



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**ANÁLISIS DE FABRICACIÓN DE CHAPA DELGADA DE ACERO Y
COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA CHAPA NACIONAL
CON LA IMPORTADA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

CERVANTES CABELLO, ARTURO

ASESOR: GARCIA ROCHA, MARIO

MÉXICO, DISTRITO FEDERAL

1991

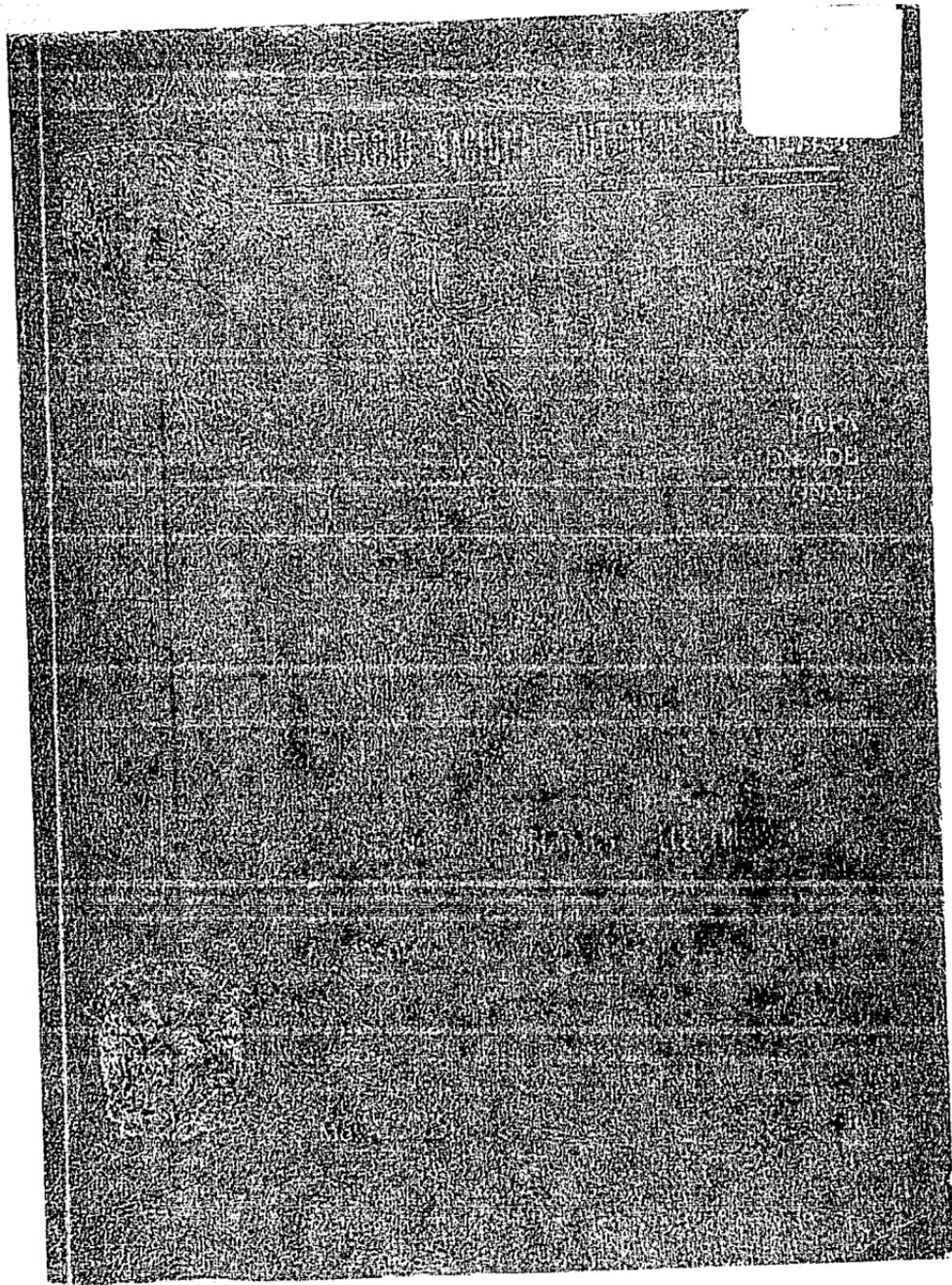


UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

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.



INDICE

Tema	Página
Capítulo I: Introducción.....	1
1.1 Introducción.....	1
Capítulo II: Siderúrgica Mundial.....	3
2.1 Antecedentes históricos.....	4
2.2 Aspectos económicos.....	8
2.2.1 Desarrollo económico mundial en 1989.....	8
2.2.2 Economía nacional.....	11
2.3 Actividad siderúrgica mundial.....	13
2.3.1 Siderúrgica nacional.....	16
2.4 Motivo del trabajo.....	22
2.5 Métodos de producción de la chapa de acero para embutido profundo.....	24
2.5.1 Antecedentes.....	24
2.5.2 Producción moderna de chapa para embutido profundo....	27
2.5.3 Métodos de producción de chapa en México.....	51
Capítulo III: Análisis del proceso de laminación.....	56
3.1 Fuerzas y relaciones geométricas en la laminación.....	57
3.2 Análisis teórico de la carga de laminado.....	67
3.2.1 Cargas de laminado.....	67
3.2.2 Factores que afectan la carga de laminación.....	71
3.2.3 Análisis teórico para laminación en frío.....	75
3.2.4 Análisis teórico para laminación en caliente.....	87
3.3 Efectos de la carga de laminación.....	91
3.3.1 Flexionado o combadura de los cilindros.....	91
3.3.2 Aplastamiento de los cilindros.....	92
3.4 Ecuaciones que hacen uso intensivo de la computadora....	96

Capítulo IV: Métodos de caracterización de la chapa delgada de acero para embutido profundo.....	100
4.1 Introducción.....	101
4.2 Caracterización de la chapa para embutido.....	103
4.2.1 Ensayo de tracción.....	103
4.2.2 Ensayo de embutido.....	113
4.2.3 Diagrama de límite de formado.....	115
4.3 Factores que influyen en la capacidad de embutido.....	118
4.3.1 Composición química.....	118
4.3.2 Microestructura y tamaño de grano.....	121
4.3.3 Rugosidad.....	122
4.4 Defectos de la chapa de acero.....	123
4.4.1 Defectos dimensionales.....	123
4.4.2 Heterogeneidad debida al recocido.....	124
4.4.3 Anisotropía.....	124
4.4.4 Defectos debidos a la laminación.....	125
Capítulo V: Experimentación.....	128
5.1 Introducción.....	129
5.2 Desarrollo experimental.....	129
5.3 Material.....	130
5.4 Análisis químico.....	130
5.5 Determinación de la rugosidad.....	131
5.6 Determinación de variaciones en el espesor de la chapa.....	135
5.7 Análisis metalográfico.....	136
5.8 Ensayo de tracción.....	139
5.9 Ensayo de embutido.....	143
5.10 Diagrama de límite de formado.....	144
Capítulo VI: Análisis de resultados y conclusiones.....	149
6.1 Análisis químico.....	149
6.2 Rugosidad.....	149
6.3 Espesor.....	151
6.4 Metalografía.....	152
6.5 Ensayo de tracción.....	153
6.6 Ensayo de embutido.....	157

6.7 Diagrama de límite de formado.....	158
6.8 Resumen.....	159
6.9 Recomendaciones al proceso.....	160
Referencias.....	164
Apéndice A.....	169
Apéndice B.....	174

CAPITULO I INTRODUCCION.

1.0 INTRODUCCION

Al parecer la chapa delgada de acero (lámina) es un material barato y fácil de producir, de modo que se podría pensar que no existe razón alguna para llevar a cabo investigación científica sobre este tipo de material.

Sin embargo la chapa delgada de acero de finales de los años ochentas, es un producto que se obtiene con la más alta tecnología, así mismo, es un material de gran demanda, siendo el principal consumidor de este producto, la industria automotriz, la cual exige uno de los mayores requerimientos que se imponen a la chapa delgada de acero, por ejemplo, en lo que se refiere a la deformabilidad. La industria automotriz ha utilizado chapa de acero cada vez más delgada, con el fin de reducir el peso de los vehículos y con esto reducir el consumo de combustible. Sin embargo, para poder reducir el espesor de la chapa se deberá mejorar su resistencia mecánica para poder garantizar la seguridad y rigidez del automóvil.

Ahora bien, al aumentar la resistencia mecánica de la chapa de acero cuando se reduce en su espesor, se presenta una reducción en su ductilidad y por consecuencia en su deformabilidad, lo que provoca problemas importantes durante el prensado de algunas partes de carrocería de automóvil, ocasionado grandes pérdidas en la industria automotriz, así como en otras áreas industriales. Además de la buena deformabilidad, también se requiere un mayor

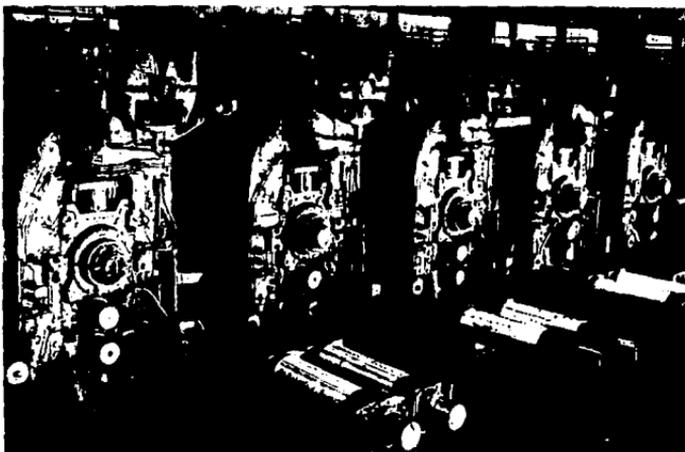
control de la homogeneidad de propiedades de la chapa a lo largo de los rollos.

A nivel internacional se nota que la chapa de acero es considerada un material de alto nivel tecnológico. En numerosos laboratorios industriales y/o universitarios se llevan a cabo investigaciones científicas, de modo que varios investigadores profundizan en el estudio teórico de este material, principalmente en cuanto a los mecanismos de la recristalización, desarrollo de texturas y comportamiento mecánico.

En el presente trabajo se realiza una revisión de los procesos de fabricación empleados en el país, relacionandolos con la calidad y propiedades del producto final, comparando esto, con sus similares de países altamente desarrollados, en este caso la comparación se realizó en base a los datos proporcionados por la literatura.

Para tal objetivo se presenta un análisis económico y siderúrgico a nivel mundial, haciendo énfasis en la situación nacional. Se resumen algunos métodos de análisis para determinar la carga y deformación en un proceso de laminación, así mismo, se revisan tanto el proceso de fabricación de chapa de acero de una industria siderúrgica europea de alta tecnología, como el proceso llevado a cabo en México. Se presentan los diversos métodos y pruebas de caracterización de la chapa. Se muestran los resultados experimentales de la caracterización de la chapa de origen nacional. Finalmente se realiza un análisis de los resultados experimentales, proporcionando recomendaciones al proceso para mejorar la calidad de la chapa de acero nacional.

CAPITULO II
SIDERURGICA MUNDIAL.



TREN DE MOLINOS DE LAMINACION.
(Referencia 3)

2.0 SIDERURGICA MUNDIAL.

2.1 ANTECEDENTES HISTORICOS

Desde época muy remota, el hombre ha tenido la necesidad de modificar el aspecto y características de diversos materiales que se encuentran en su habitat, através del tiempo aprendió a dominar técnicas o métodos mediante los cuales a podido transformar los materiales en elementos útiles para su subsistencia. Siendo los primeros metales trabajados por el hombre el oro y el cobre, en el período comprendido entre el año 6000 y 3000 A.C. período conocido en la historia del hombre como edad de los metales.

En lo referente al hierro, los antecedentes más antiguos que ha sido posible estudiar se remontan al segundo milenio A.C. habiendose determinado que dicho material fué de origen meteorítico. Sin embargo, es difícil precisar la época y el lugar donde se fábrico por primera vez el hierro a partir de sus minerales, lo más probable es que este hecho haya sido accidental; posteriormente se tratarían de reproducir las circunstancias a través de las que se había obtenido dicho material, naciendo con esto, la metalúrgia del hierro.

La metalúrgia del hierro para poder desarrollarse tuvo que solventar muchos obstáculos , uno de los principales problemas por los que atravesó fue la reducción del mineral.

Hacia 1400 A.C. la fabricación del hierro se realizaba en una sola etapa, la cual consistía en, la reducción directa del mineral, obteniendose con esto pequeñas partículas metálicas de aspecto esponjoso, las que después se reunían y se les daba la

forma deseada por martillado en caliente.

tendrían que pasar varios siglos de la historia, durante los que se investigarían y desarrollarían nuevos métodos de obtención del hierro. No es hasta mediados del siglo XIV en la ciudad de Flandes , que se logró poner a punto un alto horno capaz de producir hierro gris en gran cantidad y de manera continua.

La época moderna conocida también como edad del acero da inicio con el descubrimiento del convertidor Bessemer, fabricando por primera vez el hierro y el acero en grandes cantidades y en estado líquido. Esto se remonta al siglo XIX, cuando por sople de aire se logra la oxidación de las impurezas presentes en el arrabio.

Debido a que el arrabio o hierro de primera fusión obtenido en el alto horno se caracteriza por elevados porcentajes de carbono, manganeso y silicio principalmente; se hace necesaria la eliminación de dichas impurezas, ya que el contenido característico de un acero es menor, esto se efectúa por oxidación dada la afinidad del manganeso silicio y carbono con el oxígeno.

Desde el siglo XIX a nuestros días se han realizado grandes innovaciones y modificaciones a los procesos y equipos empleados para la fabricación de acero, entre los que podemos mencionar a los convertidores de sople de oxígeno, la colada continua, procesos de reducción directa, convertidores de uso particular como el ADO, y recientemente los convertidores con sople de gas inerte.

En lo referente a los procesos de conformación mecánica, estos nacieron como consecuencia de la obtención de los metales y sus aleaciones, debido a la necesidad de dar forma a éstos según el

uso al que se destinarán.

El desarrollo de los procedimientos de conformación mecánica de los metales ha estado siempre estrechamente ligado a través de los siglos a los procesos de la metalurgia.

Los metales dúctiles de manera natural fueron los primeros que se trabajaron en frío. El plomo y el estaño fueron transformados en hojas desde la antigüedad. Se sabe por descubrimientos arqueológicos que los griegos en el año 2000 A.C. utilizaban moldes de piedra para el martillado de hojas de oro.

Los procedimientos de conformado mecánico permanecieron esencialmente manuales hasta la edad media, periodo en que aparecieron los primeros martillos mecánicos, estos se levantaban por medio de levas accionadas por el movimiento de ruedas con álabes colocadas en los saltos de agua.

Y no fue hasta mediados del siglo XVI, que se tuvo un significativo desarrollo del trabajo de los metales en láminas debido al descubrimiento del laminador. Pero no es hasta, 1783 cuando el inglés Henry Cort, obtiene la patente Británica No 1351, la cual cubre su introducción de rodillos ranurados empleados en la manufactura de barras de hierro. La idea del tren continuo nació hacia 1892, en Alemania. Las experiencias del primer tren continuo duraron hasta 1907, fecha en que fue abandonada por no haber podido obtener un espesor suficientemente constante en el metal.

Hasta 1923 se continuó fabricando chapas por laminación en caliente, discontinua. La idea del tren continuo fue reconsiderada por Araco, quien en 1923 alcanzó a poner a punto su primer tren; el segundo le seguiría en 1926. Fue necesario esperar al final de segunda guerra mundial, para que se instalasen trenes análogos,

en Europa y América.

De la segunda mitad del siglo XX a nuestros días se han realizado grandes innovaciones y desarrollos en los laminadores y trenes de laminación, con la finalidad de obtener espesores cada vez más constantes en el metal.

Algunos de los laminadores más novedosos son: los laminadores de racimo (Cluster), laminador cuarto, laminador Sendzimir, laminador planetario.

Este tipo de laminadores generalmente se emplean para el desbaste de hoja metálica de aleaciones muy tenaces, en anchos mayores a un metro, así como, para el acabado de las mismas en espesores muy pequeños

2.2 ASPECTOS ECONOMICOS

La economía mundial vive actualmente un proceso de transición hacia lo que se ha denominado "sociedad postindustrial"; la característica general de este proceso es la transformación de la estructura productiva de los países de mayor desarrollo, donde los servicios y tecnologías de punta tienden a desplazar a las tradicionales técnicas industriales, fomentando la internacionalización de la industria.

2.2.1 DESARROLLO ECONOMICO MUNDIAL EN 1989

Los acontecimientos del escenario mundial caracterizan a 1989 y la primera mitad del año 1990, como un periodo singular por la apertura económica de los regimenes de Europa Oriental y la URSS, así como, por el fortalecimiento de la economía japonesa y el bajo desempeño de la norteamericana.

El grupo de las siete economías del mundo occidental experimentó un crecimiento del 3.25%, inferior al 4.1% obtenido en 1988.

Dentro de estos países sobresale Japón con un incremento del 4.75% en su producto interno bruto, dicho crecimiento se dio por la revaluación del yen en años anteriores.

El grupo de países que integran la Comunidad Económica Europea (CEE), presentó un crecimiento del 3.25%, debido a una fortalecida inversión relacionada con el proyecto único hacia 1992.

Las economías de la República Federal Alemana y Francia obtuvieron un avance económico del 3.0%, siendo este porcentaje la tasa de crecimiento planeada para los años 1990 y 1991 siguientes.

Mientras que en Estados Unidos, el dinamismo económico practicado en 1988, logró mantener estable la economía en 1989, presentando un crecimiento del 3.0% en el Producto Nacional Bruto (PNB), trayendo como consecuencia una moderada inflación, la cual tendió alcanzar el 5.0%

Inglaterra por su parte, enfrentó algunos problemas debido principalmente al incremento en su déficit en cuenta corriente de su balanza de pagos, así como por una mayor inflación, lo que afectó su desarrollo económico, reflejándose esto en su tasa de crecimiento que tan sólo alcanzó el 2.2%.

El crecimiento global de España y Portugal registró una tasa mayor al 4.0%, apoyada por la fuerte inversión privada y por los aumentos de los flujos de capital externos, Sin embargo, los gobiernos de ambos países se muestran preocupados por el aceleramiento de la inflación, la cual es superior a los promedios europeos.

En lo referente a América Latina, las políticas de ajuste, los desequilibrios macroeconómicos estructurales, el proceso inflacionario, y la abultada deuda externa afectarán de manera directa la economía de la región. Es por esto, que mientras la inflación alcanzó valores sin precedentes de hasta 1000%, el producto interno bruto se incremento en sólo 1.1, tasa ligeramente superior al incremento del 0.6 obtenido en 1988. El producto medio per cápita disminuyo por segundo año consecutivo en 1.0%. Realizando una breve semblanza del desempeño económico, de las principales economías de la región, Obtendremos una visión más

particular.

En Argentina el PIB experimentó una baja del 6.0%, mientras la producción manufacturera presentó una baja próxima al 9.0% por tercer año consecutivo; en general el producto industrial disminuyó un 20% con respecto al de 1986, todo ello ayudo a agudizar la inflación y el desempleo urbano, alcanzando niveles del 3700.0% y 8.0% respectivamente.

Por su parte, Brasil enfrentó un grave problema inflacionario, con un aumento de hasta 1500.0%, en tanto, que su PIB se incrementó en 3.0% apoyado en un fuerte dinamismo de su industria manufacturera, que experimentó un aumento del 2.4%, así como, su industria de la construcción, que experimentó un aumento del 8.0%, por otro lado; el desempleo urbano presentó un aumento del 3.6%.

La economía de Colombia presentó un crecimiento del 3.0% después de varios años de desempeño satisfactorio, debido a su política restrictiva para controlar la inflación que solo llegó al 27.1%, afectando de manera especial, a la industria de la construcción y manufacturera, mientras los niveles de desempleo alcanzaron el 3.6%.

Chile observó un importante crecimiento económico en su PIB del orden del 8.5%, la cifra más alta en los últimos años, la inflación se estimó en 21.2%, el índice de desempleo bajo al 7.5%.

La economía Peruana y Venezolana, experimentaron una caída del 10.0 y 8.5% respectivamente, la merma de producción fue generalizada afectando a la totalidad de los sectores productivos, así como, a la tasa de desempleo la que aumentó a 9.7%; mientras la inflación aumento en 90%.

2.2.2 ECONOMIA NACIONAL

La economía Mexicana mostró un importante crecimiento. Basada en el repunte de la inflación en los últimos meses del año 1989, en los que se realizó la revisión de algunos precios de bienes y servicios del sector público, como energéticos, teléfono, transporte público, predial, agua, así como el ajuste de precios en algunos productos básicos y el incremento del 10.0% en el nivel del salario mínimo, provocando por lo tanto, que la inflación del mes de diciembre se situará en 3.4%.

El éxito alcanzado en el control de la inflación 'obedece tanto a la política fiscal como monetaria, debido al incremento en liquidez de los agregados monetarios por el retorno de capitales estimados en 2,480 millones de dólares. Lograndose que las tasas de interés crecerán en los últimos meses para cerrar el año en niveles superiores al 40.0%.

Un punto de apoyo importante al saneamiento de la economía fue la renegociación de la deuda externa pública, reduciendo con esto la tranferencia neta de recursos al exterior, lo que repercutió en un clima de mayor confianza y certidumbre en el rumbo de la economía, lo cual fue consolidando cifras en el avance económico al propiciar el repunte de las reservas en divisas que de 6,670 millones de dólares pasó a más de 7,300 millones de dólares.

En materia cambiaria se pasó de la congelación al deslizamiento de un peso diario, lo que representó una devaluación anual del 16.0%.

El producto interno bruto (PIB) alcanzó una tasa real de crecimiento de 2.9%, la cifra más alta después de 1984 y que marca

el inicio de una mayor solidez en la etapa de recuperación económica.

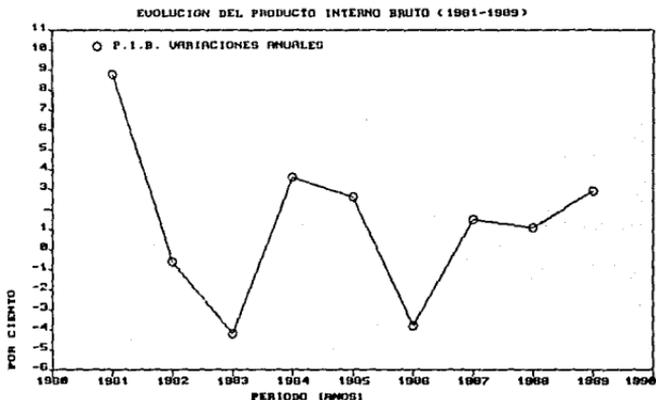


Figura 2.1 Evolución del producto interno bruto (PIB),
en México (1981- 1989).

(Referencia 7)

Dicho crecimiento del PIB visto por diversos sectores de la economía, no resultó aún proporcional ni homogéneo, ya que mientras en la industria manufacturera, construcción, comercio, y servicios, se registró un incremento en el nivel de la actividad en relación a 1988, el sector primario de la economía mantiene la tendencia en su deterioro, así, tanto la minería como el sector agropecuario presentaron decrementos en actividad de 0.7 y 1.2% respectivamente.

2.3 ACTIVIDAD SIDERURGICA MUNDIAL

La producción siderúrgica mundial es un claro reflejo de la economía mundial; es así, que la producción siderúrgica presentó un incremento en 1.5% respecto al año de 1988, dicha producción se situó en 790 millones de toneladas.

Dentro de los países desarrollados destacó Japón con una producción de acero de 107.6 millones de toneladas, lo que representa un crecimiento de casi 2.0% con respecto a 1988.

Estados Unidos, mantuvo su producción de acero cercana a los 90 millones de toneladas. Este país ha venido desarrollando esfuerzos para reconvertir su industria siderúrgica, lo cual ha significado desacelerar el ritmo mientras realiza los ajustes para acceder a un mayor nivel competitivo internacional, así como, también, ha sometido a la competencia mundial a acuerdos para restringir las exportaciones de acero a su mercado hasta un límite establecido (18.4%), como un instrumento de control y en apoyo a su planta siderúrgica.

Por su parte, la Comunidad Económica Europea incrementó su producción en 1.8% para llegar a 140.2 millones de toneladas, destacando como productores potenciales Italia y España, que en conjunto, superaron en 2.2 millones de toneladas su producción.

Es importante hacer notar, que los países industrializados presentaron una baja en la participación de la producción mundial de acero, ya que en 1979 estos, aportaban el 59.3% del total mundial, mientras que para el año de 1989 esta relación bajó al

50.1%, la baja en la participación fue cubierta por los países en vías de desarrollo y las economías del bloque socialista. La especialización en productos siderúrgicos más rentables ha hecho a los países industrializados ceder participación a los países en desarrollo en la fabricación de aceros comerciales, quienes presentaron un dinámico crecimiento en la producción de acero del 4.4% al registrar 101.5 millones de toneladas, de este grupo sobresalen países como Corea del Sur, Brasil y otros del Continente Asiático y Latinoamericano.

La producción de acero en Latinoamérica representó el 5.4% de la producción mundial. De 1981 a 1989 América Latina pasó de una producción de acero de 27.4 a 42.7 millones de toneladas, lo que representa un crecimiento del 56.0% y una tasa media anual de crecimiento del 5.0%, contrastando con la tendencia a la baja en los países industrializados.

Los cuatro países de mayor producción fueron: Brasil, México, Argentina y Venezuela, los cuales suman el 94.3% del total regional. En 1989 fue mayor el número de los países que disminuyeron su producción que los que la aumentaron; disminuyó por ejemplo Centroamérica y el Caribe (-17.4%), Chile (-7.7%), Venezuela (-5.1%), Perú(-9.1%), Colombia y Ecuador (-0.4%) y Paraguay (-12.2%).

Sobresalió la participación de la producción de acero brasileño, que con 25 millones de toneladas, contribuyó con el 58.5% del total regional, seguido por México con una aportación del 18.5%, Argentina el 9.1% y Venezuela el 8.1%.

En lo referente a la producción de laminados en América Latina, la producción ascendió a casi 33 millones de toneladas, lo que representa un incremento del 0.6%.

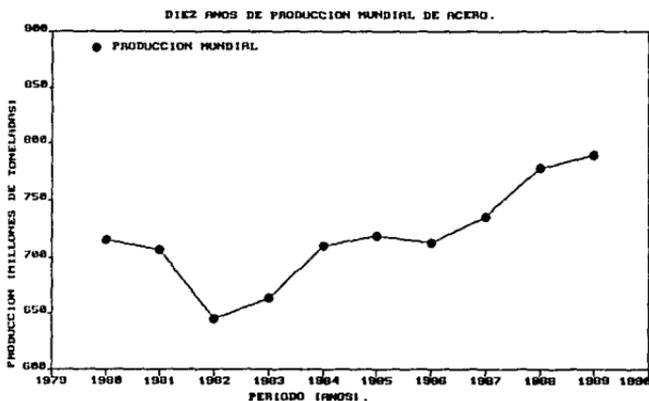


Figura 2.2. Producción mundial de acero (1980-1989).

(Referencia 7)

En la figura 2.2, anterior, se puede apreciar la variación en producción mundial de acero por periodos, donde, el periodo 1980-1982 se caracterizó por una tendencia a la disminución,, debida a la crisis mundial en el mismo periodo. El año 1982 con una producción de 644.8 millones de toneladas, marcó la tendencia al crecimiento de la producción, sin caídas en la misma, de tal manera que para el año 1989 se alcanzó una producción de 790.1 millones de toneladas.

2.3.1 SIDERURGICA NACIONAL

La producción de acero, a finales de los 70's y principios de los 80's sufrió de fuertes bajas, debido a la recesión de la economía, a la crisis petrolera y la devaluación del peso frente al dólar; mientras que para finales de la década de los 80's, contando con una economía medianamente saneada, así como, la eliminación de los impuestos arancelarios (GATT), los cuales, sirvieron como base para incrementar la producción de acero, en los últimos cuatro años, como se puede observar en la siguiente figura.

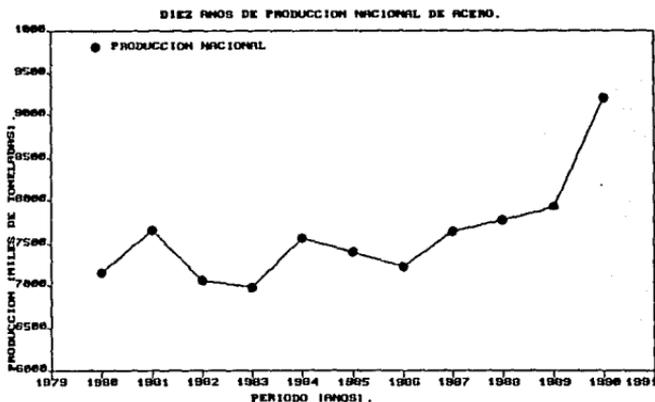


Figura 2.3. Producción Nacional de acero (1980-1990).

(Referencia 7)

En 1989 la industria Siderúrgica Mexicana presentó un crecimiento del 1.8% con respecto al año anterior, al presentar un volumen de acero crudo de 7,920 millones de toneladas. El aumento en la producción de acero responde al crecimiento de la economía y la participación activa en el proceso de apertura comercial con volúmenes suficientes.

Dentro de la dinámica de modernización de la industria Siderúrgica, se contempla abandonar en el corto plazo procesos obsoletos en la fabricación de acero como es el conocido "Siemens Martin", que después de contribuir con el 19.0% en la producción de acero de 1980, en 1989 sólo ocupó el 10.4%.

En 1989 la producción de acero para cada uno de los procesos fue: 821,000 toneladas - Horno de Hogar Abierto "Siemens Martin" (10.4%), 4'094,000 toneladas - Horno Eléctrico (51.7%), 3'005,000 toneladas - Convertidor Básico de Oxígeno (BOF) (37.9%).

