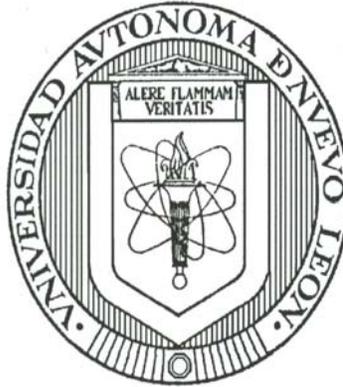


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



OPTIMIZACIÓN E INNOVACIÓN DE CÉDULAS DE LAMINACIÓN EN FRÍO
PARA UN MOLINO REVERSIBLE DEL TIPO CUARTO PARA UN ACERO 1006

POR

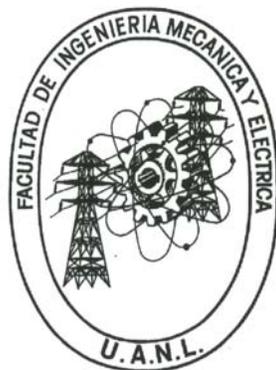
MC. OSCAR FRANCISCO VILLARREAL VERA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA DE MATERIALES

MONTERREY, NUEVO LEÓN OCTUBRE DEL 2009

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



OPTIMIZACIÓN E INNOVACIÓN DE CÉDULAS DE LAMINACIÓN EN FRÍO
PARA UN MOLINO REVERSIBLE DEL TIPO CUARTO PARA UN ACERO 1006

POR

MC. OSCAR FRANCISCO VILLARREAL VERA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA DE MATERIALES

MONTERREY, NUEVO LEÓN OCTUBRE DEL 2009

DEDICATORIA

- A Dios por la paciencia y la fe necesaria para poder llevar a cabo esta Tesis adelante.
- A mi esposa Rosana e hijos Maria Fernanda y Oscar Francisco por la comprensión y tiempo que me han dado siempre para realizar este trabajo de investigación.
- A mis padres Oscar y Francisca por todo el apoyo brindado para la realización mis estudios profesionales.
- A la empresa Villacero por este gran apoyo para llevar a cabo los estudios Doctóales.
- *Las verdades de la fe y las verdades de la ciencia, cuando se buscan por honestidad, no se contradicen entre sí, si no se complementan.*

AGRADECIMIENTOS

- En especial al Ing. Guillermo Morcos Flores del Grupo Villacero por la confianza y apoyo brindado para el desarrollo de los estudios Doctóales.
- Al personal de la UANL en especial al Dr. Rafael Colas y Dr. Carlos Lizcano por su tiempo, su apoyo y asesoría.
- A la empresa Villacero por todo el tiempo y apoyo necesario que me brindó para poder llevar a cabo todo los estudios doctóales que involucraron tiempo, pruebas e investigación técnica para la elaboración de la tesis.
- A compañeros y amigos del Grupo Villacero.

PRÓLOGO

El Consorcio VILLACERO AFIRME, uno de los más importantes comercializadores y distribuidores de acero en México, consciente de que está inmerso en un mundo globalizado que genera procesos dinámicos los cuales conducen a una búsqueda de competitividad creciente, implica entre otros factores el presentar en forma continua, mejora en la calidad, en la productividad, en los servicios a la clientela en general, dándole importancia al desarrollo y la investigación propiciando un mejoramiento de la operación relacionada con la transformación.

La planta CINTACERO filial del consorcio cuenta con un proceso de laminación en frío para atender requerimientos especiales de la clientela, actividad que ha desempeñado permanentemente durante los últimos años; por lo que la empresa en conjunto con la UANL han trabajado en el desarrollo de modelos matemáticos para simular el comportamiento del proceso de Laminación en frío del acero con el propósito de mejorar las características de forma y calidad para determinar las prácticas de operación que aseguren el comportamiento óptimo de los procesos.

Aprovechando las características del acero y por consiguiente la parte más importante de laminación; esto es la geometría del pase, permitiendo así predecir la fuerza de separación del molino laminador que conduce a la completa optimización del pase, en el consumo de energía, la productividad y la reducción adecuada que garantiza la forma y un control más cerrado sobre las variaciones del espesor durante el pase.

El objetivo principal de la investigación y desarrollo al que nos estamos refiriendo permite optimizar adecuadamente los recursos, ya que se logra la medición de los indicadores que determinan el costo del proceso, poniendo especial atención a los consumos de energía, desperdicios de acero en puntas, colas de enrollado y desenrollado, mejorando en términos generales los costos del proceso de laminación.

El presente desarrollo ha permitido la realización de más de 80 cédulas de laminación, se han mejorado los pases lográndose muy buena calidad de forma, cerrando la variación del espesor tanto en el centro como en el largo del rollo de acero.

