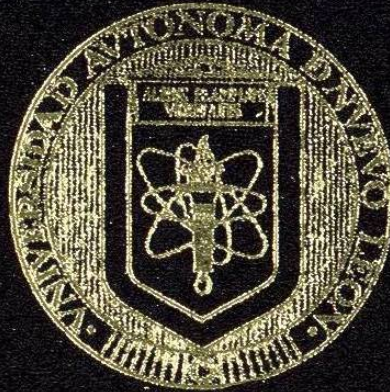


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE METODO PARA LA OPTIMIZACION
DE LAS CEDULAS DE ROLADO EN FRIJO DE ACERO
EN MOLINOS FOUR HIGH REVERSIBLES

Por

JOSE ARNOLDO GARCIA GARZA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA MANUFACTURA CON
ESPECIALIDAD EN DISEÑO DE PRODUCTOS

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DEL 2004

TM
Z5853
.M2
FIME
2004
.G37

20

DESARROLLO DE METODO PARA LA OPTIMIZACION
DE LAS CERCAS EN UNO DE LOS
MOMENTOS EN LOS QUE SE
REVISAN LAS REVISIONES

J.A.G.G.,

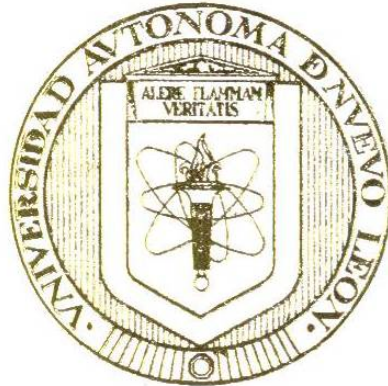


1020150266

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE METODO PARA LA OPTIMIZACION
DE LAS CEDULAS DE ROLADO EN FRIO DE ACERO
EN MOLINOS FOUR HIGH REVERSIBLES

Por

JOSE ARNOLDO GARCIA GARZA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA MANUFACTURA CON
ESPECIALIDAD EN DISEÑO DE PRODUCTOS

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DEL 2004

990442

T4
Z5853
.M2
FINE
2004
.G37

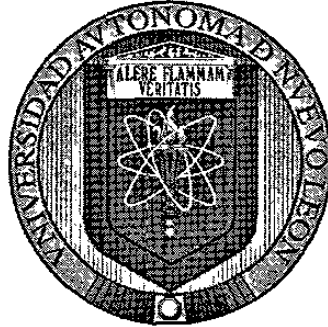


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE MÉTODO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LAS CEDULAS DE
ROLADO EN FRÍO DE ACERO EN MOLINOS FOUR HIGH REVERSIBLES

POR

JOSÉ ARNOLDO GARCÍA GARZA

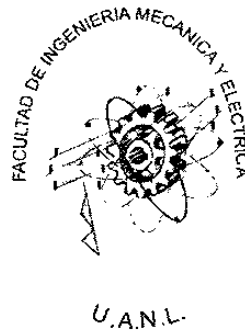
TESIS
EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA MANUFACTURA
CON ESPECIALIDAD EN DISEÑO DE PRODUCTOS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L. A 24 DE JUNIO DEL 2004

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE MÉTODO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LAS CEDULAS DE
ROLADO EN FRÍO DE ACERO EN MOLINOS FOUR HIGH REVERSIBLES

POR

JOSÉ ARNOLDO GARCÍA GARZA

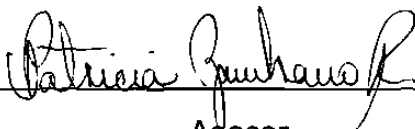
TESIS
EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA MANUFACTURA
CON ESPECIALIDAD EN DISEÑO DE PRODUCTOS

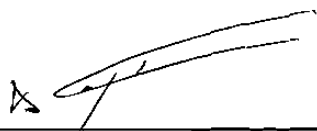
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L. A 24 DE JUNIO DEL 2004

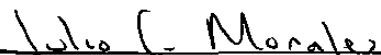
Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Posgrado

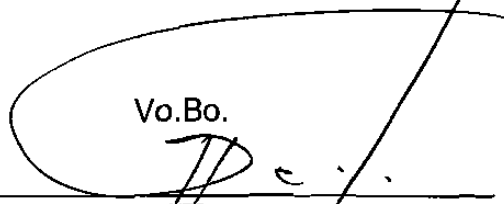
Los miembros del comité de Tesis recomendamos que la Tesis "Desarrollo de Sistema para la Optimización de las Cédulas de Rolado en Frio de Acero en Molinos Four High Reversibles", realizada por el alumno Ing. José Arnoldo García Garza con número de matrícula 0851569, sea aceptada para su defensa como opción para el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería de Manufactura con especialidad en Diseño del Producto.

El Comité de Tesis


Asesor
Dra. Patricia del C. Zambrano Robledo


Revisor
Dr. Alberto Cavazos González


Revisor
Dr. Julio Cesar Morales Chavela


Vo.Bo.
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
Subdirector de la División de Estudios de Posgrado

Dedicatoria

Este trabajo de tesis lo dedico a Dios quien me ha dado todo para poder alcanzar mis objetivos, a mis padres José Arnoldo García Leal y Maria Teresa Garza Fernández por su apoyo durante toda mi preparación académica y a mi novia Mónica Lezith Hernández González quien es mi motivación a seguir adelante.

Prologo

Este trabajo de tesis se basa en la optimización de la operación de un molino tipo four high reversible. La operación de este tipo de equipos se basa en cédulas de reducción, una cédula de reducción, es una serie de pases consecutivos a través de los rodillos, donde en cada uno de estos se da al espesor de la lámina un determinado porcentaje de reducción, con el objetivo de llegar a una reducción total acumulada en el último pase y obtener un espesor final deseado.

Una gran parte de los problemas operacionales en las empresas es que las condiciones de operación se desarrollan empíricamente, por lo que se desconocen las capacidades reales y en ocasiones se complica resolver problemas propios del proceso. Actualmente en el molino que se analizará se laminan cuatro aceros diferentes, tres de ellos de bajo contenido de carbono (SAE 1006, 1008 y 1012) y el otro de medio contenido de carbono (SAE 1024), siendo la laminación de este último la que se estudiara.

El acero SAE 1024 se lamina a cuatro espesores diferentes que son 1.12mm, 0.79mm y 0.64mm, en dos anchos de banda diferentes que son, 198mm y 264mm. Para toda la combinación de espesores finales y anchos de banda no existen cédulas en específico, es decir, en algunas ocasiones se ajustan cédulas parecidas para laminar a un determinado espesor final y ancho de banda, lo que marca la necesidad de establecer un método simple que ayude a determinar para cada combinación de acero, espesor inicial, espesor final y ancho de banda, una cédula óptima de reducción.

Hablar de lo óptimo en una cédula de reducción se refiere a dos puntos importantes, el primero es el que las cargas desarrolladas en el molino estén cerca de las máximas permisibles para poder aprovechar toda la capacidad y el segundo está relacionado con

la corona dada a los rodillos para compensar la deformación elástica de estos debido a las fuerzas de compresión, ya que para mantener esta compensación constante se debe diseñar la cédula de reducción de tal manera que cargas constantes de rolado, se desarrollen durante todos los pases, para evitar los defectos que se verán en los siguientes capítulos en la forma de la lámina.

En este proyecto de tesis el rediseño de las cédulas de reducción se realizará utilizando el método desarrollado por Bland y Ford donde se analiza la distribución de presión en el arco de contacto entre los rodillos y la lámina, para el cálculo de las cargas de rolado. Para esto se debe definir una carga máxima de rolado, así como también se debe considerar el endurecimiento por deformación del material.

Otros de los puntos importantes que se deben de considerar en el proceso de laminación en frío, son las tensiones tanto en el enrollador como en el desenrollador, una de las ventajas del método de Bland y Ford es que se puede ver de forma muy rápida y directa el efecto de las tensiones en la reducción de la carga de rolado, así como el efecto sobre la posición del plano neutral, es decir el punto donde las velocidades tanto de los rodillos como de la lámina son iguales, ya que como se verá en los siguientes capítulos es un punto de vital importancia que se debe considerar.

Índice.

	Tema	Página
1	Introducción.	1
2	Limitaciones de las teorías de rolado.	3
3	Procesos de rolado.	6
3.1	Clasificación de los procesos de rolado.	6
3.2	Molinos de Rolado.	6
3.3	Rolado en caliente.	8
3.4	Rolado en frío.	9
4	Problemas y defectos en los productos rolados.	10
5	Factores que determinan la magnitud de las cargas de rolado	14
5.1	Efecto de la condición de superficie de las herramientas de deformación.	14
5.2	Efecto del espesor inicial del material.	19
5.3	Influencia del diámetro de los rodillos.	23
5.4	Resistencia a la deformación.	25
5.5	El efecto de la tensión en el enrollador y desenrollador.	28
6	Influencia de la tensión en enrollador y desenrollador.	33
6.1	Limite máximo de tensión que puede ser aplicado útilmente.	33
6.2	Determinación experimental del efecto de la tensión en la carga de rolado.	34
6.3	El significado y determinación de m .	37
6.4	Determinación de los valores de P .	41
7	Cálculo de las cargas de rolado y diseño de las cedulas de rolado racionales – método práctico.	44
7.1	Cálculo de las cargas de rolado utilizando el método desarrollado por Cook y Parker.	44
7.2	Diseño de las cedulas racionales de rolado.	53

8	Cálculo de las cargas de rolado – método teórico.	59
8.1	Desarrollo de las ecuaciones de Bland y Ford.	59
8.2	Método para permitir aplastamiento de los rodillos.	67
8.3	Utilización de las ecuaciones de Bland y Ford.	68
9	Metodología de implementación.	82
9.1	Caso práctico a analizar.	82
9.2	Procedimiento.	83
10	Implementación de las teorías de rolado.	85
10.1	Obtención de la curva a la resistencia a la deformación plana homogénea para acero SAE 1024.	85
10.2	Definición de la carga de rolado máxima.	90
10.3	Rediseño de las cedulas de rolado.	101
10.4	Rediseño de cedulas a 0.025” y 0.044”.	102
11	Conclusiones y Recomendaciones.	106
12	Lista de Referencias.	107
13	Bibliografía.	108

Capítulo 1

Introducción

El laminado es un proceso en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos opuestos. Los rodillos giran en sentido contrario para jalar el material de trabajo, mientras su espesor es reducido por fuerzas de compresión. El proceso básico es el laminado de planos, que se usa para reducir el espesor de una sección transversal rectangular.

La mayoría del laminado se realiza en caliente debido a la gran cantidad de deformación requerida, este proceso se conoce como laminado en caliente. Los metales laminados en caliente están generalmente libres de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas. Las desventajas del laminado en caliente son que el producto no se puede mantener dentro de tolerancia cerradas, además no alcanza los requerimientos físicos, tanto dimensionales como mecánicos, de muchas industrias como es el caso de muchas de las aplicaciones de la industria automotriz, electrodomésticos, construcción, empaque, entre otras.

El laminado posterior al trabajo en caliente se conoce como laminado en frío, y éste tiene como objetivo preparar el material para operaciones posteriores. El laminado en frío hace más resistente el material y permite unas tolerancias más estrechas del espesor. Además la superficie del material laminado en frío está libre de capas de óxido y es superior en planeza a los productos laminados en caliente. Estas características hacen de los productos laminados en frío el material ideal para estampados, paneles exteriores, y otros productos que van desde automóviles hasta utensilios y muebles de oficina.

Los procesos de laminación por lo general están relacionados con inversiones de capital de muchos millones de dólares, ya que requieren de equipos conocidos como molinos, conformados por grandes rodillos, rodamientos, un castillo para contener estas partes, grandes motores para transmitir la potencia requerida por los rodillos y controladores modernos de espesores para satisfacer las necesidades del mercado actual. Debido a esto y a la gran importancia en la industria de los productos laminados en frío, el propósito de este trabajo de tesis es buscar la optimización de la operación de uno de los procesos más comunes del laminado, que es el laminado en frío en un molino four-high reversible.

Capítulo 2

Limitaciones de las teorías de rolado

Las teorías de rolado que se presentan, muestran que antes de que el método de cálculo de cargas de rolado propuesto por Ford y sus colegas pueda ser aplicado a cualquier set de condiciones de rolado, es necesario especificar un valor para μ , el coeficiente de fricción generado en la garganta de los rodillos. En lo que respecta a los valores reales de μ , desafortunadamente, no existe un método aceptable de medir directamente este valor y en consecuencia para calcular las cargas de rolado, el procedimiento usual empleado es escoger un valor asociado a las condiciones de rolado para las cuales la carga es requerida. Sin embargo con el valor seleccionado de μ , si las cargas calculadas coinciden con las cargas medidas no prueba la validez de que el método es confiable, ya que cualquier error en el procedimiento se puede rectificar seleccionando un valor diferente de μ .

La suposición de que el valor de μ se mantiene constante a lo largo de arco de contacto es bastante dudosa, los resultados obtenidos por Schey⁽¹⁾ indican claramente que μ se incrementa con la presión. Por ejemplo cuando se lamina aluminio y algunas de sus aleaciones, Schey encontró que μ variaba de 0.02 a 0.3, el valor inferior se asociaba a reducciones del 10% y el más alto con reducciones arriba del 50%. Singer⁽²⁾ señaló que esto solamente significa que el valor de μ cambia a lo largo del arco de contacto, ya que cuando se reduce el espesor del metal por medio del rolado, la reducción se realiza de forma progresiva desde cero en el plano de entrada al por ciento de reducción requerido en el plano de salida.

Otro punto interesante que surgió del trabajo de Takahashi y Alexander⁽³⁾, que mostró que algunas rebabas metálicas que se desprenden de la superficie del material, influyen

en la eficiencia de ciertos lubricantes y como consecuencia en el valor de μ . Por ejemplo cuando se lamina cobre y aluminio, aunque las rebabas solamente reducen ligeramente el valor de μ , existe un efecto sensible cuando se lamina bronce, mientras que durante el rolado del acero el valor de μ solamente se altera un poco. Otra observación hecha por Schey⁽¹⁾ es que un ligero cambio en el acabado superficial de los rodillos cambia de forma sensible el valor de μ .

Otra información que debe estar disponible antes de que cualquier método teórico para el cálculo de las cargas de rolado pueda ser empleado es k , la resistencia del material a la deformación plana homogénea y el único punto que se debe enfatizar concierne a la falta de información relacionada al efecto del grado o velocidad de deformación. Muchos de los investigadores indican que para el rolado en frío las curvas de resistencia a la deformación que se determinan en máquinas universales ordinarias – en las cuales el grado de deformación puede ser tan bajo como 10^{-3} ins / in / seg – son adecuadas para usar en sus ecuaciones, pero si hacemos referencia a la Figura 8-2 se podrá observar que cuando este tipo de curvas son usadas las cargas de rolado calculadas serán consecuentemente bajas.

La suposición de que la deformación durante el rolado es homogénea o en otras palabras, que la línea vertical que une los puntos CC de la Figura 8-1 se mantiene vertical durante su paso a través de los rodillos, implica considerar que no existen fuerzas cortantes entre las superficies de contacto del material y los rodillos pero, considerando la naturaleza del proceso de rolado en frío, el sentido común nos indica que esta suposición no puede ser confiable.

Otro tema donde también se centra mucha controversia concierne al aplastamiento de los rodillos, el trabajo experimental de Orowan⁽⁴⁾, observaciones de MacGregor y Palme⁽⁵⁾ y el trabajo teórico de Weinstein, Zorowski y Loss⁽⁶⁾ levantan dudas acerca de la capacidad del método de corrección desarrollado por Hitchcock.

Entendiendo las complicaciones de llevar la teoría de rolado a la práctica, el objetivo de este proyecto de tesis es el análisis de las cédulas de reducción de un caso práctico para llevar a cabo un rediseño de éstas utilizando las teorías de cálculo de las cargas de rolado y presentar como conclusión los resultados obtenidos en productividad como resultado de este rediseño.

Capítulo 3

Procesos de rolado

3.1 Clasificación de los procesos de rolado

El proceso de deformar plásticamente el metal pasándolo por en medio de rodillos es conocido como rolado. En la deformación de metal a través de rodillos, el trabajo es sujeto a esfuerzos de compresión altos debido a la acción de los rodillos y a esfuerzos cortantes superficiales como resultado de la fricción entre los rodillos y el metal. Las fuerzas de fricción también son responsables de alimentar el metal dentro de los rodillos.

El rompimiento inicial de lingotes en planchones es generalmente hecho por un rolado en caliente. Este proceso es seguido por otro proceso de rolado en caliente para producir placa, lamina, tubería o formas estructurales. El siguiente proceso es el rolado en frío el cual ha alcanzado una posición de mayor importancia en la industria. El rolado en frío produce hojalata y lámina con un buen acabado superficial, con un incremento en las propiedades mecánicas y al mismo tiempo manteniendo un control muy cerrado de las dimensiones del producto.

En los procesos convencionales de rolado en caliente y frío el objetivo principal es el de reducir el espesor del metal. Durante el rolado solamente un pequeño incremento en el ancho ocurre, por lo tanto la reducción del espesor resulta en un incremento longitudinal.

3.2 Molinos de rolado

Un molino de rolado consiste básicamente de rodillos, rodamientos, un castillo para contener estos elementos y controladores para aplicar fuerza en los rodillos y controlar su velocidad. Las fuerzas involucradas en el rolado pueden alcanzar fácilmente muchos

miles de lbf. Como consecuencia son necesarias estructuras muy rígidas y motores muy grandes para proporcionar la fuerza necesaria. Cuando estos requerimientos son multiplicados varias veces por una línea de molinos en serie es fácil ver porque una instalación moderna de rolado demanda inversiones de capital de muchos millones de dólares y muchas horas hombre de ingeniería, diseño y construcción.

Los molinos son clasificados convenientemente con respecto al número y arreglo de los rodillos. El más simple y común es el molino de dos rodillos (*two high mill*). En este caso los rodillos son del mismo tamaño y son rotados en una sola dirección, en estos molinos el material tiene que ser devuelto a la entrada para posteriores reducciones. Una mejora en la productividad resulta usando molinos reversibles y donde el material puede ser pasado de vuelta cambiando la dirección de rotación de los rodillos. Otra solución es el molino de tres rodillos que consiste de dos rodillos conductores uno superior y el otro inferior.

Una gran disminución de la potencia requerida por el rolado puede ser alcanzada usando rodillos de trabajo de diámetros pequeños. De cualquier manera, debido a que los rodillos de diámetros pequeños tiene menos rigidez, estos deben ser soportados por rodillos de apoyo de diámetros mas grandes. El mas simple de estos molinos es el de cuatro rodillos (*four high mill*). Lámina muy delgada puede ser rolada con tolerancias muy cerradas, en un molino con rodillos de trabajo de diámetros pequeños.

En el molino tipo cluster cada uno de los rodillos de trabajo es soportado por los dos rodillos de apoyo. Los molinos Sendzimir son modificación del cluster, los cuales han sido adaptados para rolar lámina u hojalata muy delgadas y de aleaciones de alta resistencia.

Para niveles de producción altos es común instalar series de molinos uno después del otro en "tandem". Cada set de rodillos es llamado stand. Ya que reducciones diferentes son tomadas en cada estación, la cinta se va a mover a diferentes velocidades en cada molino. La velocidad de cada set de rodillos es sincronizada de tal manera que cada

estación sucesiva toma la cinta a una velocidad igual a la velocidad de entrega de la estación anterior.

Otro diseño de molino de laminación es el *molino de rodillos planetario*. Este molino consiste de un par de pesados rodillos de apoyo rodeados por un gran número de rodillos planetarios. La principal característica de este molino es de que reduce en caliente los planchones directamente a cinta en un solo pase. Conforme cada par de rodillos planetarios deja de tener contacto con el material, otro par de rodillos hace contacto y repite la reducción. Es necesario utilizar rodillos de alimentación para introducir el planchón al molino, y un par de rodillos a la salida para mejorar el acabado de la superficie.

3.3 Rolado en caliente

La primer operación de trabajo en caliente para la mayoría de los productos de acero es hecha en el *molino de desbaste (roughing mills)* Estos molinos usualmente son de dos rodillos reversibles con un de diámetro de 0.6 a 1.4 m. El objetivo de esta operación es la de reducir los lingotes en planchones para una subsecuente transformación en placa o lámina. Durante este proceso es apreciable la dispersión de el ancho. Para mantener el ancho deseado y preservar las orillas, el lingote es volteado 90° en pases intermedios. Un molino reversible primario tiene relativamente baja productividad ya que al material se le dan entre 10 y 20 pases. Donde la alta productividad es prioridad, son utilizados los *molinos universales*. Ese tipo de molinos son esencialmente dos molinos de laminación, uno con dos rodillos de diámetro grande y otro con rodillos verticales que controlan el ancho al mismo tiempo que el espesor es reducido. La producción de planchones de lingotes fundidos puede ser eliminada usando líneas de *colada continua* para producir el planchón directamente del acero líquido.

Los molinos de laminación en caliente modernos pueden constar de un tren de 4 molinos de desbaste *four-high*, seguido por un tren final de 6 ó 7 molinos finales *four-high*. Los molinos de desbaste usualmente están equipados con rodillos verticales para controlar el ancho del planchón. Agua a presión es rociada en la lámina para remover la

escoria. En el rolado caliente del acero los planchones son calentados inicialmente de 1100 a 1300°C. La temperatura en el último molino varía de 700 a 900°C, pero se debe mantener arriba de la temperatura crítica superior para producir granos de ferrita.

3.4 Rolado en frío

El rolado en frío es usado para mejorar el acabado superficial de la lámina y con tolerancias dimensionales más cerradas que las obtenidas en la laminación en caliente. El endurecimiento por deformación causado en la reducción en frío puede ser utilizado para incrementar la resistencia del acero. El material inicial para el rolado en frío son rollos de acero rodados en caliente. La laminación en frío se realiza con molinos de tipo reversible o en tandem *four high* de alta velocidad.

La reducción total alcanzada durante el rolado en frío varía entre un 50 y un 90%, En el establecimiento de la reducción en cada pase es deseable distribuir el trabajo tan uniforme como sea posible a través de varios pases sin caer muy por debajo de la máxima reducción para cada pase. Generalmente el menor porcentaje de reducción es tomado en el último pase para permitir mejor control de planeza, calibre, y acabado superficial. Un procedimiento para desarrollar cédulas de rolado en frío es ajustando la reducción en cada pase de tal manera que se produzca una carga constante de rolado.

La eliminación del punto de cedencia del acero recocido es un importante problema práctico desde la existencia de la elongación de cedencia resultante en deformaciones no homogéneas durante el troquelado y el formado. La práctica usual es dar al acero recocido una pequeña reducción final conocida como *skin pass* que elimina la elongación de cedencia y además mejora la superficie y la planeza del acero.

Otros métodos utilizados para incrementar la planeza del acero del acero rodado es el *tensionivelado* que consiste en pasar la lámina por rodillos niveladores mientras se aplica tensión.

Capítulo 4

Problemas y defectos en los productos rolados

Existe una variedad de problemas durante el rolado, que se pueden presentar dependiendo de la interacción entre la deformación plástica del acero y la deformación elástica de los rodillos y el molino. Bajo la influencia de las altas fuerzas durante el rolado, los rodillos son aplastados y doblados, y el molino es elásticamente deformado.

La abertura de los rodillos debe ser perfectamente paralela, de otra forma la reducción del espesor no será constante en todo el ancho del material, y tomando en cuenta que este continúa constante, algunas zonas de la lámina se abombarían. Hay dos aspectos del problema de la forma de la lámina. El primero está relacionado con el espesor uniforme en todo el ancho y largo del material. Esta propiedad de la lámina puede ser medida con exactitud, y es sujeta a un control preciso con modernos sistemas automáticos de espesores. La segunda propiedad de la lámina es la planeza la Figura 4-1 nos enseña como la ondulación se desarrolla. Si los rodillos son flexionados como lo muestra la Figura 4-1b las orillas de la lámina se van a elongar más en una dirección longitudinal que en el centro.

La solución obvia para la deflexión de los rodillos es la de crear un corona positiva en éstos en la que el diámetro en el centro sea mayor que en las orillas. Posteriormente cuando los rodillos se flexionen presentaran una abertura paralela. La corona en los rodillos también se puede crear térmicamente debido a la dilatación de los rodillos durante el rolado. Este procedimiento correctivo sufre del hecho de que la corona solo es efectiva con un solo valor de carga.

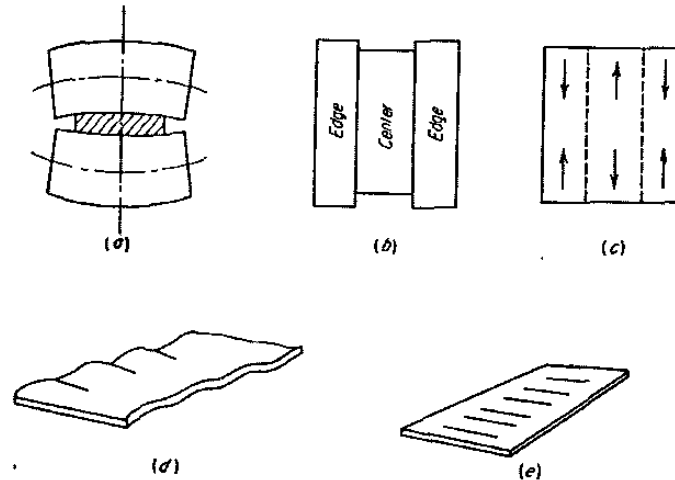


Figura 4-1. Efecto de la deformación elástica de los rodillos sobre la ondulación del material.

- a) Deformación elástica de los rodillos. b) Situación hipotética del resultado de una laminación con las condiciones mostradas en el inciso (a) suponiendo que los extremos se mueven libres con relación al centro. c) Esfuerzos generados en la lámina con las condiciones presentadas en los incisos anteriores. d) Ondulación en los extremos de la lámina como resultado de las condiciones de operación de los incisos anteriores. e) Fracturas en el centro de la lámina derivadas de los esfuerzos generados por una laminación inadecuada.

Otra causa considerada de los problemas con la planeza y la forma de la lámina se relaciona con el proceso de rolado en caliente, en este tipo de casos el rolado en frío no puede corregir estos problemas los cuales se incrementan cuando se esta rolado lámina muy delgada.

Los problemas con la planeza y forma de la lámina son provocados por deformaciones no-homogéneas en la dirección de rolado de la lamina. Otras formas de deformaciones no-homogéneas pueden traer problemas de fracturas o ramilladuras. Cuando la lámina pasa a través de los rodillos todos los elementos en el ancho experimentan una tendencia a expandirse lateralmente. La tendencia de esparcimiento lateral es opuesta por las fuerzas de fricción transversales. Debido a la curva de fricción estas son mayores en el centro de la lámina, de tal manera que los elementos en la región central se expanden mucho menos que los elementos cercanos a las orillas. Debido a que la reducción del espesor en el centro de la lámina va a un incremento longitudinal, mientras que parte de la reducción del espesor en las orillas va a un incremento lateral, la

lámina desarrolla una ligera forma redonda en los extremos. Debido a que hay una continuidad entre las orillas y el centro, las orillas de la lámina son estiradas en tensión y la condición que puede prevalecer son ramilladuras. Bajo condiciones severas de esta situación se puede dar un agrietamiento por el centro de la lamina (ver Figura 4-2).

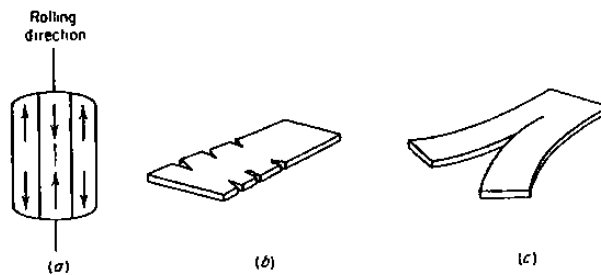


Figura 4-2. Defectos resultantes de un esparcimiento lateral.

- a) Esfuerzos generados en la lámina por una reducción mayor en el centro. b) y c) Resultado de los esfuerzos de tensión generados en las orillas de la lámina.

Cuando las condiciones de rodado son tales que solamente se deforma la superficie del material, la sección transversal del material adquiere una forma como la mostrada en la Figura 4-3a. En los subsecuentes pases a través de los rodillos el material saliente no se deforma directamente por compresión pero es forzado a elongar por el material cercano al centro. Esto crea esfuerzos de tensión secundarios que llevan a que las orillas se ramillen.

Con reducciones pesadas, de tal manera que la deformación se extiende a través del espesor de la lámina el centro tiende a expandirse mas lateralmente que las superficies para producir orillas redondeadas como las mostradas en la Figura 4-3b, esto causa esfuerzos de tensión secundarios que también causan ramillado. Con esta deformación lateral, ocurre una mayor distribución asía el centro que asía las orillas de tal manera que las orillas son puestas en tensión y el centro en compresión. Esta distribución de esfuerzos también se extiende en la dirección del rodado y si en el material existe una debilidad metalúrgica a lo largo de la línea central del planchón, ocurrirá una fractura como la mostrada en la Figura 4-3c.