Debe tenerse en cuenta que el proceso del Convertidor Básico de Oxígeno no fue utilizado en toda su capacidad (8.1 millones de toneladas de producción de acero crudo), debido a algunos problemas laborales que ocasionaron la suspensión de actividades en las plantas.

Los materiales básicos, como varilla corrugada, perfiles estructurales etc., fueron producidos por el moderno proceso de Reducción Directa, alcanzando este una producción de 2'225,000 toneladas de hierro esponja, lo que representa un crecimiento del 32.0% en contraste con una disminución en la producción de arrabio proveniente del Alto Horno al pasar de 3'678,000 toneladas en 1988 a 3'247,000 toneladas en 1989.

En 1989 la industria fabricante de ferroaleaciones participó

con, 168,042 toneladas de ferromanganeso, 98,852 toneladas de silicomanganeso, y 13,952 toneladas distribuidas entre ferrosilicio, ferrocromo, ferromolibdeno, y ferrovanadio.

En lo referente a la producción de laminados planos, esta ascendió en 1989 a 6'299,000 toneladas registrando con ello un crecimiento del 1.5% con respecto a la producción de 1988.

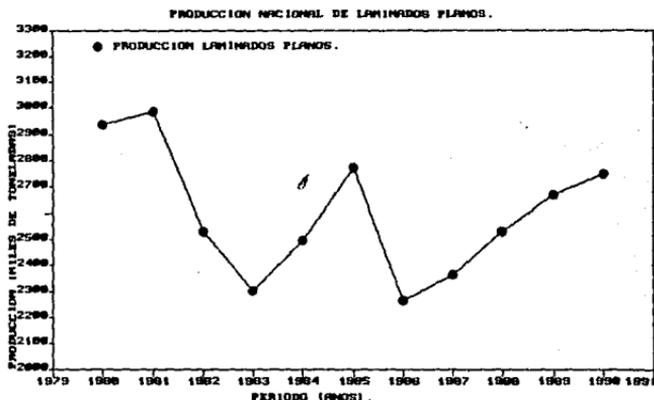


Figura 2.4. Producción Nacional de productos planos (1989-1990).
(Referencia 8)

Debe tenerse en cuenta que, la producción de chapa de acero en el país representa alrededor del 40% del volumen total de acero producido; de tal manera que, en 1989 se produjeron 2'699,000 toneladas de acero representando un crecimiento del 1.5% con respecto a 1988.

En el grupo de productos planos, la producción más alta la registrarán los laminados en frío con 1'186,200 toneladas, mientras que los laminados en caliente y la placa registrarán 875,00 y 575,000 respectivamente.

EXPORTACIONES

En este concepto la industria Siderúrgica Nacional ha tratado de mantener en niveles estables sus exportaciones, arrojando excelentes resultados su política de comercio exterior, presentando un aceptable crecimiento. Basta mencionar que en 1980 se exportaba sólo el 1.2% de los productos terminados, en comparación con el 18.0% que se exportó en 1989.

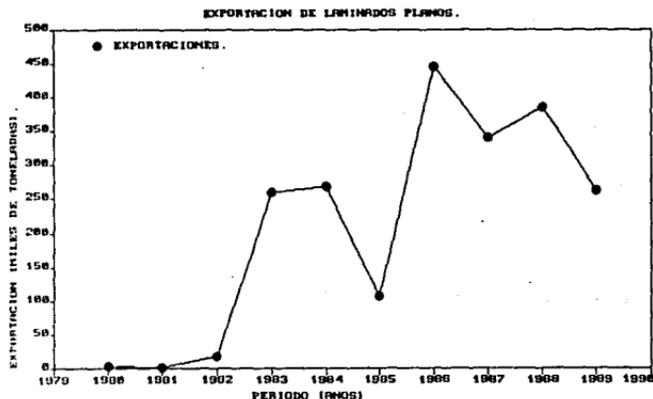


Figura 2.5. Exportación de productos planos (1980-1989).

(Referencia 8)

La figura 2.5 muestra las variaciones en la exportación de productos planos en el período 1980-1990, observándose que para 1980 sólo se exportaban 3,000 toneladas, debido a las bajas producciones del producto, para 1986 se exportó el más alto nivel de la historia 446,000 toneladas, pero para los años subsiguientes se presentó una baja drástica, por las necesidades internas de consumo.

IMPORTACIONES

Durante 1989 se importaron 778,000 toneladas de productos siderúrgicos, integrados por 57.0% de producto planos, 18.0% de planos y 25.0% de tubería y otros.

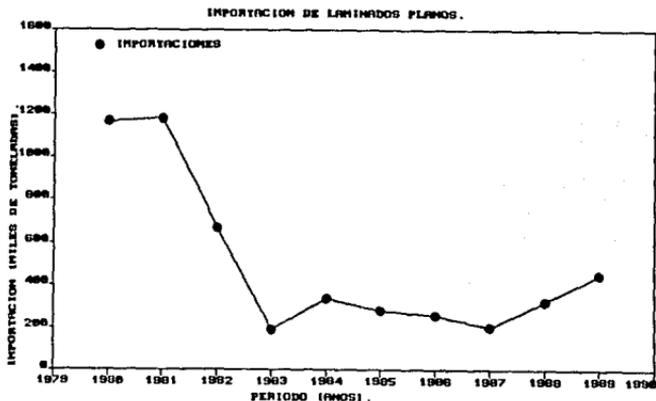


Figura 2.6. Importación de producto planos (1980-1989).

(Referencia 8)

CONSUMO

El consumo nacional de productos siderúrgicos en 1989 experimentó un crecimiento del 10.0%, llegando a un volumen de 7'746,000 toneladas.

En lo referente al consumo de producto planos, se obtuvo un incremento en consumo del 17.9% debido a la dinámica de crecimiento en sus diversos sectores consumidores, como los productores de maquinaria y equipo, aparatos electrodomésticos, muebles y equipo de oficina, aparatos de medición y control, industria automotriz, etc.

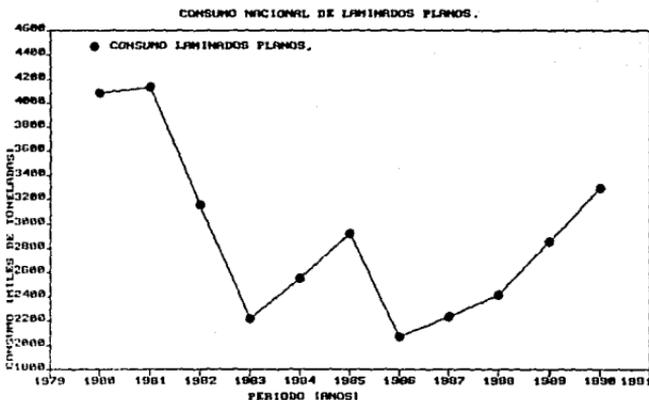


Figura 2.7. Consumo nacional de productos planos (1980-1989).
(Referencia 8)

2.4 MOTIVO DEL TRABAJO

Un parámetro siderúrgico que es empleado para evaluar el grado de industrialización de un país, es la chapa de acero, debido a que un país para industrializarse requiere y por ende produce productos siderúrgicos básicos como, varilla corrugada, perfiles estructurales, barras, alambón, etc.; los cuales son empleados para construir la infraestructura que sustenta la industrialización. Una vez alcanzado un cierto grado de industrialización, el consumo de productos siderúrgicos básicos disminuye, mientras que el consumo de productos planos aumenta, es decir ; la proporción de consumo de productos planos debe ser dominante (figura 2.8), la lámina se empleará en, carrocerías de automóviles, envases y embalajes, aparatos electrodomésticos, muebles y equipo de oficina, industria eléctrica, y señalización, entre otros usos. RELACION $(LW.PLANOS/LW.PLANOS + NO PLANOS)$.

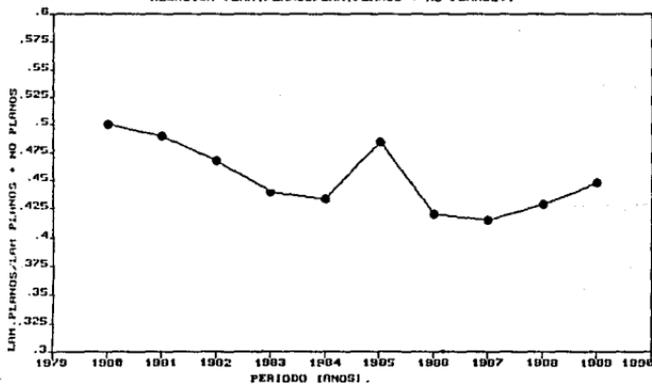


Figura 2.8. (Referencia 8)

Como se mencionó en páginas anteriores, la chapa de acero en el país representa el 40% del volúmen total de acero producido. sin embargo también se mencionó que este producto es el que presenta un mayor volúmen de importación, esto es debido a que el total de la lámina de alta embutición como la requerida por la industria automotriz se tiene que importar (figura 2.9), debido al bajo desarrollo tecnológico de la industria del área, con las consiguientes desventajas que acarrea.

Por tanto es necesario incrementar la producción y la calidad de la chapa de acero de origen nacional, para esto es conveniente hacer una revisión de los procesos de fabricación empleados en el país y la calidad del producto obtenido, comparando esto, con la calidad y procesos de países altamente 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.

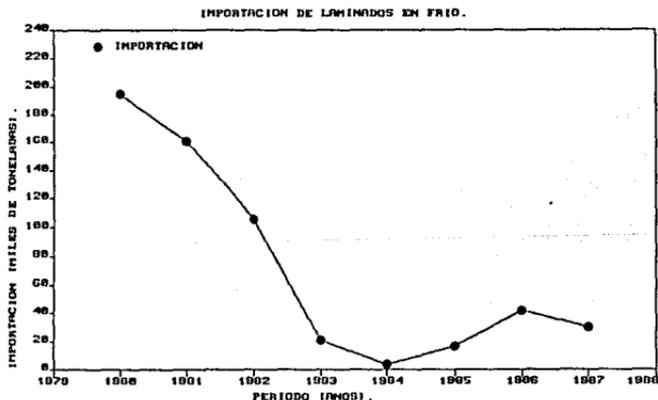


Figura 2.9. (Referencia 8)

2.5 METODOS DE PRODUCCION DE LA CHAPA DE ACERO PARA EMBUTIDO PROFUNDO

2.5.1 ANTECEDENTES

La industria automotriz se ha enfrentado durante la pasada década y en años recientes a tres problemas principales, el incremento en el costo de la energía, el aumento de la vida útil de los automóviles, y la seguridad de los ocupantes en los mismos.

Para resolver estos problemas la industria automotriz ha vuelto la vista a la industria siderúrgica de metales ferrosos.

Por su parte la industria siderúrgica ha respondido realizando grandes modificaciones, a los métodos de producción de la chapa de acero para uso automotriz y en general para embutido profundo, satisfaciendo así las exigencias de la industria automotriz, las cuales son cada día más y más cerradas. La calidad demandada no sólo se refiere a mejores propiedades mecánicas y a un control más cerrado de éstas 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 noventas.

La lámina de los noventas, presenta las siguientes características : alta calidad, bajo costo, alta resistencia mecánica y excelente ductilidad entre otras.

La alta resistencia del material permite el empleo de láminas

más delgadas disminuyendo con esto el peso del vehículo, y como consecuencia el consumo de combustible, conservando y aún elevando la seguridad de sus ocupantes.

Por su parte la excelente ductilidad permite el estampado profundo del material, dando lugar a las complejas partes requeridas para la carrocería de los automóviles modernos (diagrama a y b).

1985 LINCOLN MARK VII BODY

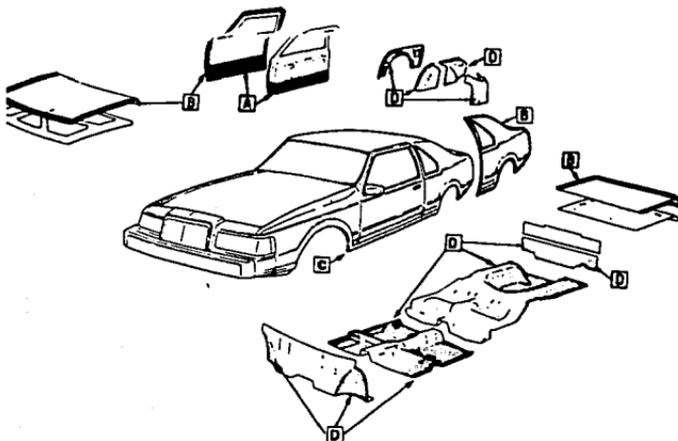


Diagrama a.

Esquema de fabricación automóvil Lincoln Mark VII

(Referencia 2)

CHRYSLER LeBARON GTS

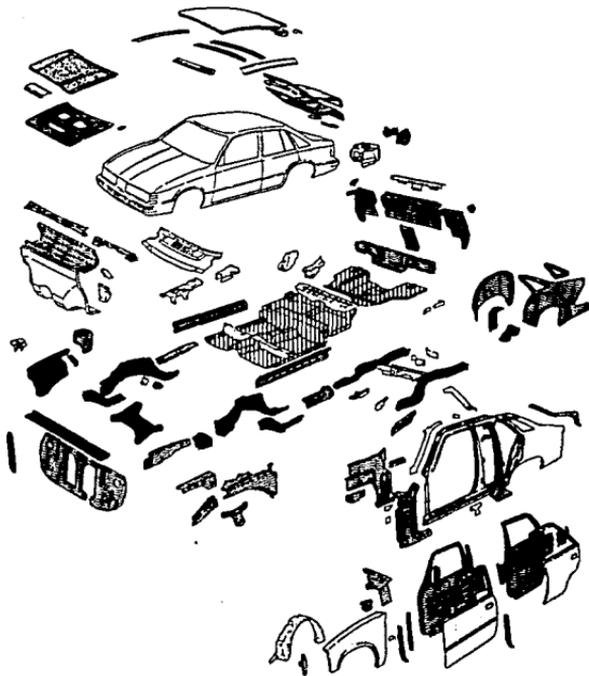


Diagrama b.

Esquema de fabricación automóvil CHRYSLER LeBARON.

(Referencia 2)

2.5.2 PRODUCCION MODERNA DE CHAPA DE ACERO
PARA EMBUTIDO PROFUNDO.

La producción moderna de chapa de acero para embutido profundo presenta algunas variantes en su proceso, con respecto a la producción tradicional de la chapa. Estas diferencias abarcan desde el control de proceso hasta el equipo mismo.

Cabe mencionar que la producción moderna de chapa de acero para embutido profundo, sólo es desarrollada y llevada a cabo por un número reducido de naciones, entre las que figuran, Estados Unidos de Norteamérica, Japón y algunos países miembros de la (C.E.E) Comunidad Económica Europea.

A manera de ejemplo se describirá el proceso de fabricación de la chapa de acero para embutido profundo, de la Siderúrgica Marítima -SIDMAR- compañía instalada cerca de la ciudad de Gante en Bélgica (Referencia 1).

SIDMAR es una empresa siderúrgica integrada, dedicada exclusivamente a la producción de productos planos (figura 3.10). SIDMAR produce únicamente productos planos con alto valor agregado, con las siguientes características: propiedades mecánicas uniformes a lo largo de los rollos de chapa delgada, acabado superficial limpio, perfecta planeidad, alta deformabilidad y excelente soldabilidad.

DIAGRAMA EUROPEO DE FABRICACION DE LA CHAPA DE ACERO

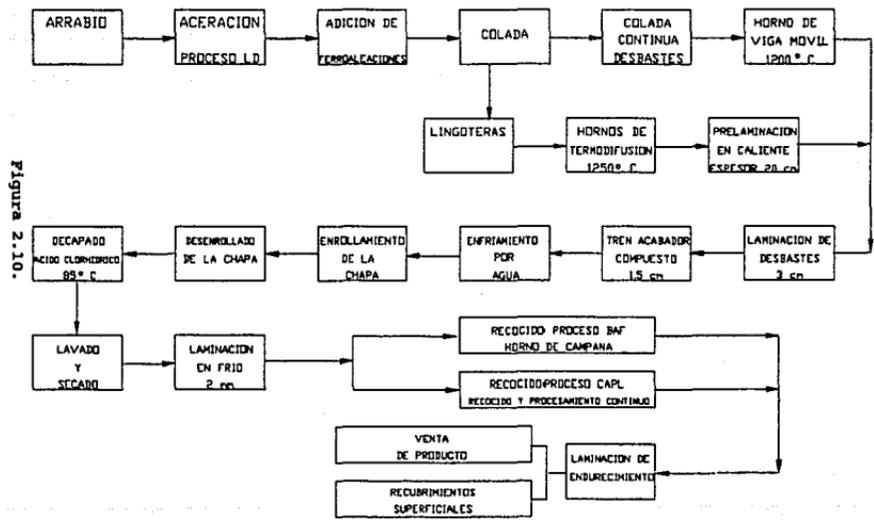


Figura 2.10.

PROCESO TECNOLÓGICO

En lo que sigue se dará una exposición del proceso tecnológico de la producción de chapa de acero para embutido profundo, mencionando algunos datos de importancia relevante.

Las modificaciones relevantes al proceso se obtienen en el proceso de aceración, ya que la obtención, enriquecimiento y paletización del mineral de hierro, permanecen prácticamente sin cambios.

ACERACION

En el proceso de aceración se emplea el procedimiento (BOF) Convertidor Básico de Oxígeno. En esta etapa el arrabio proveniente del alto horno y la chatarra adicionada, son transformados en acero por medio de la oxidación de las impurezas. En la fase de soplado de oxígeno, el contenido de carbono del acero líquido baja de 4.5% a 0.04%.

Antes de proceder a la colada del acero, se inyectan gases inertes (nitrógeno y argón) por el fondo del convertidor. El propósito de la inyección de los gases inertes es reducir el contenido de oxígeno en el acero. De esta manera es posible reducir el contenido en oxígeno 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 tratados en colada continua, debido a que estos tienen que ser aceros del tipo calmados. Además la agitación del acero líquido mejora la homogeneidad del acero sólido.

La inyección del gas inerte también permite la reducción del contenido de carbono, por ejemplo hasta 0.02%, con el mismo grado de oxidación de un acero al 0.04% sin inyección de gas inerte. Los bajos contenidos en carbono son importantes para la producción de aceros de alta deformabilidad.

Otro aspecto importante de la inyección de gas inerte, es la de aportar elementos para la formación de un compuesto denominado nitruro de aluminio, el cual, previene al acero contra la variación de propiedades mecánicas (envejecimiento) con el transcurso del tiempo. Este compuesto se forma a partir de la reacción del aluminio contenido en el acero y el nitrógeno inyectado.

La selección del gas a inyectar y la duración del tratamiento son parámetros de suma importancia en la producción. Debido a la complejidad de esta técnica, se controla todo el proceso por medio de computadoras.

COLADA

Cuando se termina el tratamiento del acero en el convertidor se vierte en el caldero y se procede a la adición de algunos productos en función de la calidad deseada en el acero. Todo el proceso de adición de productos está controlado por computadora. De tal manera que las adiciones se hacen en forma automática, controlados por la computadora que conoce la composición química del acero al salir del convertidor y la composición final deseada. La desoxidación final se realiza con alambre de aluminio.

Una vez lograda la composición química deseada del acero, se

procede a la colada. SIDMAR cuenta con dos métodos distintos: la colada en lingotes 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. 2.11). En función del grado de desoxidación del acero hay diferentes fenómenos durante la solidificación: el acero puede ser del tipo calmado o efervecente. Esta diferencia es de suma importancia para la calidad y el comportamiento mecánico del mismo.

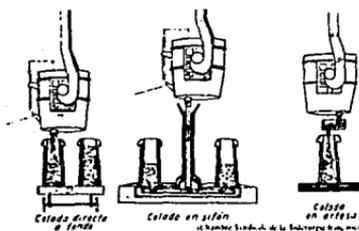


Figura 2.11. Colada en lingoteras.

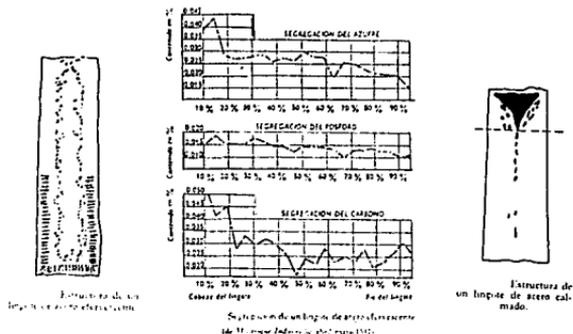
(Referencia 6)

La diferencia entre el acero calmado y el acero efervecente reside en el grado de desoxidación; el acero líquido de alto contenido en oxígeno tiene una solidificación efervecente debido a

la reacción de éste elemento con el carbono del acero, formandose burbujas de monóxido de carbono que hacen "hervir" al metal líquido.

Por su parte el acero calmado tiene un grado de desoxidación (generalmente con aluminio) bastante avanzado, de modo que la solidificación ocurre de manera tranquila, y sin la producción de monóxido de carbono. El acero calmado presenta 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. Sin embargo para lograr la misma pureza de acero, el oxígeno es eliminado por lavado con gas inerte, como se mencionó anteriormente.



Colada continua (fig 2.13). En el proceso de colada continua, 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 la cual debe estar previamente en posición de colada. Se vierte el acero en un distribuidor que puede contener 56 toneladas de metal líquido; el distribuidor cuenta con dos aberturas que desembocan en los moldes de colada. Estos moldes determinan las dimensiones de los ramales de acero que se producen. Debido a la capacidad del distribuidor, es posible cambiar la cuchara vacía por una llena sin interrumpir el proceso de colada

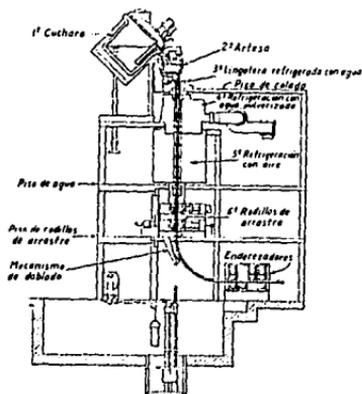


Figura 2.13. Proceso de colada continua.

(Referencia 6)

En los moldes de colada se produce la solidificación de una cáscara del material, por debajo de los moldes de colada se encuentran varios cilindros enfriados con agua que tienen como función el enfriamiento del ramal de acero y su desviación del sentido vertical hacia horizontal.

Las principales ventajas de la colada continua son, productividad y economía, las cuales están dadas respectivamente por, el carácter continuo del proceso y la eliminación de la caja preliminar de laminación en caliente, Sin embargo, el proceso de colada continua al hacer uso de acero calmado requiere de gran conocimiento y control del proceso.

PRECALENTAMIENTO

Para calentar los debastes que van a ser laminados en caliente se dispone de tres hornos empujadores (Fig. 2.14) convencionales de 33 m. de largo y de novedosos hornos de viga móvil (Fig 2.15) de 65 m. de largo. La función de éstos es el calentamiento desde la 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.

La ventaja de los hornos de viga móvil, con respecto a los hornos empujadores convencionales, estriba en, que los hornos de viga móvil garantizan mayor homogeneidad en la temperatura del planchón. así como una calidad superficial mejorada. Debido principalmente a que las guías enfriadas por agua, sobre las que

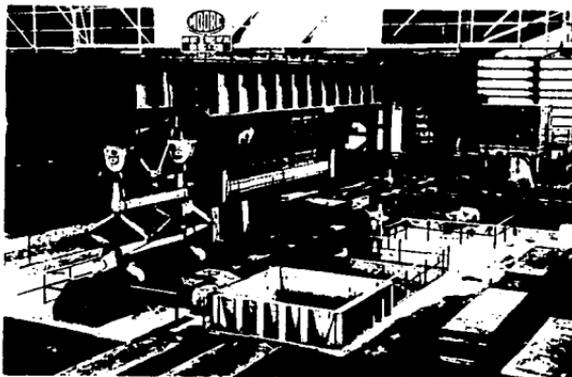


Figura 2.14. Horno empujador.

(Referencia 3)

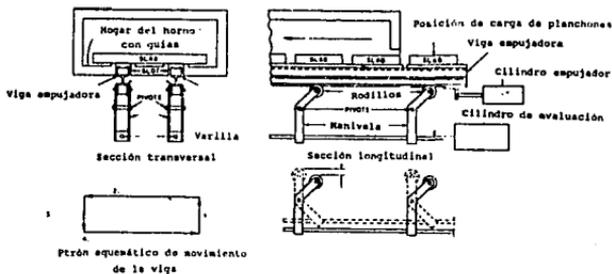


Figura 2.15. Horno de viga móvil.

(Referencia 3)

deslizan los planchones en los hornos empujadores, causan un enfriamiento local y por ende un cierto deterioro a la superficie, menoscabando la calidad de la chapa producida.

Por su parte en los hornos de viga móvil, los planchones son levantados de una posición a otra continuamente (Fig. 2.15) evitando así los problemas que involucra el horno empujador

LAMINACION EN CALIENTE

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

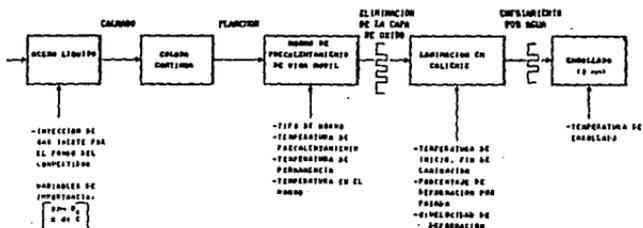


Figura 2.16

Al salir de los hornos empujadores, los planchones tienen una capa de óxido que se elimina por medio de un chorro de agua a alta presión (140 bar). A continuación los planchones pasan por el tren de desbaste, constituido por 3 cajas del tipo cuarto reversible, 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 en las cajas.

Las placas se dirigen inmediatamente hacia el tren acabador compuesto, constituido de 6 cajas tipo cuarto, donde después de cortarles punta y cola, así como también después de haberse eliminado la capa de óxido presente, la placa se reduce hasta un espesor final de chapa de 1.5 a 1.27 cm, según la aplicación.

El tratamiento de laminación es de suma importancia para la obtención de las propiedades mecánicas del material. Los parámetros de mayor efecto en la laminación en caliente son: la temperatura de precalentamiento, el tipo de horno empleado (según la calidad deseada), las temperaturas de inicio y fin de laminación (fin de laminación en zona γ ó en zona $\alpha+\gamma$), el porcentaje de deformación en cada paso de laminación, la velocidad de deformación, las cargas aplicadas y la temperatura de enrollamiento.

La temperatura de fin de laminación, es la temperatura que tiene la chapa al salir de la última caja de laminación.

La operación siguiente es normalmente el enrollado de la chapa caliente en rollos de un peso aproximadamente igual al del planchón original. Sin embargo, debido a las dimensiones y masa del rollo, el enfriamiento al aire libre de la chapa es muy lento,

lo que provoca reacciones de precipitación de los nitruros de aluminio, disminuyendo la resistencia al envejecimiento de la chapa y por ende su capacidad de embutido. En el caso de que el recocido posterior a la laminación en frío se efectúe en hornos del tipo continuo este fenómeno puede ser eliminado por la acción de un enfriamiento brusco (rápido) después del recocido. Mientras que para la chapa que será recocida en los hornos convencionales del tipo campana se tiene que evitar esta precipitación de nitruros en el enfriamiento posterior a la laminación en caliente, debido a que el ciclo térmico de estos hornos no favorece la disolución de los nitruros, de modo que resulta necesario enfriar la chapa antes de enrollarla.

Para el control de la temperatura en el proceso de laminación en caliente, se cuenta con pirómetros infrarojos situados en cada paso de las cajas, estos miden la temperatura, la cual es digitalizada y enviada a la computadora de control de proceso, y por último ésta realiza los ajustes necesarios.

LAMINACIÓN EN FRÍO

Antes de ser laminada en frío, la chapa es enviada a la instalación de decapado continuo, la cual trabaja con una solución de ácido clorhídrico a 85°C. En esta instalación la chapa es desenrollada y sumergida en la solución antes mencionada, para posteriormente ser lavada, secada y enrollada de nuevo, después de haber sido recubierta de una capa delgada de aceite.

La deformación en frío (Fig. 2.17) se realiza normalmente en cajas cuarto, aunque se han efectuado desarrollos para obtener

mayor control sobre el espesor y la calidad en general del material. Para esto se han desarrollado (Fig. 2.18) cajas de 5 rodillos (laminador quinto), cajas de 6 rodillos y actualizaciones de arreglos en racimo (Fig. 2.19). En particular SIDMAR cuenta con 2 trenes para laminación en frío, equipados con cajas cuarto.

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

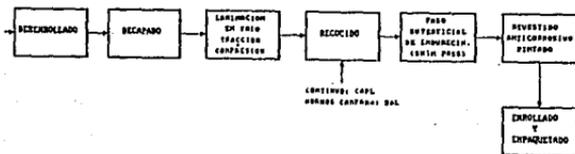


Figura 2.17.

En el primer tren de laminación en frío se reduce el espesor inicial de la chapa de 1.5 cm. a 6 ó 3 mm.; mientras que en el segundo tren se logran espesores finales de 2 a 0.2 mm.

Durante la laminación se aplica además de la carga compresiva, cargas de tracción por medio de una diferencia de velocidad entre las cajas consecutivas. La proporción entre compresión y tracción es muy importante para el comportamiento final del acero.