Dado lo anterior este trabajo contribuye en forma importante a los resultados de la empresa.

Guillermo Morco Flores
Coordinación Proyectos
Villacero

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

PRÓLOGO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. LAMINACIÓN EN FRÍO	4
Introducción	
2.1 Criterios para el cálculo de la fuerza de separación.	6
2.1.1 Criterio de cedencia para metales dúctiles.	6
2.1.2 Criterio de distorsión de energía.	7
2.1.3 Criterio de esfuerzo máximo de corte.	9
2.2 Teorías de laminación en frío.	10
2.3 Cálculo de la fuerza de separación y parámetros geométricos de la mordida.	13
2.3.1 Método empleado para el cálculo del radio del rodillo de trabajo con deformación.	21
2.3.2 Velocidad de deformación.	22

2.3.3	Calculo del coeficiente de fricción desde la fuerza de separación y características de la cinta.	24
2.4	Definición de parámetros geométricos de los productos laminados en frío.	27
2.4.1	Definición de parámetros de medición del perfil de espesor a lo ancho de la cinta.	28
2.4.2	Tipos de perfiles de coronas.	29
2.4.3	Perfil del tipo asimétrico (cuña) y nivelación.	31
2.4.4	Orilla caída, intermedia, picos y valles.	32
2.5	Geometría de la vista planar de la pieza trabajada.	33
2.5.1	Desviación de rectitud contra desviación fuera de escuadre.	33
2.5.2	Planicidad contra elongación.	33
2.5.3	Fórmulas para planicidad.	34
2.6	Principales parámetros que afectan el perfil de la cinta y planicidad.	36
2.6.1	Efecto del ancho de la cinta en la corona de la cinta.	38
2.6.2	El efecto de la fuerza de laminación en la corona de la cinta.	39
2.6.3	Efecto del diámetro del rodillo de trabajo en la corona de la cinta.	40
2.6.4	El efecto del diámetro del rodillo de apoyo en la corona de la cinta.	41
2.6.5	Efecto de la corona de la cinta en la planicidad.	42
2.7	Propósito y Estrategia del control del perfil y planicidad.	44
2.7.1	Métodos para reconocimiento de forma de la cinta.	45
2.7.2	Método del índice de forma.	46

2.8 Variación de calibre	47
2.8.1 Efecto de vibración en el calibre	48
2.8.2 Modo vertical 3er. Octavo.	50
2.8.3 Modo vertical 5to. Octavo.	50
2.8.4 Definición y causas de la excentricidad del rodillo	51
2.9 Defectos de planicidad generados por la distribución de esfuerzos en el espesor de la cinta de acero.	54
2.9.1 Comba y orilla ondulada.	55
2.9.2 Torcido.	56
2.9.3 Desviación en rectitud.	56
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	
3.1 Potencia máxima de operación.	82
3.2 Desarrollo del modelo.	83
3.2.1 Curvas constitutivas	84
3.2.2 Comprobación del modelo	85
3.3 Evaluación del perfil de espesor.	85
3.4 Calidad superficial.	86
3.5 Desarrollo de cédulas de reducción progresiva y consumo de energía.	87
4. RESULTADOS	
4.1 Introducción	94
4.2 Comprobación del modelo	95
4.3 Variación del espesor	96
4.3.1. Velocidad ideal de operación durante la secuencia de pases y pase último.	97
4.3.2. Comportamiento del coeficiente de fricción durante los cambios de velocidad.	99
4.4 Diagrama de presión.	100
4.5 Planicidad e índice de forma.	101

4.6 Rugosidad.	103
4.7 Radio del rodillo de trabajo deformado	104
4.8 Variabilidad del consumo de energía durante el pase y secuencia de operación.	104
4.9 Campañas de reducción en frío bajo diferentes cédulas progresivas.	106
5. DISCUSIÓN	
Introducción	
5.1 Modelo del cálculo de la fuerza de separación.	135
5.1.1. Curva constitutiva	136
5.1.2. Ajuste del modelo de laminación por medio del coeficiente de fricción.	139
5.1.3. Construcción de las curvas del diagrama de presión	141
5.2 Inestabilidad de la fuerza de separación.	143
5.3 Variabilidad del perfil de espesor	144
5.4 Comportamiento del porcentaje de reducción	145
5.5 Comportamiento de la planicidad	146
5.6 Rugosidad	149
5.7 Radio deformado	149
5.8 Cédulas de laminación progresivas	151
5.9 Perfiles asimétricos – cuña	151
6. CONCLUSIONES	
6.1 Conclusiones	169
6.2 Recomendaciones	170
REFERENCIAS	171
APÉNDICE	177
LISTADO DE FIGURAS	198

LISTADO DE TABLAS	207
GLOSARIO	209
SIMBOLOGÍA	219
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	227

RESUMEN

La investigación presenta la optimización de cédulas de laminación en frío para un molino reversible del tipo cuarto para la aplicación en cintas de acero grado 1006, desarrollando de una manera teórica y poniendo en práctica el modelo matemático que predice la fuerza de separación así como otros parámetros de operación, comparando y desarrollando cédulas del tipo progresivas y del tipo de campana para molinos reversibles con desenrollador de entrada, analizando el perfil de espesor y de forma de la cinta de acero de tolerancia estricta.