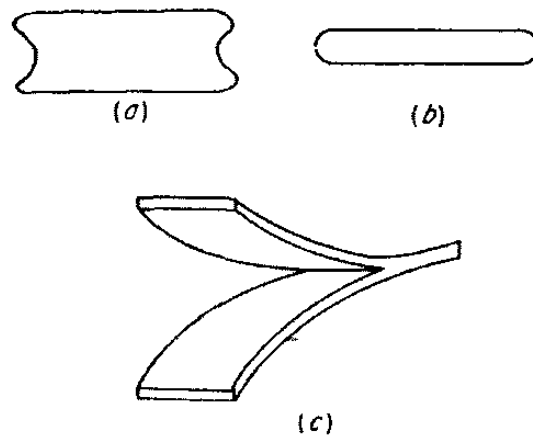


Figura 4-3. Distribución en las orillas que resultan de a) reducciones ligeras, b) reducciones pesadas, c) condición crítica derivada de defectos metalúrgicos a lo largo de la línea central

El ramillado es minimizado al utilizar rodillos verticales que mantienen rectas las orillas y de esta manera se previene la acumulación de esfuerzos de tensión secundarios.

El propósito de este capítulo y el anterior es el de dar un panorama general de los procesos de laminación tanto en frío como en caliente, en los siguientes capítulos se analizarán los métodos desarrollados para el cálculo de cargas de rolado en frío.

Capítulo 5

Factores que determinan la magnitud de las cargas de rolado

5.1 Efecto de la condición de superficie de las herramientas de deformación

Cuando la altura de un cilindro sólido de metal es progresivamente reducida, el diámetro se incrementará uniformemente siempre y cuando las superficies de los herramientas sean tan perfectas al grado de no ofrecer resistencia por fricción P al movimiento radial exterior de las caras superior e inferior del cilindro, que están en contacto con las caras de los herramientas. De cualquier modo, en la práctica, los movimientos radiales libres de las caras no ocurren, el grado de restricción depende en el acabado impartido a las superficies de los herramientas. El movimiento restringido de las caras superior e inferior del cilindro afectará al movimiento del material inmediatamente adyacente a estas caras, que, en cambio, afectará el movimiento de las otras capas. De cualquier modo debe ser apreciado, que la severidad de la restricción cada vez será menor conforme la distancia de las superficies se incrementa, a tal grado que si la altura del cilindro es suficientemente grande, esta restricción de movimiento desaparecerá. Como indica la Figura 5-1 el resultado neto es producir un cilindro con una forma de barril y zonas de material, que

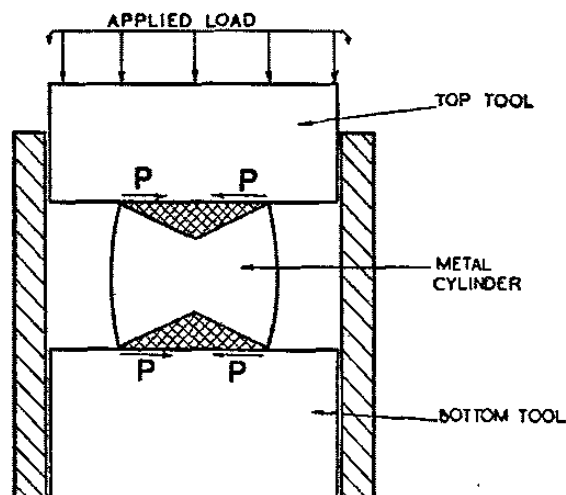


Figura 5-1. Deformación de los cilindros efecto de la superficie de las caras de la herramienta

no pueden deformarse libremente, estas zonas se muestran sombreadas en la Figura 5-1. Debe ser considerado que en la realidad los mecanismos de flujo de material son más complejos que el descrito anteriormente y no existen las fronteras de las zonas sombreadas de la Figura 5-1 pero, para propósitos de este capítulo, este concepto sencillo de lo que ocurre cuando un cilindro de metal es deformado puede ser aceptado.

De este concepto podemos concluir que las fuerzas de fricción entre las superficies de los herramientas y las del material a ser comprimido, contribuyen a la magnitud de la carga necesaria para efectuar la reducción en espesor.

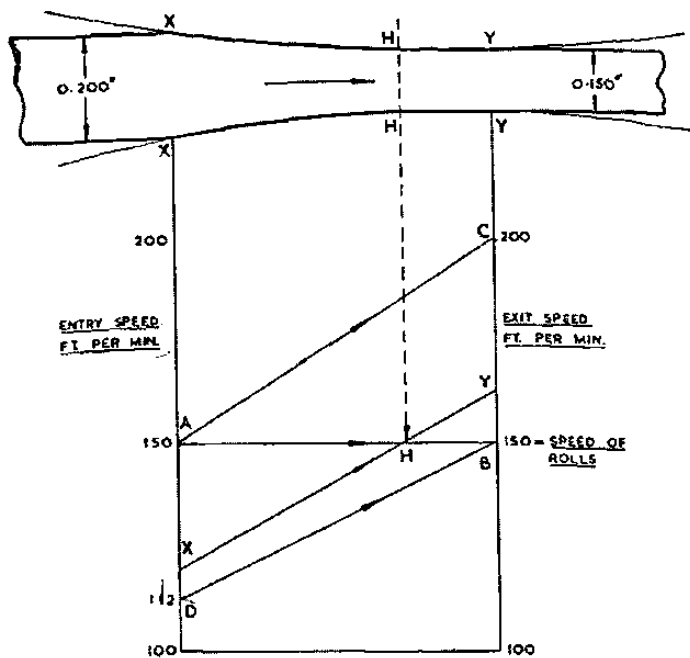


Figura 5-2. Condiciones de velocidad en la garganta de los rodillos

Durante el rolado, operan fuerzas de fricción similares, como se puede observar en el estudio de condiciones de velocidad en la garganta de los rodillos. Debido a que el espesor del material después del rolado es menor que el que tenía antes de rolado, la velocidad de salida del metal de la garganta de los rodillos debe ser mayor que la velocidad de entrada. En la Figura 5-2 se muestra una escala de velocidad, tomada como 150 ft

por minuto y es representada por la línea AB . La línea vertical en el lado izquierdo del diagrama corresponde al plano de entrada, mientras que la de la derecha se refiere al plano de salida. Si el material entra a la misma velocidad que los rodillos, entonces este debe emerger más rápido, y esta condición es representada por la línea AC . Si el material sale a la misma velocidad que los rodillos, debe entrar más lento como lo indica la línea DB . Las condiciones de velocidad reales se obtienen en alguna parte situada entre estos

dos extremos, el metal siempre deja los rodillos a una velocidad mayor a la de estos, la velocidad de entrada debe ser sensiblemente más lenta. De esta forma la posición de la línea que representa las condiciones de velocidad del metal en cualquier punto de la garganta del rodillo puede ser trazada en cualquier punto entre las líneas AC y DB, en este ejemplo se representará con la línea XY , y el punto importante a observar es que el plano HH , entre la entrada y la salida del metal se mueve a la misma velocidad que los rodillos. Esto significa que la superficie del rodillo entre X y H trata de jalar el metal hacia los rodillos como esta representado en la Figura 5-3 por las fuerzas de fricción P_1 actuando tangencialmente en las caras de los rodillos en AA . En el movimiento desde el plano HH , donde el metal se mueve a la misma velocidad de los rodillos, hacia el plano de salida YY , la velocidad del metal se incrementa gradualmente y, en consecuencia, las superficies de los rodillos intentan jalar el material de vuelta a la garganta del rodillo, esto crea otras fuerzas de fricción, P_2 , que operan en dirección opuesta a P_1 .

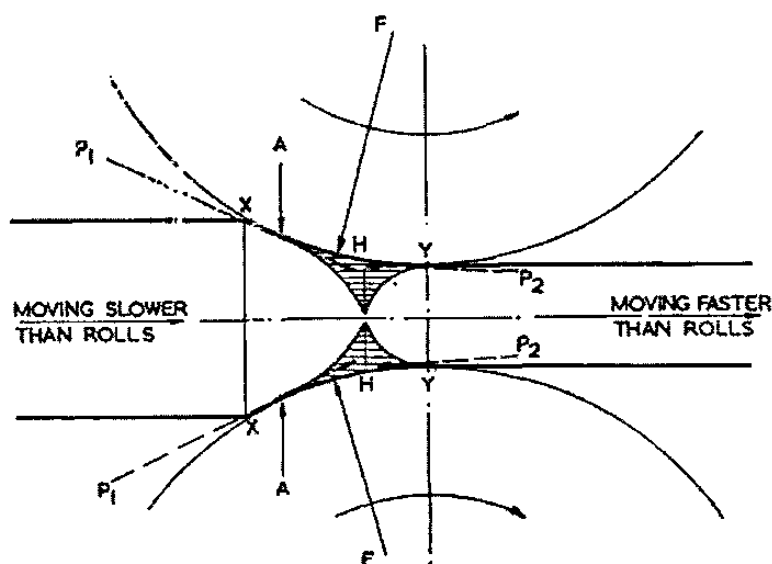


Figura 5-3. Fuerzas de Fricción creadas por las diferencias de velocidad a lo largo del arco de contacto.

En todos los puntos entre H y X el metal trata de fluir hacia atrás del punto H , pero la fuerza de fricción P_1 tiende a restringir este flujo. De forma similar el material entre H y Y intenta moverse hacia delante a una velocidad mayor que la de los rodillos pero las fuerzas de fricción P_2 tienden a prevenir que esto ocurra. La fuerza mostrada como F representa la fuerza de compresión aplicada para deformar el cilindro, y ya que, durante

el rolado, la libertad de movimiento de las superficies de material en contacto con las superficies de los rodillos es restringido, este comportamiento es también similar al que ocurre cuando se comprime un cilindro. Este modo de flujo que toma lugar en la garganta del rodillo, puede ser aceptado como comparable al menos cualitativamente, con el discutido antes, cuando se considera la compresión simple de un cilindro. Las zonas rayadas en la Figura 5-3, tienen el mismo significado que las sombreadas en la Figura 5-1. Por lo tanto se puede concluir que en un proceso de rolado, si dos cintas idénticas son reducidas el mismo porcentaje, una en molino con rodillos con una superficie lisa y la otra en molino con rodillos con una rugosidad mayor, las fuerzas de separación asociadas con este último serán mayores, siempre y cuando todas las demás condiciones de operación sean iguales.

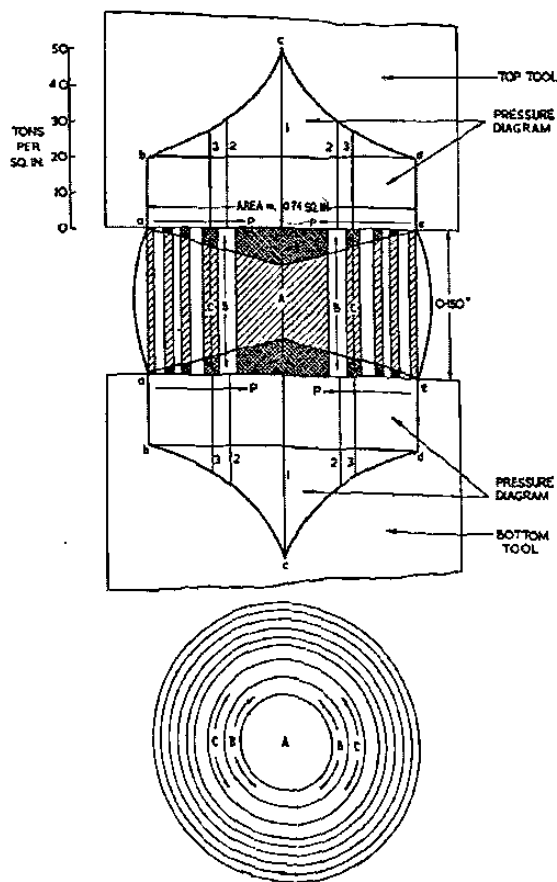


Figura 5-4. Distribución de la presión sobre las caras del cilindro.

Considerando el diagrama de la Figura 5-4, el cilindro es dividido en elementos circulares de la misma sección transversal, y la carga total de 22.4 toneladas, necesarias para obtener una reducción del 40%, es distribuida en estas áreas elementales. De esta forma para el elemento interno *A* la porción superior e inferior de las zonas restringidas están más cerca una de otra que las del elemento adyacente *B*, de esta forma la carga soportada por el área *A* será mayor que la soportada por *B*, de manera similar la proporción asociada con elemento *B* será mayor que la soportada por *C*. Si la resistencia a la deformación de *A*, es decir la fracción de la carga total aplicada dividida por el área de *A*, es representada por la altura de línea vertical (1), la altura

de la línea (2) correspondiente a B será menor. De forma similar la línea (3) para el elemento C será de una menor altura que la línea (2). En el diagrama la altura de estas líneas es conectada por la curva $abcde$, indicando la forma en la cual la presión es distribuida sobre las caras de contacto del cilindro y las herramientas de compresión, esto como consecuencia de la presencia de fuerzas de fricción P , el significado de la base rectangular $abde$ se discutirá mas adelante.

En la Figura 5-5 se muestra la distribución de la presión en el arco de contacto cuando dos cintas de aluminio son roladas en un molino de laminación en frío, una usando rodillos con un acabado de superficie liso y la segunda utilizando rodillos con una rugosidad mayor, las demás condiciones de rolado son las mismas para las dos cintas. De estas curvas se puede observar que la presión se incrementa del plano de entrada a una cierta posición a lo largo del arco de contacto, después del cual esta disminuye a medida que se acerca al plano de salida.

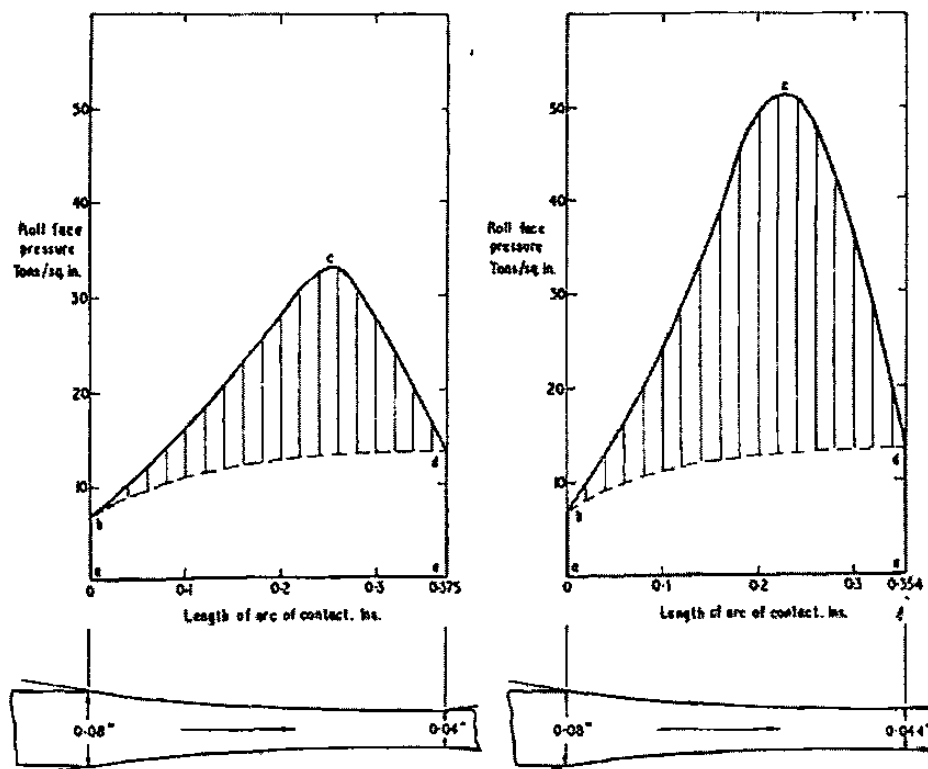


Figura 5-5. Diagramas de presión en las caras de los rodillos obtenidos cuando se reduce el espesor de aluminio con rodillos de 7" de diámetro. El diagrama de la izquierda se refiere a rodillos lisos y el de la derecha a rodillos con rugosidad mayor.

En lo que respecta a las fuerzas de fricción en la garganta del rodillo, se puede observar que la superficie del material se mueve más despacio que los rodillos en el plano de entrada, pero se incrementa hasta alcanzar la velocidad de los rodillos. La mitad de los picos redondeados en las dos curvas corresponde al punto donde la igualdad de velocidad es alcanzada. Si los diagramas de presión son comparados con los de la Figura 5-4, se pueden observar cuatro puntos similares. Estos son, que (1) la forma de las curvas son similares, (2) los ejes verticales están en toneladas por pulgada cuadrada, (3) el eje horizontal en ambas figuras representa el área de contacto, y (4) la porción rectangular *abde* del diagrama en la Figura 5-4 corresponde al área también marcada como *abde* en la Figura 5-5, la razón porque esta última no es rectangular se discutirá más adelante. El significado de la altura de la curva *abcde* en la Figura 5-4, multiplicada por la altura del cilindro después de ser comprimido es igual a la carga necesaria para efectuar la reducción de altura, de forma similar, para las dos curvas de presión, la altura multiplicada por el largo en pulgadas del arco de contacto nos da la magnitud de la carga de rolado por unidad de ancho de la cinta. Ya que en las curvas de la Figura 5-5 las dos cintas y el largo de los arcos de contacto son los mismos, la influencia de las condiciones de superficie de los rodillos en la magnitud de la carga de rolado, puede ser evaluada comparando directamente las áreas *abcde* en la Figura 5-5.

5.2 Efecto del espesor inicial del material

En el punto anterior se analizó el efecto de la condición de superficie de los rodillos donde la fricción entre los rodillos y el material fue la única variable, el área bajo la curva, el diámetro de los rodillos, el porcentaje de reducción y el espesor inicial se mantuvieron constantes. Cuando el efecto de espesores iniciales diferentes del material en la magnitud de la carga de rolado es también estudiado, aunque se pueden considerar las condiciones de fricción, el diámetro de los rodillos y el porcentaje de reducción como constantes, el área en contacto con los rodillos se modifica cuando el espesor inicial de lámina es cambiado. Por ejemplo, si el espesor de dos cintas de 10" de ancho, con espesores iniciales de 0.4" y 0.1" respectivamente, son reducidas un 30 % en un pase

con rodillos de 24" de diámetro, las respectivas áreas de contacto son de 12 in² y 6 in²; estas son calculadas con

$$Area = b \sqrt{R(t_1 - t_2)}$$

donde b es el ancho de la lámina, R es el radio de los rodillos, t_1 es el espesor antes del rolado y t_2 es el espesor después del rolado.

La Figura 5-6 muestra las dos curvas de distribución de presión en el arco de contacto, calculadas usando el método desarrollado por Orowan⁽⁷⁾, el eje horizontal representa la longitud del arco de contacto en pulgadas. Estas curvas se refieren al rolado de lámina de 10" de ancho de acero recocido en el mismo par de rodillos de 24" de diámetro operando bajo condiciones idénticas, el espesor inicial de una de las cintas es de 0.400" y la otra de 0.100", una reducción del 30% es alcanzada para cada una.

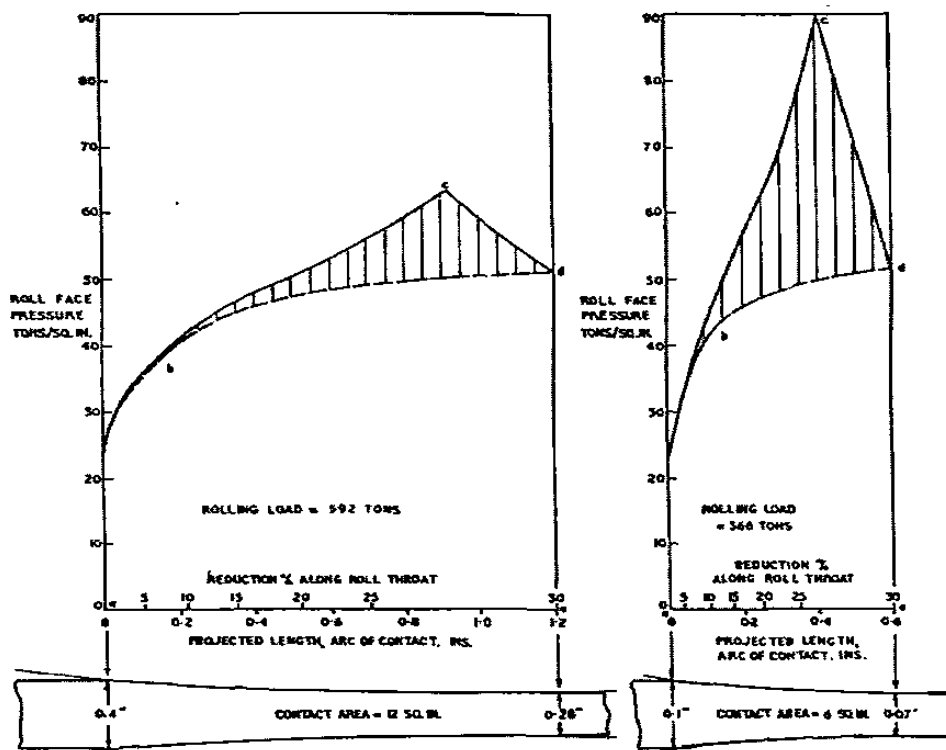


Figura 5-6. Diagramas de distribución de presión.

Acero suave, diámetro de los rodillos 24", porcentaje de reducción 30%.

El coeficiente de fricción entre las superficies del metal y los rodillos fue tomado de 0.1. Como se describió anteriormente, con curvas de este tipo la carga de rolado, en toneladas por unidad de ancho, es igual a la altura de la curva completa, en toneladas por pulgada cuadrada, multiplicada por la longitud del arco de contacto proyectado en pulgadas, o en otras palabras, el área bajo la curva multiplicada por el ancho del material da la carga de rolado. Comparando las áreas debajo de cada una de las curvas, se observa que la carga

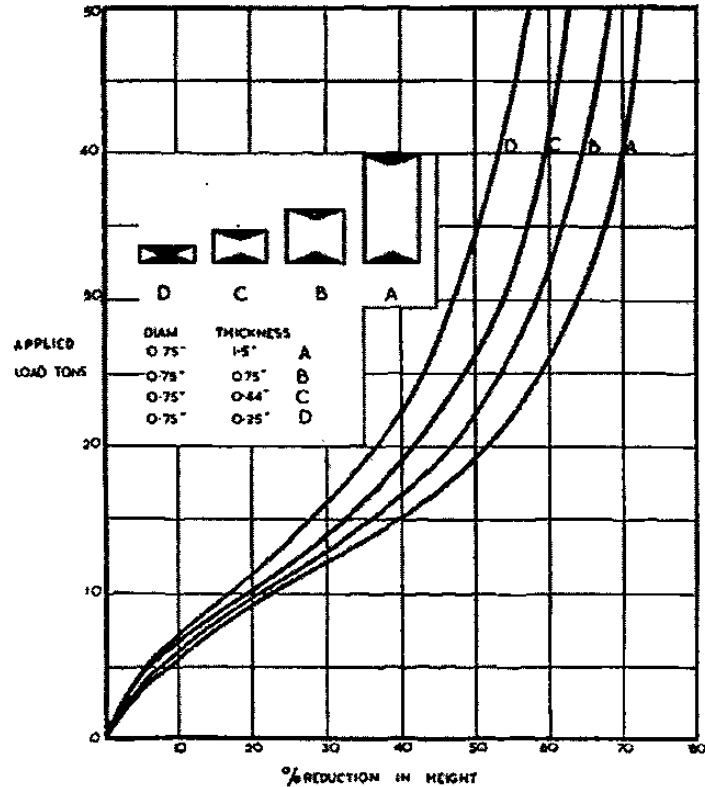


Figura 5-7. Incremento en la carga de deformación por un decremento en el espesor inicial.

desarrollada mientras se lamina el material más grueso excede la carga asociada con el material más delgado, las cargas totales son de 592 y 366 toneladas respectivamente. Como se puede observar en la Figura 5-6, el área de contacto del material más delgado es menor que el área de contacto para el más grueso, por lo tanto es de esperarse que la carga de rolado sea menor también, pero el punto importante a analizar es que la diferencia entre las cargas de rolado no se compara con la diferencia entre las diferentes áreas de contacto, ya que el área de contacto del material más delgado es el 50% del área de contacto del más grueso y la carga de rolado es solamente un 38% menor. Naturalmente la pregunta que surge, es ¿por qué la diferencia entre las cargas no es igual al 50%? Considerando la deformación de cilindros de diámetro constante pero variando en altura es posible obtener la respuesta a esta pregunta. Los cilindros mostrados en la Figura 5-7 los cuales fueron deformados con el mismo set de herramientas, son de diámetro constante de tal modo que si a cada uno se le da la misma reducción en altura,

el área que soporta la carga aplicada es la misma, independientemente de la altura. Con áreas constantes, porcentajes de reducción iguales y las mismas condiciones de superficie de los herramentales, la magnitud de las fuerzas de fricción desarrolladas entre las caras de contacto de los herramentales y los cilindros también son iguales, independientemente de las alturas originales. Haciendo referencia a las curvas de la Figura 5-7 podemos ver que para una reducción dada, entre menor sea la altura del cilindro mayor será la magnitud de la carga necesaria para efectuar la deformación. La razón de esto se asocia con la distancia entre zonas de flujo restringido. Debido a esto y como puede observarse en la Figura 5-7, Cuando la altura del cilindro *A* es reducida, por decir algo 40%, las zonas restringidas de flujo continúan una distancia considerable apartadas y no juegan de forma sensible a la resistencia de la carga aplicada. Por otra parte, cuando el cilindro *C*, es sujeto a la misma reducción la distancia entre las zonas de flujo restringido es mucho menor, y en consecuencia estas se vuelven más dominantes al interferir con el flujo libre lateral del material entre ellas. Si la altura inicial del cilindro es lo suficientemente pequeña de tal manera que las zonas de flujo restringido se encuentren en contacto, como lo indica el cilindro *D*, la carga de deformación se incrementara rápidamente, aunque estas zonas son más suaves que las del cuerpo del cilindro, estas se oponen fuertemente a la deformación ya que su movimiento radial esta siendo restringido por las fuerzas de fricción que actúan en el área de contacto entre los cilindros y los herramentales.

Aunque la descripción anterior de los mecanismos de deformación es una versión muy simplificada de lo que realmente esta ocurriendo, tiene el merito de proveer una buena idea de cómo el espesor inicial afecta la fuerza necesaria para reducir el espesor durante el rolado, por lo tanto podemos concluir el hecho de que entre menor sea el espesor inicial mayor es la influencia de la restricción de las fuerzas de fricción a la deformación y explica porque para las dos curvas de presión de la Figura 5-6, la carga solo difiere un 38% mientras que las áreas difieren un 50%.

5.3 Influencia del diámetro de los rodillos

La Figura 5-8 muestra dos cintas de 0.2" de espesor, del mismo ancho, siendo reducidas un 30% con rodillos de 12 y 24" de diámetro respectivamente. Ya que la longitud de los arcos de contacto respectivos AC y BC son diferentes, aunque el ancho es igual para las dos cintas, las áreas de contacto no serán iguales en magnitud. El área nominal para el rodillo mayor es solamente 42% mayor que la del rodillo menor, pero de acuerdo a los cálculos publicados por Cook y Larke⁽⁷⁾, cuando se examina el método de calculo de cargas de rolado desarrollado por Orowan, la carga necesaria para reducir una cinta de cobre en los rodillos de 24" es 67% mayor que la utilizada por el rodillo de menor diámetro. De manera similar, mediciones obtenidas por Lueg y Pomp⁽⁸⁾, cuando se reduce acero de 0.077" de espesor en rodillos de 3½ y 7¼" de diámetro, muestra que aunque el área de contacto para los rodillos mayores es nominalmente tan solo del 44% mayor, el incremento en la carga cuando se usan los rodillos mayores es del 80% que la desarrollada con los rodillos mas pequeños. Con el objetivo de obtener la causa de estas diferencias, algunos resultados obtenidos por Cook y Larke de experimentos realizados comprimiendo cilindros de la misma altura, pero de diferente diámetro – lo que significa diferentes áreas de contacto entre las caras de los cilindros y los herramientales – serán considerados.

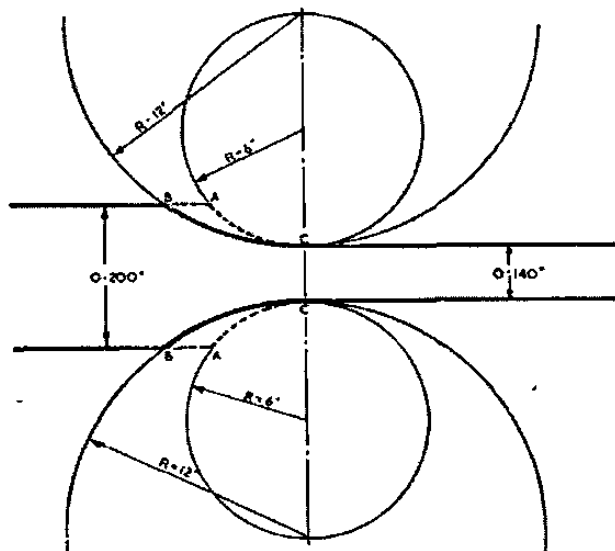


Figura 5-8. Variación del arco de contacto con el diámetro de los rodillos.