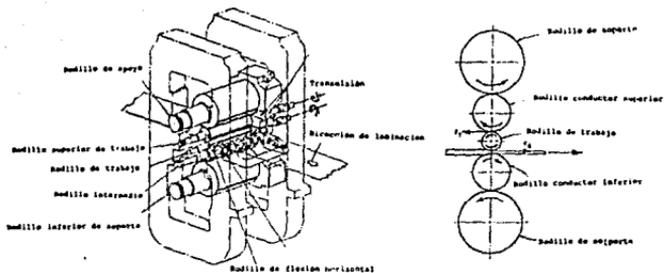


Figura 2.18
 Seccionamiento de un arreglo quinto o Taylor.
 (Referencia 3)

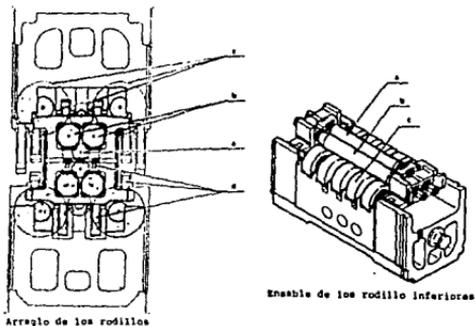


Figura 2.19
 Laminador en racimos.
 (Referencia 3)

En la deformación en frío de los aceros al carbono, los granos originales provenientes de la deformación en caliente, son altamente distorsionados y elongados en la dirección de la deformación. Otro efecto importante producido por la deformación en frío, es el desarrollo de intensas redes de dislocaciones en el acero, incrementando su esfuerzo tensil y su dureza, y por consecuencia disminuyendo su ductilidad. La variación del esfuerzo tensil con el porciento de trabajo en frío aplicado para aceros al carbono con diferentes contenidos de carbono se muestra en la figura 2.20. Mientras que los efectos del trabajo en frío sobre la ductilidad de los aceros al carbono se muestra en la figura 2.21.

De acuerdo al párrafo anterior, después de la laminación en frío la chapa presenta una dureza y resistencia mecánica muy alta, pero muy poca ductilidad. Por tanto resulta necesario someter a la chapa a un proceso de recocido durante el cual se logre la recristalización total de los granos, liberando los esfuerzos internos debidos a la red de dislocaciones, logrando así la ductilidad adecuada para la mayoría de las aplicaciones.

RECOCIDO

Para realizar el recocido SIDMAR dispone de dos procedimientos diferentes: el recocido en hornos de campana (figura 2.22 a y b) y la línea de recocido y procesamiento continuo (figura 2.22 a y b). Se habla entonces respectivamente de los procesos BAF (Batch Annealing Furnace) y CAPL (Continuous Annealing and Processing Line).

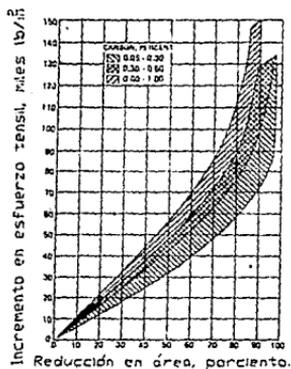


Figura 2.20

Efectos del trabajo en frío en el esfuerzo tensil.

(Referencia 3)

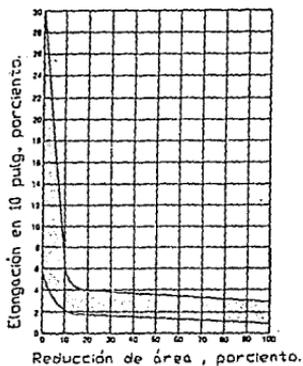


Figura 2.21

Efectos del trabajo en frío en la ductilidad.

(Referencia 3)

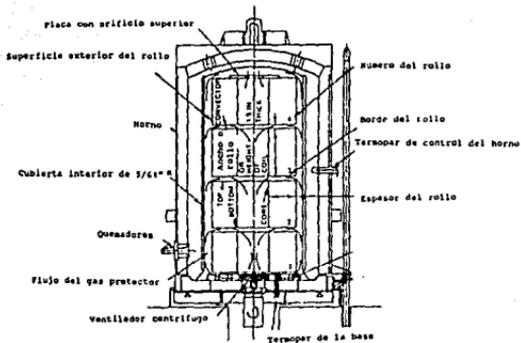


Figura 2.22a

Horno de recocido en lotes (horno campana).

(Referencia 3)

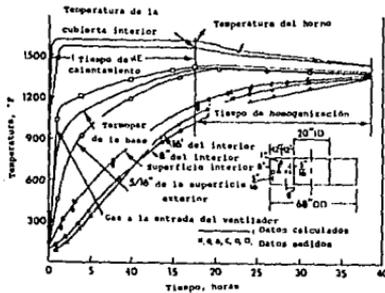


Figura 2.22b

Ciclo térmico típico para el recocido en hornos de campana.

(Referencia 3)

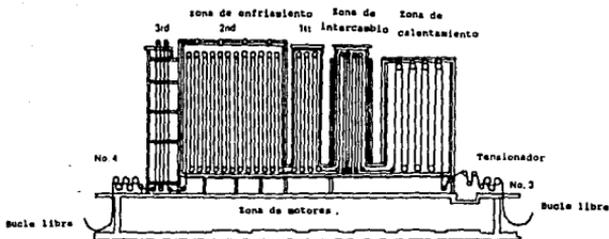


Figura 2.23a
 Horno de recocido continuo.
 (Referencia 3)

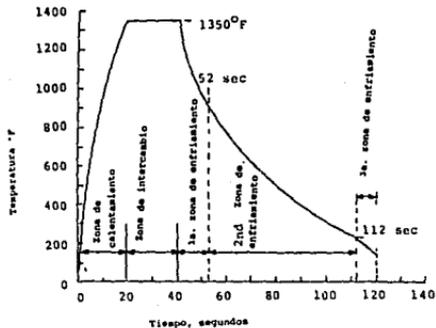


Figura 2.23b
 Ciclo térmico típico, para el recocido en horno continuo.
 (Referencia 3)

En el proceso BAF, se colocan 3 ó 4 rollos de chapa en un horno de campana (figura 2.22a) que se calienta hasta la temperatura adecuada para el recocido. Pasado el tiempo del tratamiento se deja enfriar el horno. El proceso es muy simple pero muy lento. El principal inconveniente de este proceso, es que la chapa no experimenta el mismo ciclo térmico en la zona externa y media de los rollos, debido a que ésta se introduce al horno campana en rollos, provocando así una recristalización parcial del material en la parte media de los rollos, afectando la calidad y propiedades finales de la chapa.

La figura 2.24 muestra un diagrama tiempo-temperatura elaborado en SIDMAR para el control del recocido de chapa, en el proceso BAF.

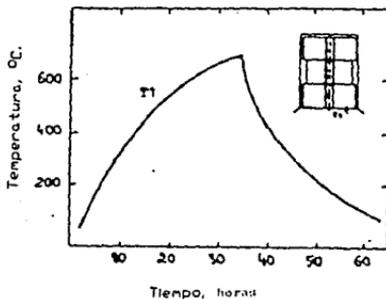


Figura 2.24

Diagrama tiempo-temperatura para proceso BAF (SIDMAR).

(Referencia 2)

En el proceso de recocido CAPL (Fig. 2.23a) la chapa de acero se procesa de manera continua en un horno muy grande, con diferentes zonas de calentamiento y enfriamiento.

La figura 2.25 muestra un diagrama tiempo-temperatura elaborado en SIDMAR, para optimizar las condiciones de enfriamiento en el horno de procesamiento continuo, esto se logra manteniendo el acero durante 4 minutos a una temperatura de sobre-envejecimiento, es decir, a 400°C para disolver el carbono y el nitrógeno sobresaturado, dejándolos precipitar.

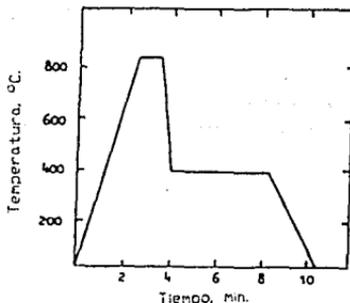


Figura 2.25

Diagrama tiempo-temperatura para proceso CAPL (SIDMAR).

(Referencia 2)

Durante el tratamiento térmico de recocido se sucede la recrystalización, la cual va acompañada de los fenómenos de nucleación y crecimiento de nuevos granos. Desarrollando la

coalescencia de subgranos en la cercanía de los límites de grano. La fuerza motriz que provoca esta coalescencia es la reducción de la energía interna (liberación de esfuerzos internos) por medio de la reducción de dislocaciones y sus energías de deformación elástica.

De acuerdo a lo anterior, el tratamiento térmico que experimenta la chapa en los dos tipos de horno es muy diferente, y por consecuencia las propiedades mecánicas obtenidas, también lo son, sin embargo, las propiedades más aptas para el embutido profundo se logran en la línea de recocido y procesamiento continuo, ya que éste proceso elimina los inconvenientes de los hornos convencionales de campana.

SKIN PASS (PASADA DE ENDURECIMIENTO)

Las chapas que salen de los hornos de recocido no son aptas para algunos usos, por tener una planeidad no uniforme, además de ser sensibles al deterioro por envejecimiento

Es por esto que las chapas al salir de los hornos de recocido son sometidas a una ligera laminación de acabado o calibración, proporcionándole planeidad, rugosidad controlada y eliminando a la vez la aparición de las líneas de Hartman, (deformación no homogénea), que provoca inconvenientes durante el embutido

La rugosidad producida en esta ligera deformación es muy importante para el proceso de embutido, ya que juega un papel primordial en la lubricación del proceso. El proceso convencional para dar rugosidad a la chapa, es tratar la superficie de los cilindros de la caja de acabado por granallado, es decir, por

chorreado con arena. Sin embargo, la rugosidad obtenida es poco reproducible y difícilmente descriptible.

Es por esto que SIDMAR desarrollo un sistema revolucionario basado en el uso de rayo laser (Fig. 2.26) para producir una rugosidad muy reproducible sobre los cilindros de laminación de la caja de acabado.

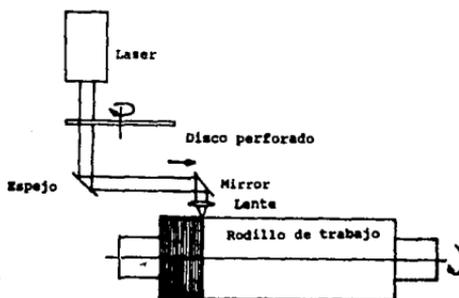


Figura 2.26
Generación del acabado superficial de un cilindro de trabajo, mediante el haz de rayo laser.
(Referencia 3)

Durante el embutido, las chapas que presentan una superficie demasiado rugosa tienden a agarrarse a los útiles de embutir, provocando el rompimiento del material, mientras que las de superficie muy lisa no mantienen el aceite de lubricación, además

de no ser aptas para procesos de pintura.

RECUBRIMIENTOS SUPERFICIALES

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

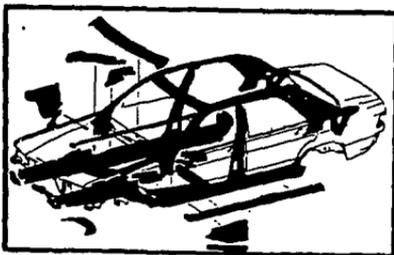


Figura 2.27

Fabricación de automóviles Mercedes-Benz, empleando chapa de acero producida por SIDMAR.

(Referencia 2)

A manera de ejemplo de la aplicación de la chapa de acero, producida con alta tecnología, se muestra un esquema de fabricación de automóviles Mercedes-Benz (Fig. 2.27), empleando

chapa de acero desarrollada y producida en SIDMAR. Donde las partes en tono oscuro son las que proporcionan la seguridad a los ocupantes, en caso de colisiones. Para la fabricación de estas partes SIDMAR desarrolló un nuevo tipo de acero, el cual se denominó "DHSS" acero de alta resistencia y buena deformabilidad (Drawing High Strength Steel) con el cual se fabrica la chapa que constituye dichas partes.

2.5.3 METODOS DE PRODUCCION DE CHAPA EN MEXICO

La chapa de acero es producida en México por dos compañías Hojalata y Lámina S.A. (HyLSA), y Altos Hornos de México S.A. (AHMSA). Esta última ofrece la chapa en 3 categorías; calidad comercial, calidad troquelado profundo, calidad embutido profundo, en esta categoría la compañía ofrece chapa producida con acero calado, con la siguiente composición química: (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%
Azufre	-	0.015% máximo

dicho acero es producido por colada continua, aún cuando presenta restricciones en cuanto a composición química deja mucho que desear tanto en comportamiento mecánico como en el control de dimensiones y rugosidad, todo esto debido a los procesos de fabricación seguidos, así como, a la falta de adecuados sistemas de control y calidad en cada etapa del proceso.

En la figura 2.28. se muestra el método de fabricación de la empresa siderúrgica AHMSA. En él se puede observar que el

PROCESO DE FABRICACION DE AHMSA PARA CHAPA DE ACERO

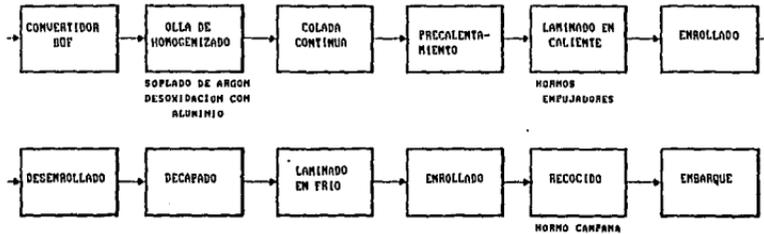
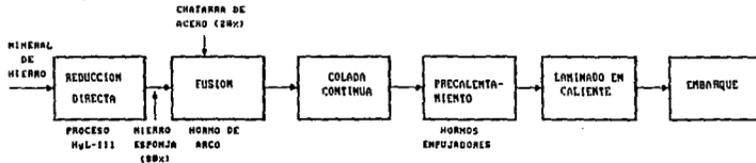


Diagrama 2.28

PROCESO DE FABRICACION SICARTSA II
PARA PLACA DE ACERO

Diagrama 2.29



precalentamiento de los planchones se efectúa en hornos empujadores, con la consiguiente heterogeneidad en propiedades que esto ocasiona al material, así como, también se puede observar que el recocido de la chapa se realiza en hornos de campana, dando como resultado un acero con propiedades mecánicas deficientes a la vez de heterogéneas.

La gran cantidad de inclusiones en el material, es indicio de un mal tratamiento de desoxidación con aluminio, durante el cual, se generan cantidades apreciables de inclusiones de alúmina en el acero, menoscabando su capacidad de embutido, ya que actúan como agentes concentradores para el crecimiento de grietas.

La gran variación en rugosidad es debida, a que el acabado de los rodillos de laminación superficial (skin pass), es realizado por granallado (chorreado con arena). La rugosidad así obtenida es poco reproducible y difícilmente descriptible.

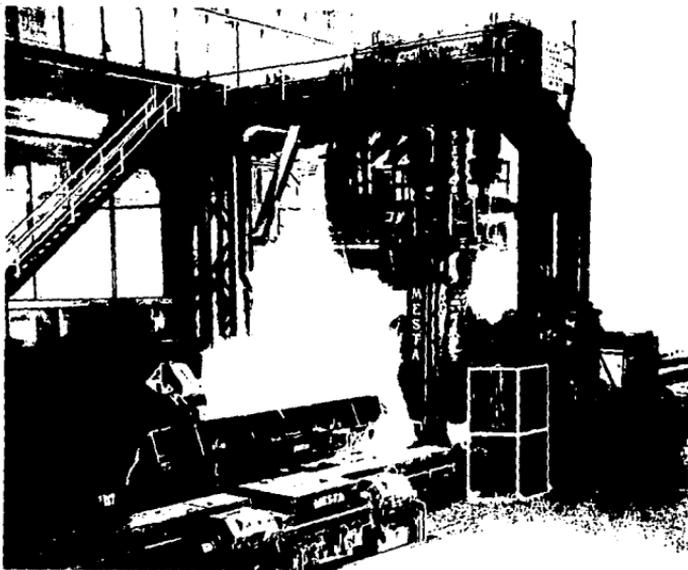
Por su parte la segunda etapa de SICARTSA (Fig. 2.29) se evocará a la producción de placa de 6 a 75 mm. con anchos hasta de 4.1 m., ya que sólo cuenta con instalaciones para laminación en caliente, enfocando su producción a la fabricación de tubo con costura, barcos y estructuras pesadas en general.

Es común en México el control del material básicamente a través de su composición química. El resultado es una chapa de acero, que aunque está de acuerdo a las especificaciones de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) no es empleada por las empresas del país, que cuentan con el proceso de embutido profundo, debido a que la chapa esta tecnológicamente atrasada 10 ó 15 años, con

respecto a la producida para el mismo fin en EUA, Europa o Japón.

A la fecha con estos antecedentes, así como, las condiciones económicas, que se preveen como consecuencia de la firma del tratado de libre comercio, EUA-Canadá-México, resulta necesario que la industria siderúrgica nacional modifique sus procesos de fabricación, tecnificandolos; ya no para que sus productos tengan aceptación en las armadoras del país, sino simplemente para sobrevivir a la competencia internacional.

CAPITULO III
ANALISIS DEL PROCESO DE LAMINACION



CAJA LAMINADORA DE PLANCHONES.

(Referencia 3)

3.1 FUERZAS Y RELACIONES GEOMETRICAS EN LAMINACION

La laminación es el proceso consistente en deformar plásticamente los metales haciéndolos pasar entre cilindros. Al deformar los metales pasándolos entre los cilindros se somete el material a intensas fuerzas de compresión, por el efecto de aplastamiento de los cilindros y a fuerzas superficiales de cizallamiento originadas por la fricción entre los cilindros y el metal. Las fuerzas de fricción son las que producen el estirado del metal.

Analizando la figura 3.1, se observa que una chapa de metal de espesor h_0 entra en contacto con los cilindros en el plano XX con una velocidad v_0 . Pasa a través de la separación entre cilindros y pierde el contacto con ellos en el plano de salida YY, con un espesor reducido h_f .

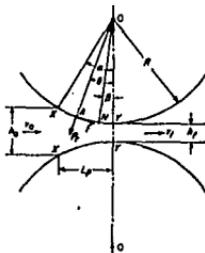


Figura 3.1. Fuerzas actuando durante la laminación.

Realizando un balance, sabiendo que el flujo de entrada es igual al flujo de salida; es decir, que debe de pasar igual volumen de metal por unidad de tiempo através de cualquier plano normal a la chapa. Tenemos.

$$b h v = b_o h_o v_o = b_f h_f v_f \quad \text{-----(3.1)}$$

donde:

- b = ancho de la chapa,
- h = espesor de la chapa,
- v = velocidad de la chapa,
- o = condición inicial (entrada a los cilindros),
- f = condición final (salida de los cilindros).

Adicionando la consideración de que no existe aumento de ancho durante la laminación, debido a que la compresión vertical del metal se traduce en alargamiento en la dirección de laminación. Por lo que la ecuación (3.1) se puede reescribir como:

$$h v = h_o v_o = h_f v_f \quad \text{-----(3.2)}$$

La consideración anterior es valida dado que, el ancho del metal permanece constante, si el metal está en libertad de extenderse sin restricción en ambas direcciones, tanto en dirección longitudinal como en dirección transversal, cuando disminuye el espesor, la deformación obtenida de esta manera se considera homogénea. Sin embargo durante el laminado existen dos restricciones que evitan la libre expansión del metal en la dirección transversal. Existe la fuerza de fricción entre el metal y los cilindros laminadores, que tiende a detener el deslizamiento axial a lo largo de ellos, así como, el ancho del metal antes del laminado. Cuando se consideran estas dos restricciones la deformación así obtenida se considera deformación plana o biaxial. para determinar cuando se está aplicando una u otra deformación,

se tienen las siguientes relaciones:

Si $b/L_p \leq 4$ entonces se considera deformación homogénea.

Si $b/L_p \geq 5$ entonces se considera deformación plana.

donde: b = ancho del metal,

L_p = longitud proyectada del arco de contacto de los cilindros laminadores (ver ecuación 3.4).

Analizando la ecuación (3.2) anterior, se deduce que la velocidad de salida v_f debe ser mayor que la de entrada v_o , creciendo progresivamente desde la entrada a la salida. La figura 3.2 muestra cómo varía la velocidad en la garganta de los cilindros. En la sección comprendida entre el plano de entrada XX y el punto N, los cilindros se mueven más rápido que el metal, tendiendo a arrastrar a éste hacia la garganta. En la sección comprendida entre el punto N y el plano de salida YY, los cilindros se mueven más lentamente que el metal, tendiendo a detenerlo. Existe solamente un punto N, donde los cilindros y el metal se mueven a la misma velocidad, ésta es el punto neutral o punto de no deslizamiento. La fuerza de fricción entre los cilindros y el metal debe, por tanto, ejercerse hacia el punto neutral.

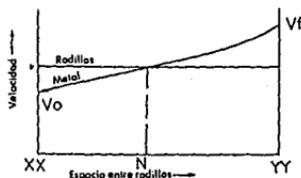


Figura 3.2. Variación de velocidad en la garganta de los cilindros.

Recordando la figura 3.1, se observa que en cualquier punto de la superficie de contacto, por ejemplo, el punto A representado en la figura 3.1, actúan dos fuerzas sobre el metal, una en dirección del radio, P_r , y otra tangencial de fricción, F . La componente vertical de P_r es conocida como la carga de laminado P . La carga de laminado es la fuerza con que los cilindros presionan al metal. Esta fuerza es también igual a la fuerza ejercida por el metal sobre los rodillos, la cual crea la separación entre estos, ésta fuerza es frecuentemente llamada fuerza de separación. La presión específica de laminado p es la carga de laminado dividida por el ancho de la chapa b y la longitud proyectada de el arco de contacto l_p . Por tanto la presión específica de laminado queda expresada como:

$$p = \frac{P}{b l_p} \quad \text{----- (3.3)}$$

donde:

p = presión específica de laminación,

$P = P_r \cos \alpha$, (ver figura 3.3)

b = ancho de la chapa,

l_p = longitud proyectada de el arco de contacto.

La longitud proyectada del arco de contacto, se obtiene de las relaciones geométricas de la figura 3.3. Donde el arco de contacto es aproximadamente l_p .

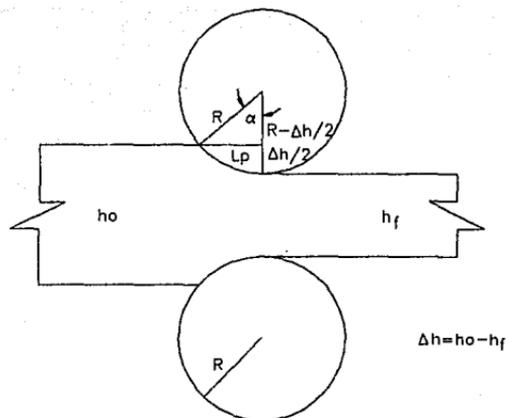


Figura 3.3. Proyección del arco de contacto.

De la figura 3.3 se obtiene la siguiente relación:

$$R^2 = L_p^2 + (R - \Delta h/2)^2$$

$$R^2 = L_p^2 + R^2 - 2R\Delta h/2 + \Delta h^2/4$$

Donde generalmente Δh es pequeño y mucho menor que R , por lo que Δh^2 puede ser despreciado, de ahí que.

$$L_p = (R\Delta h)^{1/2} \quad \text{----- (3.4)}$$

donde:

L_p = longitud proyectada del arco de contacto,

R = radio de los cilindros de laminación,

Δh = diferencia de espesores = $h_o - h_f$.

La distribución de la presión de laminado a lo largo del arco de contacto se indica en la figura 3.4. La curva de presión muestra un mínimo en XX, un máximo en el punto neutro N, y un mínimo nuevamente en YY. El área bajo la curva es proporcional a la carga de laminación. La forma del contorno de la curva de

distribución de presiones, determina el resultado de la carga de laminación con respecto al centro de los cilindros laminadores, es decir, determina el par y la potencia requeridos para producir la reducción de la chapa. El área sombreada en la figura 3.4 representa la fuerza requerida para sobrepasar las fuerzas de fricción producidas entre los cilindros y el metal, mientras que el área bajo la línea punteada XX-YY representa la fuerza requerida para deformar el metal en planos homogéneos de compresión.

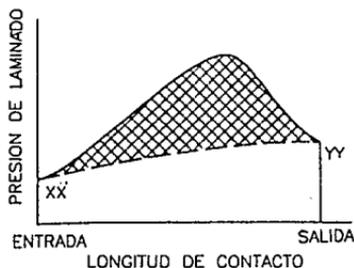


Figura 3.4. Distribución de la presión de laminado a lo largo de la longitud de contacto.

La fricción entre el cilindro y el metal es muy importante en la laminación. No solo porque sea la fricción la que obliga al metal a entrar al espacio entre cilindros, sino porque también afecta la magnitud y distribución de la presión del cilindro.

El ángulo α mostrado en las figuras 3.1 y 3.3, es formado por el plano de entrada y el plano que contiene los centros de rotación de los cilindros, este ángulo es llamado ángulo de mordedura o ángulo de contacto. Obteniendo las componentes de las fuerzas P_r y F en función del ángulo α (ángulo de mordedura), como

se muestra en la figura 3.5.

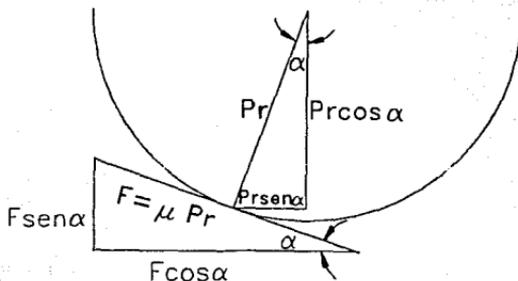


Figura 3.5.

La fuerza en dirección radial P_r tiene una componente horizontal ($P_r \cos \alpha$) que tiende a rechazar al metal e impedir que entre a los cilindros, mientras que la fuerza tangencial de fricción F tiene una componente horizontal ($F \cos \alpha$) que arrastra al metal hacia dentro. El que el metal entre y pase a través de los cilindros dependerá de los valores de las componentes horizontales de las 2 fuerzas. Por tanto para asegurar que el metal pase a través de los cilindros se debe de cumplir que, la fuerza que provoca la entrada del metal a los rodillos sea mayor y en el límite igual a la que se opone al paso de éste; expresándolo matemáticamente:

$$F \cos \alpha = P_r \sin \alpha$$

$$F/P_r = \sin \alpha / \cos \alpha = \tan \alpha$$

donde: sabemos que $F = \mu P_r$

por tanto $\mu P_r / P_r = \tan \alpha$

$$\mu = \tan \alpha \quad \text{-----} (3.5)$$

donde:

μ = coeficiente de fricción,

$\tan \alpha$ = tangente del ángulo de contacto.

La pieza de trabajo no puede ser arrastrada dentro de los cilindros cuando la tangente de el ángulo de contacto excede el coeficiente de fricción. En la laminación en caliente donde se requieren grandes reducciones en pequeños periodos de tiempo, los cilindros cuentan con estrias a lo largo de los ejes para incrementar el valor efectivo de el coeficiente de fricción.

Existen otros métodos para determinar el coeficiente de fricción, sin embargo, los valores obtenidos por estos métodos son algo más bajos que los determinados por el método anterior.

I.-) Método para determinar el coeficiente de fricción basado en la carga y par de laminación. Si se aplica una tracción hacia atrás, progresivamente creciente, hasta desplazar el punto neutro a la salida de los cilindros, la fricción sólo actúa en una dirección. Manteniendo constante la velocidad de los cilindros y la reducción de espesor, el coeficiente de fricción μ se puede calcular, a partir de la carga total P y del par M_t , los cuales quedan definidos por unidad de ancho de la siguiente manera:

$$P/b = \int_0^{L_p} p \, dx$$

$$M_t = \int_0^{L_p} (\mu p \, dx) R = \mu R \int_0^{L_p} p \, dx = \mu R (P/b)$$

por tanto
$$\mu = \frac{M_t}{PR} \quad \text{-----} (3.6)$$

II.-) Método para determinar el coeficiente de fricción basado en determinar el deslizamiento hacia adelante S_f . Desarrollando una tensión hacia atrás en el laminado, el punto neutro (de no deslizamiento) se desplaza a la salida del plano YY que contiene el eje de los cilindros, donde, la velocidad de la chapa v_f se hace igual a la velocidad de la superficie de los cilindros $v_r = R\omega$.

$$S_f = (v_f - v_r)/v_r \quad \text{----- (3.7)}$$

donde:

v_f = velocidad del metal que abandona los cilindros,
 v_r = velocidad lineal de la superficie de los cilindros.

La fricción elevada da lugar a grandes cargas de laminación, aumenta el ensanchamiento lateral y el agrietamiento de los bordes. Si en cambio la fricción es muy baja, como ocurre en la laminación en frío con cilindros pulimentados y buena lubricación, puede resultar difícil alimentar los laminadores con el material por la falta de mordido.

La mordedura de los cilindros sobre el metal depende de dos factores, el coeficiente de fricción μ , y el radio de los rodillos R. Según la ecuación (3.5), la mordedura máxima posible, o jalón máximo posible, se puede determinar geoméricamente por:

$$\mu_{\text{máx}} = \tan \alpha_{\text{máx}} = Lp/(R-\Delta h/2) = (R\mu h)^{1/2}/(R-\Delta h/2)$$

donde: $\Delta h = h_0 - h_f$

y $R \gg \Delta h$

por lo que podemos despreciar $\Delta h/2$, sin mucho error:

$$\Delta h = \mu_{\max}^2 (R)$$

donde: Δh esta determinado por el ángulo de mordedura máximo, por lo que podemos concluir:

$$\Delta h_{\max} = \mu_{\max}^2 R \quad \text{-----(3.8)}$$

De la ecuación (3.8) tenemos, que la máxima reducción teórica posible está limitada por el coeficiente de fricción y el radio de los cilindros, razón que justifica los grandes diámetros y las superficies ásperas de estos en los trenes de desbaste.