Los cambios de velocidad durante la operación de laminación, así como los porcentajes de reducción no adecuados durante el pase pueden provocar comportamientos indeseables sobre el perfil del espesor y la forma del material. No sólo el reducir el número de pases en una cédula de laminación permite optimizar sino también el mantener una secuencia de operación progresiva y descendente permitirá optimizar la potencia utilizada repercutiendo en el consumo de energía.

El modelo permitió generar 88 cédulas de laminación en frío, procesar más de 1,500 toneladas de cinta de acero y su uso resultó en la mejora de la tolerancia del espesor y forma, repercutiendo en las líneas de galvanizado y pintado al cumplir con las estrictas tolerancias especificaciones de forma y calibre en estas líneas.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La empresa nace hace más de 30 de años, inicialmente formada por dos compañías transformadoras, lo que era Flejes Industriales y Fisacero, ambas pertenecientes al Grupo FISA. Flejes Industriales se dedicaba a la fabricación del fleje de embalaje basado en normas *ASTM* y Normas Oficiales Mexicanas (*NMX*), las cuales tienen características definidas y estándar. Mientras que Fisacero se dedicaba a la transformación de rollos de acero laminados en calientes a cintas de acero laminadas en frío, caracterizándose por tolerancias estrictas tanto dimensionalmente como en las propiedades mecánicas y físicas. En años recientes el Grupo FISA terminó operaciones y el **Grupo Villacero** adquiere lo que es la compañía transformadora, para este tiempo con el nombre de Cintacero; ya solamente dedicada a la transformación de rollos de acero laminados en caliente.

El proceso de la planta Cintacero está formado por cinco etapas que aprovechan las propiedades del acero, los principales procesos son: línea de corte longitudinal, laminación en frío en donde se centra el estudio de la tesis, recocido, temple mecánico y corte final.

Se parte de rollos maestros de 914 *mm* y 1,219 *mm* de ancho. Estos rollos de acero inicialmente son divididos en múltiplos de dos o tres cintas de

banda angosta de una forma tal que se desperdicie lo menos posible al realizar el corte final de la cinta. La planta procesa estos múltiplos en un molino reversible del tipo cuarto con una capacidad máxima de tabla de 711 *mm*.

El formado de los múltiplos genera en la cinta de acero un perfil del tipo asimétrico, esto significa que si un rollo maestro es dividido en tres múltiplos, la corona se presentaría de la siguiente manera: una cinta con corona mayor en el centro, otra cinta con el punto máximo de la corona hacia un lado del operador y la otra cinta con el punto máximo de la corona hacia el lado del motor.

Si por otro lado un rollo maestro es dividido en dos múltiplos, éste en especial presentará un perfil completamente asimétrico con coronas máximas hacia sus extremos. Este tipo de perfil asimétrico de la cinta genera durante el pase variaciones de carga, que, a su vez, depende de otras variables como el grado de acero y la geometría de laminación, en donde esas altas variaciones de la fuerza de separación ocasionan en algunos casos ondulaciones o una vibración hacia sus extremos o centro.

Conscientes de la importancia de la fuerza de separación durante los pases se promovió el desarrollo de cédulas de laminación óptimas de tipo progresivas soportándose en un conjunto de herramientas entre ellos el de mayor importancia un modelo matemático de laminación que permita predecir esta fuerza en conjunto con otras características del proceso, tales como el par torsional, esfuerzo de cedencia, tensiones que se aplican a la cinta durante el pase y la relación del costo-beneficio de la operación de laminación, apoyándose en el control estadístico para medición del perfil de espesor. Teniendo como objetivo el desarrollo e innovación de cédulas de laminación para un molino reversible del tipo cuarto en cintas de acero grado *SAE* 1006 de tolerancia estricta con perfiles de forma asimétricos.

CAPÍTULO 2

LAMINACIÓN EN FRÍO

INTRODUCCIÓN

Ningún otro tipo de proceso de deformación tiene mayor producción que el proceso de laminación. Una gran cantidad de acero se lamina para la obtención de productos planos, como por ejemplo, placa, lámina, cintas y hojalata, iniciando por el proceso de laminación en caliente seguido del proceso de laminación en frío, sólo una pequeña cantidad de secciones comparada con los productos planos se reduce o transforman en formas que dependerá del mercado de venta.