La Figura 5-9 muestra 5 cilindros comprimidos el mismo porcentaje entre el mismo set de herramientas. Como se explico anteriormente, el material adyacente a la cara del herramental estará sujeto a un flujo restringido y el efecto total de esto es nuevamente representado por las zonas sombreadas. Como se puede observar las zonas para el cilindro de diámetro mayor están interactuando, mientras que la distancia entre las zonas del cilindro más pequeño es relativamente considerable. Como hemos visto, el acercamiento de estas zonas es por si mismo un factor que contribuye en el incremento a la resistencia a la deformación.

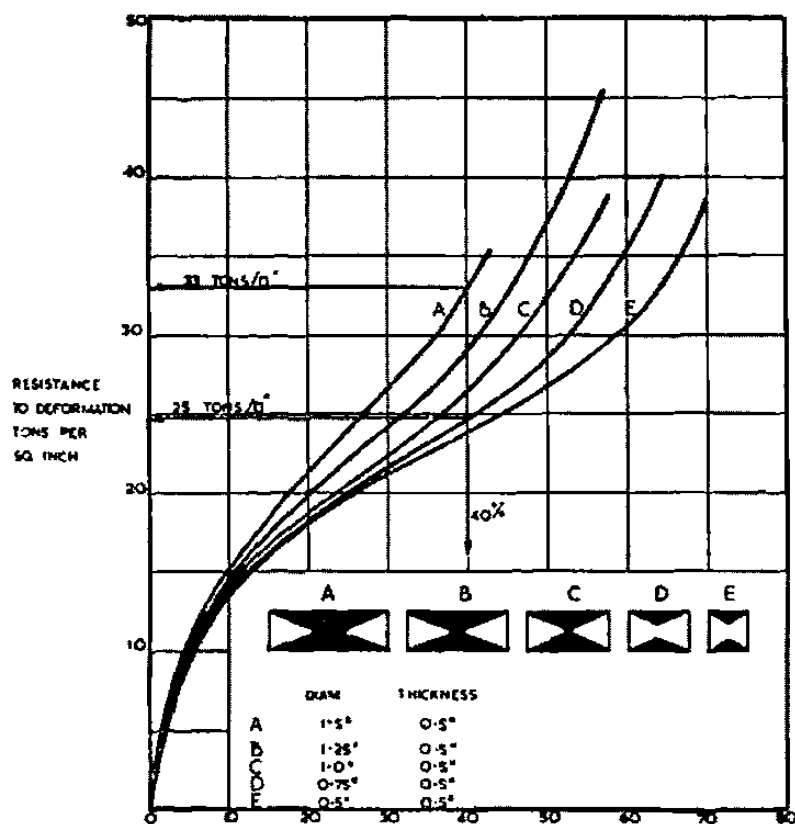


Figura 5-9. Incremento de la resistencia a la deformación debido a un incremento en el área inicial de contacto.

5.4 Resistencia a la deformación

Cuando el espesor de un lámina de metal es reducido mediante un proceso de rolado o cuando la altura de un cilindro de metal es reducida, la fuerza necesaria para efectuar la deformación esta constituida por diferentes componentes, uno para superar la resistencia natural o inherente ofrecida por el material y la otra necesaria para contrarrestar el efecto de las fuerzas de fricción que actúan a lo largo de las superficies de contacto entre los herramientas de deformación y el material. Curvas en donde esta fuerza combinada, expresada en toneladas por pulgada cuadrada es graficada contra el porcentaje de reducción de la altura de los cilindros, ya han sido presentadas en la Figura 5-9 y curvas similares se muestran en la Figura 5-10, el significado de los números adjuntos se da en la Tabla 5-1.

Si en cada uno de los grupos de curvas del siguiente diagrama es seleccionado un porcentaje de reducción, como ejemplo 30%, se puede observar que existe una diferencia importante entre la fuerza por unidad de área para deformar los cilindros más altos y los más bajos, pero el punto mas importante a observar es que esta diferencia se vuelve menor conforme el grado de restricción por fricción es reducido. En otras palabras estos datos muestran claramente, que en el uso de rodillos con las superficies mas lisas, las diferencias de altura de las diferentes curvas tiende a desaparecer, esto debido a la reducción de las fuerzas de fricción y podemos observar que todas las curvas convergen en una curva común básica. Esta curva básica es repetida en cada uno de los tres grupos de gráficas de la Figura 5-10, y define, la resistencia a la deformación natural del material, en otras palabras la resistencia a la deformación homogénea, todas las demás curvas en diagrama presentan el efecto de una deformación no homogénea introducida por la presencia de fuerzas de fricción entre los herramientas de deformación y el material. Por lo tanto, de los dos componentes de fuerzas involucrados en la compresión de cilindros para un porcentaje dado, la asociada por la resistencia básica del material, es independiente la condición de superficie de los rodillos, pero la magnitud de la otra componente será, obviamente, dependiente del grado de no

homogeneidad de la deformación introducida por la condición de la superficie de los rodillos.

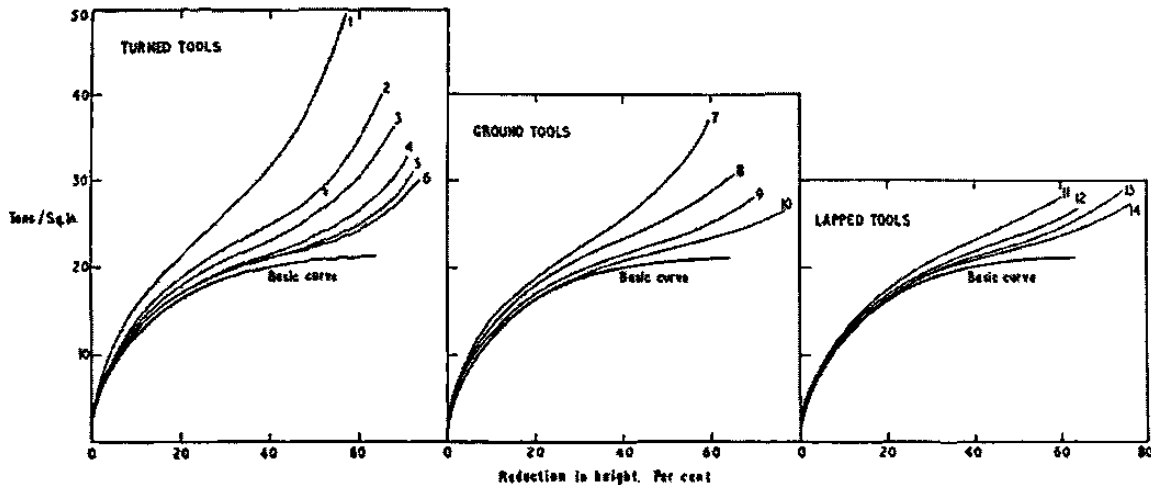


Figura 5-10. Curvas cercanas a la condición de deformación homogénea.

El término de deformación homogénea significa que no se presentan efectos de fricción y en consecuencia el material es libre de deformarse en todas las direcciones. En el caso del rolado en frío cuando la deformación solo se presenta en espesor y longitud esta deformación se conoce como deformación homogénea plana. Nadai⁽⁹⁾ mostró que la razón entre la deformación homogénea y la deformación homogénea plana es de 1.15; usando este factor y los datos publicados por Cook y Larke⁽⁷⁾, las curvas de la Figura 5-11 fueron graficadas, estas muestran la resistencia a la deformación homogénea plana de diferentes materiales.

Como se ha establecido anteriormente cuando un cilindro es sometido a compresión la carga aplicada esta formada por dos componentes, uno asociado con la resistencia del material a la deformación homogénea y el otro necesario para vencer la restricción de flujo impuesta por las fuerzas de fricción. La primera de estas dos componentes es representada por el rectángulo *abde* en la Figura 5-4. En otras palabras, cuando la altura del cilindro de cobre en este diagrama fue reducida en un 40% – esto corresponde al área comprimida de 0.74 pulgadas cuadradas, y leyendo de la curva básica de la Figura 5-4, una resistencia a la deformación homogénea de 20.2 toneladas por pulgada cuadrada – el

valor de la primer componente encontrada multiplicando 20.2 ton/in^2 por 0.74 in^2 es de 15 toneladas. La otra componente como se explicó anteriormente se distribuye de la manera mostrada por la curva *bcd* y ésta representa alrededor del 30% de la carga total.

De manera similar en el rolado, la carga se divide en dos componentes, que superan la resistencia a la deformación plana homogénea y las fuerzas de fricción entre las superficies de los rodillos y la lámina. A lo largo del arco de contacto del rodillo, la reducción del espesor varia desde cero hasta el espesor final deseado, en consecuencia, en los diagramas de distribución de presión la primer componente no será representada por un rectángulo, pero si por las áreas bajo las curvas marcadas como *abde* en las Figuras 5-5 y 5-6, donde estas son simplemente curvas de resistencia a la deformación homogénea plana. El valor de la segunda componente del total de la carga de rolado en cada uno de los diagramas de las Figuras 5-5 y 5-6 es representada por las áreas que han sido sombreadas.

Curva No. De la figura 10.	Diámetro D_0 in	Altura H_0 in	Rugosidad de los herramientales
1	0.750	1.500	Alta
2	0.750	1.250	
3	0.750	1.000	
4	0.750	0.750	
5	0.750	0.500	
6	0.750	0.250	
7	0.750	1.500	Media
8	0.750	1.000	
9	0.750	0.500	
10	0.750	0.250	
11	0.750	1.500	Baja
12	0.750	0.750	
13	0.750	0.500	
14	0.750	0.250	

Tabla 5-1. Dimensiones de cilindros de cobre usados en una prueba de compresión entre herramientas con grados de rugosidad diferentes.

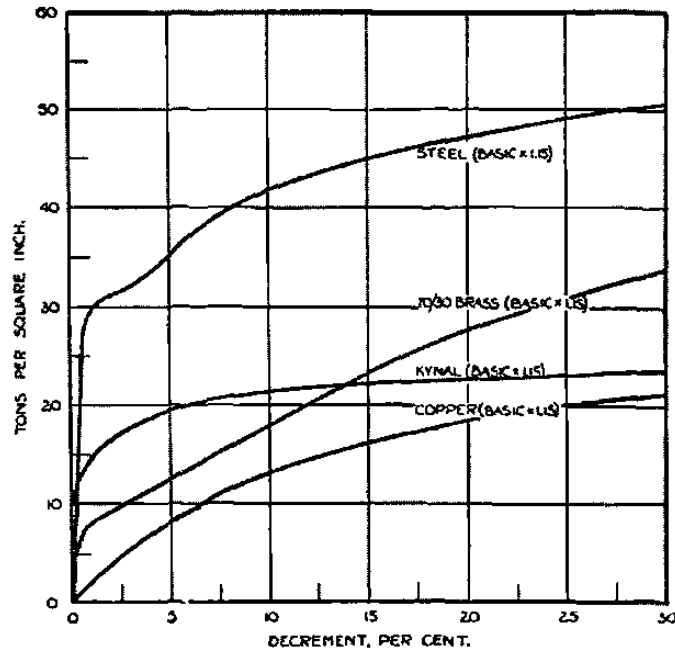


Figura 5-11. Curvas típicas de deformación plana homogénea contra porcentaje de reducción.

5.5 El efecto de la tensión en el enrollador y en el desenrollador

Los datos graficados en la Figura 5-12 claramente muestran que si, con una abertura pasiva de rodillos dada S_0 – Figura 5-13(a) – la tensión del enrollador es incrementada el espesor de la lámina disminuye. Esto significa que cuando la tensión es incrementada la carga de rolado disminuye, ya que para un valor dado de S_0 un decremento en la medida de la abertura activa de los rodillos h – Figura 13(b) – solamente puede tomar lugar si un desplazamiento elástico del castillo del molino ocurre y la compresión elástica de las caras de los rodillos es reducida.

En lo que corresponde al grado en el cual la magnitud de la carga de rolado es reducida como consecuencia de aplicar tensión en el enrollador y en el desenrollador, los datos obtenidos experimentalmente por Hessenberg y Sims⁽¹⁰⁾ se examinarán en detalle en el siguiente capítulo.

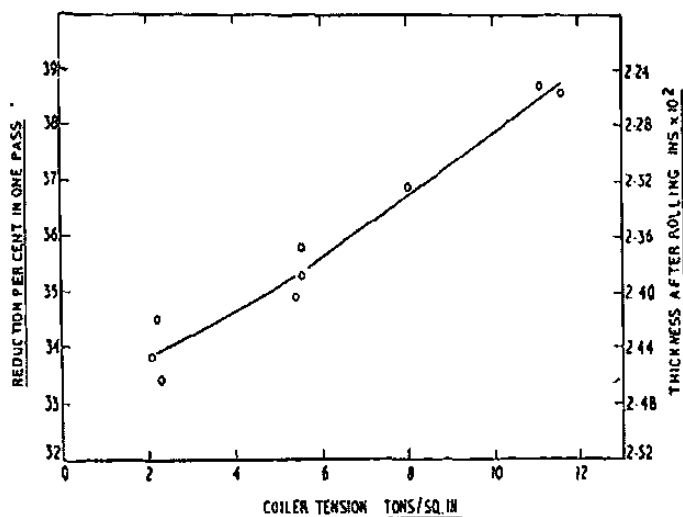


Figura 12. Efecto del incremento de la tensión en el enrollador en la reducción de espesor cuando se lámina bronce recocido de 0.037" de espesor.

la carga de rolado desarrollada mientras se efectúa una reducción del 39%, es de 58 toneladas. Aplicando una tensión de 11.2 toneladas por pulgada cuadrada solo en el enrollador, aunque la misma carga de rolado fue desarrollada, la reducción se incremento a un 47%. Cuando no se empleo tensión en el enrollador se encontró que con una tensión tan pequeña del orden de 3 toneladas por pulgada cuadrada en el desenrollador se podía alcanzar una reducción mayor del 50%, la carga de rolado asociada nuevamente fue de 58 toneladas. Con tensión en el enrollador y en el desenrollador cada una aproximadamente igual a 9.5 toneladas por pulgada cuadrada, una reducción cerca del 49% fue obtenida, mientras que la carga de rolado se redujo a 48 toneladas.

Como se describió anteriormente en este capítulo la magnitud de la carga de rolado es proporcional al área bajo la curva asociada a la presión del arco de contacto. Por lo tanto, si dos láminas idénticas son roladas en el mismo molino, la primera con tensión externa y la segunda sin tensión, entonces, ya que la carga desarrollada con la última cinta será mayor, el área bajo la curva de distribución de presión del rodillo también será mayor. Con el objetivo de ilustrar esto, algunas curvas derivadas teóricamente por

Por ahora dos o tres series de sus resultados serán suficientes para ilustrar como las tensiones externas afectan la magnitud de la carga de rolado. Consideremos que lámina de acero, de 3½" de ancho y un espesor inicial de 0.063", son roladas con y sin tensión aplicada en un molino two-high con rodillos de 10" corriendo a 40 ft/min y utilizando como lubricante una solución con un 10% de soluble en agua. Trabajando sin tensión

Nadai⁽¹¹⁾ serán examinadas, estas están representadas en la Figura 5-14. En este diagrama el eje vertical es la relación que existe entre la presión de la cara del rodillo y la deformación homogénea plana del material, el eje horizontal proyecta el arco de contacto de los rodillos.

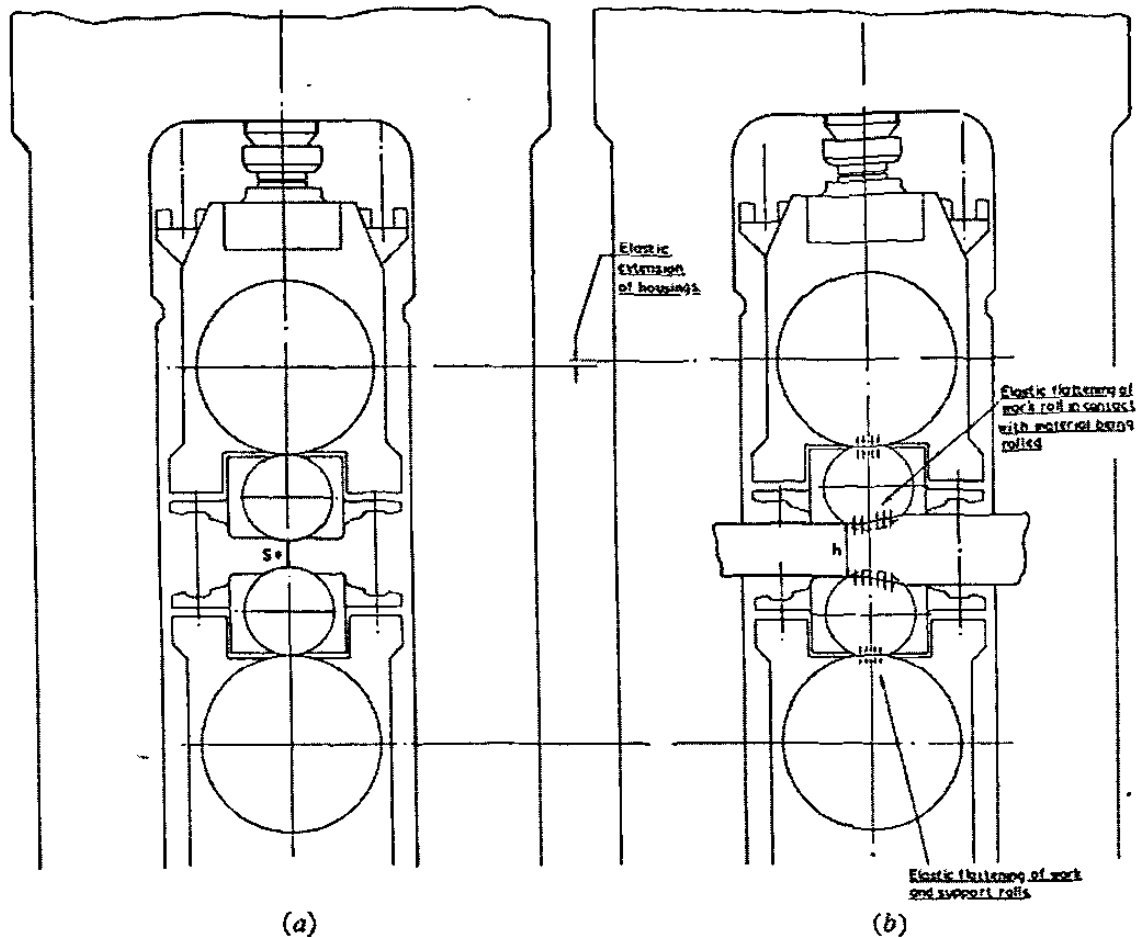


Figura 13. Diagrama mostrando un desplazamiento elástico en el castillo del molino.

a) Abertura pasiva de los rodillos, b) Abertura activa de los rodillos.

Detalles adicionales de las condiciones de rolado son el diámetro de los rodillos que fue de 16", la reducción efectuada con material de 0.143" en espesor fue del 30% y un coeficiente de fricción fue de 0.224. En la Figura 14 la curva *bd* representa la resistencia a la deformación plana homogénea de aluminio comercial puro en cualquier punto a través del arco de contacto y se puede observar que si esta propiedad se incrementa en valor mientras que la reducción avanza desde cero en el plano de entrada al porcentaje requerido en el plano de salida, el material se endurece. Para construir las curvas en la

Figura 5-14, Nadai considero una resistencia media a la deformación plana homogénea y en consecuencia para las condiciones donde la magnitud de las tensiones en el enrollador y en desenrollador son iguales, la magnitud de la resistencia a la deformación en Y , tanto a la entrada X , como a la salida serán iguales. Examinando el diagrama correspondiente donde se opera sin tensión se puede apreciar que la presión en el plano neutral se eleva y el área bajo este diagrama es proporcional a la carga de rolado que será desarrollada. Cuando las tensiones en el enrollador y en el desenrollador son iguales a un cuarto de la máxima permisible que puede ser aplicada, se puede observar que la presión en todos los puntos a lo largo de arco de contacto son reducidos, el pico de presión representado por A – El cual se obtiene con condiciones de cero tensión – cae a la posición marcada como C . De forma similar cuando las tensiones equivalen a la mitad y tres cuartos del máximo permisible, otras curvas de presión se crean los respectivos picos de presión son los puntos D y E . Si las áreas bajo estos cuatro diagramas se comparan, esta sería una medida de las respectivas cargas de rolado y se observaría que la magnitud de la carga es afectada de manera sensible por la cantidad de tensión externa aplicada a la lámina.

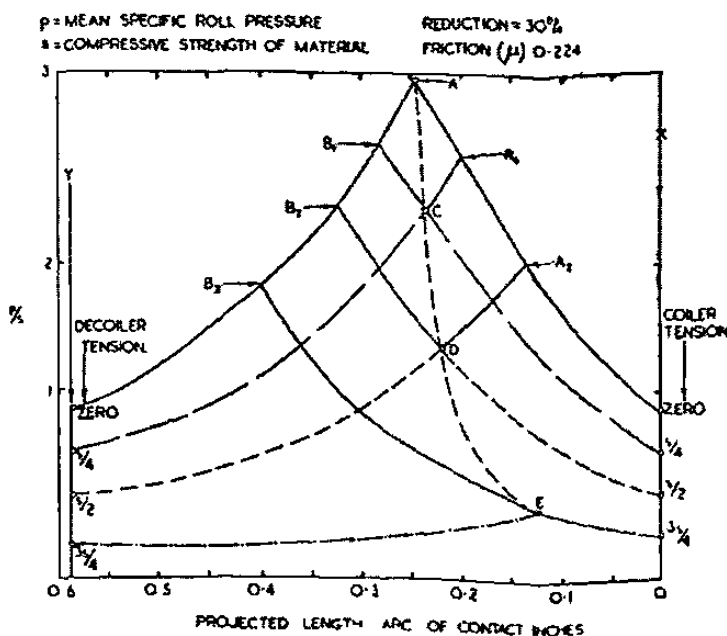


Figura 5-14. Influencia de la tensión en el enrollador y desenrollador en la magnitud de la carga de rolado.

De estas curvas también vale la pena estudiar el efecto en la carga de rolado cuando la tensión desarrollada en el enrollador y en el desenrollador son diferentes. Como se puede observar en la Figura 5-14 cuando se opera sin tensión en el enrollador, el efecto de incrementar la tensión en el desenrollador causa que el plano neutral A se mueva hacia el plano de salida X , en la dirección $A \rightarrow A_1 \rightarrow A_2$. Si

la magnitud de la tensión en el desenrollador es lo suficientemente grande, A eventualmente alcanzará el plano de salida X , y cuando esto ocurra los rodillos se moverán mas rápido en todos los puntos del arco de contacto que el material y esto traería como consecuencia deslizamientos, que resultaría en una superficie del material defectuosa. De manera contraria si solamente se usa tensión en el enrollador el plano neutral A se moverá en dirección del plano de entrada Y , en la dirección $A \rightarrow B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3$, y cuando este plano se alcanza, los rodillos trabajarán más despacio en todos los puntos que el material, ocasionando que sea imposible efectuar la laminación. Los puntos A, C, D, E , muestran la posición del plano neutral cuando ambas tensiones se incrementan.

Capítulo 6

Influencia de la tensión en enrollador y desenrollador

6.1 Limite máximo de tensión que puede ser aplicado útilmente

La tensión en el enrollador generalmente es utilizada para asegurar el enrollado correcto de la lámina y facilitar la producción de material libre de ondulación, aunque, de acuerdo con Underwood⁽¹²⁾, también ayuda a reducir la tendencia hacia el ramillado de los bordes. Indeed, Hessenberg y Sims⁽¹⁰⁾, establecieron que “no se obtiene ninguna ventaja en el rolado, con tensiones aplicadas mayores a las necesarias para producir rollos embobinados correctamente y con la planeza requerida”. En lo que respecta a la magnitud real, Underwood establece que un limite útil para la tensión en el enrollador es alcanzado cuando el esfuerzo desarrollado en la lámina, es decir la fuerza de tensión dividida entre la sección transversal del material, iguala el esfuerzo de cedencia de éste, siendo, para la mayoría de los materiales, un esfuerzo igual o ligeramente mayor al correspondiente al limite de proporcionalidad después de que emerge de los rodillos. También como se explicó en la Figura 5-2 la velocidad a la cual el metal deja los rodillos es mas cercana a la velocidad de los rodillos, que la velocidad de entrada del material y resulta claro que el plano neutral, donde el material corre a la misma velocidad que los rodillos esta mas cerca del plano de salida que del de entrada. A medida que la tensión en el desenrollador se incrementa, la zona neutral se mueve en dirección al plano de salida y cuando este limite es alcanzado, una laminación satisfactoria no se puede llevar a cabo. Por lo tanto, para cualquier molino con un conjunto de condiciones de rolado dadas, la máxima tensión desarrollada por el desenrollador depende de la posición del plano neutral en la garganta del rodillo aunque,

a pesar de esto, la máxima tensión útil aplicada en el desenrollador se define igualmente por el esfuerzo de cedencia del material a ser rolado.

Existe, sin embargo, otra ventaja importante relacionada con la aplicación de tensión en la lámina que debe ser mencionada. Conforme el espesor de la lámina se reduce cada vez más, por ejemplo en una serie de pases consecutivos, la dureza de la lámina se incrementa, la presión en la cara de los rodillos, cuando se aplica el mismo porcentaje de reducción, rápidamente se incrementa y como fue demostrado por Orowan⁽⁴⁾ estas condiciones de rolado llevan a una distorsión severa de las caras de contacto de los rodillos, es decir ocurre un aplastamiento. Por lo tanto para facilitar la laminación de espesores delgados, la máxima tensión permisible en enrollador y desenrollador debe ser aplicada al material.

6.2 Determinación experimental del efecto de la tensión en la carga de rolado

Para mostrar el efecto de la tensión sobre la carga de rolado a continuación se analizará el trabajo publicado por Hessenberg y Sims⁽¹⁰⁾, estos resultados aplican exclusivamente a aceros suaves y muestran claramente el grado en el que la carga de rolado es reducida cuando se aplica tensión en el enrollador y en el desenrollador ya sea de forma individual y en conjunto.

Toda la experimentación se llevo a cabo en un molino experimental tipo two-high, la superficie de los rodillos de 10 in de diámetro, que operaba a una velocidad de 40 ft por minuto, tenía una rugosidad axial de $15 \pm 6 \mu$ in y durante toda la laminación, la lubricación fue efectuada empleando un mezcla de 10% de aceite soluble en agua. El espesor de la lámina de 3½” de ancho en la condición de rolado en caliente (RC) fue de 0.063” y fueron medidas las cargas de rolado desarrolladas en alcanzar reducciones en un primer pase de 30 y 50%, ambas desde la condición de RC, la tensión en el enrollador en esta parte del trabajo, se aplicaba en un rango entre 0 y 20 toneladas por pulgada cuadrada, la tensión en el desenrollador, en los casos en los que se uso, se mantenía constante a 3, 6 ó 9 toneladas por pulgada cuadrada. Otras cintas, después de un primer

pase de 40%, fueron sujetas a un segundo pase nuevamente de un porcentaje de reducción entre un 30 y un 50% y aunque el rango de tensiones en el enrollador fue el mismo que en el primer pase, en el desenrollador se desarrollaron tensiones hasta de 12 toneladas por pulgada cuadrada. La siguiente tabla muestra un resumen de las condiciones de rolado.

Rollo No.	Condición	Porcentaje de Reducción por pase		Ton / in ²	
		Pase 1	Pase 2	Rango de tensión en enrollador	Tensión constante en el desenrollador
2A	Recocido	29.8	N/A	1.8 a 19.8	0
2B		29.6		0 a 20.0	3
2C		29.4		0 a 20.1	6
3A	Recocido	47.2	N/A	3.8 a 18.3	0
3B		47.9		0 a 17.8	3
3C		49.4		0 a 19.4	6
3D		50.0		0 a 19.9	9
5A	Rolado en Frío	Ver Nota (1)	32.3	5.5 a 20.8	0
5B			32.1	0 a 20.4	6
5C			33.4	0 a 20.1	12
6A	Rolado en Frío		52.1	4.2 a 20.0	0
6B			53.1	0 a 22.5	6
6C			53.7	0 a 22.1	12

Nota (1): Para los rollos (5) y (6) las cargas fueron medidas solamente durante el segundo pase. Todas las muestras fueron reducidas durante el primer pase un 40% relativo al espesor de la condición de RC de 0.063 in.

Tabla 6-1. Detalles de las series de experimentos reportados por Hessenberg y Sims

Para derivar una ecuación de la cual el efecto de la carga de tensión en el enrollador y desenrollador pudiera ser evaluado, Hessenberg y Sims usaron las siguientes tres expresiones básicas:

$$F / P = k' / m \quad (6.1)$$

$$m = \frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} k \cdot d\theta \quad (6.2)$$

$$k' = \frac{1}{\alpha} \left[\int_{\phi}^{\alpha} (k - t_b) d\theta + \int_0^{\phi} (k - t_f) d\theta \right] \quad (6.3)$$

Donde: F = La carga de rolado en toneladas por pulgada de ancho cuando es aplicada la tensión.

P = La carga de rolado en toneladas por pulgada de ancho cuando no se utiliza tensión.

k = Resistencia a la deformación plana homogénea en toneladas por pulgada cuadrada

m = un valor de k , cuando no se aplica tensión, corresponde a un valor medio particular de la reducción obtenida.

k' = El valor aparente de m cuando se utiliza tensión.