Otro de los parámetros más importantes y de más fácil determinación es la reducción porcentual, la cual está expresada de la siguiente manera:

$$(\%) r = ((h_0 - h_f) / h_f) * 100 \quad \text{-----(3.9)}$$

Esta expresión nos permite calcular el porcentaje de reducción impuesto al material. Al emplear esta expresión, se debe tener cuidado de no exceder el valor máximo teórico de reducción Δh_{\max} expresado en la ecuación (3.8); debido a que el porcentaje máximo de reducción ($\%r$) de una caja de laminación está determinado por el radio de los cilindros y el coeficiente de fricción.

3.2 ANALISIS TEORICO DE LA CARGA DE LAMINADO

3.2.1 CARGAS DE LAMINADO

A la fecha existen diversos métodos tanto analíticos, empíricos y experimentales a partir de los cuales se puede evaluar de forma aproximada la carga de laminación. La exactitud de estos estará delimitada por las características del proceso en particular que se analice.

La ecuación más sencilla se deducirá considerando aplastamiento libre del material, es decir, se realizan las siguientes consideraciones:

I.-) El arco de contacto de los cilindros con el material es aproximadamente igual a L_p , longitud lineal proyectada del arco de contacto.

II.-) El ancho del material permanece constante cuando pasa a través del espacio entre los rodillos.

III.-) El esfuerzo de cedencia del metal permanece constante durante el proceso de laminado.

IV.-) Se considera un 20% adicional por fricción.

Carga de laminación = Esfuerzo de cedencia * Area

$$P = 1.2 * E * A$$

donde:

P = carga de laminación,

E = esfuerzo de cedencia aplicado para deformar plásticamente al metal entre los cilindros = σ_0

$$A = \text{Área de contacto} = b * l_p$$

$$P = 1.2 \sigma_o b l_p \quad \text{-----(3.10)}$$

Donde el esfuerzo aplicado para deformar plásticamente al metal entre los cilindros, es el esfuerzo de cedencia para una condición plana de deformación.

$$\sigma_o = (2/\sqrt{3}) * \sigma_y \quad \text{-----(3.11)}$$

donde: σ_y = esfuerzo de cedencia

Una segunda aproximación, para el cálculo de la carga de laminación, se logra al realizar una analogía de laminación con forja, teniendo presente, que ambos procesos presentan una loma de fricción, como se muestra en la figura 3.6.

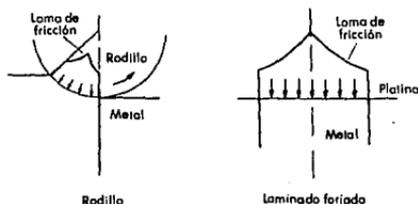


Figura 3.6. Loma de fricción en laminado y forja.

Sin embargo, se debe hacer notar que, existen dos diferencias muy grandes relativas a las lomas de fricción, La primera diferencia consiste en que, la presión máxima en el forjado siempre ocurre en la línea de centro de la platina, mientras que en el laminado ocurre en el punto neutral, que puede estar localizado en cualquier punto del arco de contacto, dependiendo de la situación de esfuerzo. La segunda diferencia consiste en que,

el valor de la presión en los dos extremos del metal en el forjado es la misma e igual a σ_0 . En el laminado el metal se deforma a medida que pasa de la entrada a la salida y el esfuerzo de cedencia aumenta. Considerando lo anterior y realizando la analogía se llega a expresiones como:

$$P = \bar{\sigma}_0 b L_p [1 + L_p/4\bar{h}] \quad \text{-----(3.12)}$$

La expresión (3.12), es aplicable para condiciones de no deslizamiento y sin fricción.

$$P = \bar{\sigma}_0 b L_p [1 + \mu L_p/2\bar{h}] \quad \text{-----(3.13)}$$

La expresión (3.13) es aplicable para condiciones de fricción con deslizamiento.

donde: $\bar{\sigma}_0$ = esfuerzo de cedencia

$$\bar{h} = \text{espesor promedio} = (h_0 + h_f)/2$$

A partir del mismo análisis (similar a (3.12)) se llega a:

$$P = \bar{\sigma}_0 b L_p/Q [e^Q - 1] \quad \text{-----(3.14)}$$

donde: $Q = \mu L_p/h$

Por el método de Ekelund, se llega a una expresión arbitraria basada en un simplificado análisis de esfuerzos.

$$P = b L_p [\sigma_0 + (2\xi \sqrt{\Delta h/R}) / (h_0 + h_f)] [1 + (1.6\mu L_p - 1.2\Delta h_0) / (h_0 + h_f)]$$

Esta expresión en su forma más moderna y simplificada queda:

$$P = \sigma_0 b L_p' [1 + (1.6\mu L_p' - 1.2\Delta h) / (h_0 + h_f)] \quad \text{-----(3.15)}$$

donde:

$$L_p' = \sqrt{R'\Delta h}$$

R' = Radio deformado por efecto de la presión de los cilindros sobre el metal. (ver tema: Efectos de la carga de laminado).

ξ = coeficiente de plasticidad $\xi = 0.01(14 - 0.01T)^\circ C$

El coeficiente de fricción se puede evaluar aproximadamente con

las siguientes expresiones:

$$\mu = 1.05 - 0.0005 T \text{ (}^{\circ}\text{C)} \text{ para cilindros de fundición gris.}$$

$$\mu = 0.8 (1.05 - 0.0005 T) \text{ (}^{\circ}\text{C)} \text{ para cilindros de acero.}$$

Los resultados obtenidos por la ecuación (3.15) son muy aproximados a los obtenidos por ecuaciones desarrolladas a partir de teorías más complejas y exactas. Por lo que se recomienda su empleo para la práctica industrial cuando los factores tales como el coeficiente de fricción no son bien conocidos.

3.2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA CARGA DE LAMINADO

Lo valores de μ y R afectan el ángulo máximo de mordedura y por consecuencia la reducción máxima posible en una pasada. La carga de laminado es directamente proporcional al esfuerzo de cedencia σ_y al ancho de la chapa b , y a la longitud proyectada del arco de contacto l_p . Mientras que mayor sea la reducción, mayor será la carga de laminado, es decir, la carga de laminado es directamente proporcional a $(\Delta h)^{1/2}$. De igual forma, mientras mayor sea el diámetro de los cilindros laminadores, mayor será la carga de laminado, es decir, la carga es directamente proporcional a $(R)^{1/2}$. A mayor valor de μ , mayor carga de laminado. Sin embargo está inversamente relacionada a h_0 , de manera que mientras más delgado sea el calibre o espesor original, mayor será la carga de laminado. Estos factores afectan grandemente el diseño de las cajas de laminación, dado que una carga excesivamente alta puede tener un efecto adverso en el comportamiento de la caja de laminación. Los metales que demandan altas cargas de laminado son los de alto esfuerzo de cedencia y calibre delgado; éste es el caso particular en el laminado de hojas o chapas. De lo analizado anteriormente, se puede concluir que los parámetros que pueden alterarse en una etapa de diseño son, el coeficiente de fricción μ , y el radio de los cilindros R .

La carga de laminado puede minimizarse haciendo el radio tan pequeño como sea posible y la superficie de los cilindros tan tersa como se pueda. Es por esto, que el laminado de hojas delgadas se realiza con cilindros de trabajo de pequeño radio

soportados por grandes cilindros de apoyo para prevenir que se flexionen. Aun en tales caja de laminación, las cargas aplicadas resultan ser excesivas, es por esto, que se recurre al uso de dispositivos que apliquen tensión hacia adelante, y hacia atrás en el metal que está siendo laminado.

La figura 3.7 muestra la condición de esfuerzos para un elemento de metal pasando en el espacio entre cilindros.

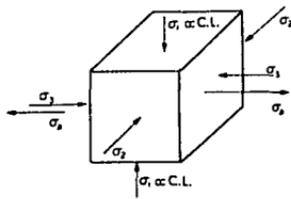


Figura 3.7. Diagrama de esfuerzos para un elemento de metal en el espacio entre cilindros.

El esfuerzo mayor aplicado, σ_1 induce esfuerzos compresivos de fricción σ_2 y σ_3 las condiciones de cedencia, de acuerdo al criterio de cedencia de Tresca, están dadas por:

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_3 &= \sigma_0 \\ \text{por lo que} \quad \sigma_1 &= \sigma_0 + \sigma_3 \quad \text{-----(3.16)} \\ \text{donde} \quad \sigma_0 &= (2/\sqrt{3})\sigma_y \end{aligned}$$

σ_y = esfuerzo de cedencia.

Ahora si se aplica tensión σ_b a la parte posterior del metal que está entrando al espacio entre los rodillos, las condiciones de cedencia se transforman en:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_3 - \sigma_b \quad \text{-----(3.17)}$$

Debe hacerse notar que σ_3 actúa en dirección contraria a $\sigma_3 y$, por tanto disminuye el valor de la carga de laminado. La tensión aplicada sobre el metal se logra empleando bobinas desenrolladoras y enrolladoras en los extremos de la caja de laminación. En los trenes de laminación la tensión se logra desarrollando una diferencia de velocidad en los cilindros de las cajas de laminación, anterior y posterior a la caja deseada, como se muestra en al figura 3.8.

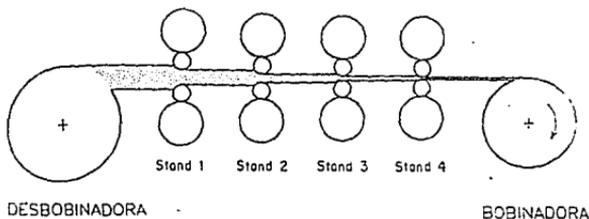


Figura 3.8. Tensión hacia atrás y adelante, aplicadas por medio de bobinas enrolladoras-desenrolladoras.

Otra ventaja que resulta de mantener la chapa en tensión es que se mejora la planeidad de la chapa y la uniformidad de espesor. La carga de laminación, P_t , en el caso de aplicar tensión se puede calcular por la siguiente ecuación:

$$P_t = P (1 - [(\sigma_3 + \sigma_1 \beta) / (\bar{\sigma}_0' \epsilon)]) \quad \text{----- (3.18)}$$

donde:

P = carga de laminación para la misma reducción, sin tensión hacia adelante ni hacia atrás,

σ_3 = esfuerzo longitudinal hacia atrás,

- σ_r = esfuerzo longitudinal hacia adelante,
 σ'_0 = valor medio del límite elástico en deformación plana,
 α = ángulo de contacto (mordedura),
 β = ángulo de no deslizamiento.

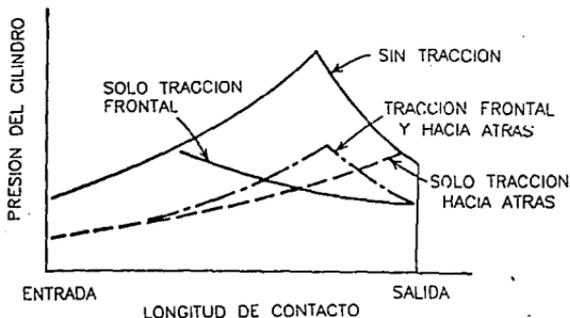


Figura 3.9. Efectos de la tensión sobre la distribución de la carga de laminado a lo largo de la longitud de contacto.

La figura 3.9 muestra el efecto de aplicar tensión a la chapa sobre la presión de laminación. El aplicar tensión hacia adelante y hacia atrás hace disminuir el área que queda bajo la curva, manteniendo casi inalterado el punto neutro. Si sólo se aplica tensión hacia atrás, el punto neutro se desplaza hacia la salida, y si la tracción es suficiente, pueda alcanzar el punto de salida. Cuando esto ocurre, los cilindros se mueven más rápidamente que el metal y resbalan sobre la superficie de éste. Cuando, al contrario, sólo se aplica tensión hacia adelante, el punto neutro se desplaza hacia la entrada.

3.2.3 ANALISIS TEORICO PARA LAMINACION EN FRIO

La forma en que se determinó la expresión, para la carga de laminación en el capítulo anterior, es una forma muy simple, que sólo nos permite una aproximación al valor real de la carga, debido a que se no se tomaron en cuenta las condiciones reales del proceso, como son, que el metal esta en movimiento y que su espesor disminuye gradualmente.

Una teoría de laminación completa debe expresar las fuerzas externas, tales como la carga y el par de laminación, en función de las condiciones geométricas de la deformación y las características del metal que ha de laminarse.

La deducción que se expone a continuación se basa en las siguientes consideraciones:

- 1.-) El arco de contacto es circular; es decir, no hay deformación elástica en los cilindros.
- 2.-) El coeficiente de fricción es constante en todos los puntos del arco de contacto.
- 3.-) No existe ensanchamiento, por lo que laminación se considera como un proceso de deformación plana.
- 4.-) La velocidad periférica de los cilindros es constante.
- 5.-) La deformación elástica de la chapa es despreciable frente a su deformación plástica.
- 6.-) Se cumple el criterio de la energía de distorsión máxima para la deformación plana:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (2/\sqrt{3})\sigma_0 = \sigma'_0$$

La figura 3.10 muestra una zona de deformación en el espacio entre cilindros laminadores , con los esfuerzos que actúan sobre ella.

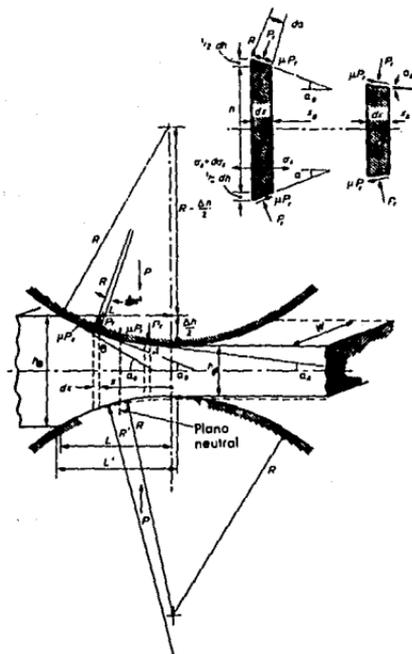


Figura 3.10. Sección de la zona de deformación en laminado de metales, mostrando los esfuerzos que actúan en dos elementos de la chapa, uno a cada lado del plano neutral.

Por definición al realizar un balance de fuerzas antes y después del punto neutro la única diferencia será el sentido y por tanto el signo de la fuerza de fricción.

Variables empleadas:

P_r = presión radial,

σ_x = esfuerzo longitudinal debido a la presencia de devanador o freno,

α' = ángulo definido con respecto al plano de salida,

x = coordenada paralela al eje de laminación.

Realizando el análisis tenemos:

Carga debida a esfuerzos longitudinales (por unidad de ancho $b=1$).

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) - \sigma_x h$$

Carga debida a la fuerza de fricción.

μP_r : fuerza de fricción, su proyección sobre "x" es:

$$P_r = dx/\cos\alpha'$$

Considerando que se aplica en los dos cilindros:

carga de fricción = $\pm 2P_r(dx/\cos\alpha')\cos\alpha'$

NOTA: El signo (-) se aplica entre el punto de entrada y el punto neutro, y el signo (+) se aplica entre el punto neutro y el punto de salida.

Por último tenemos la carga debida a la presión radial:

Proyección de la fuerza radial en "x" = $P_r \sin\alpha'$

Considerando que se aplica en los dos cilindros:

$$2P_r(dx/\cos\alpha')\sin\alpha'$$

Realizando la sumatoria de fuerzas en "x" = $\Sigma F_x = 0$

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) - \sigma_x h \pm 2\mu P_r(dx/\cos\alpha')\cos\alpha' + 2P_r(dx/\cos\alpha')\sin\alpha' = 0$$

Desarrollando la ecuación anterior y simplificando tenemos:

$$\sigma_x dh + hd\sigma_x + d\sigma_x h \pm 2\mu P_r dx + 2P_r dx \tan\alpha' = 0 \quad \text{-----(3.19)}$$

Esta ecuación se puede simplificar considerando despreciable el producto de dos diferenciales, por ser sumamente pequeño.

$$d\sigma_x dh = 0$$

Además:

$$\sigma_x dh + h d\sigma_x = d(\sigma_x h)$$

De las relaciones trigonométricas de la figura 3.11 se obtiene:

$$dh = 2dx \tan \alpha'$$

Por lo que la ecuación (3.19) queda de la siguiente forma:

$$d(\sigma_x h) \pm 2\mu Pr dx + Pr dh = 0 \quad \text{-----(3.20)}$$

Si ponemos todos los términos en función de R y α' , basandonos en la figura 3.11.

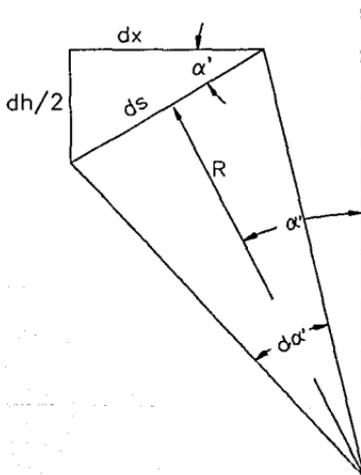


Figura 3.11.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Expresiones obtenidas a partir de la figura 3.11:

$$ds = Rda'$$

$$dx = Rda' \cos a'$$

$$dh = 2Rda' \operatorname{sena}'$$

Sustituyendo y ordenando estas expresiones en la ecuación (3.20), tenemos:

$$d(\sigma_x) \pm 2PrR\mu \cos a' da' + 2PrR \operatorname{sena}' da' = 0 \quad \text{-----(3.21)}$$

Despejando $[d(\sigma_x)]$ y simplificando la ecuación (3.21):

$$d(\sigma_x) = -2PrR(\operatorname{sena}' \pm \mu \cos a') da' \quad \text{-----(3.22)}$$

A la expresión (3.22) se le conoce con el nombre de ecuación de Von Karman, por haber sido éste el primero en desarrollarla (1925). Los signos positivo y negativo en la expresión, son debidos a que el sentido de la fuerza de fricción cambia en el punto neutro.

Empleando las aproximaciones propuestas por Bland y Ford: Los ángulos de contacto en la laminación son muy pequeños, es decir,

$$a'_{\max} \leq 6^\circ$$

Por tanto

$$\operatorname{sena}' \approx a',$$

y

$$\cos a' \approx 1$$

Sustituyendo lo anterior en la ecuación (3.22) tenemos:

$$d(\sigma_x) = -2PrR(a' \pm \mu) da' = 0 \quad \text{-----(3.23)}$$

Analizando la figura 3.7 anterior, se observa que es posible relacionar a σ_x y P con los dos esfuerzos principales de la ecuación de Von Mises, es decir, $\sigma_1 = \sigma_x$ y $\sigma_3 = -P$, donde P es la presión de laminado. La consideración anterior es válida, debido a que usualmente para el laminado en frío $a'_{\max} \leq 6^\circ$ y $\mu \approx 0.1$ de tal manera que el error en la consideración es despreciable.

De la ecuación de cedencia de Von Mises:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0$$

donde: σ_0 = esfuerzo de cedencia aparente
 σ_1, σ_2 = esfuerzos principales

Sustituyendo las relaciones de los esfuerzos principales en la ecuación de Von Mises:

$$\sigma_x - (-P) = \sigma_0$$

por tanto $\sigma_x = \sigma_0 - P$

Sustituyendo las condiciones de fluencia en la ecuación (3.23):

$$d(h(\sigma_0 - P)) = -2PrR(\alpha' \pm \mu) d\alpha' \quad \text{----- (3.24)}$$

Desarrollando y sacando como factor común a $dh\sigma_0$ tenemos:

$$d(h\sigma_0(1 - P/\sigma_0)) = -2PrR(\alpha' \pm \mu) d\alpha' \quad \text{----- (3.25)}$$

La diferencia del producto se puede escribir como:

$$h\sigma_0 d(1 - P/\sigma_0) + (1 - P/\sigma_0) d(h\sigma_0) = -2PrR(\alpha' \pm \mu) d\alpha' \quad \text{----- (3.26)}$$

Debido a que cuando el espesor se reduce el límite de fluencia se incrementa, el producto:

$$h\sigma_0 = \text{cte}$$

Además la derivada de una constante es cero, por lo que:

$$d(h\sigma_0) = 0$$

$$\text{y} \quad d(1) = 0$$

Por lo que: $h\sigma_0 d(1 - P/\sigma_0) = -h\sigma_0 d(P/\sigma_0)$

Sustituyendo todo lo anterior en la ecuación (3.25) tenemos:

$$-h\sigma_0 d(P/\sigma_0) = -2PrR(\alpha' \pm \mu) d\alpha' \quad \text{----- (3.27)}$$

Reordenando:

$$d(P/\sigma_0)/(Pr/\sigma_0) = 2R/h(\alpha' \pm \mu) d\alpha' \quad \text{----- (3.28)}$$

Para integrar la ecuación (3.28) se requiere que el espesor h se determine en función de α' . Como se muestra en la siguiente figura 3.12.

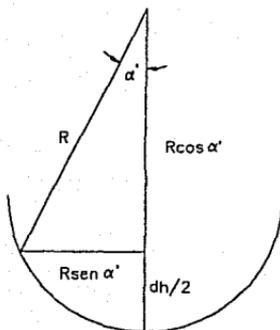


Figura 3.12

De la figura 3.12 tenemos:

$$dh/2 = R - R \cos \alpha'$$

Simplificando y despejando dh, llegamos a:

$$dh = 2R(1 - \cos \alpha') \quad \text{----- (3.29)}$$

Cuando α' es pequeño ($\alpha' \leq 6^\circ$) $\implies \cos \alpha' = 1 - (\alpha'^2/2)$

Sustituyendo lo anterior en la ecuación (3.29) tenemos:

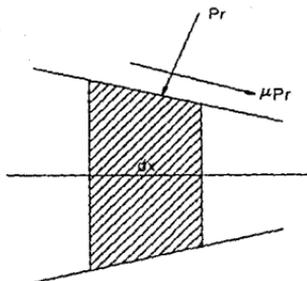
$$dh = 2R[1 - (1 - (\alpha'^2/2))]$$

Realizando operaciones y simplificando:

$$dh = R(\alpha')^2$$

Por tanto: $h_0 = h_r + R(\alpha')^2 \quad \text{----- (3.30)}$

Realizando la $\Sigma F_y = 0$ para determinar la relación entre la presión radial y la presión de laminación. Haciendo uso de la siguiente figura 3.13.



$$\sum F_y = 0$$

Figura. 3.13

Donde la proyección sobre "Y" de la presión radial es:

$$Pr(dx/\cos \alpha') \cos \alpha'$$

La proyección de la fuerza de fricción sobre "Y" es:

$$\pm \mu Pr(dx/\cos \alpha') \sin \alpha'$$

Y la proyección de la carga de laminado sobre "Y" es:

$$-Pdx$$

Realizando la sumatoria e igualando a cero tenemos:

$$Pr(dx/\cos \alpha') \cos \alpha' \pm \mu Pr(dx/\cos \alpha') \sin \alpha' - Pdx = 0$$

Simplificando y despejando P llegamos a:

$$P = Pr(1 \pm \mu \tan \alpha') \quad \text{----- (3.31)}$$

Además para laminado en frío los ángulos son muy pequeños ($\alpha' \approx$

6°): Por tanto $\tan \alpha' \ll 1$

Por lo que se puede considerar que:

$$P \approx Pr \quad \text{----- (3.32)}$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.31) y (3.32) en la ecuación

(3.28) tenemos:

$$d(Pr/\sigma_0)/(Pr/\sigma_0) = (2R/h_r + R(\alpha')^2)(\alpha' \pm \mu) dx \quad \text{----- (3.33)}$$

Desarrollando la ecuación (3.33) llegamos a :

$$d(\text{Pr}/\sigma_0)/(\text{Pr}/\sigma_0) = (2\alpha'd\alpha')/[(h_f/R)+\alpha'^2] \pm (2\mu d\alpha')/[(h_f/R)+\alpha'^2]$$

----- (3.34)

La ecuación (3.34) se puede integrar por partes según:

$$\int d(\text{Pr}/\sigma_0)/(\text{Pr}/\sigma_0) = \int du/u = \ln u + \text{cte}$$

$$\int (2\alpha'd\alpha')/(h_f/R)+\alpha'^2 = \int du/u = \ln u + \text{cte}$$

$$\int (2\mu d\alpha')/(h_f/R)+\alpha'^2 = 2\mu \int du/(a+bu^2) = 2\mu \frac{1}{\sqrt{ab}} \arctan \left(\frac{u}{\sqrt{b/a}} \right) + \text{cte}$$

donde: $b=1$ y $a=h_f/R$

Por tanto la ecuación (3.34) en forma integrada queda:

$$\ln(\text{Pr}/\sigma_0) = \ln((h_f/R)+\alpha'^2) \pm 2 \arctan \left(\frac{R/h_f}{\alpha'} \right) \pm \frac{2\mu}{\sqrt{h_f/R}} \arctan \left(\frac{\alpha'}{\sqrt{h_f/R}} \right) + \text{cte}$$

----- (3.35)

Haciendo un cambio de variable para facilitar el manejo de la ecuación, definiendo "H"

$$H = 2 \sqrt{R/h_f} \arctan \left(\frac{R/h_f}{\alpha'} \right) \pm \sqrt{h_f/R} \alpha'$$

Por lo tanto la ecuación (3.35) queda:

$$\ln(\text{Pr}/\sigma_0) = \ln((h_f/R)+\alpha'^2) \pm \mu H + \text{cte} \quad \text{----- (3.36)}$$

Obteniendo los antilogaritmos de la ecuación (3.36):

$$(\text{Pr}/\sigma_0) = C((h_f/R)+\alpha'^2) \cdot \exp(\pm \mu H) \quad \text{----- (3.37)}$$

Evaluando la constante de integración:

a.-) Condiciones de salida :

$$\alpha' = 0 \quad \text{-----} \rightarrow H = 0$$

Considerando que el esfuerzo de cedencia a la salida es $\sigma_0 = \sigma_{or}$

Considerando un esfuerzo longitudinal al eje de laminación σ_{ur} .

Sustituyendo lo anterior en la ecuación (3.37) tenemos:

$$(\text{Pr}/\sigma_{or}) = C(h_f/R)$$

Despejando la constante, tenemos:

$$C = (\text{Pr}/\sigma_{or}) \cdot (R/h_f) \quad \text{----- (3.38)}$$

Para determinar la presión radial que actúa entre el punto neutro y la salida, se hace uso del balance de fuerzas con respecto a "y"; y la condición de cedencia de Von Mises;

analizadas anteriormente:

$$Pr = P \quad \text{----- (a)}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{or} \quad \text{----- (b)}$$

donde P y σ_{nf} se pueden relacionar con σ_3 y σ_1 , respectivamente.

$$\sigma_3 = -P \quad \text{----- (c)}$$

$$\sigma_1 = \sigma_{nf} \quad \text{----- (d)}$$

Sustituyendo las ecuaciones (d) y (c) en (b) y despejando P.

$$P = \sigma_{or} - \sigma_{nf} \quad \text{----- (e)}$$

Sustituyendo (e) en (a) tenemos:

$$Pr = \sigma_{or} - \sigma_{nf} \quad \text{----- (f)}$$

Sustituyendo la ecuación (f) en la ecuación (3.36), tenemos:

$$C = ((\sigma_{or} - \sigma_{nf})/\sigma_{or}) * (R/h_f) \quad \text{----- (3.39)}$$

Sustituyendo la ecuación (3.39) en la ecuación (3.37) y despejando Pr, considerando el signo (+) para la fuerza de fricción; debido a que éste es el signo que opera en la zona que va del punto neutro a la salida, tenemos:

$$Pr = (\sigma_{or} - \sigma_{nf}) * (R/h_f) * ((h_f/R) + \alpha'^2) * \exp(+\mu H) \quad \text{----- (3.40)}$$

$$\text{Por definición } \text{sen } \alpha' = l_p / (R + (R\Delta h)^{1/2}) / R = (\Delta h/R)^{1/2}$$

Además para la laminación en frío los ángulos son muy pequeños, y por tanto: $\text{sen } \alpha' \approx \alpha' \quad \text{-----} \quad \alpha'^2 = \Delta h/R.$

Sustituyendo lo anterior en la ecuación (3.40), tenemos:

$$Pr = (\sigma_{or} - \sigma_{nf}) * (R/h_f) * ((h_f/R) + (\Delta h/R)) * \exp(+\mu H) \quad \text{----- (3.41)}$$

Donde: $h_f = \Delta h = \bar{h}$; esto se cumple para la zona que va del neutro a la salida.

$$Pr = (\sigma_{or} - \sigma_{nf}) * (\bar{h}/h_f) * \exp(+\mu H) \quad \text{----- (3.42)}$$

Evaluando la constante de integración para la condición de entrada.

b.-) Condiciones de entrada :

$$H = H_0$$

$\alpha = \alpha'$ ángulo de mordedura

$$H_0 = 2(R/h_r)^{1/2} \tan^{-1} \left[(h_r/R)^{1/2} \alpha \right]$$

Realizando un análisis análogo al anterior; despejando C de la ecuación (3.37), y sustituyendo las condiciones de entrada; además de considerar el signo (-) para la fuerza de fricción; debido a que éste es el signo que opera en la zona que va del punto de entrada al punto neutro:

$$C = (Pr/\sigma_0) / \left[(h_r/R) + \alpha'^2 \right]^{-1} \exp(-\mu H_0)$$

Cuando $\alpha = \alpha'$ (entrada):

$$\left[(h_r/R) + \alpha'^2 \right]^{-1} = \left[(h_r + h)/R \right]^{-1} = (h_r/R)^{-1} = R/H_0$$

Sustituyendo:

$$Pr/\sigma_0 = (\sigma_{or} - \sigma_{ur}/\sigma_0) (R/H_0) (\bar{h}/R) \exp \mu (H_0 - H)$$

Presión radial en la zona que va de la entrada al neutro:

$$Pr = (\sigma_{oo} - \sigma_{oo}) (\bar{h}/h_0) \exp \mu (H_0 - H) \quad \text{----- (3.43)}$$

Las ecuaciones (3.42) y (3.43) desarrolladas anteriormente, nos permiten calcular la presión radial para cualquier posición dentro del arco de contacto, de esto la carga de laminación, o fuerza total del cilindro P, podrá ser evaluada por la integral de la presión específica a lo largo del arco de contacto:

$$P = R b \int_{\alpha'=0}^{\alpha'=\alpha} p d \alpha' \quad \text{----- (3.44)}$$

donde:

b = ancho de la chapa,

$\alpha =$ ángulo de contacto,

R = radio de los rodillos.