Todos los productos son fabricados de una secuencia de operación estándar pudiendo mencionar las siguientes etapas:

1. En un principio el material inicia como un planchón, el cual es calentado, posteriormente pasándolo a los molinos de laminación en caliente del tipo dúo o cuarto. Donde el producto se lamina a placa y cortado en estándar, o sea reducida a lámina y posteriormente es enrollado en un ancho estándar. La figura 2.01 se muestra un molino laminador en caliente para el proceso de laminación.

2. La producción de rollos a cintas se lleva a cabo a partir de rollos de acero laminados en caliente partiendo de espesores de 1.5 a 5 *mm*, si se contara con una producción de productos planos se utilizará los molinos del tipo continuo formados por diferentes estaciones de trabajo para laminación en caliente, cada estación unida una con otra manteniendo una tensión adecuada entre cada estación que permita el proceso de deformación, para de aquí obtener productos planos ya sea en rollos, hojas o lámina reducida en caliente. La figura 2.02 se muestra un molino laminador en frío para el proceso de laminación de cinta angosta del tipo reversible.

3. Si se requiere un producto de calibre delgado menor a 1.5 *mm* con tolerancia estricta en calibre, con un acabado o rugosidad final y con un grado de temple específico, el rollo deberá de ser laminado en frío por medio de molinos reversibles del tipo cuarto o si se contara con alta producción se utilizará los molinos continuos, deberá tenerse cuidado en el enrollado y en la aplicación de tensiones, dependiendo del grado de temple se aplicará a las cintas procesos de recocidos que garanticen la especificación requerida manejando espesores que abarcan desde 0.2 *mm* a 2 *mm*.

4. En espesores menores a 0.05 *mm* se denomina hojalata, lo cual se produce en molinos de laminación en frío especializados, pudiéndose producir en molinos del tipo cuarto o molinos del tipo octavo (*Senzimir*).

Durante el proceso de laminación el espesor pasa de un espesor inicial (h_0) a un espesor final (h_1), reducido por los rodillos de trabajo de radio R . La reducción absoluta (Δh) en el pase estará dada por:

$$\Delta h = h_0 - h_1$$

o en términos de fracción la reducción unitaria (r) será igual a:

$$r = \frac{(h_0 - h_1)}{h_0}$$

o en términos de porcentaje, la reducción ($\% r$) estará definida como:

$$\%r = \frac{(h_0 - h_1)}{h_0} \cdot 100$$

la reducción expresada en términos de deformación natural (ε):

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

Para iniciar el proceso de deformación en frío el material a laminar es necesario que dentro del área de contacto exista fricción que permita la reducción del material y así de inicio al proceso de laminación en frío¹.

Se procederá a la definición de los criterios de laminación para el desarrollo del modelo de laminación en frío. Las imágenes de cada capítulo se incluyeron al final del mismo en conjunto con las tablas.

2.1 CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DE LA FUERZA DE SEPARACIÓN

2.1.1 CRITERIO DE CEDENCIA PARA METALES DÚCTILES

El problema de deducir relaciones matemáticas para predecir las condiciones en las cuales inicia la cedencia plástica cuando el material está sujeto a cualquier posible combinación de esfuerzos, es una consideración importante en el campo de plasticidad. En carga uniaxial, como en el ensayo de tensión, el flujo plástico macroscópico inicia en el esfuerzo de cedencia σ_0 . Es

de esperarse que la cedencia dentro de un estado de esfuerzos combinados pueda ser relacionada a una combinación particular de esfuerzos principales. Existe una manera no teórica para calcular la relación entre los componentes que relacionan la cedencia para un estado de esfuerzos tridimensionales con la cedencia en la prueba de tensión uniaxial.

El criterio de cedencia es esencialmente una relación empírica. Sin embargo éste puede ser consistente con un número de observaciones experimentales. A través de este criterio se establece que la presión hidrostática no causa cedencia en un sólido continuo². Como resultado de esto, el componente hidrostático de un complejo estado de esfuerzos no influye en el esfuerzo al cual ocurre la cedencia. Ahí se involucra el esfuerzo reducido como responsable de la cedencia. Mucho más, para un material isotrópico, el criterio de cedencia debe de ser independiente del eje, eso debe ser una función invariante. Estas consideraciones dejan como conclusión al criterio en función de los invariantes del componente reducido de los esfuerzos. Existen dos criterios aceptados para predecir la cedencia en materiales dúctiles³.