θ = Coordenada angular del arco de contacto.

α = Máximo valor de θ , ver Figura 6-1.

ϕ = La magnitud de θ cuando la velocidad del material es igual a la velocidad de los rodillos, ver Figura 6-1.

t_b = Tensión en el desenrollador en toneladas por pulgada cuadrada.

t_f = Tensión en el enrollador en toneladas por pulgada cuadrada.

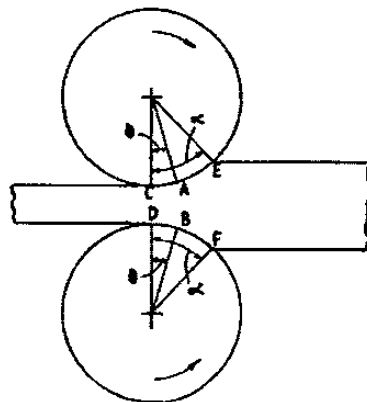


Figura 6-1. Ángulo de contacto = α . El punto donde el material se mueve a la misma velocidad de los rodillos es definido como ángulo ϕ . La velocidad en EF es menor que la de los rodillos. La velocidad en AB es la misma que los rodillos. La velocidad en CD es mayor que los rodillos.

La solución general de F se obtiene integrando la ecuación (6.3) quedando de la siguiente manera

$$k' = m - t_b - \frac{\phi}{\alpha} (t_f - t_b)$$

de la cual, usando las ecuaciones (6.1) y (6.2), la expresión general requerida es

$$F = P \left(1 - \frac{t_b}{m} \right) - \frac{P}{m} (t_f - t_b) \frac{\phi}{\alpha} \quad (6.4)$$

En la derivación de la solución particular Hessemberg y Sims asumieron que

$$2\phi = \alpha$$

Por lo tanto de la ecuación (6.4) encontramos que

$$F = P \left[1 - \frac{(t_b + t_f)}{2m} \right]$$

Ya que la solución de los resultados experimentales de Hessemberg y Sims implica que la tensión en enrollador y desenrollador tienen el mismo efecto en lo que respecta a la reducción de la magnitud de la carga P , es de gran importancia considerar independientemente la información publicada. Para hacerlo fue necesario establecer valores de P y m .

6.3 El significado y determinación de m

Como se estableció en las definiciones del significado de los símbolos en las ecuaciones (6.1) y (6.3), m es la resistencia a la deformación plana homogénea correspondiente a un valor particular de r la reducción obtenida sin el uso de tensión. Para calcular r ,

Hessenberg y Sims hicieron uso de una relación primeramente propuesta por Bland y Ford⁽¹³⁾,

$$r = 0.4r_1 + 0.6r_2 \quad (6.5)$$

Donde: r_1 = El porcentaje total de reducción de la condición RC antes del pase.

y r_2 = El porcentaje total de reducción de la condición RC después del pase.

Usando esta expresión, valores de m correspondientes a los valores asociados de r , son leídos de curvas derivadas experimentalmente, las cuales son basadas en datos tabulados en el documento original, y fueron graficadas en la Figura 6-2.

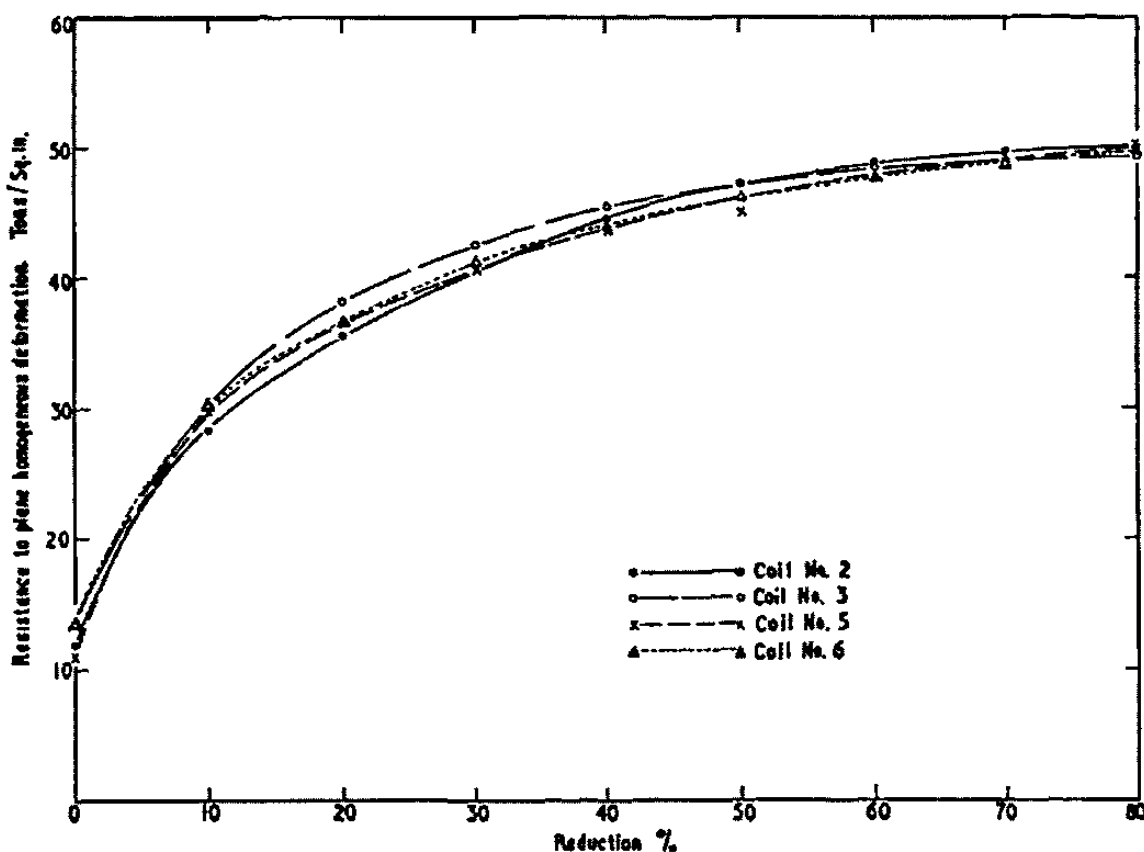


Figura 6-2. Curvas de resistencia a la deformación homogénea plana de un acero suave.

Para ilustrar como están cantidades fueron establecidas, dos ejemplos son suficientes, uno relacionado al rollo 2A y el otro al 5B. Durante el rolado del rollo 2A, cinco grupos de observaciones fueron hechas, cada una relacionada a una reducción nominal del 30% de la condición de RC, las reducciones reales obtenidas se muestran en la columna 3 de la Tabla 6-2. Esta tabla también contiene los valores asociados de m , el valor promedio del rollo 2A, el cual esta basado en los 5 muestreos realizados, es de 35.0 ton / in². En lo que respecta al rollo 5B, como se estableció anteriormente, ciertos rollos después de un primer pase de 40% de reducción nominal, se les dio un segundo pase, éste para el rollo 5B, fue de un 30% basado en el espesor después del primer pase. Para este rollo, se realizaron ocho observaciones las cuales se muestran en la Tabla 6-3 con los valores correspondientes de m . Basados en los ocho resultados podemos considerar que un valor promedio de 46 ton / in² representa el valor de m para el rollo 5B.

Usando este procedimiento, los valores de m y los valores de r relacionados, para los rollos restantes de la Tabla 6-1 fueron determinados y estos junto con los de los rollos 2A y 5B se muestran en la Tabla 6-4.

Prueba No.	Porcentaje de Reducción r_1	Porcentaje de Reducción r_2 Ver Nota (1)	Porcentaje de Reducción r Ver Nota (2)	m ton / in ² Ver Nota (3)	Promedio de m
1	N/A	29.3	17.6	34.9	35.0 Ton / in ²
2	N/A	29.4	17.6	34.9	
3	N/A	30.0	18.0	35.0	
4	N/A	30.4	18.2	35.1	
5	N/A	29.9	17.9	35.0	

(1) Datos tomados del documento original de Hessenberg y Sims.

(2) Usando la Ecuación (6.5).

(3) Leído de la Figura 6-2.

Tabla 6-2. Ejemplo de la determinación de m , la resistencia media a la deformación plana homogénea, de un solo pase de la condición de recocido. Rollo 2A. Ver Tabla 6-1 para las condiciones de rolado.

Prueba No.	Porcentaje de Reducción r_1 Ver Nota (1)	Porcentaje de Reducción r_2 Ver Nota (1)	Porcentaje de Reducción r Ver Nota (2)	m ton / in ² Ver Nota (3)	Promedio de m
1	39.2	58.1	50.5	45.9	35.0 Ton / in ²
2	39.0	58.3	50.6	45.9	
3	38.3	58.4	50.4	45.8	
4	38.7	58.1	50.3	45.8	
5	39.0	58.9	50.9	46.1	
6	39.2	58.4	50.7	46.0	
7	38.4	58.6	50.5	45.9	
8	39.2	59.5	51.4	46.2	

(1) Para los rollos 5 y 6, r_1 y r_2 fueron determinados considerando el espesor de la condición de RC como 0.063" y haciendo referencia al documento publicado por Ford y Ellis, y Bland "Cold Rolling strip Tensión" en 1951.

(2) Usando la Ecuación (6.5).

(3) Leído de la Figura 6-2.

Tabla 6-3. Ejemplo de la determinación de m , la resistencia media a la deformación plana homogénea para un segundo pase. Rollo 5B. Ver Tabla 6.1 para las condiciones de rolado.

Rollo No.	No. de Pruebas	Porcentaje r Ver nota (1)		m ton / in ² Ver nota (2)		m promedio	P ton / in- ancho	α / ϕ .
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.			
2A	5	17.6	18.2	34.9	35.1	35.0	13.8	2.8
2B	8	17.4	18.1	34.7	35.1	34.9	13.6	2.8
2C	12	16.7	18.8	34.2	35.4	34.8	13.4	2.7
3A	6	27.7	28.9	41.7	42.1	42.0	18.1	2.8
3B	8	27.4	30.1	41.6	42.6	42.1	17.6	3.7
3C	8	28.9	30.6	42.1	42.8	42.4	17.8	3.9
3D	8	29.0	30.8	42.1	42.8	42.5	17.6	3.3
5A	5	50.7	51.9	46.0	46.2	46.1	18.0	2.1
5B	8	50.3	51.4	45.8	46.2	46.0	17.8	2.2
5C	8	51.0	52.6	46.0	46.3	46.2	16.5	2.6
6A	6	57.9	58.6	47.1	47.2	47.2	23.5	2.5
6B	8	57.7	59.2	47.2	47.6	47.4	23.1	2.3
6C	8	57.4	59.6	47.2	47.7	47.4	21.8	3.3

Tabla 6-4. Valores del porcentaje de reducción medio r , la resistencia a la deformación plana homogénea m , la carga de rolado P y la relación α / ϕ .

6.4 Determinación de los valores de P

Para ilustrar el método de cómo se establecieron los valores de P , los resultados experimentales relacionados con los rollos 2A y 5B se usarán nuevamente, los detalles de los datos asociados, se obtuvieron del documento original, y se muestran en la Tabla 6-5. En lo que respecta a los rollos 2A, no se utilizó tensión en el desenrollador en ninguna de las pruebas, en consecuencia, con t_b igual a cero, la ecuación (6.4) queda de la siguiente manera:

$$F = P - \frac{P}{m} \cdot \frac{\phi}{\alpha} \cdot t_f$$

$$= P - S \cdot t_f \quad \dots (6.6)$$

Donde

$$S = \frac{P}{m} \cdot \frac{\phi}{\alpha}$$

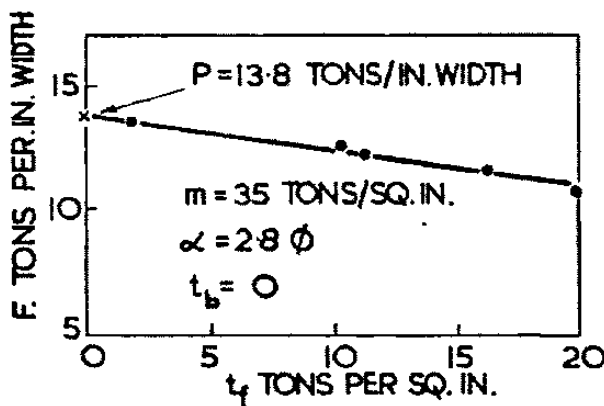


Figura 6-3. Determinación de P para el rollo 2A.

Los cinco valores de F en la Tabla 6-5 son graficados en la Figura 6-3 en contra de sus valores correspondientes de t_f y como se puede observar los puntos pueden ser unidos por una línea recta, por lo tanto, de acuerdo con la ecuación (6.6) la magnitud de P para el rollo 2A es el valor de F cuando esta línea corta el eje Y, en este ejemplo es de

13.8 toneladas por pulgada de ancho, como se indica en la marca de la Figura 6-3. También para estos resultados, S , es la pendiente de la línea la cual es igual a 0.140, y

por lo tanto, con P igual a 13.8 toneladas por pulgada de ancho y m igual a 35 ton / in² el valor de la relación entre α / ϕ es constante a 2.8.

Los detalles experimentales relacionados con el rollo 5B también se muestran en la Tabla 6-5 de donde se puede observar que de las ocho pruebas realizadas, en seis, aunque la tensión del enrollador fue variada, la tensión en el desenrollador se mantuvo constante en un promedio de 5.76 ton / in². Haciendo referencia a la ecuación (6.4) se puede observar que para estas condiciones, donde t_b y m son constantes y si la relación entre α / ϕ tiene el mismo valor en cada una de las pruebas realizadas, entonces la relación entre F y $(t_f - t_b)$ será lineal. También de acuerdo a la ecuación (6.4) cuando

$$t_f - t_b = 0$$

entonces

$$F = P \left(1 - \frac{t_b}{m} \right) \quad (6.7)$$

En la Figura 6-4 se muestra la relación lineal entre F y $(t_f - t_b)$. En este diagrama se puede observar, que para la condición cuando $(t_f - t_b)$ es igual a cero, F es igual a 15.6 ton / in de ancho y con tensión en el desenrollador constante a 5.76 ton / in² y m igual a 46 ton / in² la magnitud de P para el rollo 5B de la ecuación (6.7) queda de la siguiente manera:

$$P = 15.6 / \left(1 - \frac{5.76}{46} \right) = 17.8 \text{ ton por pulgada de ancho}$$

Nuevamente se puede observar que con la relación lineal existente entre F y $(t_f - t_b)$ entonces, la cantidad de

$$S = \frac{P}{m} \cdot \frac{\phi}{\alpha}$$

representa la pendiente de la línea, que para el rollo 5B, es de 0.180. Por lo tanto, con P igual a 17.8 ton por pulgada de ancho y con m igual a 46.0 ton / in² la magnitud de la relación entre α/ϕ es igual 2.2.

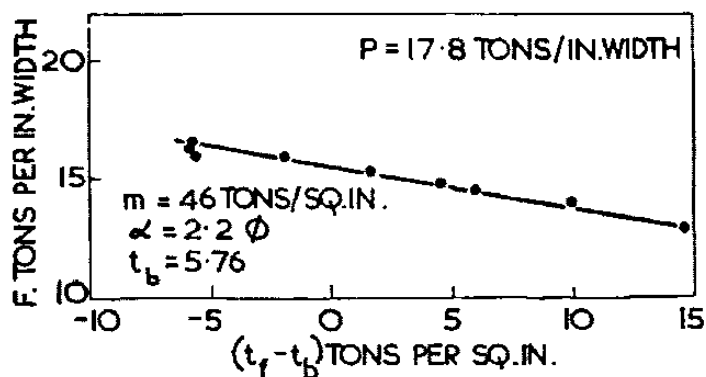


Figura 6-4. Determinación de P para el rollo 5B.

Rollo 2A					
No. de Prueba	Condición antes del rolado	Porcentaje de Reducción	Tensión (Ton / in ²)		Carga de rolado medida, F Ton / in de ancho
			Enrollador t_f	Desenrollador t_b	
1	Rolado en Caliente (RC)	29.3	1.8	0	13.5
2		29.4	10.2	0	12.6
3		30.0	11.2	0	12.2
4		30.4	16.1	0	11.6
5		29.9	19.8	0	10.6
Rollo 5B					
1	Reducido aproximadamente 40% antes del pase	31.3	0	5.8	16.5
2		31.5	0	5.8	16.4
3		32.5	3.8	5.7	16.0
4		31.8	7.4	5.7	15.3
5		32.6	10.2	5.6	14.8
6		31.5	11.8	5.8	14.5
7		32.8	15.7	5.8	14.0
8		33.2	20.4	5.9	13.0

Tabla 6-5. Cargas y tensiones aplicadas durante la laminación de los rollos 2A y 5B.

Capítulo 7

Cálculo de las cargas de rolado y diseño de cédulas de rolado racionales – método práctico

7.1 Cálculo de las cargas de rolado utilizando el método desarrollado por Cook y Parker

En este método de cálculo es necesario llevar a cabo, en un molino, un número pequeño de pruebas específicas para obtener curvas como las de la Figura 7-1, estas se refieren a bronce 70/30. Si estas curvas son examinadas se puede observar que el eje vertical se define como la razón entre t_b , que es el espesor del material y r , que representa el radio de los rodillos, mientras que el eje horizontal es la razón del espesor al cuadrado y la carga P_s desarrollada mientras se efectúa la reducción en un pase. En otras palabras, los datos medidos pueden ser determinados satisfactoriamente con un solo diámetro de rodillos, ya que, como fue señalado por Ford⁽¹⁴⁾, tanto para consideraciones teóricas como para observaciones prácticas, la ley de similitud geométrica puede ser aplicada de manera efectiva para el análisis dimensional de los datos medidos. Por ejemplo, bajo condiciones normales de rolado en frío, si la razón del espesor inicial t_b y el radio del rodillo r es constante, la fuerza de rolado desarrollada durante un porcentaje de reducción dado es directamente proporcional al radio del rodillo o al espesor inicial del material. También de acuerdo a los cálculos desarrollados por Cook y Larke⁽⁷⁾, puede ser aceptado que la relación entre la carga de rolado y el radio del rodillo es lineal.

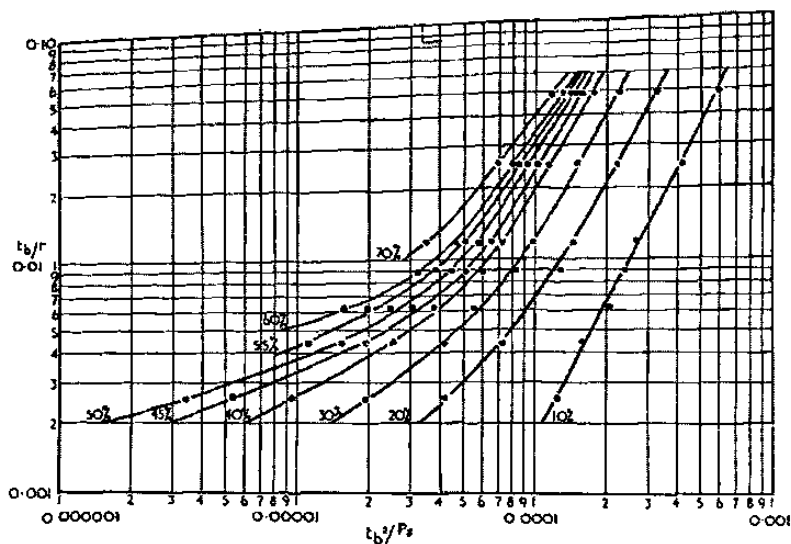


Figura 7-1. Información para construir las curvas de primer pase.

Bronce 70/30 Recocido, $t_b / w = 0.0167$

Para mostrar el valor y alcance de la familia de curvas de la Figura 7-1, supongamos que se requieren calcular las cargas de rolado para las condiciones que se dan en el siguiente ejemplo:

Ejemplo:	Diámetro de Rodillos	...	8"
	Material a laminar	...	Bronce 70/30
	Condición	...	Recocido
	Ancho de la Cinta	...	12"
	Espesor	...	0.050"

Cédula de Reducción

Pase No.	Espesor (pulg)		Porcentaje de Reducción	
	Antes	Después	Acumulado	Por Pase
1	0.050	0.037	26	26.0
2	0.037	0.029	42	21.6
3	0.029	0.025	50	13.8

En la Figura 7-1 el símbolo t_b y r se refieren al espesor del material y el radio de los rodillos respectivamente. De esta manera en este ejemplo, t_b equivale a 0.050" y r es igual a 4". Por lo tanto

$$t_b / r = 0.050 / 4 = 0.0125$$

Los valores de t_b/P_s para reducciones de 10%, 20% y hasta 60%, corresponde al valor de 0.0125 y se leen en la Figura 7-1, éstos se muestran en la Tabla 7.1. Vale la pena mencionar que las curvas de la Figura 7-1 se refieren específicamente a condiciones donde la razón entre el espesor inicial t_b y el ancho de la cinta w , equivale a 0.0167 y, con t_b igual a 0.050" el ancho asociado w , al cual las curvas hacen referencia, es

$$t_b / w = 0.0167$$

dando,

$$w = 0.050 / 0.0167 = 3"$$

Porcentaje de Reducción	$C = t_b^2 / P_s$ Ver nota (a)	$P_s = 250 \times 10^5 / 3C$ (Tons / in ²)
10	28.30×10^{-5}	3.0
20	14.70 "	5.7
30	10.10 "	8.2
40	7.50 "	11.1
45	6.75 "	12.3
50	5.95 "	14.0
55	5.25 "	15.9
60	4.70 "	17.7

Nota (a) Leer de la figura 1 con $t_b / r = 0.125$

Tabla 7-1. Información para construir la curva del primer pase.

Material Bronce 70/30 Recocido.

$$\frac{\text{Espesor Inicial}}{\text{Radio del Rodillo}} = \frac{0.05"}{4"} = 0.0125$$

Por lo tanto, considerando

$$C = t_b^2 / P_s$$

Entonces

$$P_s = t_b^2 / C = 0.05^2 / C \quad \dots \text{ por 3'' de ancho}$$

$$= 250 \times 10^{-5} / C$$

$$P_s = 250 \times 10^{-5} / 3C \quad \dots \text{ por 1'' de ancho}$$

Los valores de P_s en la Tabla 7.1 han sido calculados con esta última ecuación y son las cargas de rolado por pulgada de ancho que serán desarrolladas si material de 0.050" de espesor en la condición de recocido es reducido en un pase en los porcentajes especificados en la columna 1 de la Tabla 7.1. Cuando estos valores de P_s son graficados contra su correspondiente porcentaje de reducción la curva de la Figura 7-2 es obtenida, y es nombrada *curva del primer pase*.

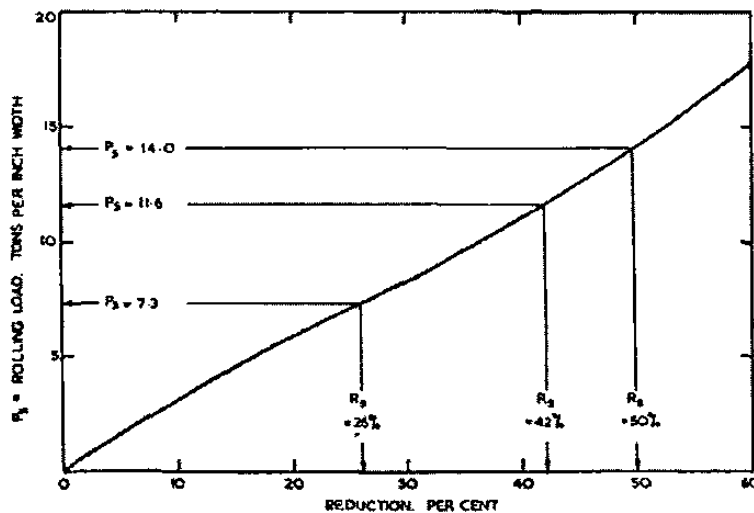


Figura 7-2. Curva de primer pase para un Bronce 70/30 con una condición de espesor inicial / radio de rodillos de 0.0125

La ecuación desarrollada por Cook y Parker para el cálculo de las cargas de rolado es

$$\left(\frac{P_1 b_1^2}{e^{mb_1} - 1} \right) + \left(\frac{P_2 b_2^2}{e^{mb_2} - 1} \right) + \dots + \left(\frac{P_n b_n^2}{e^{mb_n} - 1} \right) = \left(\frac{P_s b_s^2}{e^{mbs} - 1} \right) \quad (7.1)$$

Los subíndices definen el número de pase. El subíndice s se refiere a la condición cuando la reducción en n pases es realizada en solo uno. De hecho, cada término en la parte izquierda de la ecuación se puede considerar como la medida de energía necesaria de rolado que se utilizaría durante cada uno de los pases consecutivos, por lo tanto, el significado de la ecuación es, que cuando una reducción es efectuada en un número de pases ligeros, la suma de los términos en el lado izquierdo de la ecuación representa la energía que se necesitaría para efectuar la reducción en un solo pase.

En la ecuación anterior el significado de los símbolos P_1, P_2, \dots, P_n equivale a las cargas de rolado desarrolladas durante cada uno de los pases y P_s es la carga de rolado desarrollada cuando la reducción total en n pases es efectuada en uno.

Los factores b se determinan de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} b_1 &= \sqrt{R_1 / (100 - R_1)} \\ b_2 &= \sqrt{R_2 - R_1 / (100 - R_2)} \\ b_n &= \sqrt{R_n - R_{n-1} / (100 - R_n)} \\ b_s &= \sqrt{R_n / (100 - R_n)} \end{aligned}$$

donde R_1 , es el porcentaje de reducción en el primer pase, R_2 es el porcentaje acumulado de reducción en el segundo pase y R_n es el porcentaje de reducción en n pases.

También

$$m = 7.07\gamma \sqrt{D / t_b}$$

donde D es el diámetro de los rodillos y t_b es el espesor inicial antes del primer pase. El factor γ es determinada de curvas basadas en datos derivados experimentalmente, la curva apropiada para bronce 70/30 se muestra en la Figura 7-3.

Para determinar las cargas para las condiciones de rolado en el ejemplo, se calculan primero los valores numéricos de b_1 , b_2 y b_3 , que corresponden respectivamente al porcentaje acumulado de reducción, que en este ejemplo R_1 equivale a 26%, R_2 a 42% y R_3 a 50%.

Por lo tanto

$$b_1 = \sqrt{26 / (100 - 26)} = 0.069 \quad \dots \quad \text{1er Pase}$$

$$b_2 = \sqrt{42 - 26 / (100 - 42)} = 0.069 \quad \dots \quad \text{2do Pase}$$

$$b_3 = \sqrt{50 - 42 / (100 - 50)} = 0.057 \quad \dots \quad \text{3er Pase}$$

Para este ejemplo el valor numérico de m es

$$m = 7.07 \gamma \sqrt{8 / 0.05} = 89.4 \gamma$$

y usando la curva de la Figura 7-3 para la relación de

$$t_b/D = 0.05 / 8 = 0.006,$$

$$\gamma = 0.04$$

dando

$$m = 0.04 \times 89.4 = 3.58$$

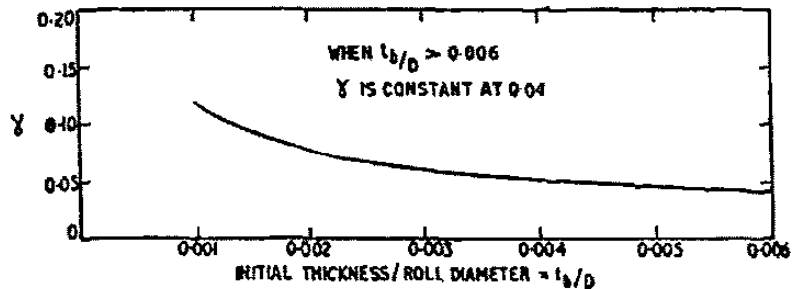


Figura 7-3. Factor determinado experimentalmente γ para usar cuando se lamina bronce 70/30.