Para obtener una aproximación más real de ésta integral, se evalúan gráficamente los valores de las ecuaciones (3.42) y (3.43) punto a punto.

Sin embargo cuando la chapa es, a la vez, delgada y dura se hace notable el aplastamiento de los cilindros y adquiere importancia la región elástica de la chapa a la entrada y la salida. En estas condiciones no puede aplicarse la teoría desarrollada anteriormente. No Existe teoría alguna para el análisis de la laminación en estas condiciones, pero es posible predecir el espesor mínimo que puede obtenerse al laminar una chapa bajo ciertas condiciones de laminación. Ford y Alexander han demostrado que

$$h_{\min} = \left[(14.22 \mu^2 R^2 (1-\nu) / E_c) + (9.05 \mu R (1-\nu)^2 / E_c) \right] \cdot (\sigma_0' - \sigma) \quad \text{-----(3.45)}$$

donde:

- R = radio de los cilindros no deformados, en milímetros,
- E_c = módulo elástico del material de la chapa, en kilogramos por milímetro cuadrado,
- E_r = módulo elástico del material de los cilindros, en kilogramos por milímetro cuadrado,
- ν_c = relación de Poisson para el material de la chapa,
- ν_r = relación de Poisson para el material de los cilindros,
- σ_0' = esfuerzo de cedencia de Von Mises = $\sigma_1 - \sigma_2 = (2/\sqrt{3}) \sigma_0$
- σ_c = tensión media de la chapa = $(\sigma_2 - \sigma_1)/2$,
- σ_b = esfuerzo longitudinal hacia atrás,
- σ_f = esfuerzo longitudinal hacia adelante.

Analizando la expresión (3.45), se observa que el espesor mínimo de la chapa se puede obtener aumentando el módulo elástico del material de los cilindros o la tensión de la chapa y disminuyendo la fricción, el diámetro de los cilindros y la tensión de fluencia.

3.2.4 ANALISIS TEORICO DE LAMINACION EN CALIENTE

Las teorías desarrolladas para la laminación en caliente no han alcanzado el estado de conocimiento que para el laminado en frío se tiene, debido principalmente a que las condiciones de fricción no han sido bien precisadas, además de que el esfuerzo de cedencia es una función compleja de la temperatura y de la velocidad de deformación.

En la laminación en caliente, la velocidad de deformación es una función de la posición a lo largo del arco de contacto. En el laminado en caliente el coeficiente de fricción es mucho más elevado que en el laminado en frío. Existen indicaciones de que la fuerza de fricción puede alcanzar valores tan elevados como el límite elástico en deformación plana. Cuando esto ocurre, la chapa se mueve a la misma velocidad periférica que los cilindros, con lo cual se presenta el caso de "fricción con adherencia perfecta". La velocidad de deformación para la laminación con adherencia perfecta está dada por:

$$\dot{\xi} = v_r/h = 2Va \operatorname{sen} \alpha' / h = 2Va \operatorname{sen} \alpha' / h_r + D(1 - \cos \alpha') \quad \text{-----(3.45)}$$

Analizando la ecuación anterior, se encuentra que la máxima velocidad de deformación se presenta a la entrada de los cilindros. Para tantos por ciento de reducción iguales la velocidad de deformación de una chapa delgada es mayor que la de un desbaste plano grueso. En los cálculos prácticos es normalmente satisfactorio determinar la velocidad media de deformación, $\bar{\dot{\xi}}$,

$$\bar{\dot{\xi}} = (Vn \sqrt{r} / \sqrt{Rh_0}) * (1 + r/4) \quad \text{-----(3.46)}$$

Donde:

V_r = velocidad radial o periférica de los cilindros,
 r = reducción fraccional.

La fricción con resbalamiento en la que existe una diferencia de velocidad entre la chapa y los cilindros, se produce generalmente en la laminación en frío y, probablemente, en las primeras fases de la laminación en caliente. Para el caso de fricción con resbalamiento la velocidad de deformación esta dada por

$$\dot{\epsilon} = (V_r/h_0) \sqrt{(2(h_0-h)/D)} \quad \text{----- (3.47)}$$

En general, para condiciones iguales, la velocidad de deformación en el caso de fricción con resbalamiento, es menor que en el caso de fricción con adherencia perfecta.

Se ha comprobado que para la práctica, basta con emplear una velocidad media de deformación para alcanzar exactitud suficiente.

Aplicando la ecuación diferencial básica de laminación, desarrollada por Von Karman (ecuación (3.22)).

$$d(d\epsilon/h) = 2PrR(\text{sen}\alpha' + \mu \text{cos}\alpha') d\alpha' \quad \text{----- (3.22)}$$

Así como, las aproximaciones propuestas por Bland y Ford: Los ángulos de contacto en laminación son muy pequeños, es decir, usualmente $\alpha' = 6^\circ$, por lo que,

$$\text{sen}\alpha' \approx \alpha'$$

$$\text{cos}\alpha' \approx 1$$

Y sustituyendo una solución propuesta por Orowan, Sims desarrolló una ecuación para la carga de laminación, que en su forma simplificada queda:

$$P = \epsilon_0^b I_p Q \quad \text{----- (3.48)}$$

Donde Q es una función compleja de la reducción, el espesor y

del coeficiente R/H

$$Q = \sqrt{h_r/4\Delta h} (\tan^{-1} \sqrt{\Delta h/h_o} - \sqrt{R/h_o} \ln(h_o^2/h_o h_r)) - (\pi/4) \quad \text{---- (3.49)}$$

Dicho valor puede ser obtenido de la siguiente figura 3.14.

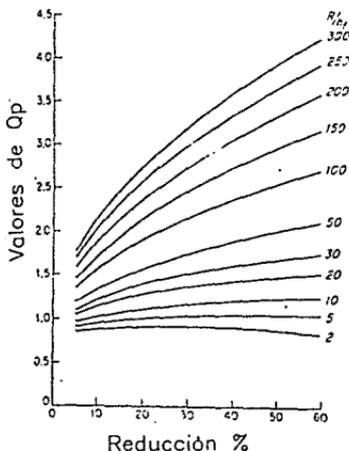


Figura 14.

Existen otras ecuaciones aplicables al laminado en caliente, entre otras se encuentran las desarrolladas por Ford/Alexander empleando análisis de campo de líneas de deslizamiento.

$$P = \frac{\sigma_y}{3} b L_p (\pi/2 + L_p/(h_o + h_r)) \quad \text{---- (3.50)}$$

El par podrá ser calculado mediante la ecuación siguiente:

$$T = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} b L_p (1.6 + 0.91 L_p/(h_o + h_r)) \quad \text{---- (3.51)}$$

Danton y Crane han propuesto la siguiente expresión para el cálculo de la carga de laminación:

$$P = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} b L_p (1.31 + 0.53 L_p / (h_0 + h_r)^{1/2}) \quad \text{----- (3.52)}$$

El esfuerzo de cedencia a la deformación homogénea, se puede obtener graficamente a partir de la reducción, temperatura y velocidad de deformación.

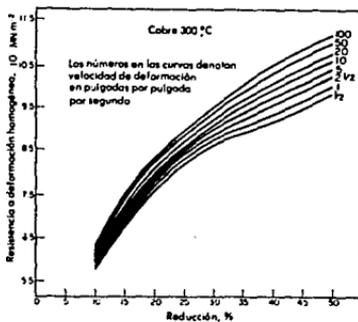


Figura 3.15. Ver apéndice A para diferentes materiales a diferentes temperaturas.

3.3 EFECTOS DE LA CARGA DE LAMINACION

En el laminado de metales las cargas y esfuerzos suelen ser muy grandes, especialmente cuando la pieza de trabajo es delgada y esta endurecida por trabajo. La combinación de ambos factores puede resultar en grandes deformaciones, las cuales se traducen principalmente en resorte del molino, flexionado o combadura y aplastamiento de los cilindros.

3.3.1 FLEXIONADO O COMBADURA DE LOS CILINDROS

Para una caja de laminación dada existe un calibre mínimo de laminación abajo del cual no es posible laminar. Cualquier intento para hacerlo resultará en mayor deformación de los cilindros.

Existen cajas de laminación diseñadas para tratar de eliminar la deformación de los cilindros laminadores, dichas cajas consisten de, cilindros laminadores de trabajo y cilindros de apoyo, donde la función de los cilindros de apoyo es proporcionar mayor rigidez a los cilindros laminadores, algunos ejemplos de estos tipos de cajas son, las cajas cuarto, las Sendzimir, las planetarias, las de racimo (Cluster), etc. (ver figuras 2.18 y 2.19, capítulo II).

Algunos otros intentos para tratar de evitar o limitar el

flexionado de los cilindros laminadores, implican la disminución de la carga de laminado. Sin embargo, aun empleando en conjunto ambos métodos ocurre cierta flexión en los cilindros laminadores.

Un reciente método para evitar la flexión de los cilindros laminadores consiste en el coronamiento de estos, es decir, darles forma de barril (coronamiento). Cabe aclarar que con este método no se evita la flexión de los cilindros, pero lo que si se logra es obtener el perfil adyacente al material que se esta laminando completamente recto.

Un desarrollo más reciente como consecuencia del método anterior consiste en, introducir gatos hidráulicos en los cuellos de los cilindros, para de esta manera alterar la combadura de los cilindros mediante una flexión a los mismos.

3.3.2 APLASTAMIENTO DE LOS CILINDROS

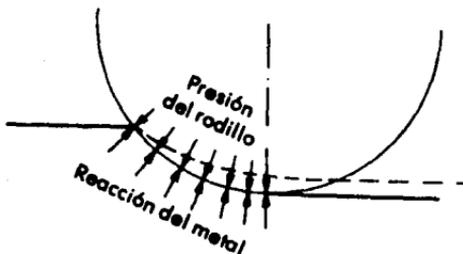


Figura 3.16. Reacción del metal ocasionando aplastamiento en los cilindros.

En la laminación, al hacer pasar la pieza de trabajo por el espacio entre cilindros laminadores, la pieza es comprimida por el esfuerzo radial, así mismo, la pieza ejerce una fuerza contraria de reacción a la fuerza radial, sobre los cilindros como se muestra en la figura 3.16, la cual es transmitida a la estructura de la caja de laminación (castillo), y a los rodamientos de los cilindros. Si se intenta comprimir materiales de calibre delgado y alto esfuerzo de cedencia, la reacción sobre los cilindros es tan grande que se deforman elásticamente y el radio de curvatura del arco de contacto es aumentado. Cuando los cilindros se deforman elásticamente, generalmente se acepta la teoría de Hitchcock, que supone que la distribución de presiones en los cilindros producirá la misma distorsión que una distribución de presiones elíptica. Hitchcock y otros propusieron que el arco de contacto no permanece circular y por tanto el radio de curvatura del cilindro aumenta de R a R' . Estableciendo la siguiente solución:

$$R' = R [1 + ((CP') / (bh))] \quad \text{----- (3.53)}$$

donde:

R' = radio deformado

R = radio original

C = constante elástica del material del rodillo

$C = 16(1-\nu^2)/\pi E$

ν = relación de Poisson

E = módulo de Young

P' = carga de laminado basada en el R'

b = ancho del metal

Δh = diferencia de espesores = $h_0 - h$

Debido a que P' es función de R' , es necesario encontrar la solución exacta de la ecuación (3.53) por aproximaciones sucesivas.

Con aproximaciones sucesivas, lo que se logra es disminuir el error entre el radio de curvatura deformado y el radio original, lograndose de esta manera que el error obtenido sea insignificanemente pequeño.

Para facilitar los cálculos en las aproximaciones sucesivas se recurre comúnmente al uso de la computadora lograndose mayor precisión y exactitud en los calculos.

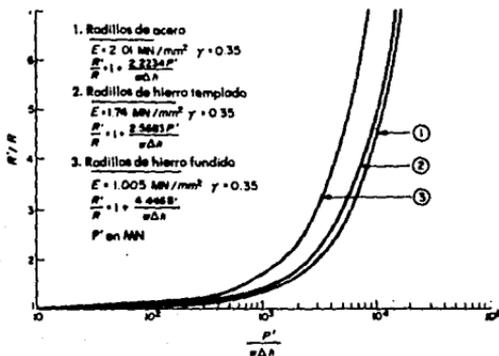


Figura 3.17. Curvas para determinar R'/R .

Para efecto de simplificar las aproximaciones sucesivas se han elaborado las curvas de la figura 3.17, por medio de las cuales se puede determinar R'/R , para rodillos de diferente material, rodillos de acero, rodillos de hierro templado y rodillos de hierro fundido.

De igual forma se han elaborado las ecuaciones representativas de cada una de las curvas, para obtener valores más precisos. Sin embargo, se debe de tener en cuenta que, los valores del radio deformado obtenidos por medio de las curvas, ó de las ecuaciones representativas de las mismas de la figura 3.17, son muy generales pero cercanos a la realidad, por lo cual se recomienda para la práctica, obtener todos los parámetros del material particular de los rodillos, sustituirlos en la ecuacion 3.53 y hacer uso de ella.

3.4 ECUACIONES QUE HACEN USO INTENSIVO DE LA COMPUTADORA

En capítulos anteriores, por simplificación se considerará que durante la laminación el ensanchamiento es nulo; sin embargo, en la práctica el ensanchamiento se debe considerar, para de esta manera tener un control real y verdadero, tanto del ensanchamiento como del proceso en sí.

Se ha determinado que los factores que afectan la magnitud del ensanchamiento son:

- a) Reducción porcentual,
- b) Diámetro de los rodillos,
- c) Tipo del material de los rodillos,
- d) Tipo de material de la pieza de trabajo,
- e) Temperatura de la pieza de trabajo,
- f) Coeficiente de fricción entre el material y los cilindros,
- g) Velocidad del proceso.

Se ha comprobado que este último factor no tiene efectos para velocidades menores a 10 m/seg. Arriba de esta velocidad el ensanchamiento tiende a disminuir ligeramente, de ahí que la mayoría de las ecuaciones desarrolladas omiten dicho factor. Existen una gran cantidad de expresiones de complejidad y precisión muy variada, una de estas es la implementada por Sven Ekelund. Dicha fórmula, aunque compleja y que necesita resolverse a partir de un proceso iterativo (generalmente con auxilio de una computadora), nos garantiza resultados excepcionalmente buenos.

$$\frac{b_r^2 - b_0^2}{2} = 4m\sqrt{rah} \Delta h - 2m \left(h \frac{\Delta h}{h} \right) \left\{ \sqrt{rah} \ln(b/\beta)_0 \right. \\ \left. \text{-----(3.54)} \right.$$

$$m = 1.6\mu \frac{\sqrt{rah} - 1.2\Delta h}{h_0 + h_r} \quad \text{-----(3.55)}$$

$$r = \frac{Dc + Sc - h_r}{2} \quad \text{-----(3.56)}$$

donde:

r = radio de los cilindros de trabajo,

Dc = diámetro del cuerpo de los cilindros,

Sc = separación de los cilindros,

$\mu = 1.05 - 0.0005(T)$, coeficiente de fricción
para cilindros de acero,

$\mu = 0.8(1.05 - 0.0005(T))$, coeficiente de fricción
para cilindros de fundición
vaciados en coquilla.

Para dar solución a la ecuación propuesta por Ekelund (3.54) se pueden utilizar métodos de aproximación como el de Newton-Raphson, para agilizar las aproximaciones se puede desarrollar un programa para computadora, como el que se muestra a continuación.

Dicho programa es desarrollado en lenguaje BASIC. La función del programa es determinar el ensanchamiento que experimenta el material al hacerlo pasar en el espacio entre cilindros laminadores.

En el programa podemos variar los parámetros más importantes diámetro de los cilindros laminadores, material de los mismos, espesor inicial, espesor final y ancho inicial de la chapa.

PROGRAMA PARA CALCULO DEL ENSANCHAMIENTO EN LAMINACION

```

10 CLS:PRINT
20 PRINT TAB(7) "*****"
40 PRINT TAB(7) " "; TAB(72) " "
60 PRINT TAB(7) " " PROGRAMA PARA CALCULAR EL ENSANCHAMIENTO EN UN PROCESO";TAB
(72) " "
70 PRINT TAB(7) " " DE LAMINACION DE PRODUCTOS PLANOS.";TAB(72) " "
80 PRINT TAB(7) " ";TAB(72) " "
85 PRINT TAB(7) " " DISEÑADO POR: CERVANTES CABELLO ARTURO.";TAB(72) " "
90 PRINT TAB(7) " ";TAB(72) " "
100 PRINT TAB(7) " " PARA HACER USO DEL PROGRAMA SE REQUIEREN LOS SIGUIENTES";TA
B(72) " "
110 PRINT TAB(7) " " DATOS";TAB(72) " "
120 PRINT TAB(7) " ";TAB(72) " "
130 PRINT TAB(7) " " 1) TEMPERATURA DE TRABAJO [GRADOS CENTIGRADOS]";TAB(72) " "
140 PRINT TAB(7) " " 2) ESPESOR INICIAL DE LA PIEZA DE TRABAJO [MILIMETROS]";TA
B(72) " "
150 PRINT TAB(7) " " 3) ESPESOR FINAL DESEADO EN LA PIEZA DE TRABAJO [MILIMETROS
];TAB(72) " "
160 PRINT TAB(7) " " 4) DIAMETRO DE LOS RODILLOS DE TRABAJO [MILIMETROS]";TAB(72
) " "
170 PRINT TAB(7) " " 5) MATERIAL DE LOS RODILLOS DE TRABAJO [ACERO O FUNDICION]"
;TAB(72) " "
180 PRINT TAB(7) " " 6) ANCHO INICIAL DE LA PIEZA DE TRABAJO [MILIMETROS]";TAB(7
2) " "
190 PRINT TAB(7) " " 7) UN VALOR PROPUESTO (CUALESQUIERA) PARA EL ANCHO FINAL";T
AB(72) " "
200 PRINT TAB(7) " " DE LA PIEZA DE TRABAJO";TAB(72) " "
210 PRINT TAB(7) " ";TAB(72) " "
220 PRINT TAB(7) " " NOTA: SI DESEA TRABAJAR CON EL PROGRAMA TECLEE 1 (O ENTER)
";TAB(72) " "
230 PRINT TAB(7) " " SI DESEA SALIR DEL PROGRAMA TECLEE 2";TAB(72) " "
240 PRINT "
250 INPUT " TECLEE EL NUMERO QUE CORRESPONDE A SU ELECCION";S1
260 IF S1=1 GOTO 280
270 IF S1=2 GOTO 1030
280 CLS
290 PRINT TAB(8) "*****"
300 PRINT TAB(8) " ";TAB(70) " "
310 PRINT TAB(8) " " PROGRAMA PARA CALCULAR EL ENSANCHAMIENTO EN UN PROCESO";TAB
(70) " "
320 PRINT TAB(8) " " DE LAMINACION DE PRODUCTOS PLANOS";TAB(70) " "
330 PRINT TAB(8) " ";TAB(70) " "
340 PRINT TAB(8) "*****"
350 PRINT
360 INPUT "DAR LA TEMPERATURA DE TRABAJO [GRADOS CENTIGRADOS] T=";T
370 PRINT
380 INPUT "DAR EL ESPESOR INICIAL DE LA PIEZA DE TRABAJO [MILIMETROS] HO=";HO
390 PRINT
400 INPUT "DAR EL ESPESOR FINAL DESEADO DE LA PIEZA [MILIMETROS] HF=";HF
410 PRINT
420 INPUT "DAR EL DIAMETRO DE LOS RODILLOS DE TRABAJO [MILIMETROS] DIA=";DIA
430 PRINT
440 PRINT TAB(4) "SELECCIONE EL NUMERO QUE CORRESPONDE AL MATERIAL DE LOS RODILLO
S"
450 PRINT TAB(19) " 1 SI LOS RODILLOS SON DE ACERO"
460 PRINT TAB(17) " 2 SI LOS RODILLOS SON DE FUNDICION"
470 INPUT " TECLEE EL NUMERO QUE CORRESPONDE AL MATERIAL DE LOS RODILLOS";R1
480 PRINT
490 IF R1=2 GOTO 530
500 IF R1=1 GOTO 510
510 NU=(1.05-(.0005*T))
520 GOTO 540
530 NU=(1.05-(.0005*T))*8
540 DETH=HO-HF

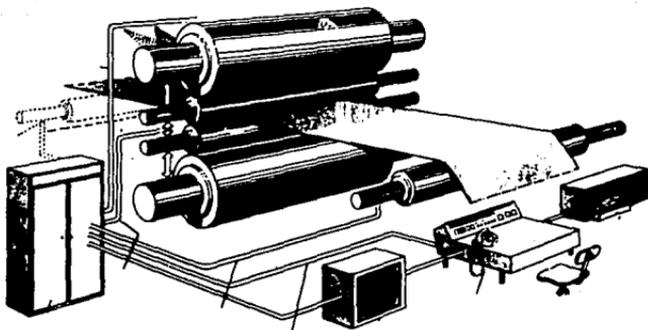
```

```

550 RE=(DIA*DETH-HF)/2
560 INPUT "DAR EL ANCHO INICIAL DE LA PIEZA DE TRABAJO [MILIMETROS] BO=";BO
570 PRINT
580 INPUT "DAR UN VALOR PROPUESTO PARA EL ANCHO FINAL DE LA PIEZA [MILIMETROS]
BF=";BF
590 CLS
600 PRINT:PRINT
610 PRINT TAB(8) "*****"
620 PRINT TAB(8) " ";TAB(68) "*"
630 PRINT TAB(8) " ";TAB(35) "DATOS:";TAB(68) "*"
640 PRINT TAB(8) " " TEMPERATURA DE TRABAJO="T";" [GRAD. CENTI]";TAB(68) "*"
650 PRINT TAB(8) " " ESPESOR INICIAL DE LA PIEZA="HO";" [MM]";TAB(68) "*"
660 PRINT TAB(8) " " ESPESOR FINAL DE LA PIEZA="HF";" [MM]";TAB(68) "*"
670 PRINT TAB(8) " " DIAMETRO DE LOS RODILLOS="DIA";" [MM]";TAB(68) "*"
680 IF R1=1 GOTO 720
690 IF R1=2 GOTO 700
700 PRINT TAB(8) " " MATERIAL DE LOS RODILLOS: FUNDICION";TAB(68) "*"
710 GOTO 730
720 PRINT TAB(8) " " MATERIAL DE LOS RODILLOS: ACERO";TAB(68) "*"
730 PRINT TAB(8) " " ANCHO INICIAL DE LA PIEZA="BO";" [MM]";TAB(68) "*"
740 PRINT TAB(8) " " ANCHO FINAL PROPUESTO DE LA PIEZA="BF";" [MM]";TAB(68) "*"
750 PRINT TAB(8) " ";TAB(68) "*"
760 PRINT TAB(8) "*****"
770 Y=((BF^2)-(BO^2))/2
780 X=SQR(RE*DETH)
790 M=1.6*HU*X
800 MM=1.2*DETH
810 WZ=(M-MM)/(HO+HF)
820 A=4*M2*X*DETH
830 B=2*M2*(HO+HF)*X
840 GC=BF/BO
850 IF GC=0 GOTO 870
860 Z=B*(LOG(BF/BO))
870 X1=Y-A-Z
880 X2=BF*(B/BF)
890 X3=X1/X2
900 BF2=BF-X3
910 IF BF=BF2 GOTO 950
920 BO=BO
930 BF=BF2
940 GOTO 770
950 PRINT:PRINT
960 PRINT TAB(8) "*****"
970 PRINT TAB(8) " ";TAB(68) "*"
980 PRINT TAB(8) " ";TAB(32) "RESULTADO:";TAB(68) "*"
990 PRINT TAB(8) " ";TAB(68) "*"
1000 PRINT TAB(8) " " ANCHO FINAL DE LA PIEZA LAMINADA="";BF2;" [MM]";TAB(68) "*"
"
1010 PRINT TAB(8) " ";TAB(68) "*"
1020 PRINT TAB(8) "*****"
1030 END

```

CAPITULO IV
METODOS DE CARACTERIZACION DE CHAPA DELGADA DE ACERO
PARA EMBUTIDO PROFUNDO



SISTEMA DE CONTROL DE MALLA CERRADA EN LOS MOLINOS DE LAMINACION.
(Referencia 3)

4.0 METODOS DE CARACTERIZACION DE CHAPA DELGADA DE ACERO PARA EMBUTIDO PROFUNDO

4.1.0 INTRODUCCION

La posibilidad de producir una gran variedad de formas a partir de la chapa metálica, con velocidades de fabricación muy grandes, es uno de los mayores avances tecnológicos del siglo XX.

La chapa de acero se conforma por diferentes métodos, dependiendo de la geometría, tamaño, número de piezas a fabricar y características del propio material.

En general el material obtiene su forma final por los procedimientos de:

- a. Corte
- b. Doblez
- c. Embutido

El proceso de corte comprende las operaciones de troquelado, cizallado y punzonado.

El proceso de Doblez comprende el rolado, formado de perfiles, engargolado y rechazado.

Por su parte el embutido se define como la operación mecánica mediante la cual la chapa metálica se transforma en un cuerpo hueco. La operación se realiza colocando la chapa sobre una matriz de forma adecuada y prensando el metal contra ella mediante un punzón (Figura 4.1). Generalmente es necesario fijar la pieza en bruto contra la matriz, para lo que se emplea un anillo

sujetador o prensachapas (pisador); cuyo objetivo es evitar el arrugamiento del metal.

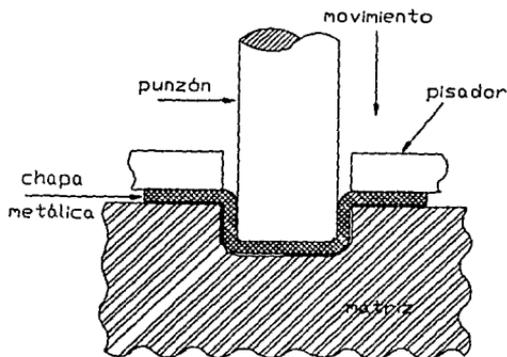


Figura 4.1. Operación de Embutido.

La matriz puede tener cualquier forma, desde un simple círculo hasta los complicados ensambles para las carrocerías de automóviles. Realizándose el embutido en una ó varias etapas denominándose a esta última embutido profundo.

En el proceso de 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 los materiales sometidos a este proceso estarán regidas por la ductilidad.

4.2.0 CARACTERIZACION DE LA CHAPA PARA EMBUTIDO.

Existen diversos métodos para evaluar la aptitud de los materiales en los procesos de embutición, la precisión y veracidad obtenido en estos varía en forma significativa de unos a otros, sin embargo, la aproximación a la realidad de estos depende de la complejidad de los mismos

4.2.1 ENSAYO DE TRACCION

Para la caracterización adecuada de la chapa para embutido profundo, resulta necesario realizar ensayos de tracción, debido a que el proceso de embutido es un proceso de compresión indirecta, razón por la cual la falla del material se producirá por los mismos mecanismos que en un ensayo de tracción.

En un ensayo de tracción se obtiene un diagrama esfuerzo-deformación (Fig. 4.2) en el cual se pueden identificar tres fases:

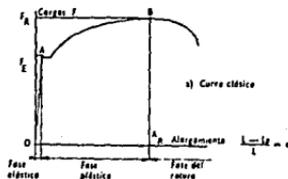


Figura 4.2. Grafica esfuerzo-deformación

(Referencia 12)

a.) Fase elástica. Los esfuerzos son proporcionales a la deformación.

b.) Fase plástica. Los esfuerzos se incrementan relativamente poco, dando lugar a alargamientos importantes.

c.) Fase de rotura. Es la prolongación de la fase plástica, pero la deterioración del metal es definitiva; los esfuerzos disminuyen mientras que la deformación aumenta; aparece una estricción (disminución importante de la sección) y después sobreviene la rotura.

La fase importante desde el punto de vista de la embutición, es la segunda; ésta está limitada (figura 4.2) por el punto A de esfuerzo FE y por el punto B de esfuerzo FR .

Como se mencionó anteriormente, la propiedad de máxima importancia en el embutido es la ductilidad, la cual se define como el grado de deformación que un material puede soportar sin romperse.

La ductilidad se puede determinar por dos procedimientos en un ensayo de tracción; el primer procedimiento consiste en determinar el porcentaje de alargamiento o elongación, midiendo la distancia entre marcas hechas a la probeta antes y después del ensayo.

$$\text{Elongación} = \frac{(\text{Longitud final}) - (\text{longitud inicial})}{(\text{longitud inicial})} (100) \quad \text{---(4.1)}$$

El porcentaje de alargamiento o elongación expresa la ductilidad en términos de la distancia que se estira el material antes de la ruptura.

El segundo procedimiento consiste en medir el cambio porcentual

del área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después del ensayo.

$$\text{Reducción de Área} = \frac{(\text{Área inicial}) - (\text{Área final})}{(\text{Área inicial})} (100) \quad \text{----(4.2)}$$

El cambio porcentual del área expresa la ductilidad en términos de la reducción del área antes de la ruptura.

De lo anterior resulta obvio que un material para embutición debe proporcionar elevados índices de alargamiento y reducción de área, al someterse a un ensayo de tracción.