2.1.2 CRITERIO DE DISTORSIÓN DE ENERGÍA

Von Mises (1913) propuso que la cedencia ocurría cuando el segundo invariante del esfuerzo desviador o reducido J_2 excede un valor crítico.

$$J_2 = k^2 \quad \text{Ec. 2.01}$$

En donde

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

Para evaluar la constante k y relacionarla a la cedencia en la prueba de tensión, se realiza en un ensayo de tensión uniaxial en el que $\sigma_1 = \sigma_0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$,

Donde σ_1 , σ_2 , y σ_3 son los esfuerzos principales que actúan en un cubo sometido a compresión y σ_0 es el esfuerzo de cedencia, continuando con la derivación. Donde:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \\ \sigma_0^2 + \sigma_0^2 &= 6k^2 \\ \sigma_0 &= \sqrt{3}k\end{aligned}\quad \text{Ec. 2.02}$$

Sustituyendo la ecuación 2.02 en la 2.01 resulta en la forma usual del criterio de cedencia de Von Mises

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 2.03}$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 2.04}$$

Las ecuaciones 2.03 y 2.04 predicen que la cedencia ocurrirá cuando la diferencia de los esfuerzos en el lado derecho de la ecuación excede al esfuerzo de cedencia en tensión uniaxial σ_0

Para identificar la constante k en la ec. 2.01 se debe considerar el estado de esfuerzos en corte puro, como es el producido en el ensayo de torsión.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= -\sigma_3 = \tau \\ \sigma_2 &= 0 \\ \text{En cedencia} \quad \sigma_1^2 + \sigma_1^2 + 4\sigma_1^2 &= 6k^2 \\ \therefore \sigma_1 &= k\end{aligned}$$

Así que k representa el esfuerzo de cedencia en corte puro (torsión). En donde el criterio de Von Mises predice que el esfuerzo de cedencia en torsión y es menor que la tensión uniaxial de acuerdo a

$$k = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_0 = 0.577 \sigma_0 \quad \text{Ec. 2.06}$$

En resumen hay que notar que el criterio de Von Mises implica que la cedencia no es dependiente de cualquier esfuerzo normal o esfuerzo de corte, pero por instancia la cedencia depende de los tres valores de esfuerzos de corte principales. El criterio de cedencia está basado en diferencias del esfuerzo normal, $\sigma_1 - \sigma_2$, etc. El criterio es independiente de los componentes del esfuerzo hidrostático. Así que el criterio de Von Mises involucra términos cuadráticos, y el resultado es independiente del signo de los esfuerzos individuales. Esto es una importante ventaja ya que no es necesario conocer cual es el esfuerzo principal mayor o menor para usar este criterio de cedencia.

Von Mises originalmente propuso este criterio porque es matemáticamente simple, subsecuentemente otros trabajos han expuesto su significado físico. Hencky (1924) mostró que la ec. 2.04 es equivalente a suponer que la cedencia ocurre cuando la energía de la distorsión alcanza un valor crítico. La energía de la distorsión es la parte de la energía de deformación total por unidad de volumen que está involucrada en el cambio de forma a medida que se opone a un cambio en volumen³.

2.1.3 CRITERIO DE ESFUERZO MÁXIMO DE CORTE

Este criterio de cedencia supone que la cedencia ocurre cuando el esfuerzo de corte máximo alcanza el valor del esfuerzo de corte en la prueba de tensión uniaxial. El esfuerzo de corte máximo estará dado por:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad \text{Ec. 2.07}$$

Donde σ_1 es a σ_3 .

Para tensión uniaxial, $\sigma_1 = \sigma_0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, y el esfuerzo de corte τ_0 es igual a $\sigma_0/2$, sustituyendo en la ec. 2.07.

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_0 = \frac{\sigma_0}{2}$$

Ahí que el criterio de máximo esfuerzo de corte estará dado por:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad \text{Ec. 2.08}$$

para un estado de corte puro, $\sigma_1 = -\sigma_3 = k$, $\sigma_2 = 0$, el criterio de esfuerzo de corte máximo predice que la cedencia ocurrirá cuando

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_3 &= 2k = \sigma_0 \\ k &= \frac{\sigma_0}{2} \end{aligned} \quad \text{Ec. 2.09}$$

Es notorio que el criterio de corte máximo es menos complicado que el criterio de Von Mises y por esta razón, es más usado en ingeniería, sin embargo debido a que el criterio de esfuerzo de corte máximo no considera los esfuerzos principales intermedios, dificultando su desarrollo debido a que es necesario determinar los esfuerzos principales, es por eso que el criterio de Von Mises es más utilizado en trabajos teóricos³.

2.2 TEORÍAS DE LAMINACIÓN EN FRÍO

Mucho más trabajos han sido desarrollados en la búsqueda de un tratado teórico de laminación en frío que para cualquier otro tipo de proceso mecánico. La teoría de laminación ayuda en las expresiones de fuerzas externas, tal como la fuerza de separación y el par torsional, en términos de geometría de la deformación y propiedades de la resistencia del material siendo procesado.