Por lo tanto

$$mb_1 = 3.58 \times 0.069 = 0.247 \quad \dots \quad \text{1er Pase}$$

$$mb_2 = 3.58 \times 0.069 = 0.247 \quad \dots \quad \text{2do Pase}$$

$$mb_3 = 3.58 \times 0.057 = 0.204 \quad \dots \quad \text{3er Pase}$$

dando

$$e^{mb_1} - 1 = e^{0.247} - 1 = 0.280 \quad \dots \quad \text{1er Pase}$$

$$e^{mb_2} - 1 = e^{0.247} - 1 = 0.280 \quad \dots \quad \text{2do Pase}$$

$$e^{mb_3} - 1 = e^{0.204} - 1 = 0.226 \quad \dots \quad \text{3er Pase}$$

Substituyendo estos valores numéricos en la ecuación tenemos,

$$0.069^2 P_1 / 0.280 = 1.70 \times 10^{-2} P_1 \quad \dots \quad \text{1er Pase}$$

$$0.069^2 P_2 / 0.280 = 1.70 \times 10^{-2} P_2 \quad \dots \quad \text{2do Pase}$$

$$0.057^2 P_3 / 0.226 = 1.44 \times 10^{-2} P_3 \quad \dots \quad \text{3er Pase}$$

y la ecuación se puede escribir como

$$10^{-2} (1.70P_1 + 1.70P_2 + 1.44P_3) = P_s b_s^2 / (e^{mbs} - 1) \quad (7.2)$$

Considerando solamente los primeros dos pases la ecuación (7.2) se hace

$$10^{-2} (1.70P_1 + 1.70P_2) = P_s b_s^2 / (e^{mbs} - 1)$$

en donde el término de la derecha se refiere a la condición en donde la reducción acumulada en los primeros dos es realizada en un solo pase. Por lo tanto, con

$$R_n = 42\%$$

$$b_s = \sqrt{42} / (100 - 42) = 0.112$$

donde,

$$mb_s = 3.58 \times 0.112 = 0.401$$

$$e^{mb_s} - 1 = e^{0.401} - 1 = 0.493$$

Por lo tanto

$$0.112^2 P_s / 0.493 = 2.54 \times 10^{-2} P_s$$

y corresponde al término del lado derecho de la ecuación (7.2) que se reduce a

$$1.70P_1 + 1.70P_2 = 2.54P_s \quad (7.3)$$

La carga de rolado por pulgada de ancho P_1 del primer pase se lee directamente de la curva de la Figura 7-2, la cual, para una reducción del 26% es igual a 7.3 toneladas por pulgada de ancho. Si la reducción total efectuada en los primeros dos pases se realiza en un solo pase, la carga por unidad de ancho también puede ser leída de la curva de la Figura 7-2. Por lo tanto para una reducción del 42%,

$$P_s = 11.6 \text{ toneladas por pulgada de ancho.}$$

Substituyendo estos valores de P_1 y P_s en la ecuación (7.3) tenemos,

$$(1.70 \times 7.3) + 1.70P_2 = 2.54 \times 11.6$$

$$P_2 = (29.5 - 12.4) / 1.7$$

$$P_2 = 10.0 \text{ toneladas por pulgada de ancho}$$

Ya que los valores numéricos de P_1 y P_2 son conocidos, la ecuación se puede escribir como

$$10^{-2} (12.4 + 1.70 \times 10.0 + 1.44P_3) = P_s b_s^2 / (e^{mb_s} - 1)$$

$$10^{-2} (29.4 + 1.44P_3) = P_s b_s^2 / (e^{mbs} - 1) \quad (7.4)$$

en donde el término de la derecha ahora refleja la condición donde la reducción total alcanzada en tres pases es realizada en un solo pase. Por lo tanto, ya que la reducción en los tres pases es del 50%,

$$b_s = \sqrt{50 / (100 - 50)} = 0.141$$

Con el valor de m inalterado de 3.58

$$mb_s = 3.58 \times 0.141 = 0.505$$

$$e^{mbs} - 1 = e^{0.505} - 1 = 0.657$$

Por lo tanto, el término de la derecha de ecuación (7.4) se hace

$$0.141^2 P_s / 0.657 = 3.03 \times 10^{-2} P_s$$

y la ecuación se reduce a

$$(29.4 + 1.44P_3) = 3.03P_s \quad (7.5)$$

La carga requerida con P_s para efectuar un 50% de reducción en un solo pase es leída de la Figura 7-2 siendo

$$P_s = 14 \text{ Toneladas por pulgada de ancho}$$

Y después de sustituir este valor en la ecuación (7.5) la carga por pulgada de ancho P_3 desarrollada durante el primer pase es

$$P_3 = 9.0 \text{ toneladas por pulgada de ancho}$$

Las cargas necesarias están dadas en la siguiente tabla:

Pase No.	Porcentaje de Reducción		Cargas de rolado (Toneladas)	
	Total	Por pase	Por pulgada de ancho	Ancho de 12"
1	26.0	26.0	7.3	88
2	42.0	21.6	10.0	120
3	50.0	13.8	9.0	108

Tabla 7-2. Cargas de rolada para la cédula de tres pases del ejemplo.

Como se puede observar las cargas desarrolladas en cada pase para la cédula de rolado que ha sido analizada, no son iguales. Existen, sin embargo, un número de buenas razones por las cuales es deseable que las cédulas de rolado sean diseñadas bajo la base de utilizar cargas uniformes en cada pase. Por ejemplo, uno de los parámetros que gobiernan el diseño y uso de coronas en los rodillos es la carga de rolado, ya que la producción de material libre de ondulación tanto en los extremos como en el centro se facilita más asegurando que la distribución de carga a lo largo de la corona de rodillos es de la magnitud adecuada e igual para cada pase.

7.2 Diseño de cédulas racionales de rolado.

Para desarrollar las cédulas racionales de reducción usando la fórmula que se presenta en este capítulo es necesario llevar a cabo dos conjuntos de cálculos por pase, como se describe en el siguiente ejemplo. Con el objetivo de ilustrar el procedimiento, la curva de primer pase mostrada de la Figura 7-4 será utilizada y para los cálculos la capacidad del molino será considerada de 30 toneladas por pulgada de ancho de la tabla del rodillo. Para este rango de carga, como puede verse en la Figura 7-4, la reducción en el primer pase corresponde a R_1 de 32%. Para determinar el porcentaje de reducción en el segundo pase R_2 que será alcanzado si la misma carga de rolado es desarrollada, es necesario seleccionar dos reducciones - en este caso, se seleccionarán 40 y 45% - y para

calcular los factores b se utilizara el procedimiento mostrado en la Tabla 7.3. Para efectuar los cálculos de esta Tabla, el factor m tiene el valor asociado con la curva de la Figura 7-4, que es, con D/t_b y " γ " igual a 120 y 0.04 respectivamente

$$m = 3.1$$

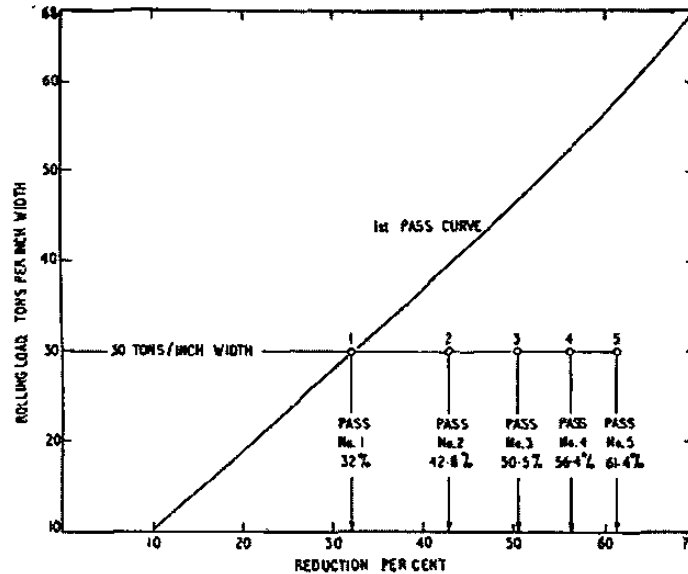


Figura 7-4. Cédula de rolado racional de 5 pases. Material bronce 70/30. espesor inicial 0.200". Diámetro de rodillos 24". Para la curva del primer pase $m = 3.1$

Ya que la Tabla 7.3 considera solamente los primeros dos pases, la ecuación (7.1) se escribe de la siguiente manera

$$\frac{30b_1^2}{e^{mb_1} - 1} + \frac{P_2 b_2^2}{e^{mb_2} - 1} = \frac{37b_s^2}{e^{mbs} - 1} \quad (7.6a)$$

$$y \quad \frac{30b_1^2}{e^{mb_1} - 1} + \frac{P_2 b_2^2}{e^{mb_2} - 1} = \frac{41.6b_s^2}{e^{mbs} - 1} \quad (7.6b)$$

donde la ecuación (7.6a) se refiere a las condiciones, de 32% en el primer pase y un segundo pase con un 40%, y la ecuación (6b) se refiere a un primer pase de 32% y un segundo pase de 45%.

Pase No.	$R_n \%$	b_n	mb_n	$e^{mbn} - 1 = y_n$	b_n^2 / y_n	Nota
1	32	0.0832	0.258	0.294	0.0235	Estos valores son de los términos del lado izquierdo de la ecuación (6)
2 (1er Opción)	40	0.0471	0.146	0.157	0.0141	
2 (2da Opción)	45	0.0656	0.203	0.225	0.0191	
2 (Aceptable)	42.8	0.0574	0.178	0.195	0.0169	
Pase No.	$R_n \%$ En un pase	b_s	Mb_s	$e^{mbs} - 1 = y_s$	b_s^2 / y_s	Nota
2 (1er Opción)	40.0	0.105	0.325	0.384	0.0287	Estos valores son de los términos del lado derecho de la ecuación (6)
2 (2da Opción)	45.0	0.122	0.378	0.459	0.0324	
2 (Aceptable)	42.8	0.114	0.353	0.423	0.0307	

Tabla 7-3. Desarrollo del segundo pase de la cédula de reducción racional.

Los valores numéricos de los factores “b” en la ecuación (7.6) con “m” igual a 3.1

Los valores numéricos 30, 37 y 41.6 se leen de la Figura 7-4 y son las cargas por pulgada de ancho que serán desarrolladas si reducciones de 32, 40 y 45% son realizadas en un solo pase. Después de sustituir los valores de los factores que involucran b que se muestran en la última columna de la Tabla 7.3 y cuando estos son substituidos en la ecuación (7.6) esta queda de la siguiente manera

$$(0.0235 \times 30) + (0.0141 P_2) = (0.0287 \times 37)$$

$$(0.0235 \times 30) + (0.0191 P_2) = (0.0324 \times 41.6)$$

de donde P_2 para un segundo pase de un 40% de reducción es igual a 25.3 toneladas y para un segundo pase de 45% es igual a 33.5 toneladas.

Estos dos valores de P_2 son conectados con una línea recta como se muestra en la curva *A* en la Figura 7-5 donde se podrá observar que para una carga de 30 toneladas por pulgada de ancho, la reducción total después de un segundo pase, es 42.8%.

En la Figura 7-4 los puntos marcados como (1) y (2) denotan el primer pase de 32% y un segundo pase de 42.8% respectivamente. Para analizar la carga correspondiente al segundo pase la información de la última columna de la Tabla 7.3, definida como “aceptable” y la carga de 39.7 toneladas por pulgada de ancho leída de la Figura 7-4 proyectando la línea marcada con (2) hasta interceptar la curva – esta carga corresponde a la reducción en un solo pase de 42.8% – es usada para el calculo de P_2 donde,

$$(0.0235 \times 30) + (0.0169 P_2) = 0.0307 \times 39.7$$

y $P_2 = 30.4$ toneladas por pulgada de ancho.

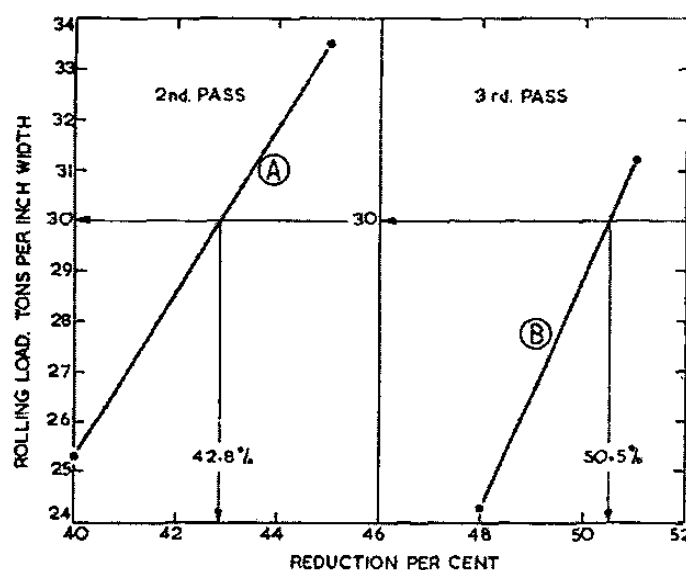


Figura 7-5. Determinación de las reducciones aceptables para las cédulas de rolado racionales.

Para asegurar que la misma carga de 30 toneladas es desarrollada durante el tercer pase, el porcentaje total de reducción es determinado exactamente de la misma manera, dos reducciones se seleccionan de manera arbitraria, en este caso se consideraran 48 y

51%. La Tabla 7.4 muestra el detalle de los cálculos necesarios y utilizando estos datos y la Figura 7-4, de donde se leen las respectivas cargas correspondientes a reducciones de 48 y 51% cuando son realizadas en un solo pase, dos ecuaciones son derivadas de la ecuación básica (7.1).

Estas son:

$$(0.0235 \times 30) + (0.0169 \times 30.4) + (0.0131 P_3) = (0.0347 \times 44.3) \quad \dots (7a)$$

$$(0.0235 \times 30) + (0.0169 \times 30.4) + (0.0172 P_3) = (0.0372 \times 47.2) \quad \dots (7b)$$

la primera se refiere al tercer pase con una reducción total de 48% donde P_3 es igual a 24.3 toneladas y la segunda a la reducción de 51% donde P_3 vale 31.2 toneladas.

Pase No.	R_n %	b_n	mb_n	$e^{mbn} - I = y_n$	b_n^2 / y_n	Nota
1	32	0.0832	0.258	0.294	0.0235	Estos valores son de los términos del lado izquierdo de la ecuación (7)
2	42.8	0.0574	0.178	0.195	0.0169	
3 (1er Opción)	48	0.0438	0.136	0.146	0.0131	
3 (2da Opción)	51	0.0584	0.181	0.198	0.0172	
3 (Aceptable)	50.5	0.0561	0.174	0.190	0.0166	
Pase No.	R_n % En un pase	b_s	Mb_s	$e^{mbs} - I = y_s$	b_n^2 / y_s	Nota
3 (1er Opción)	48.0	0.133	0.412	0.510	0.0347	Estos valores son de los términos del lado derecho de la ecuación (7)
3 (2da Opción)	51.0	0.146	0.453	0.573	0.0372	
32 (Aceptable)	50.5	0.144	0.446	0.562	0.0369	

Tabla 7-4. Desarrollo del segundo pase de la cédula de reducción racional.

Los valores numéricos de los factores “b” en la ecuación (7.7) con “m” igual a 3.1

Como en el paso anterior, estos valores de P_3 se unen con una línea recta – ver curva B, Figura 7-5 – con la cual se encuentra que si la reducción total después del tercer pase es 50.5%, la carga de rolado será de 30.4 toneladas por pulgada de ancho. Los cálculos necesarios para verificar esto son dados en la Tabla 7.4. Utilizando la información que

encontramos en la línea descrita como “aceptable” y considerando 46.7 toneladas por pulgada de ancho leído de la Figura 7-4 para un solo pase de 50.5% da

$$(0.0235 \times 30) + (0.0169 \times 30.4) + (0.0166 P_3) = (0.0369 \times 46.7)$$

de donde calculamos que $P_3 = 30.4$ toneladas por pulgada de ancho.

Cálculos similares se realizaron para el cuarto y el quinto pase, la información completa relacionada a esta cédula racional se detalla en la Tabla 7.5.

Pase No.	Porcentaje de Reducción total	Reducción por pase	Espesor		Carga de Rolado	
			Antes	Después	Ton / in de ancho	Para 24" de ancho
1	32.0	32.0	0.200	0.136	30.0	720
2	42.8	16.2	0.136	0.114	30.4	730
3	50.5	13.2	0.114	0.099	30.4	730
4	56.4	12.1	0.099	0.087	29.8	715
5	61.4	11.5	0.087	0.077	29.8	715

Tabla 7-5. Cédula de rolado racional de 5 pases
Material Bronce 70/30 recocido, Espesor inicial 0.200".
Ancho 24". Diámetro de los rodillos 24."

Capítulo 8

Cálculo de las cargas de rolado – método teórico

8.1 Desarrollo de las ecuaciones de Bland y Ford

Uno de los métodos de cálculo de cargas de rolado en frío utilizando ecuaciones derivadas de la consideración de fuerzas desarrolladas en la garganta de los rodillos es la propuesta por Bland y Ford y aunque el principal propósito de este capítulo es demostrar como se realizan los cálculos, es importante dedicar algo de atención al entendimiento de cómo fueron desarrolladas las ecuaciones.

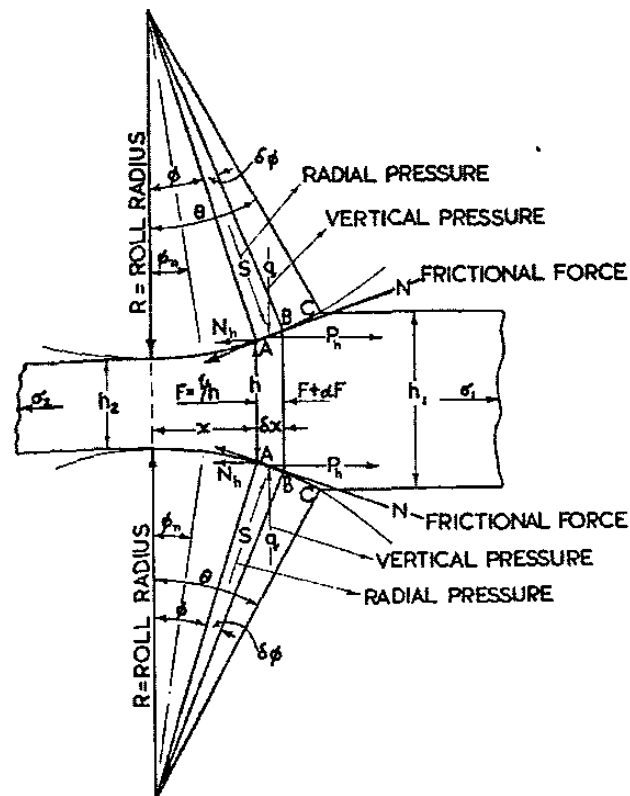


Figura 8-1. Fuerzas en la garganta del rodillo.

Haciendo referencia a la Figura 8.1 en donde el ancho del material es tomado como unidad, se puede observar que la fuerza L en AB debido al esfuerzo s es

$$L = s.(AB)$$

La componente horizontal es

$$L_h = s(AB)\text{sen}\phi$$

De forma similar, la fuerza de fricción N actuando a lo largo de AB es

$$N = \mu.s.(AB)$$

Sin embargo, como se explica en la Figura 5-3, del plano de entrada al neutro la fuerza N actúa en tensión, mientras que del plano neutro al plano de salida actúa en compresión, si las fuerzas de compresión se consideran positivas entonces, en el arco de contacto, la componente horizontal de N se puede escribir como,

$$N_h = \pm\mu.s.(AB)\cos\phi$$

donde el símbolo negativo se refiere a la zona de entrada y el positivo a la de salida. De esta forma, el total de la fuerza horizontal es

$$L_h + N_h = s.(AB)(\sin\phi \pm \mu\cos\phi)$$

y considerando los dos rodillos, la fuerza dF – ver Figura 8-1 – puede ser escrita como

$$dF = 2s.(AB)(\sin\phi \pm \mu\cos\phi)$$

o, considerando AB igual a $R.d\phi$, tenemos que

$$\frac{dF}{d\phi} = 2Rs(\sin \phi \pm \mu \cos \phi) \quad (8.1)$$

Todas las ecuaciones teóricas utilizadas para el cálculo de cargas de rolado están basadas en esta ecuación diferencial básica, la diferencia entre las diversas conclusiones esta asociada con las consideraciones físicas adoptadas y las aproximaciones matemáticas hechas para llegar a la solución. En el desarrollo de la solución de la ecuación (8.1) Bland y Ford⁽¹³⁾ asumieron que,

- El arco de contacto se mantiene circular aun cuando un aplastamiento de los rodillos ocurre.
- El coeficiente de fricción μ , es constante en todo el arco de contacto.
- La compresión elástica del material es despreciable.
- El incremento del ancho del material es cero, el proceso de rolado es tratado como un problema bidimensional.
- El criterio de plasticidad de Huber-von Mises puede ser utilizado.
- La deformación es completamente homogénea, en otras palabras un plano representado por una línea vertical como la que une los puntos CC en la Figura 8.1, se mantiene vertical a través de su paso por los rodillos.
- La presión radial s , en cualquier punto del arco de contacto es igual a su componente vertical q .

Durante los desarrollos matemáticos descritos a continuación podremos observar que además de estas siete consideraciones, algunas aproximaciones matemáticas también son introducidas.

Con la deformación homogénea postulada y considerando unidades de ancho, el esfuerzo f correspondiente a la fuerza horizontal F es,

$$f = F / h \quad (8.2)$$

esto, porque de la consideración de deformación homogénea, representa uno de los tres principales esfuerzos que actúan en el segmento mostrado en la Figura 8-1. Los otros dos esfuerzos son q , la componente vertical del esfuerzo radial y el esfuerzo w , que, aunque no está indicado en el diagrama actúa en ángulo recto para ambos esfuerzos f y q . Por lo tanto considerando a q , f y w como esfuerzos principales y usando la ecuación de Huber-von Mises tenemos,

$$(q - f)^2 + (f - w)^2 + (w - q)^2 = 2K^2 \quad (8.3)$$

donde K equivale a la resistencia básica a la compresión homogénea. Ya que se considera que el ancho del material no sufre deformación, podemos decir que

$$0 = \frac{1}{E} [w - \nu(q + f)]$$

o

$$w = \frac{1}{2} (q + f),$$

ha sido establecido por Nadai⁽⁹⁾ que para la deformación plástica, el factor ν , que es la relación de Poisson, toma el valor de 0.5, Substituyendo este valor de w en la ecuación (8.3) nos da

$$f = q - 1.155K = q - k \quad (8.4)$$

el símbolo k representa la resistencia a la deformación homogénea. Por lo tanto usando la ecuación la ecuación (8.2)

$$F = f(q - k)$$

y, en consecuencia, el lado izquierdo de la ecuación (8.1) puede escribirse como

$$\begin{aligned} \frac{dF}{d\phi} &= \frac{d}{d\phi} \left[hk \binom{q}{k-1} \right] \\ &= hk \cdot \frac{d \binom{q}{k}}{d\phi} + \binom{q}{k-1} \cdot \frac{d(hk)}{d\phi} \end{aligned}$$

En este paso, Bland y Ford consideran el segundo término como cero, ya que el error que se introduce bajo esta consideración es insignificante. Por lo tanto, después del arreglo de los términos, la ecuación (8.1) queda de la siguiente manera,

$$\frac{d \binom{q}{k}}{d\phi} \frac{q}{k} = \frac{2R}{h} (\operatorname{sen} \phi + \mu \cos \phi) \quad (8.5)$$

También, cuando, se trabaja con ángulos pequeños, como en el caso del rolado en frío, es razonable como lo hicieron Bland y Ford, introducir la aproximación matemática

$$\cos \phi = 1 - \frac{\phi^2}{2}$$

y como consecuencia tenemos que

$$h = h_2 + 2R(1 - \cos \phi)$$

Por lo tanto

$$h = h_2 + R\phi^2$$

Por la misma razón, se considera que

$$\operatorname{sen} \phi \mp \mu \cos \phi = \phi \mp \mu$$

y utilizando estas aproximaciones, la ecuaciones (8.5) se hace

$$\frac{d\left(\frac{q}{k}\right)}{d\phi} = \frac{2R(\phi \mp \mu)}{h_2 + R\phi^2}$$

Si ambos lados de la ecuación anterior son integrados con respecto a ϕ , encontramos que

$$\log_e \left(\frac{q}{k}\right) = \log_e \frac{h}{R} \mp 2\mu \frac{R}{h_2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{R}{h_2} \cdot \phi \right) + \log_e A$$

o

$$q = A \frac{hk}{R} \cdot e^{\mp \mu H}, \quad (8.6)$$

donde

$$H = 2 \frac{R}{h_2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{R}{h_2} \cdot \phi \right) \quad (8.7)$$

En el plano de entrada el ángulo ϕ equivale a θ y

$$H = H_1 = 2 \frac{R}{h_2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{R}{h_2} \cdot \theta \right) \quad (8.8)$$

y considerando k_1 para el valor de k en este plano, de la ecuación (8.6)

$$A = \frac{R}{h_1} \cdot \frac{q}{k_1} \cdot e^{\mu H_1}$$

Cuando se aplica tensión en el desenrollador σ_1 y recordando que las fuerzas en tensión son consideradas negativas, entonces en el plano de entrada el valor de f en la ecuación (8.4) equivale a menos σ_1 y

$$q = k_1 - \sigma_1$$

dando

$$A = \frac{R}{h_1} \left(1 - \frac{\sigma_1}{k_1} \right) e^{\mu H_1}$$

Substituyendo esta expresión en la ecuación (8.6), resulta para la zona de entrada, es decir del plano de entrada hasta el plano neutral,

$$q = \frac{hk}{h_1} \left(1 - \frac{\sigma_1}{k_1} \right) e^{\mu(H_1 - H)} \quad (\text{Zona de entrada}) \quad (8.9)$$

En el plano de salida, el ángulo ϕ es igual a cero, por lo tanto H también es igual a cero, de esta manera cambiando k_2 por k en este plano de la ecuación (8.6) obtenemos

$$A = \frac{Rq}{h_2 k_2}$$

Por lo tanto con una tensión en el enrollador de σ_2 , y ya que esta se definió como negativa, la magnitud de q en el plano de salida de la ecuación (8.4), con f igual σ_2 ,

$$q = k_2 - \sigma_2$$

y

$$A = \frac{R}{h_2} \left(1 - \frac{\sigma_2}{k_2} \right)$$

Con este valor de A en la ecuación (8.6), el valor de q relacionado con la zona de salida en el arco de contacto es,

$$q = \frac{hk}{h_2} \left(1 - \frac{\sigma_2}{k_2} \right) e^{\mu H} \quad (\text{Zona de salida}) \quad (8.10)$$

Antes de aplicar las ecuaciones (8.9) y (8.10) para un set de condiciones de rolado dadas, en algunas ocasiones se recomienda determinar la magnitud del ángulo del plano neutral. Denotando este plano por n , ya que q_n en las ecuaciones (8.9) y (8.10) tiene el mismo valor,

$$e^{\mu(H_1 - 2H_n)} = \frac{h_1 \left[\frac{1 - \sigma_2}{k_2} \right]}{h_2 \left[\frac{1 - \sigma_1}{k_1} \right]} \quad (8.11)$$

o colocando y igual al lado derecho de esta ecuación,

$$\log_e y = \mu(H_1 - 2H_n)$$

de donde

$$H_n = \frac{H_1}{2} - \frac{1}{2\mu} \cdot \log_e y \quad (8.12)$$

Substituyendo H_n por H en la ecuación (8.7) y colocando ϕ_n por ϕ , tenemos

$$\phi_n = \frac{h_2}{R} \cdot \tan \left[\frac{h_2}{R} \cdot \frac{H_n}{2} \right] \quad (8.13)$$

de donde, después de calcular el valor de H_n , la magnitud de ϕ_n , el ángulo del plano neutral, puede ser encontrado.

8.2 Método para permitir aplastamiento de los rodillos

Si se considera que durante el rolado la deformación elástica de las superficies de contacto de los rodillos es insignificante, entonces es satisfactorio considerar el radio R del rodillo, cuando se utilizan las ecuaciones derivadas teóricamente para el cálculo de las cargas de rolado. Sin embargo, bajo algunas condiciones de rolado, altas presiones son desarrolladas en las superficies que forman la garganta de los rodillos y – aceptando la suposición que la forma del arco deformado se mantiene circular – a menos que el radio R' de este arco deformado sea usado, el cálculo de las cargas se puede llevar con un grado de error significativo. El procedimiento empleado para permitir la compresión de las caras de contacto de los rodillos es calcular R' utilizando una ecuación atribuida a Hitchcock⁽¹⁵⁾.

$$\frac{R'}{R} = 1 + \frac{CP}{b(h_1 + h_2)} \quad (8.14)$$

donde P = la carga de rolado en toneladas basada en R , in.

b = ancho del material, in.

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

El valor de E para rodillos de acero, de hierro templados superficialmente y de hierro fundido se puede considerar como 1.34, 1.17 y 0.68 ton / in² respectivamente, cada uno considerado a 10^4 , y por lo tanto los valores de C , usando 0.35 para ν , que es la relación de Poisson, son

$$C = 3.34 \times 10^{-4} \text{ para rodillos de acero,}$$

$$C = 3.82 \times 10^{-4} \text{ para rodillos de hierro endurecidos superficialmente,}$$

$C = 6.57 \times 10^{-4}$ para rodillos de hierro fundido.

8.3 Utilización de las ecuaciones de Bland y Ford

Ejemplo 1. Una cinta de cobre de alta conductividad recocido de 24 in de ancho es rolada en frío de 0.100" a 0.060" en un pase en un molino de rodillos de acero de 18" de diámetro corriendo a 225 ft / min. Sin considerar tensiones en el enrollador y el desenrollador, encontrar la magnitud de la carga de rolado, considerando aplastamiento de los rodillos. El coeficiente de fricción en la garganta del rodillo se puede considerar como 0.06.

El primer paso en el cálculo de la carga de rolado es evaluar las siguientes constantes, el significado de la mayoría de los símbolos utilizados se indica en la Figura 8-1. Se debe considerar que durante el cálculo, los ángulos son definidos en radianes y no en grados. Las constantes son las siguientes

$$\theta = \sqrt{\frac{h_1 - h_2}{R}} = \sqrt{\frac{0.040}{9}} = 0.0667 \text{ radianes}$$

$$R = \sqrt{\frac{9}{0.06}} = 12.247$$

y

$$\begin{aligned} H_1 &= 2 \times 12.247 \tan^{-1}(12.247 \times 0.0667) \\ &= 24.494 \times 0.6850 = 16.778, \end{aligned}$$

ver ecuación (8.8).