Los comportamientos típicos en un ensayo de tracción se muestran en la figura (4.3). La figura 4.3a muestra una curva del tipo:

$$\sigma = \sigma_0(1+ke^n) \quad \text{----(4.3)}$$

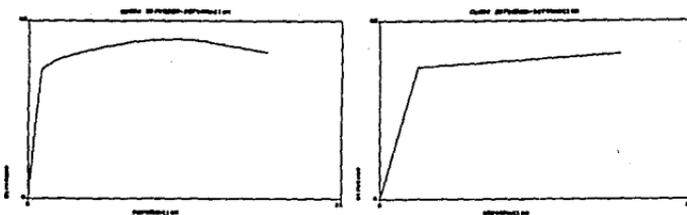
la cual es representativa de un acero de alto contenido de carbono o de un acero que ha sido anteriormente trabajado en frío. La figura 4.3b muestra una curva con un comportamiento del tipo:

$$\sigma = \sigma_0(1+ke) \quad \text{-----(4.4)}$$

la cual es representativa de un material fuertemente deformado en frío. La figura 4.3c muestra una curva con un comportamiento parabólico del tipo:

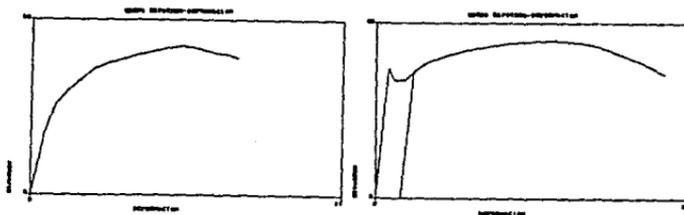
$$\sigma = ke^n \quad \text{-----(4.5)}$$

es importante aclarar que el comportamiento parabólico entre los esfuerzos y las deformaciones es particular de la zona plástica. Por último la figura 4.3d presenta la curva característica de los materiales que tienen un límite de cedencia agudo. Este comportamiento es el que presentan los aceros de bajo carbono, así como, algunos otros materiales como el molibdeno, algunas aleaciones de aluminio y titanio, muestras monocristalinas de cadmio, zinc, aluminio y bronce α y β . En los aceros de



4.3 a

4.3 b



4.3 c

4.3 d

Figura 4.3
Curvas esfuerzo-deformación para materiales elastoplásticos.
(Referencia 11)

de bajo carbono dicho comportamiento se atribuye a la presencia de átomos intersticiales (Carbono y Nitrógeno) los cuales actúan con las dislocaciones obstruyendo su movimiento. Una vez que las dislocaciones se han liberado de la atmósfera de átomos intersticiales el esfuerzo 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 bandas de Luders ó líneas de Hartmann, éstas líneas normalmente tienen una orientación de 45° con respecto al eje de carga. Su origen es en zonas de concentración de esfuerzos extendiéndose posteriormente a toda la muestra de tal forma que la deformación que a éstas se atribuye es heterogénea.

Es evidente que el comportamiento antes mencionado no es idóneo para un material que será empleado en operaciones de embutido. Dicho comportamiento se elimina al deformar el material hasta un punto como el marcado con "x" (figura 4.3d) en la práctica se logra mediante la aplicación del paso acabador de laminación (reducción menor al 5% después del recocido), sin embargo, en algunas ocasiones aún se presenta el límite elástico agudo, esto es debido al fenómeno conocido como envejecimiento, el cual consiste en un cambio de propiedades en el material, sucediéndose con lentitud a temperatura ambiente y con mayor rapidez a mayores temperaturas. Este fenómeno es debido a que la atmósfera de átomos intersticiales se difunden nuevamente atrapando de nueva cuenta a las dislocaciones, proporcionando una cierta vida máxima de almacenamiento de la chapa.

Otra forma de limitar el límite elástico agudo es a través de la precipitación de los átomos intersticiales, mediante la

formación de carburos, nitruros, y carbonitruros. Esto se logra adicionando al acero pequeñas proporciones (menos de 0.1%) de elementos formadores de dichos compuestos como son Nb, Ti, B, V y Al.

DATOS MENOS USUALES DE LA PRUEBA DE TRACCION

Los datos que usualmente se obtienen a partir de una prueba de tracción clásica son el límite elástico, la resistencia máxima y el alargamiento a la ruptura del material. Datos menos usuales pero de suma importancia en los procesos de embutido son el índice de endurecimiento "n" y el índice de anisotropía "r" o valor de Lankford (Referencia 4)..

Como se mencionó anteriormente, el proceso de embutido es un proceso de compresión indirecta, por lo cual la falla sucede exactamente por los mismos mecanismos que en una prueba de tracción. Esto está decidido por la rapidez de endurecimiento por trabajo, la cual nos dará una indicación de la ductilidad del material.

El índice de endurecimiento "n" mostrado en las ecuaciones 4.3 y 4.5 representa la velocidad con 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 en el ensayo de tracción (Figura 4.4). El comportamiento de endurecimiento por deformación se expresa como $\sigma = kc^n$, ecuación 4.5, donde σ es el esfuerzo de cedencia, k es una constante, ϵ es la deformación y n el índice de endurecimiento por deformación.

El valor de n puede determinarse en la dirección de laminado o a 45 o 90° con respecto a esta dirección.

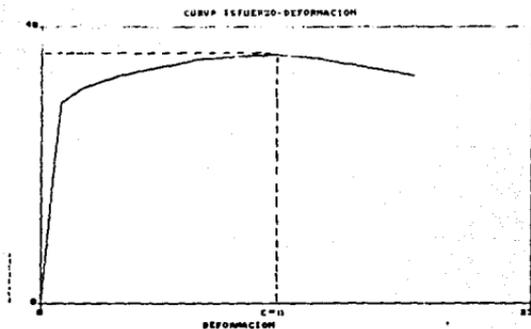


Figura 4.4

El índice de endurecimiento por deformación del material
corresponde a la deformación uniforme del mismo.

(Referencia 4)

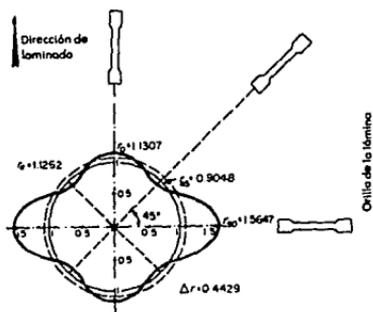


Figura 4.5

Variación típica del índice de anisotropía plana "r".

(Referencia 5)

El índice medio para el material se calcula como:

$$\bar{n} = 1/4 (n_{90} + n_{0} + 2n_{45}) \quad \text{-----(4.6)}$$

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

Por otro lado la anisotropía es definida como la variación en las propiedades mecánicas en un metal trabajado debido al proceso de deformación.

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 propiedades es función de la dirección específica del ensayo y se mide através del índice de anisotropía "r" ó de Langford, el cual indica el grado de resistencia del material a una reducción de espesor durante el proceso de embutido.

La definición de "r" es la siguiente:

$$r = \frac{\text{deformación en el ancho}}{\text{deformación en el espesor}} \quad \text{-----(4.7)}$$

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

af, ai = Anchos final, e inicial

ef/ei = Espesor final, e inicial

En la práctica resulta difícil la medición precisa de la variación del espesor, por lo que la ecuación anterior se puede expresar en términos de longitudes; considerando que el volumen del material permanece constante.

$$r = \frac{\ln(af/ai)}{\ln (li*ai)/(lf*af)} \quad \text{-----(4.8)}$$

li, lf = longitud inicial y final

El valor de "r" es función de la dirección como se muestra en la figura 4.5. Donde se puede observar que los valores máximos de "r" se encuentran a 0° y a 90° con respecto a la dirección de laminado, debido a la orientación de los cristales. Para obtener un valor más significativo de "r", Langford (Ref. 4) sugirió la siguiente ecuación:

$$\bar{r} = 1/4 (r_{0^{\circ}} + r_{90^{\circ}} + 2r_{45^{\circ}}) \quad \text{----- (4.9)}$$

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

De la definición del índice "r" de anisotropía (ecuación 4.7) se desprende la conveniencia de que éste tome valores mayores a la unidad ya que así se permitirá un mayor embutido sin que se presenten adelgazamientos o fracturas. Por tanto cuando \bar{r} es menor que 1.0 el material no es aplicable para embutido, prefiriéndose aquellos productos con índices \bar{r} entre 1.5 y 1.8. Para operaciones donde la pieza tiene relaciones de longitud a diámetro, mucho menores que la unidad, resulta necesario el uso de materiales con índices del orden de 1.8 a 2.2.

Los materiales que presentan índices \bar{r} menores que la unidad formarán defectos de orejas (vease tema defectos de la chapa) en el proceso de embutido y como consecuencia la eliminación de las piezas con el consiguiente desperdicio de material. Otro tipo de materiales que tiende a formar orejas son los que presentan índices "r" que difieren mucho entre sí. Es por eso que para evaluar la variación del índice "r" Keeler (Ref. 15) sugirió el

índice A_r , el cual es expresado como:

$$A_r = r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2r_{45^\circ} \quad \text{----- (4.10)}$$

Es evidente que si $D_r=0$ el material no formará orejas durante el proceso de embutido, cuando $D_r > 0$, se presentan orejas a 0° y 90° de la dirección de laminado.

Los parámetros antes propuestos requieren de tiempo y recursos considerables, Willis y Blade (Ref 5) propusieron un índice de anisotropía alterno:

$$EWS = \frac{h_e - h_t}{1/2(h_e+h_t)} \times (100) \quad \text{----- (4.11.)}$$

donde:

h_e = altura máxima de la pieza embutida

h_t = altura en la zona sin orejas de la tacilla

Como es obvio determinar los índices "n" y "r" ofrece un método más completo de comparación de materiales. A tal grado que la industria automotriz Europea ha estandarizado los métodos de prueba para determinar tales índices.

4.2.2 ENSAYOS DE EMBUTIDO

Existen diversos ensayos que permiten juzgar la capacidad de embutido de la chapa, mediante la realización de pequeñas embuticiones. Entre los ensayos más comunes se encuentran, el ensayo Erichsen, Persoz y Jovignot.

El ensayo Erichsen (figura 4.4) Consiste en medir la profundidad de una copela embutida por estirado con la ayuda de una matriz, un plato de presión (prensachapas) y un punzón esférico, como se muestra en la figura 4.4

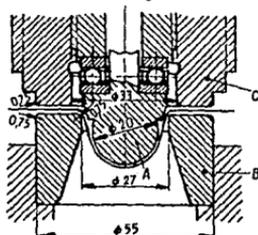


Figura 4.6 Ensayo Erichsen.

(Referencia 12)

Diversos factores tienen influencia sobre el índice Erichsen; como por ejemplo, el radio del borde de la matriz, el radio del punzón, el pulido del mismo, la lubricación de la superficie y la velocidad del ensayo.

Por su parte el ensayo Persoz (Fig. 4.5) se realiza con el plato de presión bloqueado, la geometría y la disposición de la matriz y punzón se muestra en la figura. Este ensayo está influenciado principalmente por, la velocidad del ensayo, la lubricación, y la presión del plato.

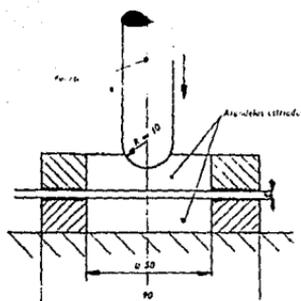


Figura 4.7. Ensayo Persoz.

(Referencia 12)

El ensayo Jovignot (Fig. 4.6) utiliza un principio diferente. Consiste en medir la profundidad alcanzada por estirado (con la ayuda de un fluido a presión) de un disco sujeto en su periferia.

Debido a las características de este ensayo es relativamente poco empleado, a causa de la dificultad de la correcta colocación de la probeta, convirtiendolo en un ensayo de laboratorio más que de taller.

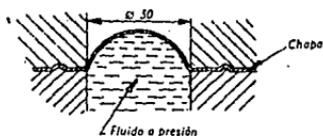


Figura 4.8. Ensayo Jovignot

(Referencia 12)

En general la embutibilidad de un metal depende primordialmente de la relación entre el diámetro del disco inicial al diámetro del punzón, D_0/D_p . Por la influencia de los factores de índole geométrica, el valor de esta razón puede oscilar entre 1.6 y 2.3. La carga del punzón aumenta casi linealmente con el diámetro del disco. Otros factores que afectan la embutibilidad son los radios del perfil de la embocadura o borde de la matriz y el borde del punzón. cuando el radio de la embocadura es menor que diez veces el espesor de la chapa, tanto la carga del punzón como la embutibilidad son seriamente afectadas. El radio del perfil del borde del punzón no afecta la carga de éste, pero puede ser decisivo para que pueda fabricarse o no una copa. Cuanto menor sea el radio (más agudo el borde), mayor es el adelgazamiento que se produce en esta región, aumentando la probabilidad de que se rasgue la copa. Por tanto el empleo de un punzón con el radio del borde muy pequeño provoca un doblado demasiado severo y produce una copa de poca resistencia. Por el contrario, un punzón con el borde demasiado suavizado, es decir, con radio demasiado grande, deja zonas de metal sin apoyar produciéndose pliegues.

4.2.3 DIAGRAMAS DE LIMITE DE FORMADO

El desarrollo de formas cada vez más complejas ha dado como resultado que los parámetros determinados a través de los ensayos antes mencionados sean insuficientes para asegurar el éxito en las operaciones de embutido, siendo entonces necesaria la implantación de pruebas que se aproximen más 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.

Keeler (Referencia 15) y Goodwin (Referencia 16) han implementado los diagramas de limite 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 (Fig. 4.9).

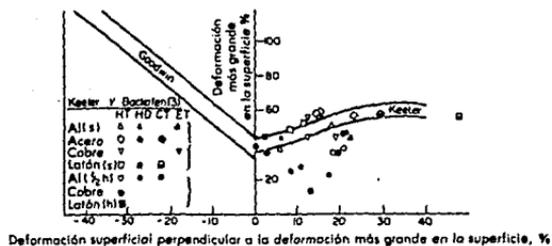


Figura 4.9.
Diagrama de límite de formado típico.
(Referencia 5)

La deformación es determinada mediante el grabado de un patrón de círculos de 2.5 mm sobre el material, el cual es posteriormente embutido con un punzón de 7.5 mm de diámetro. En ésta primera etapa se realiza el embutido de tal manera que, no se produzcan fallas en el material, procediendo entonces a la medición de 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 dichas elipses, este último dato da lugar a una coordenada en el diagrama (ϵ) mayor contra (ϵ) menor, al unir estos puntos se obtiene la característica de no falla en el material. Un posterior incremento en la profundidad de embutido hasta producir la fractura del material proveerá las coordenadas que al unirse indican las condiciones de falla en el material.

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 cualquier combinación de deformación mayor y menor, por abajo de la misma línea será viable. La construcción de los DLF es muy compleja pero, se ve compensado con creces por la precisión de la información que éstos proveen. La precisión de los datos del DLF es comparable con los obtenidos a partir de un programa de computadora, que utiliza el método de análisis de deformaciones por elemento finito.

4.3.0 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CAPACIDAD DE EMBUTIDO.

Ahora se analizarán los factores que determinan el comportamiento dúctil y por ende el comportamiento de la chapa en el proceso de embutido.

4.3.1 COMPOSICION QUIMICA

Es indiscutible que las propiedades de la chapa estan ligadas a su composición química, de tal forma, que ésta determina la incompatibilidad del material para un determinado uso.

Para los procesos de embutición es deseable que la composición química no rebase los siguientes rangos, para garantizar así una mayor ductilidad:

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

CONTENIDO EN CARBONO

Los bajos contenidos en carbono ($C < 0.1\%$) son deseables, en los aceros para embutido debido a que el carbono es poco soluble en el hierro a temperatura ambiente. En el caso que un acero contenga mayor contenido de carbono que el indicado, éste contendrá un cierto porcentaje de cementita Fe_3C (carburo de hierro). Si ésta está combinada con el hierro bajo la forma de perlita, que puede agruparse en forma de partículas alargadas por la laminación, hará descender las propiedades del metal. Por el contrario, si la cementita queda aislada, en forma de pequeños glóbulos muy

dispersos, se puede estimar que las propiedades serán buenas, ya que la deformación del metal estará muy poco influenciada por aquellas partículas.

Lo que es recomendable evitar, es que la cementita no se agrupe en las uniones de los granos, constituyendo una barrera rígida que se opone a la deformación.

CONTENIDO EN SILICIO

Los aceros para embutición tienen generalmente muy poco silicio, alrededor de 0.05%. No conviene sobrepasar 0.15% de silicio, ya que de lo contrario entraría en solución en la ferrita, aumentando la dureza de ésta y por ende del acero, con la consiguiente disminución en ductilidad.

CONTENIDO EN MANGANESO

El manganeso tiene un efecto endurecedor cuando su contenido sobrepasa 0.6%. Además el manganeso tiene un papel activo en la desulfuración y la formación de escoria, evitando la formación del FeS (sulfuro de hierro) y permitiendo la incorporación del azufre a la escoria respectivamente.

CONTENIDO EN AZUFRE

Generalmente se trata de mantener el contenido de azufre lo más bajo posible. Si el contenido en manganeso es demasiado bajo, el sulfuro de hierro que se forma, tiende a rodear los granos de una envuelta frágil y dura. El valor 0.040% es considerado como máximo para el contenido de azufre.

CONTENIDO EN FOSFORO

El fósforo, cuando entra en solución en la ferrita, hace a ésta dura. Además un porcentaje elevado de fósforo parece disminuir el tamaño de grano del metal, así como, elevar el límite elástico. Por todas estas razones el contenido máximo tolerado de fósforo en los aceros es de 0.040%.

Es recomendable para mejorar las características mecánicas del material de acuerdo a lo discutido al inicio del tema, que exista la presencia de elementos inhibidores del envejecimiento, y formadores de carburos carbonitruros y nitruros, dichos elementos son Nb, Ti, B, V y Al, adicionados en pequeñas proporciones. Mayores adiciones de estos elementos en combinación con un enfriamiento brusco, desde una temperatura de austenitización incompleta dará como resultado la aparición de martensita y bainita como componentes microestructurales característicos de los aceros microaleados, los cuales presentan dada su microestructura (martensita-bainita) una estructura definida como 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 factible a éstos aceros para usos donde se requieran embutidos profundos, como por ejemplo, la industria automotriz.

4.3.2 MICROESTRUCTURA Y TAMAÑO DE GRANO

Como se mencionó anteriormente es recomendable en los aceros para embutido un bajo porcentaje de contenido de carbono ($C < 0.1\%$), es decir, los aceros para embutido son del tipo hipoeutectoide generalmente, los cuales presentan una microestructura formada casi totalmente por ferrita (Fig 4.7) y en algunas ocasiones una matriz de ferrita con placas laminares de cementita, conocida con el nombre de perlita.

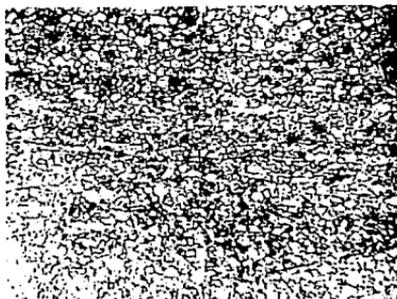


Figura 4.10.

Microestructura típica (ferrita) de un acero para embutido.

(Micrografía a 100 aumentos)

(Referencia 12)

El tamaño de grano medio debe de estar comprendido entre dos límites. en efecto, un grano demasiado fino da un metal duro y poco dúctil; por otro lado, un grano demasiado grande da al metal embutido un aspecto de piel de naranja (ver defectos de la chapa).

De tal manera que para los materiales de embutido es conveniente que el tamaño de grano se mantenga entre 0.035 y 0.045 mm lo que corresponde a las clases número 6 y 7 de ASTM.

Además del tamaño medio de los granos, tiene gran influencia que sean homogéneos, es decir, se debe evitar que existan granos anormalmente grandes que son origen de roturas, puntos débiles del metal, y aspecto de piel de naranja.

4.3.3 RUGOSIDAD.

El acabado superficial de los acero para embutido tiene un papel preponderante en el embutido, ya que la rugosidad permite que una capa de lubricante actúe entre las herramientas de embutir y la chapa, reduciendo la fricción, disminuyendo la carga de trabajo y evitando el estirado del material.

Para este propósito se recomienda que la superficie sea medianamente rugosa. Debido a que las superficies rugosas tienen tendencia a agarrarse a los útiles y demasiado lisa no son convenientes para la pintura. Por el momento no se cuenta con normas o estandares que limiten este parámetro, sin embargo, la práctica recomienda que una rugosidad aceptable es aquella que presenta una Ra (Rugosidad media aritmética) entre 1.2 y 2.4 μ m.

La rugosidad de la chapa se genera en el último paso de laminación y ésta está determinada por el propio acabado de los rodillos de trabajo.

4.4.0 DEFECTOS DE LA CHAPA DE ACERO

4.4.1 DIMENSIONALES

Aún cuando el material cumpla con las propiedades y acabados que de él se demandan es necesario que se encuentre dentro de ciertas tolerancias dimensionales, considerando no sólo su espesor sino la uniformidad que este parámetro tenga tanto en su ancho como en su longitud.

La variación dimensional más frecuente, es la del espesor con respecto al ancho de la chapa, la cual tiene su origen en la ligera cóncavidad que sufren los cilindros de laminación, bajo las intensas cargas a que son sometidos; provocando que la chapa presente un mayor espesor en la parte media de la hoja con respecto a las orillas de la misma.

La ligera cóncavidad de los cilindros se evita con un coronamiento adecuado de los mismos. El coronamiento consiste en desarrollar una convexidad que tiene como función compensar la deformación elástica del cilindro (flexión) producto de la presión resultante de la deformación del material.

Otros problemas que afectan las dimensiones del espesor son: El desajuste en la separación de los cilindros, el desigual desplazamiento del cilindro de ajuste provoca que la separación de éste con el otro cilindro de trabajo no sea uniforme, produciendo por consecuencia una hoja con espesores diferentes en las orillas. Otro efecto en la variación del espesor es el calentamiento de los cilindros por trabajo, y como consecuencia del calentamiento de los cilindros, la chapa presenta una ligera convexidad, o al

contrario una ligera depresión (cóncavidad).

4.4.2 HETEROGENEIDAD DEBIDA AL RECOCIDO.

El recocido tiene por objeto recuperar la ductilidad de la chapa, pérdida por efecto del trabajo en frío. Para asegurar un buen recocido es necesario llevar el material a una temperatura suficiente para asegurar la recristalización y mantenerlo a la misma temperatura durante un tiempo muy largo y enfriarlo muy lentamente, como se mencionó en capítulos (capítulo II) anteriores, estas condiciones sólo se logran en un horno especial denominado "Horno de Recocido Continuo", sin embargo, éste tipo de horno no es muy frecuente, siendo el más común el "Horno de Recocido en Lotes", al cual se introduce la chapa en rollos (bobinas), trayendo como principal defecto un calentamiento excesivo en la superficie del rollo y un calentamiento deficiente en el corazón de la bobina, provocando diferentes zonas de recristalización y por ende diferentes propiedades en la chapa, menoscabando sus propiedades de embutido.

4.4.3 ANISOTROPIA.

Muchas de las propiedades de los materiales cristalinos son anisotrópicas debido al arreglo repetitivo de los átomos en el espacio. Se dice que un material es anisotrópico cuando sus propiedades no son idénticas en todas direcciones, es decir sus propiedades favorecen alguna(s) direccione(s) cristalográficas(s) específicas(s).

La anisotropía es la causante de la presencia de deformaciones irregulares en la altura de los bordes de la copela cilíndrica

embutida, a éste tipo de deformación comúnmente se le conoce como "orejas". Otra consecuencia de la anisotropía es la presencia de roturas prematuras y orientadas que se producen durante la deformación de la chapa.

4.4.4 DEFECTOS DEBIDOS A LA LAMINACIÓN

DEFECTOS DEL TIPO GRIETAS

Los bordes del material son trabajados intensamente en el curso de las diferentes operaciones de laminación. De ello resulta que el menor defecto del metal da origen a una grieta. Estos defectos se eliminan mediante el corte de los bordes, que al mismo tiempo regulariza el ancho de la banda.

DEFECTOS DEL TIPO HELECHOS

Estos defectos son debidos a una repartición desigual, sobre el ancho de la chapa, de los esfuerzos de laminación. En la laminación en frío, generalmente se trabaja a partir de una banda ligeramente cóncava, debida al bombeo (convexidad) sufrido por los cilindros de laminación en caliente; por esto, cuando llega la banda cóncava, se hace trabajar exageradamente al metal del borde, con tendencia a impulsarlo hacia el centro. Entonces se producen en el metal marcas oblicuas cuyo aspecto recuerda a los helechos, de donde proviene su denominación.

Así mismo, si los cilindros de laminación en frío tienen demasiada convexidad con el objeto de eliminar la deformación elástica de éstos, el trabajo sobre una banda de espesor constante deforma exageradamente el metal del centro; existiendo tendencia a impulsar el material hacia los bordes, lo que produce marcas en dirección oblicua.

Estos defectos son poco visibles en el control de calidad de la chapa, sin embargo, son muy visibles después del proceso de embutido, el metal presenta una gran crudeza en las zonas donde existen estos defectos, realizando relieves, haciendo la chapa inservible para embuticiones visibles.

DEFECTOS DEL TIPO GRABADOS

Se mencionó en capítulos anteriores, que el óxido que aparece en la laminación en caliente es eliminado por la acción de chorros de agua a alta presión, colocados inmediatamente después de cada caja. Puede ocurrir, sin embargo, que por un mal funcionamiento del sistema se formen algunas placas de óxido que se laminen con el metal; estas partículas se incrustan en la superficie de la chapa y el decapado no puede eliminarlas; se las encuentra después de la laminación en frío bajo la forma de grabados.

Las marcas de los cilindros pueden producirse tanto en la laminación en caliente como en frío. Pequeñas partículas, adheridas a los cilindros de laminación en caliente, marcan en la chapa defectos apenas visibles, que son enmarcados por la laminación en frío; la mayor parte de las veces estos defectos no son detectados hasta la embutición. Son repetidos y alineados.

DEFECTOS DEL TIPO PICADURAS

Un decapado demasiado enérgico puede atacar localmente la chapa formando pequeños cráteres; esto es lo que constituye el defecto picaduras; puede ser debido a una mala regulación, bien en la temperatura de los baños, de las concentraciones, o aun a irregularidades en la velocidad del avance de la banda.

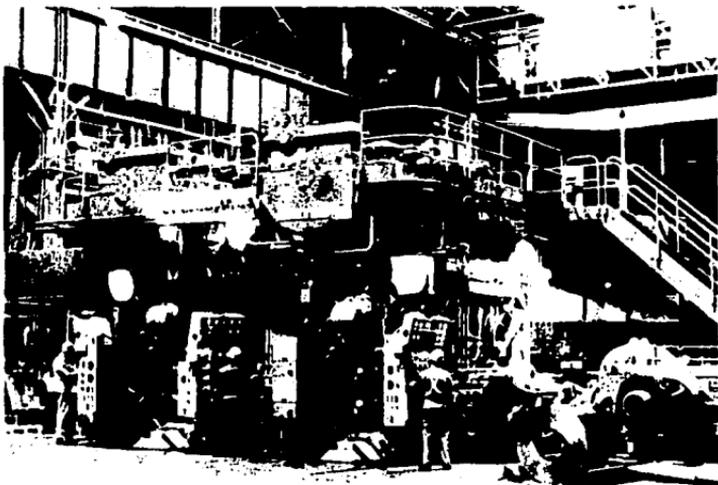
Estos defectos producen inconveniencia de las piezas embutidas para exponerse en lugares visibles, además de ser en muchos casos concentradores de esfuerzos.

DEFECTOS DEBIDOS AL ENVEJECIMIENTO: VERMICULTURAS

Como se mencionó al inicio del capítulo, el envejecimiento es un fenómeno de evolución espontánea del acero con el tiempo, donde se cambia la estructura cristalina del acero y por ende sus propiedades, provocando la aparición en las piezas embutidas de defectos llamados vermiculturas. Estos defectos se presentan bajo la forma de líneas en bajorrelieve en la superficie de la chapa, provocando que para piezas visibles se elimine dicho material.

La chapa envejecida presenta en el embutido los defectos, llamados vermiculturas. Estos defecto pueden detectarse por medio del ensayo de tracción en las proximidades del límite elástico; en esta zona la probeta presenta líneas rectas a aproximadamente 45° , dichas líneas se denominan líneas de Luder o de Piobert y se presentan mientras el alargamiento no ha sobrepasado el último alargamiento correspondiente al límite elástico de la chapa.

CAPITULO V.
EXPERIMENTACION



TREN LAMINADOR DE CHAPA DE ACERO EN FRIO.
(Referencia 3)

5.0 EXPERIMENTACION

5.1 INTRODUCCION

La evaluación de la calidad y propiedades del material se puede analizar desde dos diferentes puntos de vista; esto por una parte nos permite determinar la posibilidad de que el material pueda ser empleado para los fines que se demandan, como por ejemplo, producir una simple lata o una compleja parte de la carrocería de los modernos automóviles, mientras que por otro lado nos permite relacionar sus propiedades con las características de su proceso de producción, como por ejemplo, ciertas condiciones de precalentamiento, temperatura de enrollamiento, ciclos de recocido, así como composición del material durante el proceso de fusión.

5.2 DESAROLLO EXPERIMENTAL

En la experimentación la chapa de acero fue sometida a muy diversas pruebas y mediciones, para poder evaluar de la forma más precisa y veraz, sus propiedades, y por ende su comportamiento en el proceso de embutido.

Para la caracterización de la chapa se llevarón a cabo las siguientes pruebas.

- I .-) Análisis químico,
- II -) Determinación de la rugosidad,
- III.-) Determinación de variaciones en el espesor de la chapa,
- IV .-) Análisis metalográfico,

- V.-) Ensayo de tracción en muestras tomadas en la dirección del eje de laminación, a 45° y a 90° del mismo.
- VI.-) Ensayos de embutido según Erichsen,
- VII.-) Determinación del diagrama de límite de formado del material.