La ecuación diferencial para el equilibrio de un elemento del material siendo deformado entre los rodillos es común para todas las teorías de laminación. La derivación dada a continuación, Bland y Ford⁴, está basada en las siguientes suposiciones:

- ❖ El ángulo de contacto es circular (θ) – él cual no presenta deformación elástica en la mordida de laminación.
- ❖ El coeficiente de fricción μ es constante en todos los puntos del ángulo de contacto.
- ❖ No existe expansión lateral, así que el proceso de laminación se puede considerar como un problema de deformación plana.
- ❖ Las secciones verticales permanecen planas, por lo que la deformación es homogénea.
- ❖ La velocidad periférica de los rodillos es constante.
- ❖ La deformación elástica de la lámina es despreciable en comparación con la deformación plástica.
- ❖ Se mantiene el criterio de cedencia de energía de distorsión, para deformación plana.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \sigma'_0$$

El esfuerzo actuando en un elemento de la cinta en el entrehierro se muestra en la figura 2.03. En cualquier punto de contacto entre la cinta y la superficie del rodillo, definido por el ángulo ϕ , los esfuerzos actuantes son: La presión radial p_r y el esfuerzo cortante tangencial $\tau = \mu p_r$. Estos esfuerzos son resueltos en sus componentes horizontal y vertical en la figura 2.04. En adición, el esfuerzo σ_x , se supone uniformemente distribuido sobre las caras verticales del elemento. El esfuerzo normal en un extremo del elemento es $p_r R d\phi$, y el componente horizontal de esta fuerza es $\mu p_r R \sin \phi d\phi$. La fuerza de fricción tangencial es $\mu p_r R d\phi$ y su componente horizontal es $\mu p_r R \cos \phi d\phi$. Tomando la suma de la fuerza horizontal en el elemento resulta en

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) + 2\mu p_r R \cos d\phi - \sigma_x h - 2p_r \text{Sen } \phi d\phi = 0$$

Lo cual se simplifica

$$\frac{d(\sigma_x h)}{d\phi} = 2p_r R (\text{Sen } \phi \pm \mu \text{Cos } \phi) \quad \text{Ec. 2.11}$$

El signo positivo se aplica entre el plano de salida y el punto neutral, mientras el signo negativo se aplica entre el plano de entrada y el punto neutral. Los signos más y menos en la ec. 2.11 se deben a que la dirección de la fuerza de fricción cambia en el punto neutro. Esta ecuación primeramente fue derivada por Von Karman⁵ y es usualmente llamada así.

Las fuerzas actuantes en la dirección vertical están balanceadas por la presión específica del rodillo de laminación p . Tomando el equilibrio de fuerzas en la dirección vertical resuelta en una relación entre la presión normal y la presión radial.

$$p = p_r (1 \mp \mu \tan \phi) \quad \text{Ec. 2.12}$$

La relación entre la presión normal y el esfuerzo compresivo horizontal σ_x está dada por el criterio de energía de distorsión de cedencia para deformación plana.

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_3 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \sigma'_0 \\ p - \sigma_x &= \sigma'_0 \end{aligned} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde p es el mayor de los dos esfuerzos compresivos principales.

La solución del problema en la laminación en frío consiste en la integración de la ecuación 2.11 con la ayuda de la ec. 2.12 y 2.13. Varias aproximaciones se pueden realizar para obtener una solución adecuada. Trinks⁶ proporciona una solución gráfica a la ecuación 2.11 de Von Karman

utilizando suposiciones del esfuerzo de cedencia constante y un arco de contacto parabólico. La solución de las ecuaciones de laminación más completa fue obtenida por Orowan⁷ en esta solución se supone que el esfuerzo de cedencia cambia con el ángulo de contacto ϕ debido al endurecimiento por deformación.

Las teorías de laminación que han evolucionado son la base para el desarrollo de complejos modelos matemáticos y computacionales que permiten simplificar el estudio de laminación. Con la aplicación y uso actual de computadoras permite generar un modelo basado en las ecuaciones de laminación teniendo de plataforma a Windows, en donde posteriormente se realizan graficas y cálculos por medio de la hoja electrónica de Excel. La actual plataforma de Windows apoyándose en Excel ayuda a simplificar el desarrollo de modelos, pudiendo aplicar las ecuaciones de laminación. Por otro lado también mucho de los nuevos conceptos de laminación pueden encontrarse en el desarrollo de cursos y prácticas de la **IRTC (International Rolling Technology Course)**⁸.

2.3 CÁLCULO DE LA FUERZA DE SEPARACIÓN Y PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA MORDIDA DE LAMINACIÓN EN FRÍO.