También sin tensiones en el enrollador y el desenrollador, σ_1 y σ_2 en la ecuación ambas son igual a cero, por lo tanto, ya que y se define como el equivalente a la parte derecha de la ecuación (8.11)

$$y = h_1 / h_2 = 1.667$$

$$\log_e y = 0.5111$$

Por lo tanto, utilizando la ecuación (8.12), con μ igual a 0.06, el valor de H_n es 4.132, y usando la ecuación (8.13), el ángulo del plano neutral ϕ_n es 0.0139 radianes.

Habiendo calculado las constantes anteriores, los cálculos se tabulan en la forma ilustrada en la Tabla 8-1, el objetivo es determinar los valores de q_0 a intervalos predefinidos a lo largo del arco de contacto, el subíndice 0 indica que no se utiliza tensión en el desenrollador y el enrollador. Aunque esta tabla se explica por si sola, algunos puntos deben ser remarcados:

1. Los ángulos son en radianes.
2. El ángulo de la columna (4) es el ángulo del plano neutral y en la columna (10) es el ángulo del arco de contacto completo.
3. Los valores de k en la línea (13), que dan la resistencia a la deformación plana homogénea correspondiente a cada valor de r , la reducción creciente del espesor, se lee de la curva marcada 30 ins / in / seg de la Figura 8-2. En lo que respecta a la velocidad de deformación, se define con el símbolo λ , el valor de 30 ins / in / seg, se puede calcular usando la siguiente aproximación,

$$R\theta = \sqrt{R(h_1 - h_2)},$$

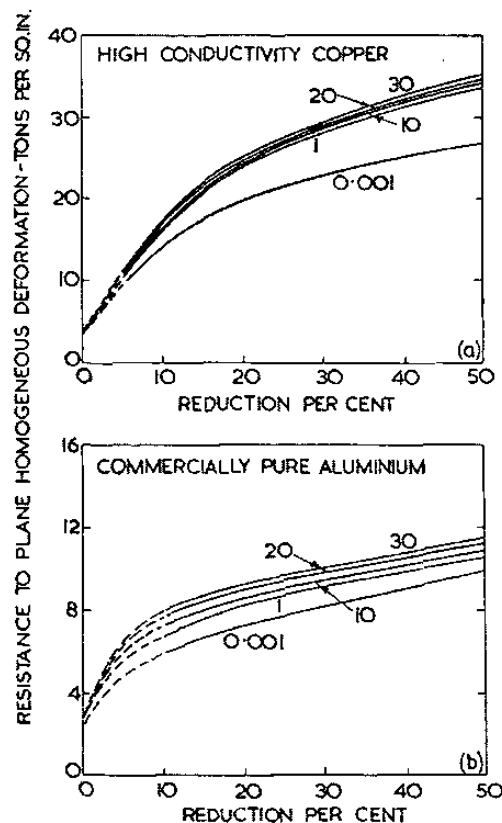


Figura 8-2. Resistencia a la deformación plana homogénea.

$$\lambda = \pi \sqrt{R(h_1 - h_2)} \cdot N / 30h_1 \quad (8.15)$$

donde λ es en ins / in / seg, y las dimensiones de R , h_1 y h_2 están en pulgadas, N esta dada en revoluciones por minuto.

4. Las columnas de la (10) a la (4) están relacionadas con la zona de entrada, es decir del plano de entrada al plano neutral, mientras que las columnas de la (4) a la (1) lo hacen a la zona de salida.

Ya que se cuenta con la información de la Tabla 8-1, el siguiente paso es graficar q_0 contra ϕ . El diagrama resultante, que se muestra en la Figura 8-3, da la curva marcada *abcd* muestra como k , la resistencia a la deformación plana homogénea del material cambia mientras este pasa a través de la garganta del rodillo. Usando la regla de la ordenada-media, o cualquier otro método conveniente, el área bajo el diagrama de presión puede ser fácilmente determinada y la carga de rolado P_0 basada en R , el radio de los rodillos sin aplastamiento, se encuentra multiplicando esta área por R y después por b , el ancho del material, Para este ejemplo el área es

$$\begin{aligned} \text{área} &= \int_0^{\phi_n} q_0 d\phi + \int_{\phi_n}^0 q_0 d\phi \\ &= 0.5196 + 1.4449 \\ &= 1.9645 \text{ ton / in}^2 \end{aligned}$$

La carga de rolado P_0 es

$$\begin{aligned} P_0 &= b \times R \times \text{área} \\ &= 24 \times 9 \times 1.9645 = 424 \text{ toneladas} \end{aligned}$$

	Salida 1	2	3	Plano Neutral 4	5	6	7	8	9	Entrada 10	
1	ϕ (Radianes)	0	0.005	0.010	0.0139	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.0667
2	$\frac{R}{h_2} \cdot \phi$	0	0.0612	0.1225	0.1702	0.2449	0.3674	0.4899	0.6124	0.7348	0.8169
3	$\tan^{-1} \left[\frac{R}{h_2} \cdot \phi \right]$	0	0.0611	0.1219	0.1687	0.2403	0.3523	0.4555	0.5495	0.6338	0.6850
4	$H = 2 \cdot \frac{R}{h_2} \tan^{-1} \left[\frac{R}{h_2} \cdot \phi \right]$	0	1.497	2.986	4.132	5.886	8.629	11.157	13.459	15.524	16.778
5	$H_1 - H$				12.646	10.892	8.149	5.621	3.3319	1.254	0
6	μH	0	0.0898	0.1792	0.2479						
7	$\mu(H_1 - H)$				0.7588	0.6535	0.4889	0.3373	0.1991	0.0752	0
8	$e^{\mu H}$	1.0	1.094	1.196	1.282						
9	$e^{\mu(H_1 - H)}$				2.136	1.922	1.631	1.401	1.220	1.078	1.0
10	$R\phi^2$	0	0.0002	0.0009	0.0017	0.0036	0.0081	0.0144	0.0225	0.0324	0.0400
11	$h = h_2 + R\phi^2$	0.060 0	0.0602	0.0609	0.0617	0.0636	0.0681	0.0744	0.0825	0.0924	0.1000
12	$r\% = 100(h_1 - h_2) / h_1$	40.0	39.8	39.1	38.3	36.4	31.9	25.6	17.5	7.6	0
13	k (ton / in ²)	32.75	32.7	32.45	32.3	31.7	30.25	27.8	23.8	14.4	3.5
14	kh	1.965	1.969	1.976	1.993	2.016	2.060	2.068	1.964	1.331	0.35
15	kh / h_2	32.75	32.82	32.93	33.22						
16	kh / h_1				19.93	20.16	20.60	20.68	19.64	13.31	3.5
17	q_0 (Sal.) = $hk \cdot e^{\mu H} / h_2$	32.75	35.91	39.38	42.59						
18	q_0 (Ent.) = $hk \cdot e^{\mu(H_1 - H)} / h_1$				42.57	38.75	33.60	28.97	23.96	14.35	3.5

Tabla 8-1. Procedimiento para calcular q_0 cuando no se utiliza tensión en el enrollador y en el desenrollador.

Si solamente se necesita una aproximación de la carga de rolado – que en muchas de las ocasiones es todo lo que se necesita – los cálculos no necesitan proceder más adelante, pero en caso de dudas en lo que a exactitud se refiere, se debe considerar el aplastamiento de los rodillos. Para hacerlo, la carga de 424 toneladas se introduce en la ecuación (8.14) y considerando rodillos de acero tenemos

$$\frac{R'}{R} = 1 + \frac{3.34 \times 10^{-4} \times 424}{24 \times 0.04} = 1.148$$

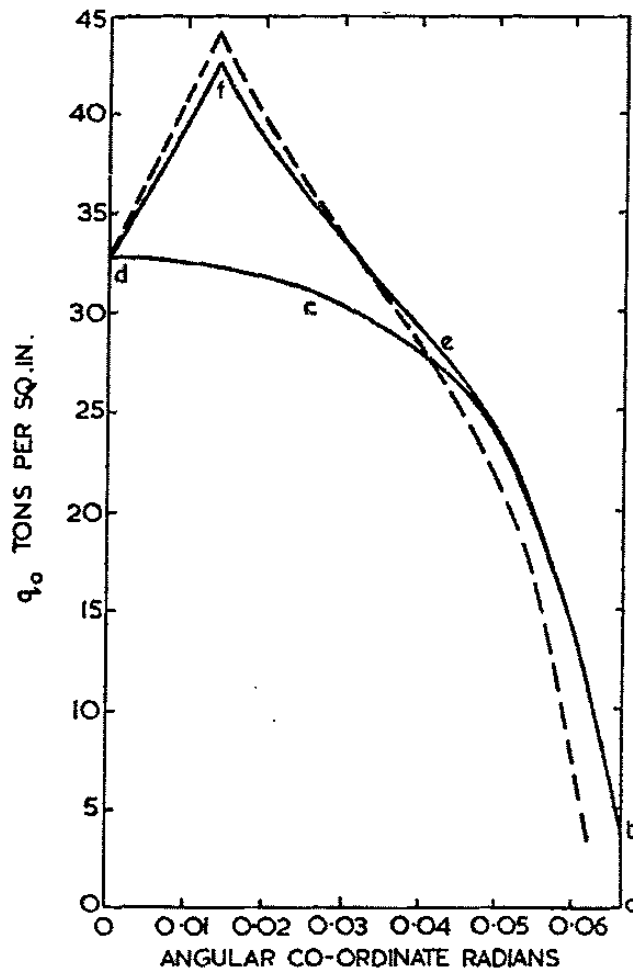


Figura 8-3. Diagrama de presión para el Ejemplo 1, Material Cobre

Cuando R equivale a 9", tenemos que R' es igual a 10.332".

Con este valor de R' , todos los cálculos se repiten y cuando esto se realiza, encontramos, para este ejemplo, que la carga de rolado correcta es

$$P'_0 = 24 \times 10.332 \times 1.8725 = 464 \text{ Toneladas}$$

La cantidad de 1.8725 es el área en toneladas por pulgada cuadrada que se encuentra bajo la curva de presión nueva, derivada del segundo conjunto de cálculos – ver línea discontinua de la Figura 8-3. La diferencia en porcentaje entre las dos curvas es del 8%.

Naturalmente, la pregunta que surge, es cuando se deben realizar correcciones por aplastamiento de rodillos, desafortunadamente, no existe una respuesta definitiva. Obviamente mucho depende de las condiciones de rolado y de las circunstancias particulares que requieren la evaluación de la información de las cargas aplicadas. Sin embargo como regla general, se puede considerar que cuando la relación entre R' / R es igual o menor a 1.05 no se necesita calcular la corrección del valor de la carga de rolado.

En lo que respecta a una segunda corrección, en este primer ejemplo,

$$\frac{R''}{R'} = 1 + \frac{3.34 \times 10^{-4} \times 464}{24 \times 0.04} = 1.161$$

Por lo tanto,

$$\frac{R''}{R'} = \frac{1.161}{1.148} = 1.01$$

Esta cantidad es menor a 1.05 y, en consecuencia, no es necesario calcular una tercer carga de rolado, ya que ésta no diferirá mas del 2% que la anterior.

Ejemplo 2. Una cinta de aluminio puro de 20" de ancho, es rolada en frío de un espesor de 0.100" a 0.060" en un solo pase en un molino four-high, utilizando rodillos de trabajo de acero de 10" de diámetro corriendo a 60 revoluciones por minuto. Si el coeficiente de fricción en la garganta del rodillo es de 0.08, determinar la carga de rolado cuando se emplea una tensión en el desenrollador de 0.5 ton / in² y de 2 ton / in² en el enrollador y comparar esta carga con la desarrollada cuando no se utiliza tensión.

Como en el ejemplo anterior, se calcularán primero algunas constantes, pero en este ejemplo el ángulo del plano neutral no se incluirá en la información tabulada necesaria para construir el diagrama de presión. Por lo tanto las únicas constantes necesarias son

$$\theta = \sqrt{\frac{h_1 - h_2}{R}} = \sqrt{\frac{0.100 - 0.06}{5}} = 0.0893 \text{ radianes}$$

$$\sqrt{\frac{R}{h_2}} = \sqrt{\frac{5}{0.06}} = 9.1285$$

y

$$\begin{aligned}
 H_1 &= 2 \times 9.1285 \tan^{-1}(9.1285 \times 0.0893) \\
 &= 18.257 \times 0.6839 = 12.486.
 \end{aligned}$$

Usando estos valores, se realizaron los cálculos de Tabla 8-2, se puede observar que como en ejemplo previo, las líneas (17) y (18) se refieren a valores de q_0 , lo que significa que se refiere a condiciones donde no se emplea tensión en el enrollador y el desenrollador. Si hacemos referencia a las ecuaciones (8.9) y (8.10) podemos observar que q_t es definida como el valor de q cuando se aplica tensión, por lo tanto la ecuación (8.9) puede escribirse como

$$q_t(\text{Entrada}) = \left[1 - \frac{\sigma_1}{k_1} \right] q_0 \quad (8.16)$$

y la ecuación (8.10) como

$$q_t(\text{Salida}) = \left[1 - \frac{\sigma_2}{k_2} \right] q_0 \quad (8.17)$$

En otras palabras, cuando los valores de q_0 se han establecido, los valores de q_t pueden determinarse rápidamente multiplicando q_0 por los factores de tensión representados por el primer término del lado derecho de las ecuaciones (8.16) y (8.17). Para las condiciones definidas en este ejemplo la magnitud del factor de tensión que se aplica en el lado de la entrada es

$$1 - \frac{\sigma_1}{k_1} = 1 - \frac{0.5}{3.0} = 0.833$$

y para el lado de la salida es

$$1 - \frac{\sigma_2}{k_2} = 1 - \frac{2.0}{10.81} = 0.815$$

las cantidades de 3.0 y 10.81 son la resistencia en toneladas sobre pulgada cuadrada a la deformación plana homogénea en los planos de entrada y salida respectivamente. Por lo tanto para determinar los valores de q_t necesarios todo lo que se tiene que realizar es multiplicar los valores de q_0 en la línea (17) de la Tabla 8-2 por el factor de 0.815 y los de la línea (18) por 0.833. Las cantidades requeridas son dadas en las columnas (2) y (5) de la Tabla 8-3, junto con los valores asociados de ϕ . En la Figura 8-4, el diagrama marcado *abc* se refiere a estos valores de q_t , es decir considerando las condiciones de tensión marcadas en el ejemplo, mientras que la curva marcada como *def* se refiere a condiciones donde no se emplea tensión en el enrollador y desenrollador. De cualquiera de los diagramas, el valor de ϕ_n , el ángulo del plano neutral, y su valor correspondiente de q_t , son leídos y registrados en la primera y penúltima línea de la Tabla 8-4, estos valores y los apropiados en las Tablas 8-2 y 8-3 son usados para determinar las áreas bajo la curva de los dos diagramas de presión, donde para la curva *abc* es de 0.7720 ton / in² y de 0.9318 para la curva *def*. Ya que el material tiene 20" de ancho y el radio de los rodillos libres de aplastamiento es de 5", las cargas requeridas son de

$$P'_t = 20 \times 5 \times 0.7720 = 77.2 \text{ Toneladas}$$

$$P'_0 = 20 \times 5 \times 0.9318 = 93.2 \text{ Toneladas}$$

mostrando con esto que cuando se utiliza una tensión de 0.5 ton / in² en el desenrollador y de 2 ton / in² en el enrollador la carga de rolado es 20% menor que la desarrollada cuando no se utiliza tensión.

En lo que respecta al aplastamiento de los rodillos, substituyendo la carga mas alta en la ecuación (8.14) y recordando que se están utilizando rodillos de acero, muestra que la relación de R' / R es de 1.04, indicando que no es necesario realizar correcciones en las cargas calculadas.

	Salida 1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entrada 10
1 ϕ (Radianes)	0	0.005	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.0893
2 $\frac{R}{h_2} \cdot \phi$	0	0.0456	0.0913	0.1826	0.2739	0.3651	0.5477	0.6390	0.7303	0.8152
3 $\tan^{-1} \left[\frac{R}{h_2} \cdot \phi \right]$	0	0.0456	0.0910	0.1806	0.2673	0.3502	0.5009	0.5687	0.6306	0.6839
4 $H = 2 \frac{R}{h_2} \tan^{-1} \left[\frac{R}{h_2} \cdot \phi \right]$	0	0.833	1.661	3.297	4.880	6.394	9.149	10.383	11.513	12.486
5 $H_1 - H$	12.486	11.653	10.825	9.189	7.606	6.092	3.337	2.103	0.973	0
6 μH	0	0.0666	0.1329	0.2638	0.3904	0.5115	0.7319	0.8306	0.9210	0.9989
7 $\mu(H_1 - H)$	0.9989	0.9323	0.8660	0.7351	0.6085	0.4874	0.2670	0.1682	0.0778	0
8 $e^{\mu H}$	1.0	1.069	1.142	1.302	1.478	1.668	2.079	2.295	2.512	2.715
9 $e^{\mu(H_1 - H)}$	2.715	2.540	2.377	2.086	1.838	1.628	1.306	1.183	1.081	1
10 $R\phi^2$	0	0.0001	0.0005	0.0020	0.0045	0.0080	0.0180	0.0245	0.0320	0.0400
11 $h = h_2 + R\phi^2$	0.060	0.0601	0.0605	0.0620	0.0645	0.0680	0.0780	0.0845	0.0920	0.1000
12 $r\% = 100(h_1 - h_2) / h_1$	40.0	39.9	39.5	38.0	35.5	32.0	22.0	15.5	8.0	0
13 k (ton / in ²) Ver Nota (1)	10.81	10.79	10.77	10.64	10.47	10.22	9.50	8.84	7.60	3.00
14 kh	0.6486	0.6485	0.6516	0.6597	0.6753	0.6950	0.7410	0.7470	0.6992	0.3000
15 kh / h_2	10.81	10.81	10.86	11.00	11.26	11.58	12.35	12.45	11.65	5.00
16 kh / h_1	6.486	6.485	6.516	6.597	6.753	6.950	7.410	7.470	6.992	3.0
17 q_0 (Sal.) = $hk \cdot e^{\mu H} / h_2$	10.81	11.56	12.40	14.32	16.64	19.32	25.68	28.57	29.26	13.58
18 q_0 (Ent.) = $hk \cdot e^{\mu(H_1 - H)} / h_1$	17.61	16.47	15.49	13.76	12.41	11.31	9.68	8.84	7.56	3.00

Nota (1) Con $N = 60$ r.p.m., el valor de λ de la ecuación (15) es 30 ins / in / sec y el valor de k se lee de la curva marcada en la Figura 2 (b).

Tabla 8-2. Procedimiento para calcular los valores q_0
para los cálculos subsiguientes de q_t

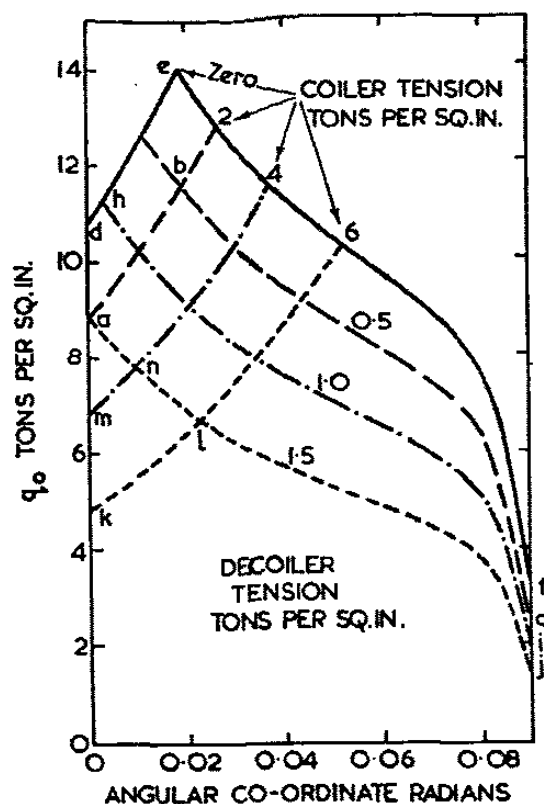


Figura 8-4. Diagrama de presión para el Ejemplo 2 y para varios valores de tensión en enrollador y el desenrollador: Material aluminio.

ϕ Radianes	Lado de salida			Lado de entrada		
	σ_2 (Ton / in ²)			σ_1 (Ton / in ²)		
	2	4	6	0.5	1.0	1.5
(1)	$q_t = 0.815 q_0$ (2)	$q_t = 0.630 q_0$ (3)	$q_t = 0.445 q_0$ (4)	$q_t = 0.833 q_0$ (5)	$q_t = 0.667 q_0$ (6)	$q_t = 0.5 q_0$ (7)
0	8.81	6.81	4.81	-	11.75	8.81
0.005	9.42	7.28	5.14	-	10.99	8.24
0.010	10.11	7.81	5.52	12.90	10.33	7.75
0.020	11.67	9.02	6.37	11.46	9.18	6.88
0.030	13.56	10.48	7.40	10.34	8.28	6.21
0.040		12.18	8.60	9.42	7.54	5.66
0.060			11.42	8.06	6.46	4.84
0.070				7.36	5.90	4.42
0.080				6.30	5.04	3.78
0.0893				2.50	2.00	1.50

Tabla 3. Valores de q_t de la Figura 8-4 derivados directamente de los valores de q_0 .

σ_1 (Ton / in ²)	σ_2 (Ton / in ²)	ϕ_n (Radianes)	q_t en el plano neutral (Ton / in ²)	Carga de Rolado (Toneladas)
		Nota (1)	Nota (1)	Nota (2)
0	0	0.0184	13.95	93.2
0	2	0.0267	12.75	87.9
0	4	0.0364	11.60	80.0
0	6	0.0520	10.20	67.6
0.5	0	0.0114	12.70	80.8
1.0	0	0.0027	11.25	66.2
0.5	2	0.0191	11.50	77.2
1.0	6	0.0227	6.65	45.2

Nota (1) Leído de la Figura 8-4.

Nota (2) Áreas bajo las curvas de la Figura 8-4.

Tabla 8-4. Magnitud del ángulo del plano neutral ϕ_n y cargas de rolado para las condiciones de tensión de la Figura 8-4.

Una de las ventajas del método de cálculo de cargas de rolado de Bland y Ford es que una vez que se han calculado la serie de valores de q_0 como los de las líneas (17) y (18) de la Tabla 8-2, el efecto de la tensión – tanto del enrollador como la del desenrollador actuando de forma individual o en conjunto – en la magnitud de la carga de rolado puede ser determinado rápidamente. Todo lo que se tiene que hacer es calcular, para tensiones específicas, el valor de los factores de tensión de las ecuaciones (16) y (17) y después multiplicarlos por los valores conocidos de q_0 . Por ejemplo, usando los valores de q_0 de la Tabla 8-2, se calcularon las cargas de rolado para las siguientes condiciones de tensión:

- Tensión en el enrollador de 2, 4 y 6 ton / in².
- Tensión en el desenrollador de 0.5 y 1.0 ton / in².
- Tensión en el desenrollador de 1.5 ton / in² combinada con una tensión en el enrollador de 6 ton / in².

La magnitud de los factores de tensión y los valores requeridos de q_t están incluidos en la Tabla 8-3, los valores de ϕ_n , y las cantidades asociadas de q_t , se presentan en la

Tabla 8-4. Cada uno de los seis diagramas de presión resultantes se graficaron en la Figura 8-4, los valores necesarios de q_i y ϕ se tomaron de las Tablas 8-3 y 8-4. Las áreas bajo los seis diagramas se incluyeron en la Tabla 8-4, no fue necesaria ninguna corrección por aplastamiento de rodillos.

Se puede observar en la Figura 8-4, la curva dhi , que corresponde a una tensión aplicada en el desenrollador de $1 \text{ ton} / \text{in}^2$ sin tensión en el enrollador, el ángulo del plano neutral ϕ_n es cercana a cero, y en consecuencia, un rolado satisfactorio es apenas posible. También de la curva aj , se puede observar que si la tensión del desenrollador se incrementada en $1.5 \text{ ton} / \text{in}^2$ – nuevamente sin aplicar tensión en el enrollador – el proceso de rolado no se puede llevar a cabo. En otras palabras para este ejemplo aunque el rolado puede proceder satisfactoriamente usando una tensión en el desenrollador de $1.0 \text{ ton} / \text{in}^2$, si ésta es incrementada a $1.5 \text{ ton} / \text{in}^2$, el movimiento hacia delante de la cinta se detendrá y los rodillos se patinarán continuamente sobre las superficies de contacto del material. Sin embargo, cuando una tensión en el desenrollador de $6 \text{ ton} / \text{in}^2$ es combinada con esta tensión del desenrollador – curva kjl Figura 8-4 – el ángulo neutral ϕ_n es significativamente mayor que cero y en consecuencia el rolado será satisfactorio.

Como se demostró anteriormente, la tensión en el desenrollador es mas efectiva que la del enrollador para disminuir la carga de rolado y combinando las ecuaciones (8.11) y (8-13) es posible determinar, para cualquier condición de rolado específica, la máxima tensión en el desenrollador que se puede utilizar de forma provechosa. Teóricamente, la condición limitante para una buena práctica de rolado es cuando el ángulo neutral ϕ_n es igual a cero. De acuerdo a la ecuación (8-13), cuando esto ocurre, la cantidad H_n también es cero, por lo tanto de las ecuaciones (8-11) y (8-12)

$$y = e^{\mu H_1} = \begin{bmatrix} 1 - \sigma_2 \\ k_2 \\ 1 - \sigma_1 \\ k_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{matrix} h_1 \\ h_2 \end{matrix}$$

donde, después de un rearrreglo de los términos, muestra que existe una relación lineal entre la tensión del enrollador σ_2 y la máxima cantidad de tensión en el desenrollador σ_1 que puede ser combinada con ella. La relación es

$$\sigma_1 = \alpha + \beta\sigma_2 \quad (8.18)$$

donde

$$\alpha = k_1 \left[1 - \frac{h_1}{h_2 \cdot e^{\mu H_1}} \right]$$

y

$$\beta = \frac{h_1 k_1}{h_2 k_2 \cdot e^{\mu H_1}}$$

Como un ejemplo del uso de la ecuación (8.18) podemos regresar a las curvas graficadas en la Figura 8-4. Los valores de h_1 , h_2 , k_1 , k_2 , μ y H_1 son los del Ejemplo 2 y en consecuencia para todas las curvas en la Figura 8-4

$$\sigma_1 = 1.16 + 0.17\sigma_2$$

Usando esta ecuación y los valores de tensión en el enrollador σ_2 en la Figura 8-4, los valores correspondientes de tensión en el desenrollador σ_1 que se pueden emplear son

Toneladas por pulgada cuadrada				
σ_2	0	2	4	6
σ_1	1.16	1.50	1.84	2.18

La pequeña diferencia entre el rango de valores de σ_1 , para las condiciones de rolado dadas, nos indica que a menos que la magnitud de la tensión en el desenrollador sea cuidadosamente controlada, el rolado no procederá de forma uniforme y satisfactoria. Por ejemplo, como se muestra en la curva *mnj* de la Figura 8-4, cuando una tensión en el

enrollador de $4 \text{ ton} / \text{in}^2$ es empleada, el rolado continuará de forma satisfactoria con una tensión por decir de $1.5 \text{ ton} / \text{in}^2$ en el desenrollador, pero si debido a una ineficiencia en el control, σ_1 se incrementa un poco arriba de las $1.8 \text{ ton} / \text{in}^2$ los rodillos patinaran ya que los rodillos estarán imposibilitados de jalar el material.

Capítulo 9

Metodología de Implementación

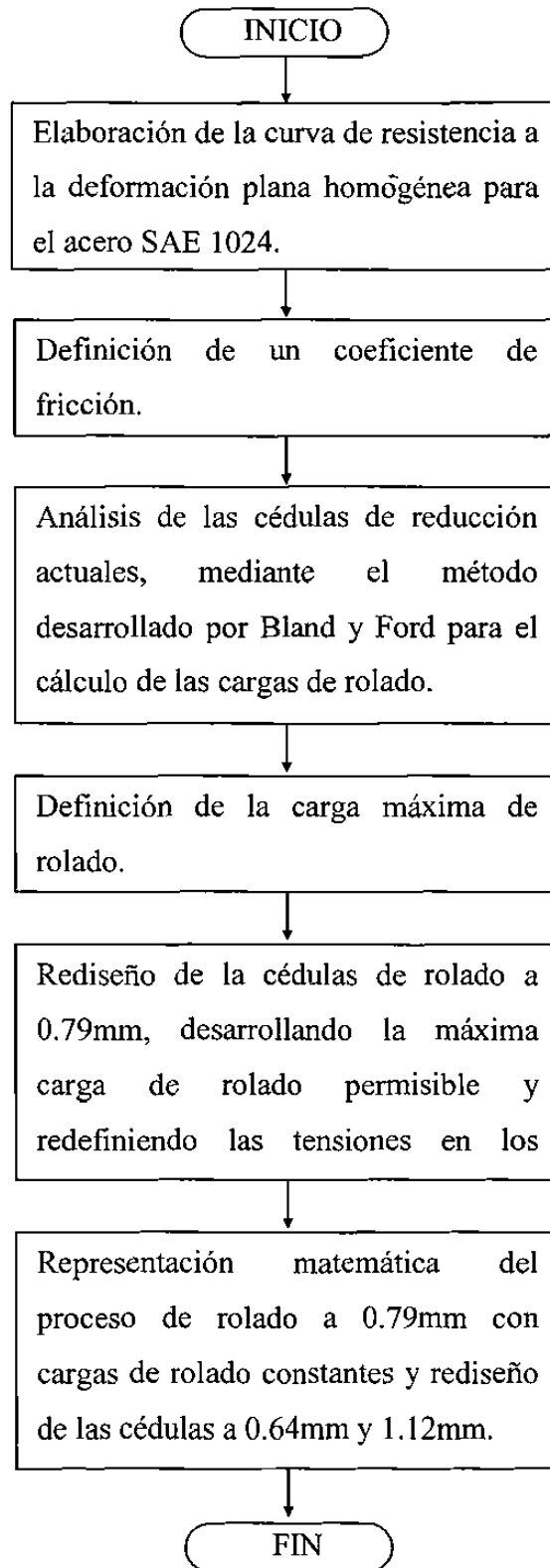
9.1 Caso practico a analizar

El caso práctico a analizar y donde se implementarán las teorías de rolado descritas en los capítulos anteriores, es un molino four high reversible de rolado en frío. Actualmente en este molino se laminan cuatro aceros diferentes, tres de bajo contenido de carbono (SAE 1006, 1008 y 1012) y uno de medio contenido de carbono (SAE 1024).