5.3 MATERIAL

En la experimentación del presente trabajo, se empleó chapa de acero calibre # 22 tipo AISI-SAE 1008 calidad comercial producida por AHMSA.

Las probetas y mediciones realizadas, fueron seleccionadas y tomadas de un lote de 35 hojas de lámina calibre 22, de 10 pies (3.048 metros) de longitud por 3 pies (0.914 metros) de ancho.

5.4 ANALISIS QUIMICO

El análisis químico se efectuó con un espectrómetro de chispa, reportando los siguientes resultados.

C	-	0.0789%
Mn	-	0.36%
Si	-	0.12%
P	-	0.02%
Al	-	0.20%
S	-	0.0165%
Fe	-	el resto

De la composición química reportada, se puede constatar que el

materia en cuestión, si cumple con la composición química de un acero 1008 AISI-SAE.

5.5 DETERMINACION DE LA RUGOSIDAD

La chapa de acero debe tener una superficie medianamente rugosa. Ya que una superficie demasiado rugosa presenta tendencia a agarrarse a los útiles de embutir, y demasiado lisa no es conveniente para la pintura y acabados superficiales.

La práctica ha demostrado que una chapa de acero con una rugosidad media aritmética (R_a) de 1.2 a 2.4 μm . es aceptable para los procesos de embutido.

METODO EXPERIMENTAL. 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 ésta puede presentar los cuales se agrupan en cuatro ordenes de magnitud que son:

Primer orden	Defectos de forma.
Segundo orden	Irregularidad en la envolvente de la superficie.
Tercer orden	Estrías y surcos.
Cuarto orden	Defectos aperiódicos.

La rugosidad del material se caracteriza entonces por los defectos de tercer y cuarto orden, que son a final de cuentas las estrías y surcos tanto periódicos como aperiódicos. De éstas se pueden obtener una gran variedad de parámetros como son: la media aritmética de las desviaciones del perfil de la muestra a partir de la línea media (R_a), la raíz cuadrática media de la desviación

del perfil (Rq), el promedio de alturas de pico a valle (Rz), la altura máxima de pico a valle ó profundidad máxima de rugosidad (Rmax), la máxima altura del perfil de rugosidad arriba de la línea media (Rp). Dichos valores fueron determinados en 10 muestras por ambas caras, de acuerdo a las normas DIN 4760, 4761, 4762, y 4763, con un rugosímetro MITUTOYO SURPTEST-402 portátil.

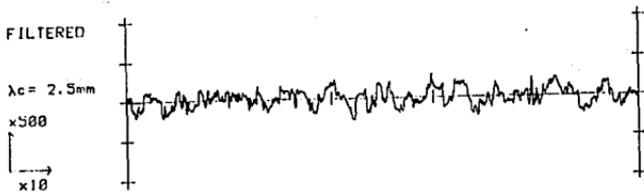
En la tabla 5.1 se presentan los resultados del ensayo de rugosidad, mientras que en las figuras 5.1 y 5.2 se presentan los perfiles de rugosidad del material.

T A B L A 5.1. Datos de rugosidad

NUMERO DE ENSAYO	Ra (μm)	Rq (μm)	Rmax (μm)	Observaciones
1	4.1	4.8	20.2	Lado A muestra 1
2	4.2	5.7	12.0	Lado B muestra 1
3	3.3	4.0	22.0	Lado A muestra 2
4	3.9	5.3	32.0	Lado B muestra 2
5	4.5	6.5	11.2	Lado A muestra 3
6	2.6	3.8	17.0	Lado B muestra 3
7	3.0	3.9	20.2	Lado A muestra 4
8	2.8	3.7	19.2	Lado B muestra 4
9	1.9	2.5	11.0	Lado A muestra 5
10	3.0	3.7	13.0	Lado B muestra 5
11	4.2	5.9	40.0	Lado A muestra 6
12	3.1	4.4	30.0	Lado B muestra 6
13	2.7	3.6	11.0	Lado A muestra 7
14	4.2	5.7	26.6	Lado B muestra 7
15	3.5	4.7	12.0	Lado A muestra 8
16	4.9	6.8	24.0	Lado B muestra 8
17	2.9	4.4	14.8	Lado A muestra 9
18	3.9	4.9	22.8	Lado B muestra 9
19	4.1	5.2	26.0	Lado A muestra 10
20	3.6	4.9	33.0	Lado B muestra 10

MITUTOYO SURFTES1

RANGE	100um
λ_c	2.5mm
R_a	7.3um
R_z (DIN)	18um
R_{max} (DIN)	22um
R_q	4.0um
R_L	27um
R_p	8um



MITUTOYO SURFTES1

RANGE	100um
λ_c	2.5mm
R_a	3.9um
R_z (DIN)	25um
R_{max} (DIN)	32um
R_q	5.3um
R_L	33um
R_p	16um

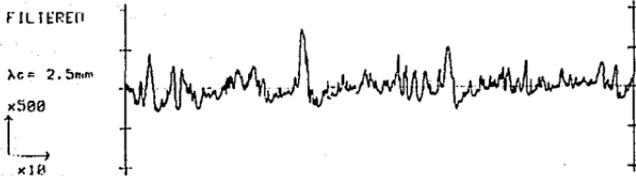


Figura 5.1

Gráficas del perfil de rugosidad, muestra 3,
lado A y B respectivamente.

HITUTOYO SURFTEST

RANGE 100um
 λ_c 2.5mm
 Ra 1.2um
 Rz (DIN) 26um
 Rmax(DIN) 48um
 Rq 0.9um
 Rt 11um
 Rp 19um



HITUTOYO SURFTEST

RANGE 100um
 λ_c 2.5mm
 Ra 3.1um
 Rz (DIN) 22um
 Rmax(DIN) 30um
 Rq 4.4um
 Rt 33um
 Rp 15um

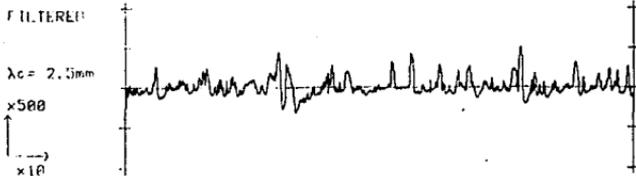


Figura 5.2

Gráficas del perfil de rugosidad, muestra 6,
 lado A y B respectivamente

5.6 DETERMINACION DE VARIACIONES EN EL ESPESOR DE LA CHAPA.

En este aspecto se realizarón medidas en las orillas y centro de las láminas, como se muestra en al figura 5.3, con la finalidad de comprobar la uniformidad del espesor en el material.

Las mediciones se realizarón con un micrómetro digital electrónico cuya precisión es 0.001 mm.

DISTRIBUCION DE ESPESORES EN CHAPA COMERCIAL
CALIBRE 22

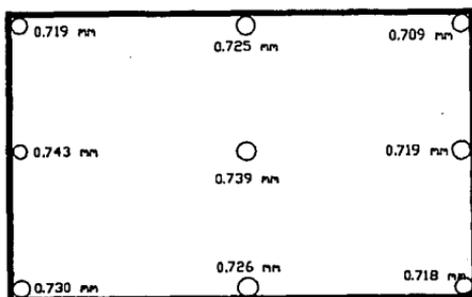


Figura 5.3
Espesores promedio en lámina de acero calibre # 22.

La figura 5.3 muestra los espesores promedio obtenidos en las mediciones realizadas, las dimensiones de la hoja mostrada son, 10 pies (3.048 metros) de longitud por 3 pies (0.914 metros) de

ancho Es importante tener en cuenta que cuando se habla de una chapa calibre # 22, se habla de un espesor de chapa de 0.762 milímetros (0.030 pulgadas).

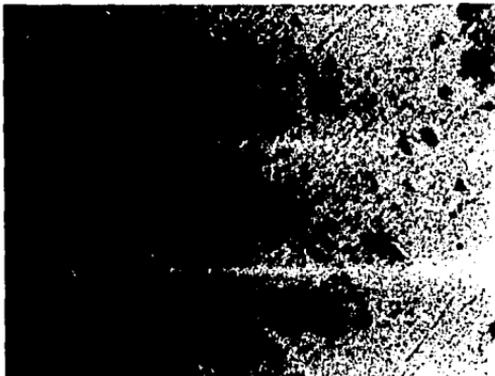
5.7 ANALISIS METALOGRAFICO

Una vez terminada la medición de la rugosidad, se procedió a obtener las muestras para el estudio metalográfico de la chapa. Las muestras se obtuvieron en cortes tanto longitudinales como transversales al eje de laminación.

A continuación se realizó la preparación de las muestras para el estudio metalográfico. La técnica utilizada consistió en, montaje en caliente de las muestras, para facilitar su manejo, desbaste grueso con lijas de los números 180, 240, 320, 400, 500 y 600, pulido fino con alumina de 0.3 μ .

Las mismas muestras pulidas y protegidas con un baño de alcohol fueron utilizadas para observar y determinar, el tipo de inclusiones en el material (Fotografías. 5.1 y 5.2). Dichas muestras se observaron en el microscopio metalográfico a 100 aumentos, llegando a determinar la presencia de óxidos en muy variada densidad, así como, eventualmente alumina.

Posteriormente las mismas muestras fueron atacadas con nital al 3%, para revelar su microestructura, dichas muestras fueron observadas a diferentes aumentos, llegando a determinar algo que ya se prevía, debido al tipo de acero que se trataba. La microestructura de la chapa está formada casi totalmente por ferrita (fotografías. 5.3 y 5.4). Algo importante de mencionar es la gran heterogeneidad en el tamaño de grano.



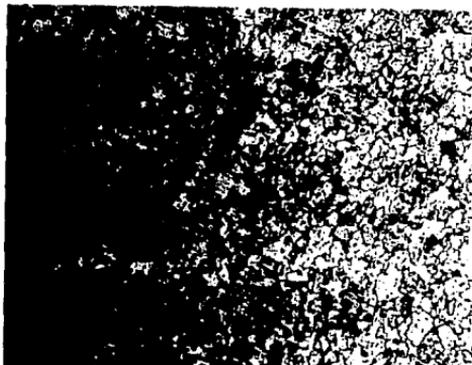
Fotografía 5.1

Muestra sin ataque, observada a 100X presentando una mezcla de óxidos gruesos y finos tipo 3 y 4 (ASTM E-45).



Fotografía 5.2

Muestra sin ataque, observada a 100X presentando óxidos gruesos y alumina serie fina.



Fotografía 5.3

Cristales de ferrita en la chapa de acero 1008
observada a 100X, atacada con nital al 3%.



Fotografía 5.4

Microestructura de la lámina observada a 100X,
presentando heterogeneidad en el tamaño de grano.

El tamaño de grano se midió usando el método de comparación según la norma ASTM. La muestra atacada se observó a 100X en el microscopio, comparando las dimensiones de los granos de la muestra con una serie de patrones estándar clasificados, que cubren los diversos tamaños de grano (ASTM E112-63). Determinándose que el tamaño de grano es.

TAMARO DE GRANO DE LA CHAPA: No. 6, en un 60%.

TAMARO DE GRANO DE LA CHAPA: No. 8, en un 40%.

Como las muestras presentarán un tamaño de grano mixto (fotografía 5.4) se especifico el tamaño en términos de dos números denotando el porcentaje aproximado de cada tamaño presente.

5.8 ENSAYO DE TRACCION

Para realizar éste ensayo se cortaron 16 muestras del material, 5 a 0°, es decir a lo largo del eje de laminación, 6 a 45° y 5 a 90°. Los ensayos se realizaron de acuerdo a la norma ASTM E-8, en una máquina de pruebas dinámicas INSTRON servohidráulica, modelo 1331. En dichos ensayos se determinó:

- I.-) Esfuerzo de cedencia al (0.2%),
- II.-) Esfuerzo máximo,
- III.-) Índice de endurecimiento,
- IV.-) Índice de Langford.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación. En la figura 5.4 se muestran las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a las probetas 5 y 16 tomadas a 0°, mientras que

la figura 5.5 muestra las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a las probetas 2 y 3 tomadas a 45° , así como, las de las probetas 6 y 11 tomadas a 90° .

La tabla 5.2 presenta los datos de, esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo, deformación máxima, índice de endurecimiento (n), e índice de Langford (r), correspondientes a los 16 ensayos.

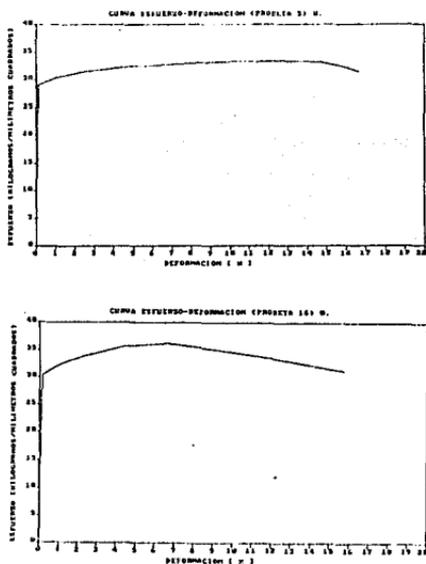


figura 5.4

Curvas esfuerzo-deformación de las probetas colineales con el eje de laminación (0°).

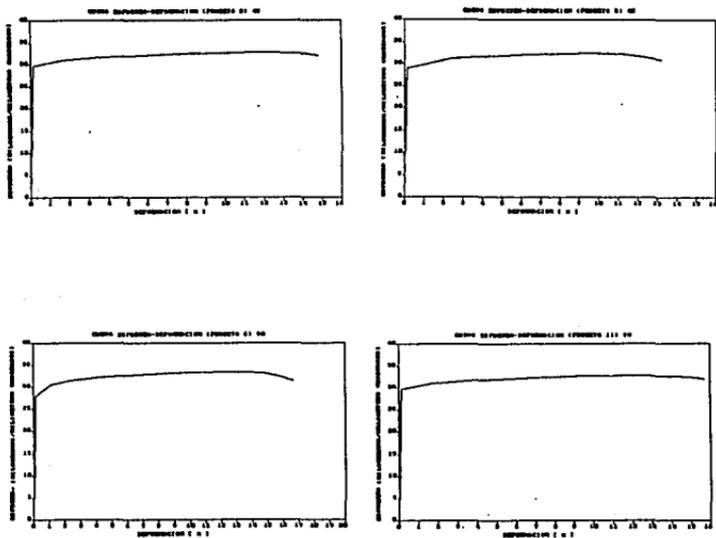


Figura 5.5
 Curvas esfuerzo-deformación representativas de las probetas
 a 45° , y 90° con respecto al eje de laminación.

T A B L A 5.2

NUMERO DE ENSAYO	ESFUERZO DE CEDENCIA σ_y (Kg/mm ²)	ESFUERZO MAXIMO σ_{MAX} (Kg/mm ²)	DEFORMACION MAXIMA ϵ_{MAX}	INDICE DE EN DURECIMIENTO n	INDICE DE LANGFORD r	ANGULO CON RESPECTO AL EJE DE LAMINACION 0°
1	31.76	32.64	15.41X	0.068	1.150	45°
2	29.67	33.76	15.98X	0.1225	0.9722	45°
3	29.0	32.39	14.45X	0.0941	0.8741	45°
4			14.26X		1.1876	90°
5	28.96	35.34	11.94X	0.1358	1.160	0°
6	27.81	34.52	17.44X	0.1217	1.045	90°
7	29.39	33.49	17.99X	0.120	0.5806	45°
8	28.60	33.29	19.61X	0.1392	1.1034	90°
9	30.0	33.58	18.50X	0.1193	0.7897	45°
10	31.29	37.60	22.58X	0.1335	1.1229	0°
11	27.93	32.62	20.52X	0.1270	0.9988	90°
12	29.66	33.96	21.25X	0.1367	0.8292	90°
13	31.86	38.18	21.95X	0.1550	1.125	0°
14	29.42	33.08	19.59X	0.1287	0.670	45°
15	32.26	37.81	20.06X	0.1310	1.2428	0°
16	30.36	37.56	15.87X	0.1175	1.069	0°

Tabla 5.2

Datos de los ensayos de tracción

5.9 ENSAYOS DE EMBUTIDO

El propósito del ensayo de embutido fue determinar el índice de embutido del material, el cual se determina midiendo la máxima penetración del punzón sobre la chapa, antes de que ocurra la ruptura.

El índice de embutido, también conocido como índice Erichsen, se determinó de acuerdo a la norma ISO-DIS 6490-Sheet and strip-Modified Erichsen Lapping, que es equivalente a la norma nacional DGM B131-1964.

Los ensayos se realizaron en muestras del mismo lote de lámina que el empleado para las pruebas de tracción. Para la realización de los mismos se utilizó una máquina de ensayos dinámicos INSTRON servohidráulica, modelo 1331. Obteniendo los datos mostrados en la tabla 5.3.

T A B L A 5.3

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

5.10 DIAGRAMA DE LIMITE DE FORMADO

Para determinar el diagrama de limite de formado, se cortarón muestras del material de 9 X 24 cms., las cuales fuerón sometidas a un proceso de fotograbado superficial de malla circular de 4.88mm. de diámetro (Fotografía. 5.5). Se experimentó con la profundidad de fotograbado, buscando que las marcas de la malla circular no fuerán profundas, para que no actuarán como concentradores de esfuerzos favoreciendo la falla del material; así como, tampoco fuerán tan superficiales que desaparecieran durante el proceso de deformación, imposibilitando la medición en la malla distorsionada. De esta experimentación se llegó a determinar que la profundidad menos desfavorable para los ensayos es de 0.01 mm.

Una vez determinada la profundidad de fotograbado, se procedió a grabar la malla sobre todas la muestras. Posteriormente se prepararon las muestras para los ensayos de tracción y embutido.

Las muestras previamente preparadas se ensayaron en la máquina servohidráulica antes mencionada. A las muestras ensayadas se les midió, el eje mayor y el eje menor sobre los círculos deformados de la malla fotograbada, determinandose los datos de la tabla 5.4, mismos que fuerón utilizados para generar el diagrama de limite de formado del material (Fig. 5.8). Teniendo en cuenta que los datos del ensayo de embutido generan el primer cuadrante del diagrama, mientras que los datos del ensayo de tracción generan el segundo cuadrante. En la figura 5.7 se muestra la dispersión de los datos obtenidos, donde se nos presenta la información del comportamiento del material en forma confusa. Para obtener la información de los

ensayos en forma clara y precisa, fué necesario desarrollar un programa de computadora, para ajuste de curvas (Ver apéndice B).

Una vez realizado el programa, se procedió al ajuste de los datos de los ensayos de tracción y embutido, llegando a obtener el diagrama final de límite de formado, mostrado en la figura 5.8, el cual presenta la información del comportamiento del material en forma clara.

T A B L A 5.4

NUMERO DE ENSAYO	DIAMETRO INICIAL (mm)	SERIEYE MAYOR (mm)	SERIEYE MENOR (mm)	DEFORMACION MAXIMA ϵ_1	DEFORMACION MINIMA ϵ_2	SE FRACTURO EL MATERIAL
1.1	4.88	7.32	6.34	0.405	0.262	SI
1.2	4.88	7.77	6.12	0.465	0.226	SI
1.3	4.88	7.42	6.18	0.419	0.236	NO
1.4	4.88	7.00	6.24	0.361	0.246	NO
2.1	4.88	7.29	6.28	0.401	0.252	SI
2.2	4.88	7.24	6.31	0.394	0.257	SI
2.3	4.88	7.86	6.05	0.477	0.215	NO
2.4	4.88	7.58	6.83	0.440	0.336	NO
3.1	4.88	7.50	6.32	0.430	0.259	SI
3.2	4.88	7.56	6.30	0.438	0.286	SI
3.3	4.88	7.28	6.22	0.400	0.243	NO
3.4	4.88	7.43	6.33	0.420	0.260	NO
4.1	4.88	7.71	6.21	0.457	0.241	SI
4.2	4.88	7.65	6.31	0.450	0.288	SI
4.3	4.88	7.79	6.33	0.468	0.291	SI
4.4	4.88	7.86	6.10	0.477	0.223	SI
5.1	4.88	7.65	6.67	0.450	0.312	SI
5.2	4.88	7.61	6.15	0.444	0.231	SI
5.3	4.88	7.00	6.38	0.361	0.268	SI
6.1	4.88	7.73	6.51	0.460	0.288	NO
6.2	4.88	7.66	6.27	0.451	0.251	NO
6.3	4.88	7.38	6.22	0.414	0.243	NO
6.4	4.88	7.64	6.08	0.448	0.220	SI
7.1	4.88	7.86	6.35	0.477	0.263	NO
7.2	4.88	7.67	6.33	0.452	0.260	NO
7.3	4.88	7.64	6.45	0.448	0.279	NO
7.4	4.88	7.43	6.19	0.420	0.238	NO
8.1	4.88	7.79	6.31	0.468	0.257	NO
8.2	4.88	7.97	6.44	0.491	0.277	NO
8.3	4.88	7.45	6.33	0.423	0.260	NO
8.4	4.88	7.64	6.00	0.448	0.207	NO
8.5	4.88	7.74	6.31	0.461	0.288	NO
9.1	4.88	7.87	6.38	0.478	0.268	NO
9.2	4.88	7.80	6.37	0.469	0.266	NO
9.3	4.88	7.68	6.11	0.453	0.224	NO
9.4	4.88	7.76	6.08	0.464	0.220	NO
10.1	4.88	7.10	5.23	0.375	0.070	NO
10.2	4.88	7.43	5.79	0.420	0.017	NO
10.3	4.88	7.93	6.57	0.485	0.300	NO
11.1	4.88	7.54	5.96	0.435	0.196	SI
11.2	4.88	7.14	5.45	0.381	0.110	NO
11.3	4.88	7.36	5.67	0.410	0.150	NO
11.4	4.88	7.60	6.09	0.443	0.221	NO
12.1	4.88	7.79	6.40	0.468	0.271	SI
12.2	4.88	7.44	5.84	0.422	0.180	NO
12.3	4.88	7.73	6.26	0.460	0.250	NO



Fotografía 5.5.

Aspecto de la malla circular fotografada en las muestras.



Fotografía 5.6.

Aspecto de la malla después de la deformación en el embutido.

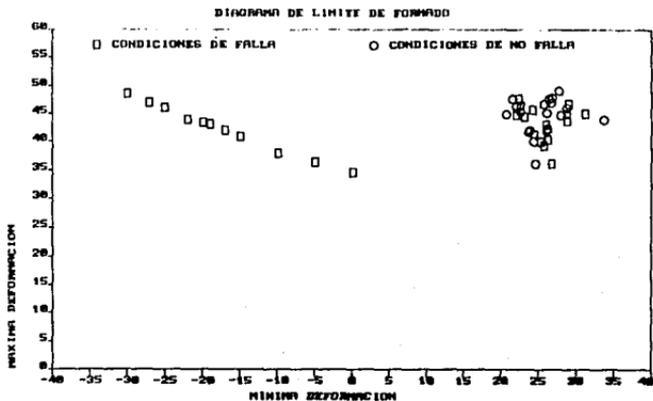


Figura 5.7

Dispersión de los dato obtenidos.

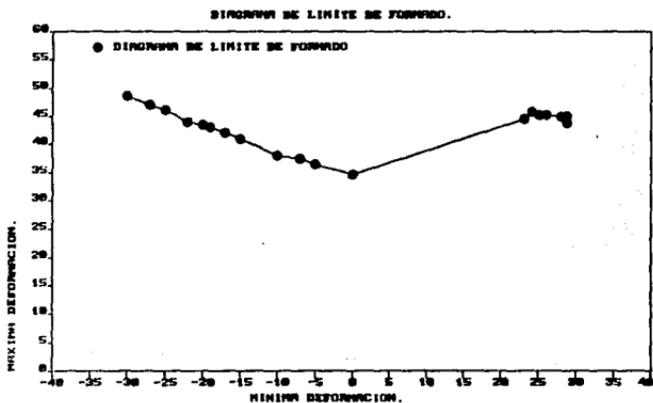


Figura 5.8

Diagrama de limite de formado del material.

6.0 ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De los análisis, mediciones y ensayos realizados a la chapa en estudio, proveniente de Altos Hornos de México S.A.; se concluye lo siguiente:

6.1 ANALISIS QUIMICO

El análisis químico realizado al material, es muy próximo al rango de valores especificados por la norma AISI-SAE para dicho acero. Concluyéndose que el control de la composición química es muy bueno, satisfaciendo así los valores exigidos por norma.

A manera de ilustración se muestra a continuación la composición química del acero 1008 según la norma AISI-SAE.

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
0.10máx	0.3-0.5	0.04máx	0.05máx

De la composición química de norma y la composición química obtenida (capítulo 5) se puede constatar lo anterior.

6.2 RUGOSIDAD

Si consideramos los valores de rugosidad exigidos a la chapa de acero, por la industria automotriz, los cuales fueron determinados en la práctica de los procesos de embutido.

Dichas exigencias están relacionadas al parámetro Ra (Rugosidad media aritmética); la cual debe estar comprendida entre 1.2 y 2.4 μm . para poder ser aceptada. Ahora bien, la chapa experimentada presenta valores de Ra muy por arriba del límite superior exigido por la industria automotriz. Dado que de las 20 mediciones realizadas se obtuvo un promedio de rugosidad de:

$$\bar{R}_a = 3.52\mu\text{m}.$$

y desviaciones del 53.97% con respecto a la rugosidad más pequeña (1.9 μm .), así como, del 67.61% con respecto a la rugosidad más grande (5.9 μm .).

Por lo anterior se concluye que el acabado superficial del material es muy irregular y diferente en ambas superficies. A tal grado que no cumple con las exigencias de rugosidad necesarias para los procesos de embutido. Esto es debido al proceso rudimentario empleado, en el grabado de los cilindros del tren acabador, en este caso se realiza mediante el proceso de granallado, el cual no es muy controlable, obteniéndose sobre los cilindros un acabado poco reproducible y difícilmente descriptible. Se debe tener en cuenta que la variación de rugosidad da como resultado inconvenientes, tanto durante el proceso de embutido como en las operaciones de pintura.

Es por esto que resulta necesario diseñar normas para el grabado de los cilindros de trabajo de la última etapa de laminación, para así poder controlar dentro de límites más estrechos, la uniformidad de la rugosidad.

6.3

ESPESOR

En la experimentación del presente trabajo se empleó hoja calibre # 22, la cual tiene un espesor normalizado de 0.762 mm. (0.030 pulg.). En chapas del mismo lote se encontraron espesores promedio entre 0.72 mm., con variaciones en las mismas del orden de ± 0.02 mm, ésto tanto en dirección transversal como longitudinal. Dichos espesores se aproximan más al calibre # 23 (no comercial), con un espesor normalizado de 0.685mm., que al propio de procedencia. Lo que demuestra que el control de proceso en lo referente al calibre deja mucho que desear.

Las variaciones en el espesor son relacionadas a la irregularidad del acabado de la chapa, así como, a un mal coronamiento de los cilindros de laminación en frío, combinado con un mal ajuste del calibre en el paso acabador ó de calibración del material.

Dichas deficiencias en el calibre de la chapa, provocan que en algunos casos el consumidor, si el volumen manejado así lo justifica, instale una caja para calibración de espesores, en su planta o taller, con el consiguiente incremento en costo que dicho procesamiento y equipo implica en el producto terminado.

6.4 METALOGRAFIA.

En las observaciones hechas a 40, 80 y 100 aumentos en las muestras transversales y longitudinales, se determinó una gran densidad de óxidos clasificados según la norma ASTM E-45, como óxidos gruesos tipo 4 y óxidos finos tipo 1, además de pequeñas inclusiones de alumina. Esto demuestra una práctica de desoxidación deficiente, dando como resultado un material de baja calidad y capacidad de embutido.

Dicho volumen se puede disminuir con la inyección de gases inertes por el fondo del convertidor durante el proceso de aceración. Ya que dicha inyección reduce el contenido de oxígeno del acero líquido, dando como resultado menos óxidos en el acero sólido, otra ventaja de esto es que los gases inertes agitan al acero líquido mejorando su homogeneidad en propiedades.

La gran heterogeneidad observada en el tamaño de grano, muestra deficiencias en el proceso de recocido, en este caso se realiza en hornos del tipo campana, donde el ciclo térmico de calentamiento no asegura la austenitización completa de los rollos de acero, trayendo como consecuencia una deficiente difusión de los átomos a través de los límites de grano, dando como resultado, la recristalización parcial del material, con la consecuente

variación del tamaño de grano.

Para garantizar la austenitización y la recristalización total del acero, es conveniente realizar un estudio de las diferentes temperaturas desarrolladas dentro del horno, para así tener un mayor control de la temperatura y tiempo de permanencia de los rollos de acero dentro del horno. Una vez controlados los parámetros anteriores se puede realizar con buenos resultados el recocido de la chapa, obteniendo por consecuencia mayor uniformidad en el tamaño de grano. Se deben de tener en cuenta las desventajas del recocido en hornos del tipo campana.

6.5 ENSAYOS DE TRACCION.

Los ensayos de tracción se realizarón de acuerdo a la norma ASTM E-8. De los resultados obtenidos se comprueba que se trata de un material previamente endurecido por trabajo, que no ha pérdido completamente sus antecedentes durante el proceso de recocido, presentando una reducida ductilidad, un bajo exponente de endurecimiento y un alto grado de anisotropía. En general el material se comporta de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\sigma = \sigma_y (1 + c \epsilon^n) \quad \text{----- (6.1)}$$

donde:

σ = esfuerzo de deformación plástica,

σ_y = esfuerzo de cedencia,

c = deformación plástica,

m, n = constantes adimensionales.