Basados también en los conceptos anteriores, para el cálculo de la fuerza de separación, el desarrollo del modelo se acerca su aproximación a resultados industriales, considerando la potencia del molino de laminación en frío, parámetros geométricos de la mordida de laminación, dimensiones transversales de cintas de acero, grados de acero y el desarrollo correspondiente de las curvas constitutivas del acero.

Uno de los métodos de cálculo de fuerzas de separación o cargas de laminación en frío usa ecuaciones derivadas de la consideración de fuerzas desarrolladas en el área de contacto o mordida y fue propuesta por Bland y Ford⁹. En la figura 2.05 el ancho del material es tomado como unidad, es visto que la fuerza normal " L " en AB debido al esfuerzo s es

$$L = s \cdot (AB),$$

El componente horizontal será

$$L_h = s \cdot (AB) \operatorname{sen} \phi,$$

Similarmente la fuerza friccional N actúa a lo largo de AB es

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

Donde μ es el coeficiente de fricción y ϕ es el ángulo que abarca del punto de salida al diferencial.

Sin embargo, del plano de entrada al plano neutral la fuerza N actúa en el material como una carga tensil, mientras desde el plano neutro al plano de salida actúa en un sentido compresivo. Si las fuerzas compresivas se toman como positivas, sobre la longitud completa del ángulo de contacto, la componente horizontal de N puede ser escrita como:

$$N_h = \mp \mu \cdot s \cdot (AB) \cos \phi,$$

- ❖ *El signo negativo se refiere a la zona de entrada, por ejemplo desde el plano de entrada al plano neutral y*
- ❖ *El signo positivo a la zona de salida.*

Aquí, la fuerza horizontal es:

$$L_h + N_h = s \cdot (AB) (\operatorname{sen} \phi \mp \mu \cos \phi),$$

Y tomando ambos rodillos en cuenta, la fuerza dF - figura 2.05- puede ser escrita como

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

o puesto que AB igual $Rd\phi$, después

$$\frac{dF}{d\phi} = 2Rs \cdot (\sin \phi \mp \mu \cos \phi) \quad \text{Ec. 2.14}$$

Para el desarrollo de la solución de la ecuación 2.14 de Bland y Ford se supone que:

- El ángulo de contacto permanece circular aún y cuando ocurre aplastamiento de rodillo.
- El coeficiente de fricción μ , es constante sobre la longitud completa del arco de contacto.
- La compresión elástica del material se descarta¹⁰.
- El incremento del ancho del material es cero.
- Se aplica el criterio de Huber-Von Mises de plasticidad.
- La deformación es completamente homogénea, en otras palabras, el plano representado por una línea vertical es tal que la unión de los puntos CC en la figura 2.05, permanece vertical a través de su pase por la mordida.
- La presión radial s , de la figura 2.05 en cualquier punto a lo largo del ángulo de contacto es igual a la componente vertical q en ese punto.

Con un plano de deformación homogéneo definido, y con una unidad de ancho establecida, el esfuerzo f corresponde a la fuerza horizontal F , figura 2.05 y su resultante serán

$$f = F / h \quad \text{Ec. 2.15}$$

Esto se debe al suponer deformación homogénea, tomando uno de los tres esfuerzos principales, el cual actúa en el segmento mostrado en la Fig. 2.03 Los otros 2 esfuerzos serían el esfuerzo q , componente vertical del esfuerzo radial, y el esfuerzo w , el cual aunque no se indica en el diagrama, actúa en ángulo recto con respecto a los esfuerzos f y q . Para el desarrollo matemático se asume deformación homogénea y que los esfuerzos p , q y w son esfuerzos principales, lo cual fue postulado en el documento de Orowan¹¹, quien desarrolló su solución para la ecuación 2.14. Así que q , f y w se definen como esfuerzos principales, y utilizan la ecuación de Huber-Von Mises³,

$$(q - f)^2 + (f - w)^2 + (w - q)^2 = 2K^2, \quad \text{Ec. 2.16}$$

Donde K es igual a la resistencia bajo compresión homogénea. Es aquí donde se supone que el ancho del material no sufre deformación, por consiguiente:

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

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

Donde E es el módulo de elasticidad del material.