Los anchos de banda utilizados van desde cintas de 196mm hasta 310mm, los cuales se laminan a diferentes espesores finales, por ejemplo, los acero de bajo contenido de carbono se laminan a espesores desde 0.89mm hasta 0.38mm partiendo de diferentes espesores iniciales que van desde 2.29mm hasta 1.9mm, mientras que el acero SAE 1024 se lamina en dos anchos de banda que son 198mm y 264mm, partiendo de un espesor inicial de 2.54mm.

Debido a que en este caso el acero SAE 1024 en un ancho de banda de 264mm representa el 45% de la producción total, éste será seleccionado para el desarrollo he implementación de las teorías de rolado. En este acero y ancho de banda se tienen tres espesores finales que son 1.12mm, 0.79mm y 0.64mm siendo el segundo el principal y para los cuales existen cédulas de reducción, las cuales se buscará optimizar.

9.2 Procedimiento



El primer paso del procedimiento será definir el comportamiento del material al endurecimiento por deformación. Esto se llevará a cabo realizando ensayos de tensión de muestras de cada uno de los diferentes pases en la cédula a 0.64mm. En esta parte se debe definir el valor de μ , que representa el coeficiente de fricción entre la lámina y los rodillos.

Posteriormente y utilizando el método desarrollado por Bland y Ford, mostrado en el capítulo 8, para el análisis de la distribución de presión en el arco de contacto entre el material y los rodillos, determinaremos la máxima carga de rolado que históricamente se ha aplicado y que servirá como base para el rediseño de las cédulas de rolado.

El primer rediseño se realizará con la cédula a 0.79mm ya que en este espesor se lámina el 80% del acero SAE 1024, en esta etapa se redefinirán las tensiones para obtener los beneficios mencionados en el capítulo 7. Posteriormente y ya con esta cédula rediseñada se representará matemáticamente para rediseñar las cédulas a 1.12mm y a 0.64mm.

Capítulo 10

Implementación de las teorías de rolado

10.1 Obtención de la curva de resistencia a la deformación homogénea para acero SAE 1024

Para el análisis de las condiciones de rolado en un molino determinado se debe primeramente considerar el material a laminar, para esto se debe contar con una curva de esfuerzo contra deformación homogénea plana que describa el efecto del endurecimiento por deformación de cada material en específico. Para obtener esta curva se realizaron ensayos de tensión para cada una de las reducciones realizadas en la cédula utilizada para laminar acero SAE 1024 desde su condición de rolado en caliente a 2.54mm de espesor inicial, hasta una condición de rolado en frío a 0.64mm de espesor final; esta cédula se muestra a continuación:

Pase	Condición	Espesor Inicial (mm)	Espesor Final (mm)	% Red	% Red. Acum.
	RCD	2.54	2.54	0%	0%
1	RFC-1	2.54	1.96	23%	23%
2	RFC-2	1.96	1.70	33%	33%
3	RFC-3	1.70	1.24	26%	51%
4	RFC-4	1.24	1.04	16%	59%
5	RFC-5	1.04	0.81	21%	68%
6	RFC-6	0.81	0.64	21%	75%

Nota: RCD – Lámina Rolada en Caliente Decapada, RFC – Lámina Rolada en Frío Cruda y consecutivo del pase de reducción.

Tabla 10-1. Cédula de reducción para acero SAE 1024 de 2.54mm de espesor inicial a 0.64mm de espesor final.

A continuación se muestran las curvas de esfuerzo contra deformación, de las cuales se obtuvieron los datos de cedencia, que a su vez se utilizarán para hacer la curva de esfuerzo contra deformación homogénea plana:

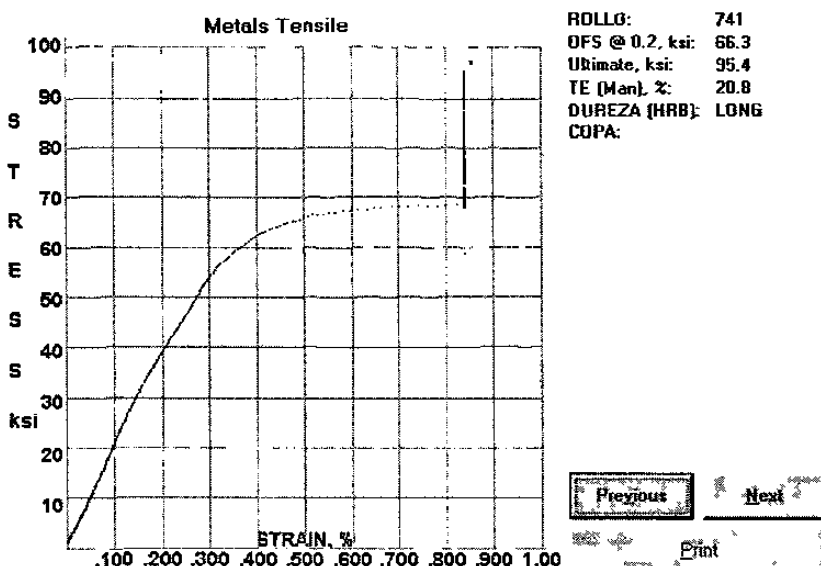


Figura 10-1. Curva de esfuerzo contra deformación para acero SAE1024 desde su condición de rolado en caliente a 2.54mm de espesor.

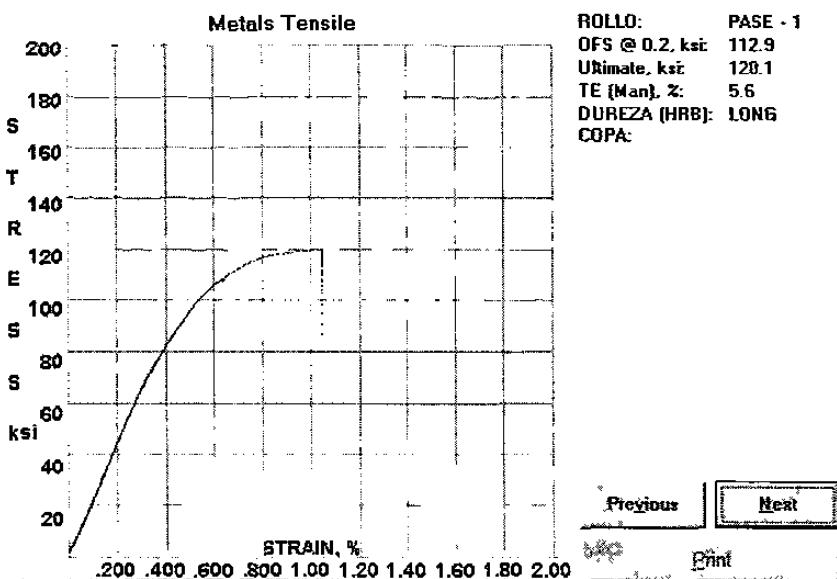


Figura 10-2. Curva de esfuerzo contra deformación para acero SAE1024 desde su condición de rolado en frío a 1.96mm de espesor correspondiente al primer pase de la cédula de reducción de la Tabla 10-1.

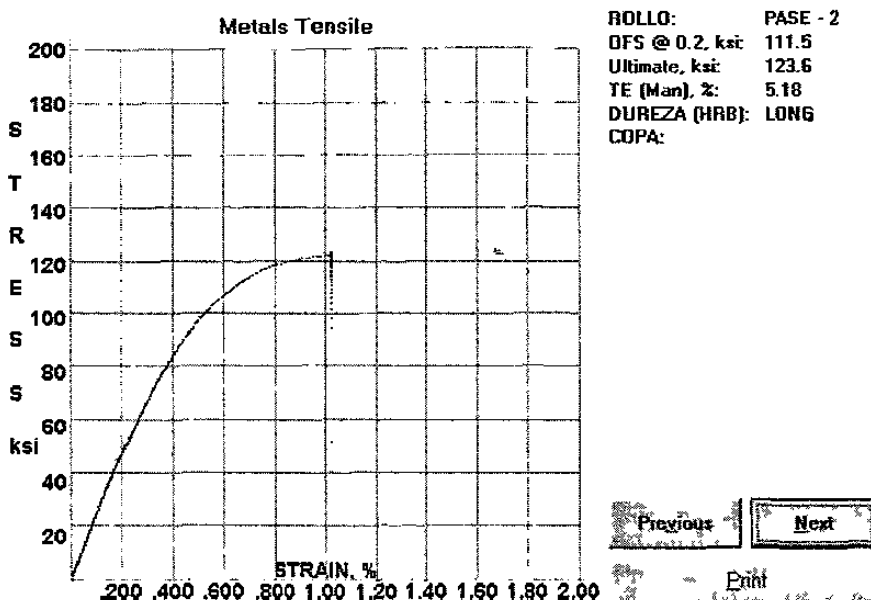


Figura 10-3. Curva de esfuerzo contra deformación para acero SAE1024 desde su condición de rolado en frío a 1.70mm de espesor correspondiente al segundo pase de la cédula de reducción de la Tabla 10-1.

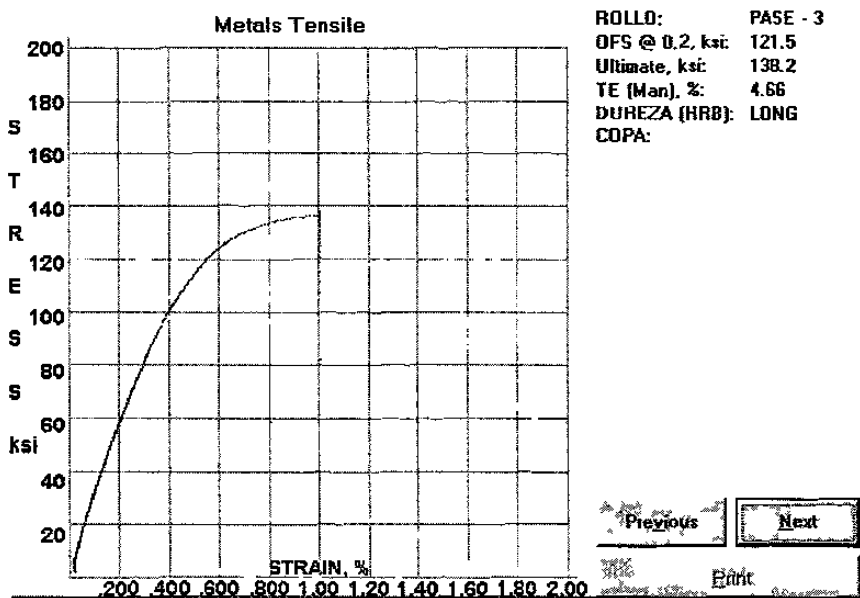


Figura 10-4. Curva de esfuerzo contra deformación para acero SAE1024 desde su condición de rolado en frío a 1.24mm de espesor correspondiente al tercer pase de la cédula de reducción de la Tabla 10-1.

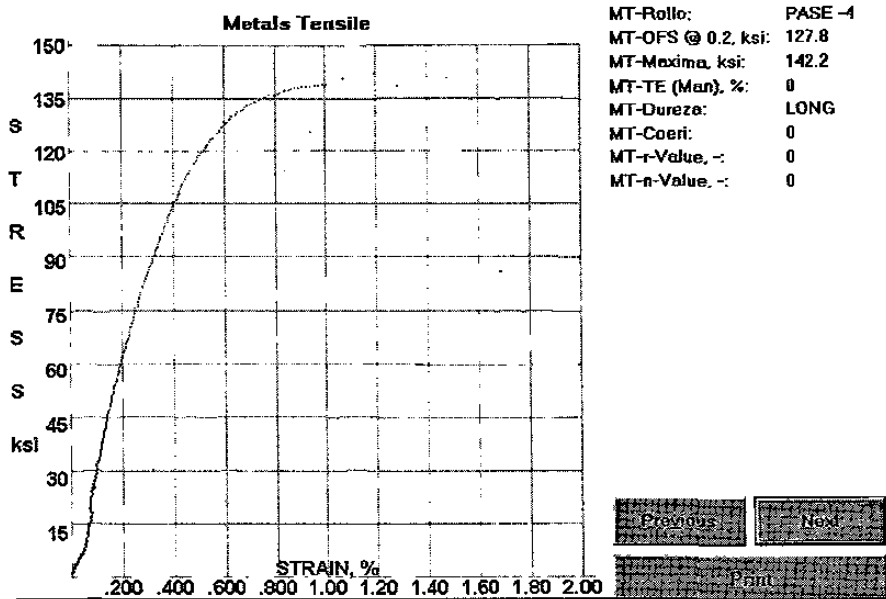


Figura 10-5. Curva de esfuerzo contra deformación para acero SAE1024 desde su condición de rolado en frío a 1.04mm de espesor correspondiente al cuarto pase de la cédula de reducción de la Tabla 10-1.

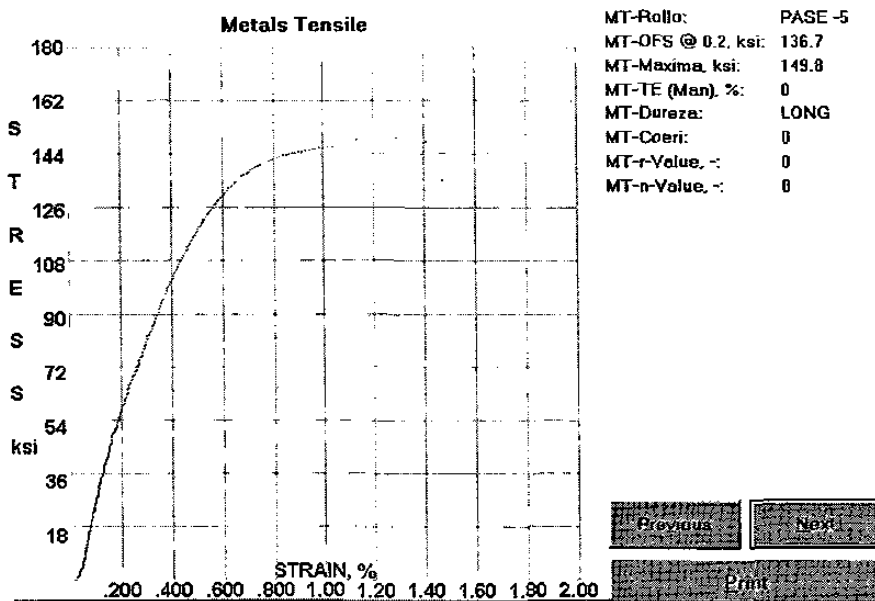


Figura 10-6. Curva de esfuerzo contra deformación para acero SAE1024 desde su condición de rolado en frío a 0.81mm de espesor correspondiente al quinto pase de la cédula de reducción de la Tabla 10-1.

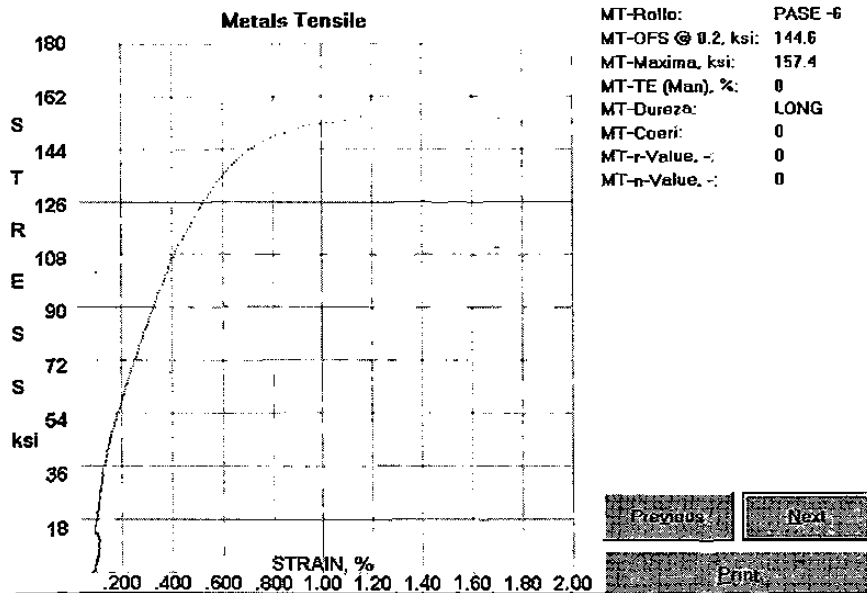


Figura 10-7. Curva de esfuerzo contra deformación para acero SAE1024 desde su condición de rolado en frío a 0.64mm de espesor correspondiente al sexto pase de la cédula de reducción de la Tabla 10-1.

Ya que el esfuerzo de cedencia se define como, el esfuerzo al cual se produce una pequeña deformación permanente generalmente igual a 0.002, en otras palabras es el esfuerzo donde comienza la deformación plástica del material, que es la zona que se trabaja en el rolado en frío, estos serán considerados para obtener la curva de resistencia contra deformación homogénea plana. De las figuras de la 10.1 a la 10.7 obtenemos los datos de la Tabla 10-2:

Condición	Esfuerzo de Cedencia	
	(KSI)	(MPa)
RCD	66.3	457.1
RFC-1	112.9	778.4
RFC-2	111.5	768.8
RFC-3	121.5	837.7
RFC-4	127.8	881.2
RFC-5	136.7	942.5
RFC-6	144.6	997.0

Tabla 10-2. Esfuerzos de cedencia.

Posteriormente se grafican los esfuerzos de cedencia contra el porcentaje de reducción acumulado a partir de la condición de rolado en caliente.

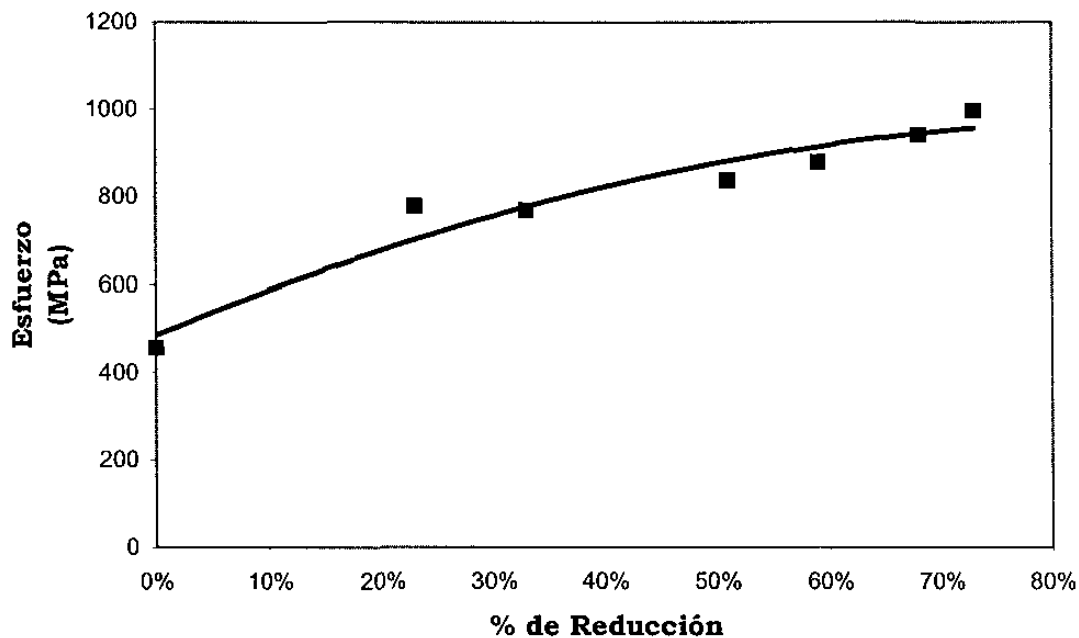


Figura 10- 8. Curva de resistencia a la deformación homogénea plana para acero 1024.

La ecuación de la curva queda de la siguiente manera:

$$y = -588.77x^2 + 1076.1x + 485.49 \quad (10.1)$$

con esta ecuación podemos conocer la resistencia a la deformación homogénea plana para cualquier porcentaje de reducción específico.

10.2 Definición de la carga de rolado máxima

Se analizaron las cédulas de reducción utilizadas para acero SAE 1024 con el fin de determinar la carga de rolado máxima históricamente aplicada. Las condiciones generales de espesor inicial, final y ancho de banda de estas cédulas se muestran en la Tabla 10-3.

Espesor Inicial (mm)	Espesor Final (mm)	Ancho de Banda (mm)
2.54	1.12	264
“	0.79	“
“	0.64	“

Tabla 10-3. Datos de espesor inicial, espesor final y ancho de banda de las cédulas de reducción para SAE 1024.

El método utilizado para determinar las cargas de rolado, es el desarrollado por Bland y Ford el cual se describe en el Capítulo 8, este análisis se realizó en cada uno de los pases de todas las cédulas de reducción de la Tabla 10-3. A continuación se muestra a detalle este procedimiento con la cédula a 0.79mm.

El primer paso es determinar un coeficiente de fricción, en este caso y para las condiciones de laminación dadas, el valor considerado de μ será 0.06.

La cédula de reducción a 0.79mm en un ancho de banda de 264mm se muestra en la Tabla 10-4:

No. de Pase	Espesor (mm)	% Reducción	% Acumulado	Tensión Sur		Tensión Norte	
				MPa	N	MPa	N
1	2.00	21.0%	21.0%	69.3	36,708	0	0
2	1.60	20.0%	37.0%	62.37	33,038	86.88	36,680
3	1.30	19.0%	49.0%	105.15	35,959	77.91	32,895
4	1.02	22.0%	60.0%	101.29	34,639	124.30	33,328
5	0.79	23.0%	69.0%	137.90	28,654	124.30	33,328

Tabla 10-4. Cédula de reducción a 0.79mm en un ancho de 264mm para un acero SAE 1024.

Análisis del primer pase

Para determinar la carga de rolado se deben evaluar las siguientes constantes:

$$\theta = \frac{h_1 - h_2}{R} = \frac{2.54 - 2.01}{78.74} = 0.082 \text{ radianes}$$

$$\frac{R}{h_2} = \frac{78.74}{2.01} = 6.26$$

y

$$\begin{aligned} H_1 &= 2 \times 6.26 \tan^{-1}(6.26 \times 0.082) \\ &= 12.52 \times 0.474 = 5.934 \end{aligned}$$

Usando estos valores se realizaron los cálculos de la Tabla 10-5 hasta las líneas (17) y (18), para las líneas (19) y (20) se deben de calcular los valores de los factores de tensión en la entrada y salida. El valor a la entrada es de

$$1 - \frac{\sigma_1}{k_1} = 1 - \frac{0.0}{485.49} = 1$$

y para el lado de la salida es

$$1 - \frac{\sigma_2}{k_2} = 1 - \frac{69.29}{685.38} = 0.899$$

Los valores de σ_1 y σ_2 son las tensiones definidas en la cédula de reducción, en el caso del primer pase el mandril sur realiza el enrollado de lámina y el norte el desenrollado, en el segundo pase esta función se invierte y así sucesivamente durante el desarrollo de todos los pases de la cédula. Los valores de K_1 y K_2 se determinan de la Figura 8 considerando para el primer pase una reducción de 0% a la entrada y de 21% a la salida. Los cálculos quedan de la siguiente manera:

	Salida 1	2	3	Plano Neutral 4	5	6	7	8	9	Entrada 10	
1	ϕ (Radianes)	0.000	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.060	0.070	0.080	0.082
2	$\frac{R}{h_2} \cdot \phi$	0.0000	0.0313	0.0626	0.1253	0.1879	0.2505	0.3758	0.4385	0.5011	0.5153
3	$\tan^{-1} \left[\frac{R}{h_2} \cdot \phi \right]$	0.0000	0.0313	0.0626	0.1246	0.1857	0.2455	0.3595	0.4132	0.4645	0.4758
4	$H = 2 \cdot \frac{R}{h_2} \tan^{-1} \left[\frac{R}{h_2} \cdot \phi \right]$	0.0000	0.3922	0.7836	1.5612	2.3268	3.0753	4.5034	5.1764	5.8191	5.9609
5	$H_1 - H$	5.9609	5.5688	5.1773	4.3998	3.6341	2.8856	1.4576	0.7846	0.1418	0.0000
6	μH	0.0000	0.0235	0.0470	0.0937	0.1396	0.1845	0.2702	0.3106	0.3491	0.3577
7	$\mu(H_1 - H)$	0.3577	0.3341	0.3106	0.2640	0.2180	0.1731	0.0875	0.0471	0.0085	0.0000
8	$e^{\mu H}$	1.0000	1.0238	1.0481	1.0982	1.1498	1.2026	1.3102	1.3642	1.4179	1.4300
9	$e^{\mu(H_1 - H)}$	1.4300	1.3967	1.3643	1.3021	1.2436	1.1890	1.0914	1.0482	1.0085	1.0000
10	$R\phi^2$	0.0000	0.0020	0.0079	0.0315	0.0709	0.1260	0.2835	0.3858	0.5039	0.5330
11	$h = h_2 + R\phi^2$	2.0070	2.0090	2.0149	2.0385	2.0779	2.1330	2.2905	2.3928	2.5109	2.5400
12	$r\% = 100(h_1 - h_2) / h_1$	20.984	20.907	20.674	19.744	18.194	16.024	9.824	5.794	1.144	0.000
13	k (ton / in ²)	685.38	684.73	682.80	675.01	661.79	642.81	585.53	545.87	497.73	485.49
14	kh	1,375.5	1,375.6	1,375.8	1,376.0	1,375.1	1,371.1	1,341.1	1,306.2	1,249.8	1,233.1
15	kh / h_2	685.38	685.40	685.48	685.60	685.16	683.16	668.22	650.80	622.70	614.42
16	kh / h_1	541.55	541.58	541.64	541.73	541.38	539.80	528.00	514.24	492.03	485.49
17	q_0 (Sal.) = $hk \cdot e^{\mu H} / h_2$	685.38	701.72	718.48	752.92	787.81	821.59	875.53	887.84	882.90	878.61
18	q_0 (Ent.) = $hk \cdot e^{\mu(H_1 - H)} / h_1$	774.41	756.43	738.95	705.39	673.29	641.84	576.26	539.02	496.24	485.49
19	q_i (Sal.) = $0.866(q_0)$	616.09	630.78	645.84	676.80	708.16	738.53	787.01	798.08	793.64	789.78
20	q_i (Ent.) = $1(q_0)$	774.41	756.43	738.95	705.39	673.29	641.84	576.26	539.02	496.24	485.49

Tabla 10-5. Procedimiento para calcular los valores q_i para el primer pase.

Los datos de las líneas (19) y (20) se grafican contra los datos de línea (1) para obtener la distribución de presión en el arco de contacto quedando como se muestra en la Figura 10-9.

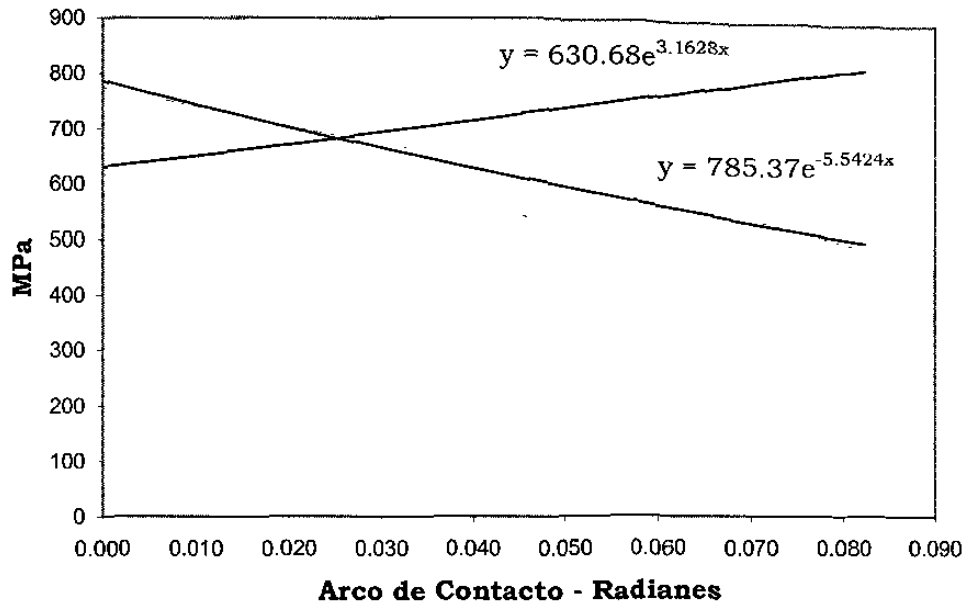


Figura 10-9. Gráfica de distribución de presión en el arco de contacto para el 1er pase de la cédula de reducción para acero SAE 1024 a 0.79mm en un ancho de 264mm.