Para determinar el índice de endurecimiento promedio (\bar{n}) se determinarán primero los valores promedio de (n) en las direcciones a 0°, 45° y 90°, con respecto a la dirección de laminación, obteniéndose.

$$\bar{n}_{0^{\circ}} = 0.1345 \pm 0.01203$$

$$\bar{n}_{45^{\circ}} = 0.1087 \pm 0.02121$$

$$\bar{n}_{90^{\circ}} = 0.1311 \pm 0.00710$$

Posteriormente se calculó el índice promedio (\bar{n}) de acuerdo a la ecuación (4.6).

$$\bar{n} = 0.1273$$

De dicho valor se concluye, que el material presenta un índice de endurecimiento muy por debajo de los valores necesarios para garantizar el éxito en las operaciones de embutido. Ya que éste debe permanecer entre 0.6 y 2.10 para poder considerar al material útil para el proceso de embutido.

Para determinar el índice promedio de anisotropía (\bar{r}) primero se determinarán los valores promedio de (r) en las direcciones 0°, 45° y 90°, con respecto a la dirección de laminado.

$$r_{0^{\circ}} = 1.1439 \pm 0.05735$$

$$r_{45^{\circ}} = 0.8394 \pm 0.1886$$

$$r_{90^{\circ}} = 1.0328 \pm 0.1197$$

Posteriormente haciendo uso de la ecuación (4.9) se

calculó el índice promedio (\bar{F}).

$$\bar{F} = 0.965$$

Finalmente se calculó la variación en anisotropía, de acuerdo a la ecuación (4.10).

$$Ar = 0.4979$$

Comprobándose que el material es sumamente anisotrópico, ya que sus propiedades varían en grandes porcentajes en función de la dirección. Con respecto al índice de anisotropía promedio (\bar{F}), la anisotropía en la dirección colineal al eje de laminación (0°), presenta una variación del 17.5%, en dirección a 45° , la variación en anisotropía es del 13.4%, y en dirección a 90° , la variación es del 8%. Condiciones éstas totalmente previsible e inherentes al proceso de fabricación de la chapa.

El valor de (\bar{F}) obtenido demuestra que el material presenta alta anisotropía y por ende baja calidad. Ya que cuando (\bar{F}) es menor que la unidad el material no es aplicable en las operaciones de embutido, debido a que dicho materiales presentan adelgazamiento y rupturas prematuras. Generalmente para las operaciones de embutido se requieren materiales con índices de anisotropía entre 1.5 y 1.8, mientras que para el embutido profundo se requieren con índices entre 1.8 y 2.2. Por otra parte el valor obtenido de Ar comprueba la alta anisotropía de la chapa y su inconveniencia para ser aplicada en ciclos de

embutido, ya que σ_x es mayor que cero, lo que indica que la lámina formará orejas o aletas durante el ciclo de embutido.

El esfuerzo de cedencia promedio (σ_y), el esfuerzo promedio máximo (σ_{max}) y la deformación promedio máxima (ϵ_{max}), según las direcciones 0° , 45° , y 90° , son:

$$(\sigma_y)_{\bar{y}} = 303.52 \text{ MPa}$$

$$(\sigma_{max})_{\bar{y}} = 365.81 \text{ MPa}$$

$$(\epsilon_{max})_{\bar{y}} = 20.11\%$$

$$(\sigma_y)_{45^\circ} = 293.02 \text{ MPa}$$

$$(\sigma_{max})_{45^\circ} = 325.20 \text{ MPa}$$

$$(\epsilon_{max})_{45^\circ} = 16.98\%$$

$$(\sigma_y)_{90^\circ} = 279.58 \text{ MPa}$$

$$(\sigma_{max})_{90^\circ} = 329.51 \text{ MPa}$$

$$(\epsilon_{max})_{90^\circ} = 18.61\%$$

Mientras que los promedios de éstas direcciones son:

$$(\bar{\sigma}_y) = 292.92 \text{ MPa}$$

$$(\bar{\sigma}_{max}) = 339.22 \text{ MPa}$$

$$(\bar{\epsilon}_{max}) = 17.96\%$$

Los datos anteriores comprueban la limitada capacidad de endurecimiento, de la chapa, ya que la relación de (σ_{max}/σ_y) es del orden de 1.16, así como, su limitada capacidad para estirarse, ya que en general la deformación promedio máxima es del orden del 18%.

6.6 ENSAYOS DE EMBUTIDO.

Los ensayos de embutido se realizaron según la norma ISO-DIS 8490-Sheet and Strip-Modified Erichsen Lapping. En éstos ensayos se determinó el índice de embutido cuyo promedio fue de 9.178 mm., siendo éste inferior al valor esperado, ya que según el fabricante la chapa tiene un índice de embutido del orden de 11mm, siendo esto otro indicativo de la calidad de la chapa comercial.

El bajo índice de embutido del material, así como, la alta anisotropía, son en gran parte debidos a deficiencias en el tratamiento térmico de recocido, así como, a la textura u orientación preferencial ocasionada en el trabajo en frío. Dado que si se conforma la chapa por embutido, algunos segmentos se deformarán más que otros, desarrollandose adelgazamientos localizados del material produciendo tanto los defecto conocidos como "orejas", como la fractura del material, con pequeñas deformaciones. Las deficiencias en el tratamiento térmico de recocido producen baja ductilidad en el material y por ende bajos índices de embutido, mientras que el direccionamiento preferencial provoca la anisotropía y por consecuencia el adelgazamiento y formación de "orejas en el material.

6.7 DIAGRAMA DE LIMITE DE FORMADO.

Con respecto al diagrama de límite de formado, se puede concluir que la información sobre él es muy escasa en la literatura, y quizás sea esto un justificante para que los productores de chapa no proporcionen nunca éste tipo de información a nivel comercial.

Ahora bien, los resultados hasta ahora mencionados, aún que son muy bastos no aseguran el éxito en las operaciones de embutido. Es por esto que resulta necesaria la implantación de pruebas que se aproximen más a las condiciones reales de trabajo. Para tal objeto se desarrolló el diagrama de límite de formado para la chapa de acero "calibre 22", en él se puede predecir con precisión si el material fallará o no, según las condiciones de deformación impuestas. Si la combinación de deformación mayor y menor queda por encima de la línea del diagrama, el material fallará, mientras que si la combinación de deformaciones queda por abajo de la línea del diagrama, el material no fallará.

RESUMEN:

De los resultados anteriores se comprueba que el material estudiado no es apropiado para conformarse por embutido profundo, ya que la ductilidad de la chapa es aún menor que la esperada para este tipo de acero, lo que se traducirá en adelgazamiento del espesor en zonas localizadas críticas, trayendo como consecuencia la falla prematura con bajos esfuerzos y bajas deformaciones, para relaciones de embutido entre el diámetro del disco inicial al diámetro del punzón (D_0/D_p) mayores a 2.5, ó cuando los radios del punzón ó embocadura sean muy pequeños. Esto se corrobora con el alto grado de anisotropía ó índice de Langford determinado, el cual es aproximadamente igual a la unidad, además de que r es mayor que cero, indicando que el material formará "orejas" o "aletas" durante el ciclo de embutido.

Por otro lado el espesor varía en forma significativa en especímenes de un mismo lote, y lo que es aún más crítico esto se manifiesta aún en lo que corresponde a un sólo espécimen. En particular se encontrarán variaciones tales que el espesor, del producto corresponde más a los calibres # 21 y 23 (no comerciales) que al propio de referencia.

La rugosidad del material no cumple con las exigencias demandadas por los procesos de embutido, ya que su

superficie es sumamente rugosa, y difícilmente descriptible.

6.9 RECOMENDACIONES AL PROCESO

de las datos estadísticos y los resultados experimentales, se induce la necesidad de modificar el proceso de fabricación de la chapa de acero, ya que el sector de la industria manufacturera, requiere y va a necesitar en lo futuro productos planos de mayor calidad que el estudiado en este trabajo.

Ahora bien, con las tendencias económicas actuales , provocadas por la firma del tratado comercio EUA-Canadá-México; resulta de vital importancia producir más con más calidad, ya que en el aspecto siderúrgico nos encontramos en desventaja con respecto a los países de alta tecnología, lo que traerá como consecuencia un aumento todavía mayor del consumo interno de productos planos importados, mientras que los productos de origen nacional serán cada vez menos consumidos. De tal forma que resulta necesaria una transformación en la manera de producir la chapa de acero, ya no con el objetivo de surtir a las armadoras instaladas en el país, sino simplemente para sobrevivir al comercio exterior. Esto no tiene que representar una modificación radical en los trenes de laminación, lo que se requiere básicamente es normar de forma precisa procedimientos y garantizar en cada etapa la calidad del producto.

Algunas de las recomendaciones para mejorar la calidad de la chapa de acero de producción nacional son:

Fusion: En este aspecto, se recomienda mejorar la práctica de desoxidación con aluminio, ya que niveles superiores de 35% de FeO en el convertidor, generan cantidades apreciables de inclusiones de alúmina al desoxidarse con aluminio. Para disminuir el volumen de óxidos, se recomienda la inyección de gases inertes por el fondo del convertidor a presiones y flujos controlados; la mayor ventaja de esta inyección es la reducción del contenido de oxígeno en el acero, y por ende del contenido de óxidos. Es importante adicionar pequeños porcentajes de elementos formadores de carburos y carbonitruros para evitar el envejecimiento del material.

Pre calentamiento: En este rubro, lo ideal sería cambiar los convencionales hornos empujadores por los modernos hornos de viga móvil, pero debido al alto costo de éstos últimos la recomendación es una solución prohibitiva. La solución recomendada a los hornos empujadores convencionales consiste, en controlar de manera precisa tanto la temperatura como el

tiempo de permanencia del material en el horno; para así poder garantizar la disolución de los nitruros de aluminio, así como, evitar la formación excesiva de la cascarilla de óxido.

Laminación
en caliente

En esta etapa se recomienda un mayor control tanto de la reducción por etapas, como, de la temperatura de enrollado, éste último parámetro debe controlarse en rangos muy cerrados, ya que para enrollamientos de la chapa a altas temperaturas (por ej. 700°C), el enfriamiento del rollo es muy lento, trayendo como consecuencia la precipitación de los nitruros que evitan el envejecimiento. mientras que para temperaturas bajas, se mantiene la cantidad máxima de nitrógeno en solución sobresaturada, provocando así que la precipitación ocurra durante el recocido.

Laminación
en frío:

En la laminación en frío se recomienda un control preciso de las deformaciones y número de pasadas, para lo cual se pueden implementar controles de malla cerrada, que permitan el ajuste de la separación de los cilindros de trabajo de acuerdo a los espesores inicial y final del material. Los sensores más idóneos

son mediante el uso de rayos "X" y rayos infrarrojos.

**Recocido de
recristalización:**

Lo idóneo sería recomendar instalaciones de recocido continuo, pero debido al alto costo de éstas instalaciones la solución esta fuera del alcance de las posibilidades económicas de México, razón que nos obliga a seguir trabajando con los convencionales hornos de recocido en lotes (hornos tipo campana), en éstos es recomendable conocer las diferentes temperaturas interiores para determinar en forma precisa el ciclo de recocido, para posteriormente aplicar un enfriamiento lento del material, provocando que el nitrógeno y el aluminio disueltos en soluciones sobresaturadas, precipiten, provocando la nucleación de nuevos granos durante el proceso de recristalización.

Paso acabador:

En esta etapa lo más importante es controlar el grabado de los cilindros de trabajo, para lograr que la rugosidad de la chapa sea uniforme. Para tal caso se recomienda emitir normas, que estandaricen los métodos de grabado para los cilindros.

REFERENCIAS

1. Houbaert Irmen, Yvan.
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, México. 1989.
2. Van der Hoeven, Jean-Martin.
STUDIE VAN DE TOEPASBAARHEID VAN BAKE HARDENING IN
DE CARROSSERIEBOUW.
Estudio de la dureza "Bake Hardening" en la
carrocería de los automóviles.
Tesis, Universidad de Gante.
Bélgica. 1988.
3. Roberts L. William.
Flat processing of steel.
Editorial Marcel Dekker, Inc.
New York. 1988.
4. Dieter Ellwood, George.
Mechanical Metallurgy.
Editorial McGraw-Hill
New York. 1987.

5. Harris J. N.
Mechanical working of metals.
Editorial Pergamon Press
Oxford. 1983.

6. Apraiz Barreiro, José.
Fabricación de hierro, acero y fundiciones.
Editorial Urmo.
Barcelona. 1978.

7. Anónimo.
Diez años de producción mundial de acero.
Cámara Nacional de la Industria del Hierro y Acero.
México, D.F.. 1989.

8. Anónimo.
Reporte de importación y exportación de materias
primas y productos siderúrgicos 1980-1990.
Cámara Nacional de la Industria del Hierro y Acero.
México, D.F.. 1988, 1989, 1990.

9. Dirección General de Normas, Depto de Normalización.
Norma oficial de método de prueba para la
determinación del índice de embutido de productos
planos delgados de acero.
DGN-B131-1964.

10. Chakrabarty J.
Theory of Plasticity.
Editorial McGraw-Hill.
New York. 1987.

11. Río Jesús del.
Deformación plástica de los materiales. La forja y
la laminación en caliente.
Editorial Gustavo Gili.
Barcelona. 1980.

12. Quercy A.
Trabajo de los metales en lámina.
Ediciones Urmo.
Bilbao, España. 1970.

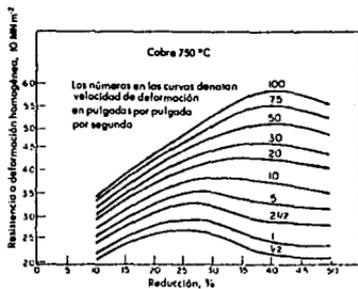
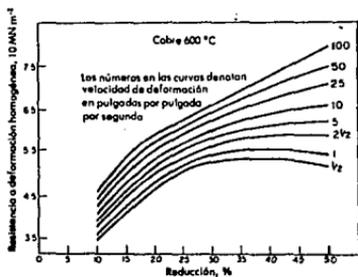
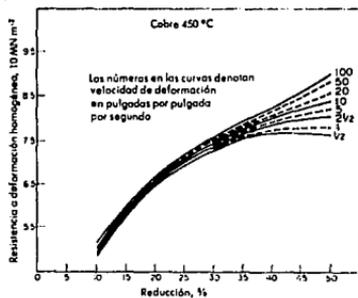
13. Rowe.
Elements of metal forming.
Editorial Edward Arnold.

14. Meers U.
Bake Hardenability of continuously annealed steel
sheet.
Reporte Técnico, Depto. de Metalurgia, SIDMAR.
Gante, Bélgica. 1988.

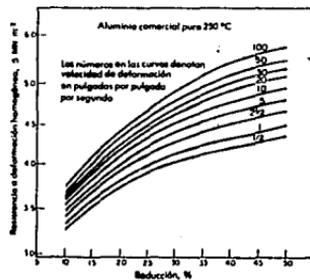
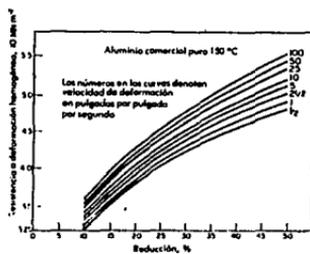
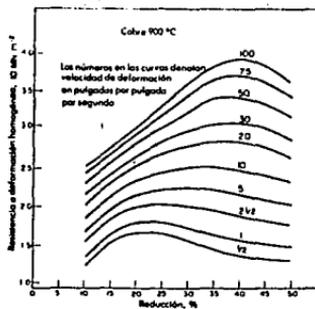
15. Keeler S. P.
Sheet Met Ind.
Volumen 42, Metal Progress.
Octubre 1966.
16. Goodwin G. M.
Metallurgy.
Volumen 60, 1968.
17. Ortiz Prado, Armando.
Apuntes de la materia Procesos de Conformado.
Editorial Facultad de Ingeniería UNAM.
México, D.F.. 1990.
18. Hosford F. W., Cadell M. R.
Metal Forming, Mechanics and Metallurgy.
Editorial Prentice-Hall.
Englewood, N. J.. 1983.
19. Avner Sidney.
Introducción a la Metalurgia Física.
Editorial McGraw-Hill.
México. 1981.

20. Marks.
Manual del Ingeniero Mecánico.
editorial McGraw-Hill
México. 1982.
21. Polletier J. R., Gautier J.J.
Le développement de nouvelles qualités de toles
pour l'industrie automobile.
Revue de Métallurgie-CIT.
Octubre de 1982.

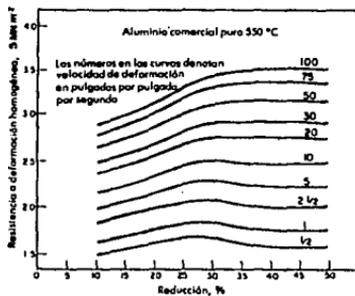
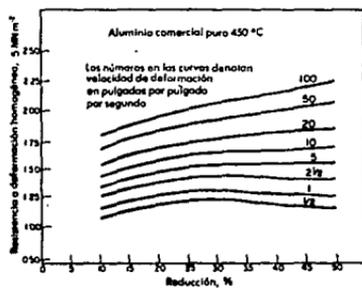
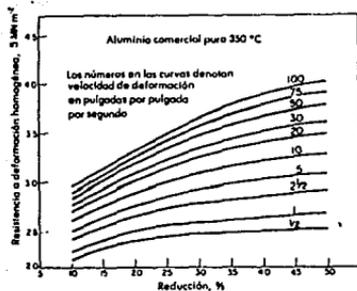
APENDICE A



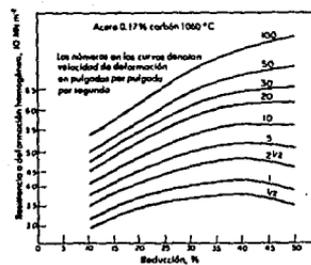
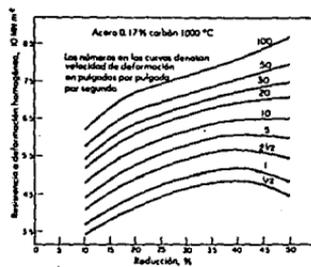
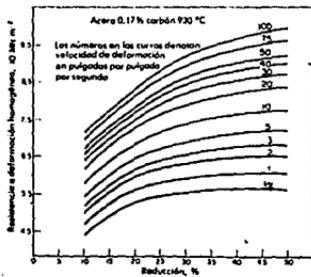
APENDICE A



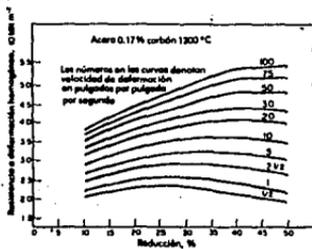
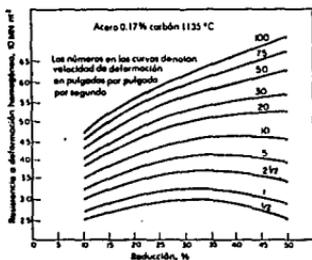
APENDICE A



APENDICE A



APENDICE A



APENDICE B

```

10 CLS
20 PRINT " PROGRAMA DISEÑADO POR: CERVANTES CABELLO ARTURO"
30 PRINT " MEXICO D.F., MARZO DE 1991."
40 REM// multiple regression. //
50 DIM X(100),Y(100),A$(10),Q$(1),B(4),M(4),C(4)
60 A$(0)="regreso a menu principal"
70 A$(1)="lineal";A$(2)="potencial";A$(3) = "logaritmica";A$(4) = "exponencial"
80 A$(5) = "datos inapropiados";A$(6) = "error en los datos";A$(7) = " "
90 GOSUB 1520
100 CLS:PRINT"                               Regresion multiple                               ":PRINT
110 PRINT "opciones de calculo ":PRINT
120 PRINT A$(1);": y=b+mx":PRINT:PRINT A$(2);": y=bx^m":PRINT
130 PRINT A$(3);": y=b+m ln x":PRINT:PRINT A$(4);": y=b exp(mx)": PRINT
140 GOSUB 1340
150 PRINT
160 PRINT "opciones":PRINT : PRINT "(1) ";A$(1):PRINT
170 PRINT "(2) ";A$(2):PRINT
180 PRINT "(3) ";A$(3): PRINT : PRINT "(4) ";A$(4): PRINT
190 PRINT "(5) encontrar la mejor curva"
200 PRINT:PRINT "(6) listar y editar datos":PRINT
210 PRINT "(7) introducir tabla de datos":PRINT:PRINT"(8) interpolacion":PRINT
220 PRINT "(9) salida":PRINT
230 PRINT:INPUT " cual":F
240 SE = 0: ON F GOTO 350,450,570,690,810,850,250,1030,1630
250 CLS:PRINT"MOD0: entrada de datos": PRINT:INPUT"comenzar x=indice (a/n)":Q$
260 ID=ABS(Q$="s")
270 PRINT : FOR N = 1 TO 100: PRINT : PRINT "prasionse 'e' al final"
280 IF ID THEN 310
290 INPUT"x = ":Q$: IF Q$="E" THEN 340
300 X(N)=VAL(Q$):GOTO 320
310 X(N) = N: PRINT "x = ";N
320 PRINT : INPUT "y = ":Q$: IF Q$ = "E" GOTO 340
330 Y(N) = VAL(Q$): NEXT N
340 NM = N - 1: GOTO 160
350 GOSUB 1420: FOR N = 1 TO NM
360 X = X + X(N):Y = Y + Y(N):XY = XY + (X(N) * Y(N))
370 XS = XS + (X(N) ^ 2):YS = YS + (Y(N) ^ 2)
380 NEXT N:M(1) = (XY - (X * Y / NM)) / (XS - ((X ^ 2) / NM))
390 B(1) = (Y / NM) - (M(1) * (X / NM))
400 C(1) = (XY - ((X * Y) / NM)) / 2
410 C(1) = C(1) / (XS - ((X ^ 2) / NM))
420 C(1) = C(1) / (YS - ((Y ^ 2) / NM))
430 IF SE THEN RETURN.
440 GOTO 1370
450 GOSUB 1420: FOR N = 1 TO NM
460 IF X(N) < = 0 THEN 560
470 IF Y(N) < = 0 THEN 560
480 XL = LOG(X(N)):YL = LOG(Y(N))
490 X = X + XL:Y = Y + YL:XY = XY + (XL * YL)
500 XS = XS + (XL ^ 2):YS = YS + (YL ^ 2)
510 NEXT N:M(2) = (XY - (X * Y / NM)):M(2) = M(2) / (XS - ((X ^ 2) / NM))
520 B(2) = EXP ((Y / NM) - (M(2) * X / NM))
530 C(2) = (XY - (X * Y / NM)) ^ 2:C(2) = C(2) / (XS - ((X ^ 2) / NM)):C(2) = C
(2) / (YS - ((Y ^ 2) / NM))
540 IF SE THEN RETURN
550 GOTO 1370
560 GOSUB 1410: GOTO 540
570 GOSUB 1420: FOR N = 1 TO NM
580 IF X(N) < = 0 THEN 680
590 XL = LOG(X(N)):YL = Y(N)
600 X = X + XL:Y = Y + YL:XY = XY + (XL * YL)
610 XS = XS + (XL ^ 2):YS = YS + (YL ^ 2): NEXT N
620 M(3) = ((Y - ((1 / NM) * X * Y)) / (XS - ((1 / NM) * (X ^ 2))))
630 B(3) = (1 / NM) * (Y - (M(3) * X))
640 C(3) = (XY - ((1 / NM) * X * Y)) ^ 2:C(3) = C(3) / (XS - ((1 / NM) * (X ^ 2)
))

```

APENDICE B

```

650 C(3) = C(3) / (YS - ((1 / NM) * (Y ^ 2)))
660 IF SE THEN RETURN
670 GOTO 1370
680 GOSUB 1410: GOTO 660
690 GOSUB 1420: FOR N = 1 TO NM
700 IF Y(N) < = 0 THEN 800
710 XL = X(N):XL = LOG (Y(N))
720 X = X * XL:Y = Y * YL:XY = XY + (XL * YL)
730 XS = XS + (XL ^ 2):YS = YS + (YL ^ 2): NEXT N
740 M(4) = ((XY - ((1 / NM) * X * Y)) / (XS - ((1 / NM) * (X ^ 2))))
750 B(4) = EXP ((Y / NM) - (M(4) * (X / NM)))
760 C(4) = (XY - ((1 / NM) * X * Y)) ^ 2: C(4) = C(4) / (XS - ((X ^ 2) / NM))
770 C(4) = C(4) / (YS - ((Y ^ 2) / NM))
780 IF SE THEN RETURN
790 GOTO 1370
800 GOSUB 1410: GOTO 780
810 PRINT "PRINT" Busqueda del mejor ajuste": PRINT
820 SE = 1: F = 1: GOSUB 350: F = 2: GOSUB 450: F = 3: GOSUB 570: F = 4: GOSUB 690:
C = 0: FOR Q = 1 TO 4: IF C(Q) < C THEN 840
830 C = C(Q): PF = Q
840 NEXT Q: F = PF: GOTO 1370
850 PRINT " (return) = listar, (a) = editar ?":
860 GET QS: IF QS="return" THEN 860: IF QS="a" THEN 930
870 FOR N = 1 TO NM: PRINT
880 PRINT "n=";N: PRINT "x=";X(N): PRINT "y=";Y(N):
890 NEXT N: GOSUB 1340: GOTO 160
900 PRINT : PRINT " (return)=mas, (o)=opciones ?":
910 GET QS: IF QS="" THEN 910
920 IF QS="o" THEN 160
930 PRINT : PRINT : INPUT " cual par de datos ";N
940 PRINT"dato ";N;" actualmente:";PRINT "x = ";X(N);PRINT"y = ";Y(N);PRINT
950 PRINT : PRINT "Introduzca nuevos datos:"; PRINT : IF ID THEN 970
960 INPUT "x = ?";X(N): GOTO 980
970 PRINT "x = ";N
980 PRINT : INPUT "y = ?";Y(N)
990 PRINT : PRINT " (return)=mas, (o)=opciones ?":
1000 QS="MEYS: IF QS="" GOTO 1000
1010 IF QS="o" THEN 160
1020 GOTO 930
1030 PRINT"use esta rutina despues de calcular.": PRINT
1040 FOR Q=0 TO 4:PRINT:IF C(Q)<0 OR Q=0 THEN PRINT "(";Q;)" ";:A:(Q)
1050 NEXT Q: PRINT " cual";F
1060 IF F=0 THEN 160
1070 IF F > 4 THEN 1030
1080 IF C(F) = 0 THEN 1030
1090 PRINT : INPUT "k para y (x), o y para x (y)":QS:FL = (QS = "y")
1100 IF FL THEN 1120
1110 PRINT : INPUT "valor de x";X: GOTO 1130
1120 PRINT : INPUT "valor de y";Y
1130 REM onarr goto 5000
1140 ON F GOTO 1150,1180,1210,1240
1150 IF FL THEN 1170
1160 Y = B(F) * (M(F) * X): GOTO 1270
1170 X = (Y - B(F)) / M(F): GOTO 1270
1180 IF FL THEN 1200
1190 Y = B(F) * (X ^ (M(F))): GOTO 1270
1200 X = (Y / B(F)) ^ (1 / (M(F))): GOTO 1270
1210 IF FL THEN 1230
1220 Y = B(F) + ((M(F) * LOG (X))): GOTO 1270
1230 X = EXP ((Y - B(F)) / M(F)): GOTO 1270
1240 IF FL THEN 1260
1250 Y = B(F) * EXP (M(F) * X): GOTO 1270
1260 X = LOG (Y / B(F)) / M(F): GOTO 1270
1270 IF FL THEN 1290
1280 PRINT : PRINT "y = ";Y: GOTO 1300
1290 PRINT : PRINT "x = ";X

```

APENDICE B

```

1300 PRINT : PRINT "(return)=mas, (o)=opciones";
1310 QS=INKEY$: IF QS="" GOTO 1310
1320 IF QS="o" THEN 160
1330 PRINT: GOTO 1100
1340 PRINT"
1350 QS=INKEY$: IF QS="" THEN GOTO 1350 presione cualquier tecla"
1360 PRINT": RETURN
1370 REM if not se then home
1380 PRINT : PRINT A$(F):": PRINT : PRINT "b = ":B(F): PRINT : PRINT "a = ":M
1390 PRINT "m = ":M(F):PRINT:PRINT"coef. corre. = ":C(F):PRINT
1400 GOSUB 1340: GOTO 160
1410 PRINT A$(5):A$(F): FOR I=1 TO 1000:NEXT:RETURN
1420 XL = 0:YL = 0:XY = 0:XS = 0:YS = 0:X = 0:Y = 0: IF NM > 1 THEN 1440
1430 PRINT" datos no introducidos: espiece de nuevo": END
1440 RETURN
1450 REM if peek(53040)=14thenprint"this function will not work with"
1460 REM if peek(53040)=14thenprint"negative numbers. try positive values."
1470 REM if peek(53040)=20thenprint"this value catse a division by zero"
1480 REM if peek(53040)=20thenprint"error. try another value."
1490 REM x=0:y=0:resume
1500 REM print"you have a #":peek(53040);" error in your"
1510 REM print"program. oncr is located in line# 917.":end
1520 PRINT
1530 PRINT" Regresion multiple ":PRINT
1540 PRINT" Dado un conjunto de (n) puntos de coordenadas, el programa usa cua
tro diferentes metodos para ajustar dichos puntos a una curva"
1550 PRINT :PRINT"notese":PRINT
1560 PRINT" La entrada de los datos (opcion # 7 del menu) debera ser usada ant
os de cualquier calculo"
1570 PRINT :PRINT" Si lo desea el programa puede probar una funcion en particu
lar y encontrar los parametros de la curva que mejor se ajuste a los datos"
1580 PRINT"(opcion # 5 del menu principal).":PRINT
1590 PRINT" Tambien, los datos originales pueden ser listados y editados (opci
on # 6).":PRINT
1600 PRINT :PRINT :PRINT :PRINT" presione cualquier tec
la. "
1610 ZX$=INKEY$: IF ZX$="" THEN GOTO 1610
1620 RETURN
1630 END

```