 \pm 13.68 \text{ MPa}$$

$$\bar{\sigma}_{\max} = 339.22 \pm 21 \text{ MPa}$$

$$\bar{\epsilon}_{\max} = 17.96 \pm 3\%$$

De los datos anteriores se comprueba la capacidad limitada de endurecimiento, ya que la relación de σ_{\max}/σ_y es del orden de 1.16, así como su capacidad para estirarse ya que en general la deformación máxima es menor al 20%.

A partir de datos obtenidos de los mismos ensayos de tracción se determinó el índice de anisotropía ó de Langford (r) de acuerdo a la ecuación (3.5), éste presentó los siguientes valores promedio:

$$\bar{r}_{0^{\circ}} = 1.1439 \pm 0.0642$$

$$\bar{r}_{45^{\circ}} = 0.8912 \pm 0.1824$$

$$\bar{r}_{90^{\circ}} = 1.0328 \pm 0.1339$$

el índice de Langford promedio (\bar{r}) se determinó de acuerdo a la ecuación 3.6:

$$\bar{r} = 0.9898$$

El índice $\star r$ se calculó conforme a la ecuación 3.7:

$$\star r = 0.3943$$

5.3.2. Índice de embutido Erichsen

El índice de embutido promedio para las pruebas realizadas fue de $9.178 \pm 0.096\text{mm}$, lo que resultó inferior al valor esperado con respecto a los datos del fabricante (11 mm), siendo otro indicativo de la calidad del material comercial.

De todos los resultados anteriores se comprueba que el material estudiado no es apropiado para ser empleado en un proceso de embutido profundo ya que la ductilidad de la chapa es aún menor que la esperada para este acero, lo que se traducirá entonces en adelgazamiento de la chapa en zonas críticas y por consecuencia en fracturas para relaciones de embutido (D_o/D_f) mayores a 2.5, ó cuando los radios de punzón o embocadura sean muy pequeños. Por otra parte se tiene que el índice de Langford es de aproximadamente la unidad, además de que $\star r$ es substancialmente diferente de 1.00, lo que indica que el material formará orejas o aletas durante el ciclo de embutido.

5.4. Corolario

De todos los datos obtenidos se constata algo que no se desconocía totalmente al inicio del trabajo, que es la mala calidad de la chapa nacional, más sin embargo se presentan parámetros que no habían sido reportados con anterioridad, ya que los productores garantizan composición química, resistencia e índices de embutido pero no mencionan nada respecto al índice de anisotropía planar, índice de endurecimiento y menos aún refieren al diagrama de límite de formado.

Ahora bien el problema es que el sector de la manufactura requiere y va a necesitar en lo futuro productos de mayor calidad que el estudiado en este trabajo, ya no para la

industria automotriz, sino simplemente para línea blanca por ejemplo, es necesario entonces una transformación en la manera de producir la chapa de acero, y esto no tiene que representar una modificación radical en los trenes de laminación, lo que se requiere entonces es normar de forma precisa procedimientos y garantizar en cada etapa la calidad del producto.

Concretando lo que se recomienda implementar para mejorar la calidad de la chapa de acero de producción nacional es:

Fusión: Mejorar la práctica de desoxidación del acero para evitar la aparición de inclusiones, así como inyectar gas inerte en el crisol para flotar las impurezas del material. Es importante adicionar pequeños porcentos de elementos formadores de carburos y carbonitruros, para evitar el envejecimiento del material.

Precalentamiento: Controlar de forma precisa la temperatura y tiempo de permanencia del material en el horno para garantizar la disolución de nitruros de aluminio y evitar la formación de una excesiva cascarilla de óxido.

Laminación en Caliente: Controlar reducción por etapa, así como la temperatura de enrollado para evitar la formación de precipitados indeseables.

Laminación en Frio: Es conveniente adicionar a los actuales trenes un sistema de control de lazo cerrado que permita el ajuste de la separación de los rodillos de acuerdo a los espesores inicial y final del material, los sensores más idóneos son mediante el uso de rayos "X".

Recocido de recristalización: Lo óptimo es utilizar instalaciones de recocido continuo, pero su alto costo, lo hace una solución prohibitiva, razón por la que es necesario continuar trabajando con hornos tipo campana. Para evitar inconvenientes es necesario conocer las diferentes temperaturas del horno que muestren de forma precisa el ciclo

térmico al que es sometido el material.

Paso acabador.

Lo mas importante es controlar el grabado de los rodillos de tal manera que la rugosidad de la chapa sea uniforme, asi como también ajustar la reducción para tan solo eliminar la presencia de bandas de Luders en el subsecuente embutido, evitando endurecimiento indeseable del material.

REFERENCIAS

1. Yvan Houbaert Irmen.
"Producción industrial e investigación científica referente a la chapa delgada de acero" Conferencia presentada en el XV Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, Zacatecas, Mex. 1989 .
2. Anónimo, " 10 años de producción mundial de acero", Camará Nacional de la Industria del Hierro y Acero, México, D.F. 1989
3. Anónimo, "Reporte de importación y exportación de materias primas y productos siderúrgicos, para el periodo 1980-1987, reportes de los periodos de 1988, 1989", Cámara Nacional de la Industria del Hierro y Acero, México, D.F., 1988, 1989, 1990.
4. Apraiz J., "Fabricación de hierro, acero y fundiciones" Ed. URMO, Barcelona, 1978.
5. Roberts L. William., "Flat processing of steel" Ed. Marcel Dekker, Inc. - New York, 1988
6. Anónimo, " Norma oficial de método de prueba para la determinación del índice de embutido para productos planos delgados de acero. DGN-B131-1964" Dirección general de normas, Departamento de Normalización.
7. Chakrabarty J., "Theory of plasticity" Ed. McGraw-Hill - New York, 1987
8. Río Jesús del, "Deformación plástica de los materiales. La forja y la laminación en caliente", Ed. Gustavo Gili, S.A., Barcelona, 1980.
9. Dieter E.G., "Mechanical Metallurgy" Ed. McGraw-Hill, New York, 1986.
10. Harris J.N., "Mechanical working of metals" Ed. Pergamon Press, Oxford, 1983

11. Keeler S.P., "Sheet Met Ind.", volumen 42, Metal Progress, octubre 1966
12. Goodwin G.M., "Metallurgy", volumen 60, 1968
13. Hosford F.W., Cadell M.R., "Metal forming, Mechanics and Metallurgy", Ed. Printice-Hall, Englewood, N.J., 1983.
14. Lange, "Handbook of metal forming", Ed. McGraw-Hill, New York
15. Rowe, "Elements of metal working theory", Ed. Edward Arnold
16. Kurosawa M., Satoh S., Obara T., Tsunoyama K. "Age-Hardening Behavior and dent resistance of bake hardenable and extra-drawable high strength steel" Kawasaki steel technical report, num. 18 mayo de 1988.
17. Tanaka K., "Future trends in the technological evolution of the japanese steel industry" Japan Steel Cooperation - I&SM diciembre de 1988.
18. Meers U., "Bake Hardenability of constinuously annealed steel sheet" Reporte Técnico, Departamento de metalurgia, Sidmar, 1988.
19. Pelletier J.R., Gautier J.J., "Le développement de nouvelles qualités de toles pour l'industrie automobile" Revue de Métallurgie - CIT, octobre de 1982.