De esta gráfica se obtienen dos ecuaciones

$$y = 630.68e^{3.1628x}$$

y

$$y = 785.37e^{-5.5424x}$$

Donde Y representa la presión desarrollada en el arco de contacto y X un punto en específico a lo largo del arco de contacto expresado en radianes.

De esta manera las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$q_t = 785.37e^{-5.5424\phi}$$

del plano de entrada al plano neutral y

$$q_i = 630.68e^{-3.1628\phi}$$

del plano neutral al plano de salida.

Para conocer la presión en el área de contacto entre los rodillos y el material se debe integrar el área bajo estas dos curvas, por lo tanto

$$\text{área} = \int_0^{\phi_n} q_i d\phi + \int_{\phi_n}^{\theta} q_i d\phi$$

donde ϕ_n es el ángulo del plano neutral leído de la Figura 10-9 y θ es el ángulo de contacto. Sustituyendo los valores en la ecuación anterior tenemos:

$$\text{área} = 630.68 \int_0^{0.025} e^{-3.1628\phi} d\phi + 785.37 \int_{0.025}^{0.0823} e^{-5.5424\phi} d\phi$$

la solución de la integral queda de la siguiente manera:

$$\text{área} = 630.68 \left[\frac{e^{-3.1628(0.025)} - 1}{-3.1628} \right] + 785.37 \left[\frac{e^{-5.5424(0.0823)} - e^{-5.5424(0.025)}}{-5.5424} \right]$$

$$\text{área} = 16.40 + 33.57 = 49.97$$

El resultado de la integración queda expresado en MPa por lo tanto este es igual 49.97 N/mm². Para el cálculo de la carga de rolado utilizamos la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} P_i &= b \times R \times \text{área} \\ &= 264 \times 78.74 \times 49.97 = 1,038,744 N \end{aligned}$$

donde b representa el ancho del material en milímetros y R el radio de los rodillos en milímetros.

Análisis del segundo pase

Para el segundo pase el procedimiento es el mismo, se deben reevaluar las siguientes constantes

$$\theta = \frac{h_1 - h_2}{R} = \frac{2.01 - 1.60}{78.74} = 0.072 \text{ radianes}$$

$$\frac{R}{h_2} = \frac{78.74}{1.60} = 7.015$$

y

$$\begin{aligned} H_1 &= 2 \times 7.015 \tan^{-1}(7.015 \times 0.072) \\ &= 14.030 \times 0.4677 = 6.562 \end{aligned}$$

Los factores de tensión se recalculan de acuerdo a las tensiones aplicadas en el segundo pase, en éste, el mandril sur realiza el desenrollado y el norte el enrollado, tal como se explicó al inicio de este capítulo para molinos reversibles se debe considerar esta alternancia de funciones cuando se este analizando una cédula de reducción. El valor a la entrada es de

$$1 - \frac{\sigma_1}{k_1} = 1 - \frac{62.37}{684.40} = 0.91$$

y para el lado de la salida es

$$1 - \frac{\sigma_2}{k_2} = 1 - \frac{86.88}{803.09} = 0.892$$

Con estos datos se realizan los cálculos de la Tabla 10-6. Para el análisis del segundo pase así como en el de los pases sucesivos, para determinar el valor de k (línea 13 de la Tabla 10-6) que representa la resistencia a la deformación plana homogénea del material. En cada uno de los puntos a lo largo de arco de contacto se debe considerar la reducción total acumulada es decir la reducción total de los pases anteriores más la reducción dada en cada uno de los puntos especificados del arco de contacto. Para esto la línea 12(A) fue agregada en la Tabla 10-6,

	Salida 1	2	3	Plano Neutral 4	5	6	7	8	9	Entrada 10	
1	ϕ (Radianes)	0.000	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070	0.072
2	$\frac{R}{h_2} \cdot \phi$	0.0000	0.0351	0.0702	0.1403	0.2105	0.2806	0.3508	0.4209	0.4911	0.5062
3	$\tan^{-1} \left[\frac{R}{h_2} \cdot \phi \right]$	0.0000	0.0351	0.0700	0.1394	0.2074	0.2736	0.3374	0.3984	0.4565	0.4686
4	$H = 2 \frac{R}{h_2} \tan^{-1} \left[\frac{R}{h_2} \cdot \phi \right]$	0.0000	0.4919	0.9826	1.9557	2.9103	3.8383	4.7331	5.5897	6.4044	6.5747
5	$H_1 - H$	6.5747	6.0827	5.5920	4.6189	3.6644	2.7364	1.8415	0.9850	0.1702	0.0000
6	μH	0.0000	0.0295	0.0590	0.1173	0.1746	0.2303	0.2840	0.3354	0.3843	0.3945
7	$\mu(H_1 - H)$	0.3945	0.3650	0.3355	0.2771	0.2199	0.1642	0.1105	0.0591	0.0102	0.0000
8	$e^{\mu H}$	1.0000	1.0300	1.0607	1.1245	1.1908	1.2590	1.3284	1.3985	1.4685	1.4836
9	$e^{\mu(H_1 - H)}$	1.4836	1.4405	1.3987	1.3193	1.2459	1.1784	1.1168	1.0609	1.0103	1.0000
10	$R\phi^2$	0.0000	0.0020	0.0079	0.0315	0.0709	0.1260	0.1969	0.2835	0.3858	0.4100
11	$h = h_2 + R\phi^2$	1.6000	1.6020	1.6079	1.6315	1.6709	1.7260	1.7969	1.8835	1.9858	2.0100
12	$r\% = 100(h_1 - h_2) / h_1$	20.398	20.300	20.006	18.831	16.872	14.130	10.604	6.295	1.203	0.000
12 A	$r.a.\% = 100(0.1 - h) / 0.1$	0.3701	0.3693	0.3670	0.3577	0.3422	0.3205	0.2926	0.2585	0.2182	0.2087
13	k (ton / in ²)	803.09	802.60	801.10	795.06	784.77	769.89	749.93	724.30	692.25	684.40
14	kh	1,285.0	1,285.7	1,288.1	1,297.1	1,311.2	1,328.8	1,347.5	1,364.2	1,374.7	1,375.6
15	kh / h_2	803.09	803.59	805.05	810.72	819.53	830.51	842.20	852.62	859.17	859.77
16	kh / h_1	639.28	639.67	640.83	645.35	652.36	661.10	670.41	678.71	683.92	684.40
17	q_0 (Sal.) = $hk \cdot e^{\mu H} / h_2$	803.09	827.66	853.94	911.65	975.89	1045.59	1118.79	1192.37	1261.73	1275.57
18	q_0 (Ent.) = $hk \cdot e^{\mu(H_1 - H)} / h_1$	948.44	921.42	896.31	851.43	812.78	779.06	748.73	720.02	690.94	684.40
19	q_1 (Sal.) = $0.866(q_0)$	716.21	738.12	761.56	813.03	870.32	932.47	997.76	1063.38	1125.23	1137.58
20	q_1 (Ent.) = $1(q_0)$	862.01	837.45	814.63	773.84	738.71	708.06	680.50	654.41	627.97	622.03

Tabla 10-6. Procedimiento para calcular los valores q_1 para el segundo pase de la cédula de 0.79mm.

Con los valores de q_i a la entrada y salida se elabora la curva de distribución de presión en el arco de contacto quedando como se muestra en la Figura 10-10,

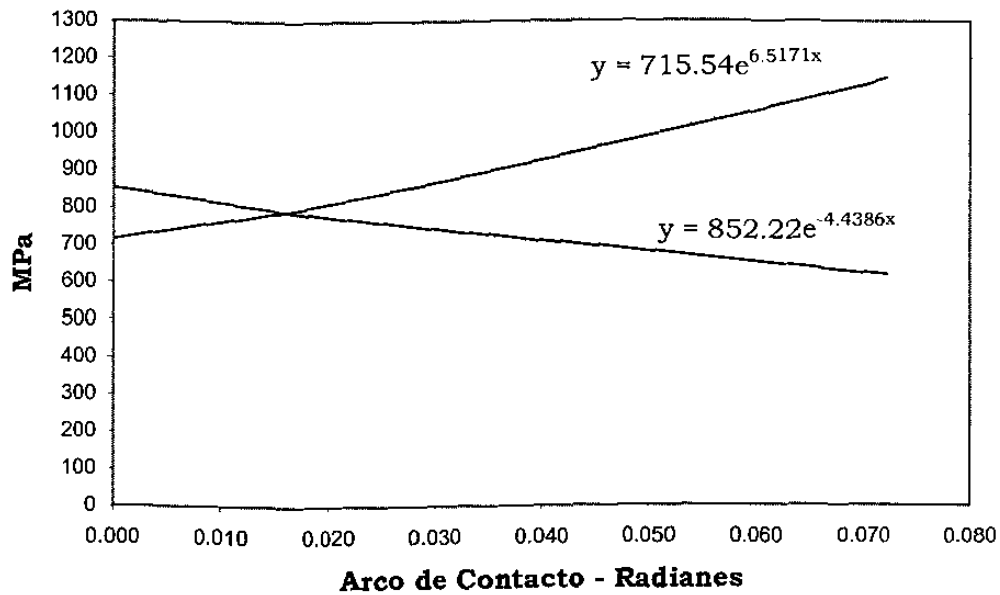


Figura 10-10. Gráfica de distribución de presión en el arco de contacto para el 2do pase de la cédula de reducción para acero SAE 1024 a 0.79mm en un ancho de 264mm.

En la Figura 10-10 se muestra el efecto de la tensión aplicada en el desenrollador ya que se puede observar como el plano neutral se mueve hacia el plano de salida. El procedimiento para determinar la carga de rolado en este pase es exactamente igual al desarrollado en el primero, integrando el área bajo las dos curvas se obtiene la presión aplicada que es de 51.32 MPa, multiplicando este valor por el radio de los rodillos y el ancho de banda nos da una carga aplicada de 1,067,346 N.

El cálculo de las cargas de rolado del tercer, cuarto y quinto pase es el mismo que para el segundo. En la Figura 10-11 se muestran las curvas de distribución de presión para todos los pases, se puede observar, como la presión en el plano neutral se incrementa debido al endurecimiento por deformación del material, a la vez que el arco de contacto se reduce debido a la disminución de los porcentajes de reducción del primer al quinto pase, esto se hace con el objetivo de mantener las cargas de rolado constantes durante toda la cédula de reducción.

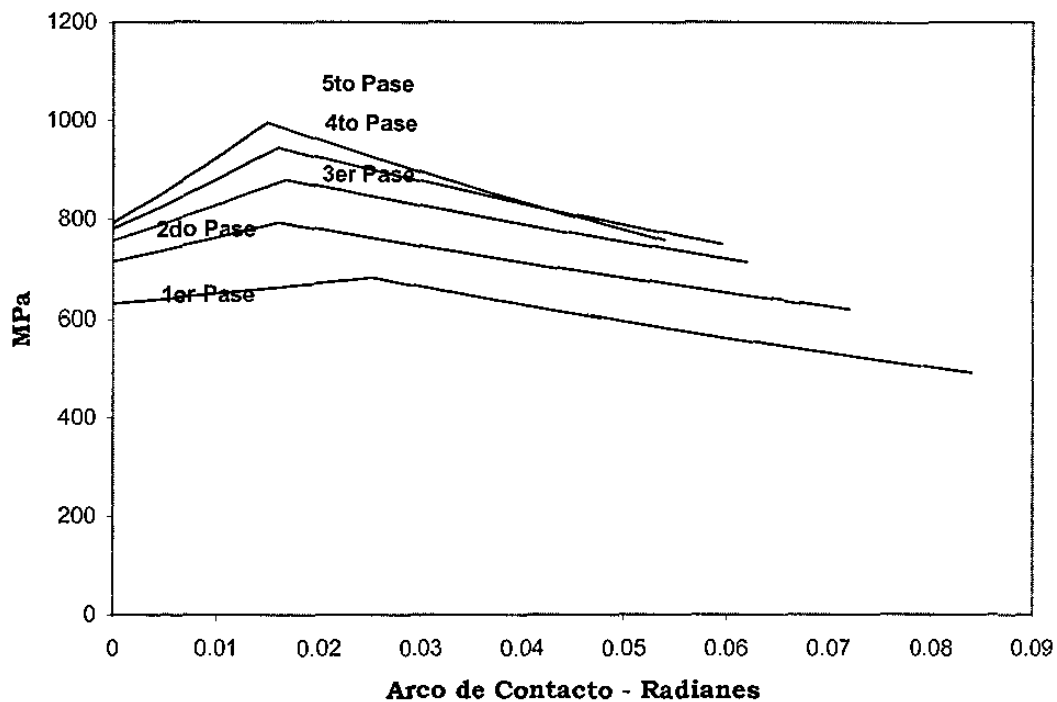


Figura 10-11. Curvas del distribución de presión para la cédula de reducción de acero SAE 1024 a 0.79mm y en un ancho de banda de 264mm.

Utilizando el mismo procedimiento se analizaron las cargas desarrolladas en las cédulas de reducción de la Tabla 10-3, los resultados se muestran en la Tabla 10-7.

Cédula de reducción para acero SAE 1024 de 2.54mm a 0.64mm y a un ancho de Banda de 264mm			
No. de Pase	% de Red. Total Nota (1)	Carga de Rolado (N)	% de carga aplicada Nota (2)
1	21 %	1,037,774	97 %
2	37 %	1,066,487	99 %
3	49 %	1,045,345	98 %
4	60 %	1,056,746	99 %
5	69 %	982,452	92 %
6	75 %	840,234	79 %
Cédula de reducción para acero SAE 1024 de 2.54mm a 0.79mm y a un ancho de Banda de 264mm			
No. de Pase	% de Red. Total	Carga de Rolado (N)	% de carga aplicada
1	21 %	1,039,722	97 %
2	37 %	1,067,346	100 %
3	49 %	1,035,706	97 %
4	60 %	1,053,151	99%
5	69 %	983,933	92 %
Cédula de reducción para acero SAE 1024 de 2.54mm a 1.12mm y a un ancho de Banda de 264mm			
No. de Pase	% de Red. Total	Carga de Rolado (N)	% de carga aplicada
1	19 %	976,171	92 %
2	32 %	912,014	85 %
3	42 %	904,853	85 %
4	50 %	864,534	81 %
5	56 %	773,818	73 %

(1) Porcentaje total acumulado.

(2) El porcentaje de carga aplicada esta en función de la máxima carga desarrollada para acero 1024 que en este caso se aplica en el segundo pase de la cédula a 0.79mm y con un ancho de banda de 264mm.

Tabla 10-7. Cargas desarrolladas en las cédulas de reducción para acero SAE 1024.

De los resultados anteriores podemos concluir que tanto para la cédula a 0.64mm, como a 0.79mm, las cargas aplicadas en los primeros pases son mayores a las aplicadas en los últimos, que trae como consecuencia que el amperaje de los motores principales se dispare lo que obliga a disminuir las velocidades de rolado, también ocasiona problemas con los rodillos de trabajo ya que en algunas ocasiones estos se patinan. Se puede observar también que las cargas aplicadas en la cédula a 1.12mm son sensiblemente menores, lo que puede ocasionar problemas de calidad en la lámina debido a una compensación incorrecta de la corona de los rodillos.

10.3 Rediseño de las cédulas de rolado

Considerando los resultados de la Tabla 10-7 se rediseño la cédula a 0.79mm ya que ésta desarrolla la carga máxima aplicada, además de que este espesor en acero SAE 1024 representa el 40% de la producción total. En el rediseño se deberá considerar aplicar una carga constante en todos los pases, así como buscar reducir la carga aplicada en los primeros, esto con el fin de desarrollar velocidades de rolado mayores sin incrementar los amperajes de los motores en esta etapa del proceso.

Este rediseño se llevo a cabo ajustando los porcentajes de reducción a prueba y error y comprobando las cargas desarrolladas mediante el método descrito en el Capítulo 8, desarrollado por Bland y Ford. La cédula rediseñada quedo:

No. de Pase	Espesor (mm)	% Reducción	% Acumulado	Tensión Sur		Tensión Norte	
				MPa	N	MPa	N
1	2.01	21.00%	21.00%	68.26	36182	0.00	0
2	1.63	19.00%	36.00%	68.26	36182	82.74	35528
3	1.32	18.80%	48.00%	103.43	36084	82.74	35528
4	1.04	21.20%	59.00%	103.43	36084	131.01	36039
5	0.79	24.40%	69.00%	137.90	28682	131.01	36039

Tabla 10-8. Cédula de reducción a 0.79mm rediseñada en un ancho de 264mm para un acero SAE 1024.

Dentro del rediseño de la cédula también se establecieron nuevos valores de tensión tanto en el desenrollador como en el enrollador, se recalcularon las tensiones en MPa tomando como base el área transversal de la lámina y el límite máximo de tensión que los mandriles pueden aplicar que es de 36,697 N. Esto se hizo con el fin disminuir la

carga de rolado en la mayor medida posible con ayuda de la tensión en la lámina, tal como se vio en el Capítulo 6.

La siguiente tabla muestra el comparativo de cargas y velocidades desarrolladas entre la cédula anterior que se muestra en la Tabla 10-4 y la rediseñada de la Tabla 10-8:

Cédula Anterior			Cédula Rediseñada		
No. de Pase	Carga (N)	Velocidad (FPM)	No. de Pase	Carga (N)	Velocidad (FPM)
1	1,039,722	370	1	1,039,438	420
2	1,067,346	280	2	1,023,424	420
3	1,035,706	370	3	1,022,517	420
4	1,053,151	450	4	1,039,758	540
5	983,933	522	5	1,040,385	500

Tabla 10-9. Comparativo de cargas y velocidades desarrolladas con las cédulas de la Tabla 10-4 y la rediseñada de la Tabla 10-8.

La reducción en el tiempo de laminación sin considerar tiempos de preparación, es de un 14%, además las cargas desarrolladas en los cinco pases están dentro de un rango del 98% de la carga máxima aplicada trayendo con esto los beneficios de calidad ya antes mencionados.

10.4 Rediseño de cédulas a 0.64mm y 1.12mm

Con el fin de poder determinar de forma rápida las reducciones por pase para las cédulas de reducción restantes de la Tabla 10-7, que desarrollen cargas de rolado constantes obviamente del mismo acero y ancho de banda, se graficó de la Tabla 10-8, el número de pase (columna 1) contra el espesor final (columna 2), quedando de la siguiente manera,

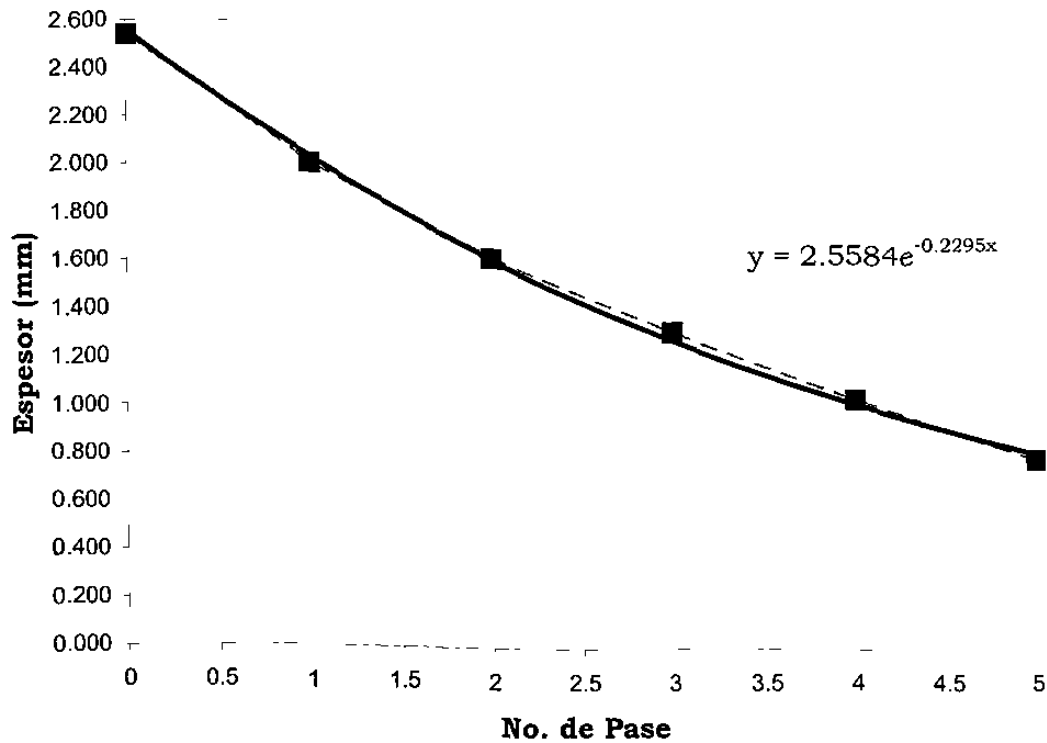


Figura 10-12. Curva de espesor final contra número de pase para el rolado de un acero SAE 1024 con un ancho de banda de 264mm.

El comportamiento es expresado mediante la siguiente ecuación exponencial,

$$y = 2.5584e^{-0.2295x} \quad (10.2)$$

donde “y” representa el espesor final y “x” el número de pases.

Ya que la Figura 10-12 representa un comportamiento hasta una reducción final de 0.79mm, se calcularon con la ecuación (2) las reducciones obtenidas en un sexto y séptimo pase, esto con el fin de cubrir una reducción hasta de 0.64mm. Los datos se muestran en la Tabla 10-10:

No. de Pase	Espesor final según la Tabla 8	Espesor Final según ecuación (2)
1	2.01	2.03
2	1.63	1.63
3	1.32	1.30
4	1.04	1.02
5	0.79	0.81
6	0.64
7	0.51

Tabla 10-10. Reducción por pase hasta un séptimo pase.

Como se puede observar en la Tabla 10-10 una reducción a 1.12mm puede ser alcanzada fácilmente en cuatro pases y a 0.64mm en seis pases. Se puede ver también que en los primeros cinco pases existen ligeras diferencias entre las reducciones calculadas en la tercera parte de este capítulo y las calculadas con la ecuación (10.2), esto indica que este método solo nos acerca a una cédula ideal, pero de cualquier modo el análisis de las cargas de rolado descrito en el Capítulo 8, se deberá llevar a cabo para optimizar la cédula de reducción.

No. de Pase	Espesor (mm)	% Reducción por pase	% Acumulado	Cargas (N)	Cargas Cédula Tabla 7 (N)
1	0.080	20.0%	20.0%	1,007,015	1,037,774
2	0.065	18.8%	35.0%	1,011,347	1,066,487
3	0.053	18.5%	47.0%	1,014,915	1,045,345
4	0.043	18.9%	57.0%	986,660	1,056,746
5	0.033	20.9%	66.0%	1,014,061	982,452
6	0.025	19.4%	75.0%	968,760	840,234

Tabla 10-11. Cédula de reducción a 0.64mm rediseñada en un ancho de 264mm para un acero SAE 1024.

Como se puede observar en los datos de la Tabla 10-11, las cargas desarrolladas bajo este método son sensiblemente menores, esto a su vez se verá reflejado en los motores

del molino, además que se encuentran dentro de un rango del 93 al 98% de la máxima carga aplicada desarrollada en la cédula de la Tabla 10-8 a 0.79mm, lo que ayudara a evitar los problemas descritos en el Capítulo 4.

Para la cédula a 1.12mm se realizó el mismo procedimiento de la Tabla 10-10, se tomaron las reducciones por pase y posteriormente estas son analizadas con el método de Bland y Ford para uniformizar la carga de rolado y asegurar que la compensación de la corona de los rodillos será uniforme durante todo el proceso de rolado. El resultado es el siguiente:

No. de Pase	Espesor (mm)	% Reducción por pase	% Acumulado	Cargas (N)	Cargas Cédula Tabla 7 (N)
1	2.03	20.0%	20.0%	1,007,015	976,171
2	1.65	18.8%	35.0%	1,011,347	912,014
3	1.35	18.5%	47.0%	976,967	904,853
4	1.12	18.9%	57.0%	986,660	864,534
5	773,818

Tabla 10-12. Cédula de reducción a 1.12mm rediseñada en un ancho de 264mm para un acero SAE 1024.

La cédula a 1.12mm de espesor final se reduce de cinco a cuatro pases y aunque resulta obvio que se tendrá un incremento en las cargas de rolado, estas se encuentran en un rango entre el 93 y el 97 % de la máxima carga aplicada, la cual se desarrolla en el quinto pase de la cédula a 0.79mm mostrada en las Tablas 10-8 y 10-9.

Capítulo 11

Conclusiones y Recomendaciones

11.1 Conclusiones

Como se puede observar en la Tabla 10-9, pequeños cambios en los porcentajes de reducción por pase, llevan a cambios importantes en las cargas de rolado desarrolladas. La ventaja del método desarrollado por Bland y Ford para el análisis de cargas de rolado, son que muestra en una forma directa los efectos de estos cambios considerando por supuesto el endurecimiento por deformación del metal, así como los efectos de las tensiones en los mandriles, tanto en la carga de rolado como en la posición del plano neutral que representan la base para el rediseño de las cédulas de rolado.

Las desventajas de este método es que requiere una serie de cálculos, que aunque no son complejos, si requiere tiempo, además como se mencionó en el Capítulo 5, existen muchos factores que intervienen en las cargas de rolado y los efectos en los cambios de cada uno de ellos sobre los demás se tiene que considerar de manera independiente, es decir que se deberá llevar a cabo un análisis similar para diferentes tipos de acero, anchos, espesores iniciales, diámetro de rodillos, etc.

11.2 Recomendaciones

Uno de los puntos importantes para mejorar las condiciones de operación de un molino y que representa el siguiente paso después de el rediseño de las cédulas de reducción a cargas de rolado constantes, es el diseño de una corona de rodillos adecuada para la carga de rolado ya definida. Para esto se debe considerar el material de los rodillos para conocer la deformación elástica de estos, así como los límites de fatiga seguros y los diferentes anchos de banda a laminar.

Lista de Referencias

- (1) Schey, J. A., "The Nature of Lubrication in the Cold Rolling of Aluminum and its Alloys" F. Inst. Met., 1960-61, p. 1.
- (2) Discusión de las referencias 1 y 2 (159 y 164) F. Inst. Met., 1960 – 61, p. 297.
- (3) Takahashi, H., y Alexander, J. M., "Friction in the Plain Strain Compression Test" F. Inst. Met., 1961-62, p. 74.
- (4) Orowan, E., "The calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling" Proc. Inst. Mech. Eng., 1943, p.140.
- (5) MacGregor, C. W., y Palme, R. B., "The Distribution of Contact Pressure in the Rolling of Metals" F. for Basic Eng., 1959, p. 669.
- (6) Weinstein, A. S., Zorowski, C., and Loss, F. J. "Analytical Investigation of the Cold Rolling of Bar Stock" Iron and Steel Eng., 1961, May, p. 135.
- (7) Cook, M., y Larke, E. C. "Computation of rolling load, Torque and Roll Face Pressure in Metal Strip Rolling" F. Inst. Met., 1945, p 557.
- (8) Lueg, W., and Pomp, A. "The Influence of Roll Diameter on the Cold Rolling of Steel Strip" Mitt. W. Inst. Eisenf., 1935, p. 63.
- (9) Nadai, A., y Whal, A. M. "Plasticity" MacGraw Hill, 1931.
- (10) Hessenberg, W. C. F., y Sims, R. B., "The Effect of Tension on Torque and Roll Force in Cold Rolled Strip" F. Iron and Steel Inst., 1951, p. 168.
- (11) Nadai A., "The Forces Required for Rolling Steel Strip Under Tension" F. of Applied Mechanics, 1939, p. A54.
- (12) Underwood, L. R. "The Rolling of Metals" Sheet Met. Ind., 1947, p. 2,405.
- (13) Bland, D. R., y Ford, H. "The Calculation of Roll Force and Torque in Cold Strip Rolling with Tensions" Proc. Inst. Mech. Eng., 1948, p. 144.
- (14) Ford, H. "Cold Rolling Technique" Sheet Met. Ind., 1949, p. 1,432.
- (15) "Elastic Deformation of Rolls During Cold Rolling" A.S.M.E. Research Publication "Roll Neck Bearings". Amer. Soc. Mech. Eng. (New York), 1935.

Bibliografía

The Rolling of Strip, Sheet, and Plate
Larke, E.C.
Chapman and Hall, Ltd., London, 1963.

Fundamentos de Manufactura Moderna.
Mikell P. Groover
Prentice Hall, 1997.

Mechanical Metallurgy
George E. Dieter.
Mc Graw Hill, 1988.