Esto es establecido por Nadai¹² que para la deformación plástica, el factor γ , el cual es la relación de Poisson, toma el valor de $\frac{1}{2}$; sustituyendo este valor de w dentro de la ecuación 2.16 da

$$f = q - 1.155K = q - k \quad \text{Ec. 2.17}$$

El símbolo k representa la resistencia planar de deformación homogénea. Aquí usando la ecuación (2.15)

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

en consecuencia, del lado izquierdo de la ecuación 2.14 puede ser reescrita como

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

En esta etapa, Bland y Ford toman el segundo término de la ecuación superior como igual a cero, debido que es un valor es muy pequeño y el error puede considerar insignificante. Al igualarse con la ecuación y reacomodarse los términos, la ecuación (2.14) llegará a ser:

$$\begin{aligned}hk \cdot \left[\frac{d\left(\frac{q}{k}\right)}{d\phi} \right] &= 2Rq(\text{sen}\phi \mp \mu \cos\phi) \\ k \cdot \left[\frac{d\left(\frac{q}{k}\right)}{d\phi} \right] &= \frac{2R}{h}(\text{sen}\phi \mp \mu \cos\phi) \\ \frac{d\left(\frac{q}{k}\right)}{d\phi} \Big/ \frac{q}{k} &= \frac{2R}{h}(\text{sen}\phi \mp \mu \cos\phi)\end{aligned}$$

Ec. 2.18

Debido a que en laminación en frío existen ángulos de contacto muy pequeños, es muy razonable, lo hecho por Bland y Ford, para introducir una aproximación matemática

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

Y en consecuencia es:

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

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

Por la misma razón en este orden se escribe

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

Usando estas aproximaciones, la ecuación (2.18) llegará a ser

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

Si ambos lados de la ecuación son integrados con respecto al ángulo ϕ , se encuentra que

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

o

$$q = A \frac{hk}{R} \cdot e^{\mp \mu H}, \quad \text{Ec. 2.19}$$

donde

$$H = 2 \sqrt{\frac{R}{h_2}} \cdot \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R}{h_2}} \cdot \phi \right) \quad \text{Ec. 2.20}$$

En el plano de entrada, el ángulo " ϕ " es igual a " θ " y

$$H = H_1 = 2 \sqrt{\frac{R}{h_2}} \cdot \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R}{h_2}} \cdot \theta \right) \quad \text{Ec. 2.21}$$

Poniendo k_1 para el valor de k en el plano de entrada, después de la ecuación (2.19).

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

Cuando se aplica el esfuerzo tensional del desenrollador σ_1 y recordando que las fuerzas ténsiles se han definido como negativas, en el plano de entrada el valor de f en la ecuación (2.17) es igual a menos σ_1 y

$$q = k_1 - \sigma_1$$

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

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación (2.19) da para la zona de entrada, por ejemplo del plano de entrada al plano neutral,

$$q = \frac{hk}{h_1} \left(1 - \frac{\sigma_1}{k_1} \right) e^{\mu(H_1-H)} \quad (\text{zona de entrada}) \quad \text{Ec. 2.22}$$

En el plano de salida, el ángulo ϕ es igual a cero, y ahí, H también es igual a cero, así que poniendo k en este plano de la ecuación (2.19)

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

Aquí, con la tensión del enrollador de σ_2 , también definida como negativa, la magnitud de q en el plano de salida es desde la ecuación (2.17), con f es igual a menos σ_2

$$q = k_2 - \sigma_2$$

y

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

Con el valor de A en la ecuación (2.19), el valor de q el cual se relaciona a la zona de salida del arco de contacto es

$$q = \frac{hk}{h_2} \left(1 - \frac{\sigma_2}{k_2} \right) e^{\mu H} \quad \text{zona de salida} \quad \text{Ec. 2.23}$$

Antes de aplicar las ecuaciones (2.22) y (2.23) para la laminación será necesario determinar la magnitud al plano neutro. Marcado con el plano por n , desde ϕ_n en las ecuaciones (2.22) y (2.23) teniendo el mismo valor,

$$e^{\mu(H_1 - 2H_n)} = \frac{h_1}{h_2} \left[\frac{1 - \frac{\sigma_2}{k_2}}{1 - \frac{\sigma_1}{k_1}} \right] \quad \text{Ec. 2.24}$$

igualando a "y" el lado derecho de esta ecuación,

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

$$H_n = \frac{H_1}{2} - \frac{1}{2\mu} \cdot \log_e y \quad \text{Ec. 2.25}$$

Desarrollando la ecuación 2.20 en donde se sustituye H_n para H y el ángulo neutro ϕ_n para ϕ , desarrollando la expresión:

$$\begin{aligned} \frac{H_n}{2} &= \sqrt{\frac{R}{h_2}} \cdot \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R}{h_2}} \cdot \phi_n \right) \\ \frac{H_n}{2} \cdot \sqrt{\frac{h_2}{R}} &= \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R}{h_2}} \cdot \phi_n \right) \\ \sqrt{\frac{R}{h_2}} \cdot \phi_n &= \tan \left[\frac{H_n}{2} \cdot \sqrt{\frac{h_2}{R}} \right] \end{aligned}$$

$$\phi_n = \sqrt{\frac{h_2}{R}} \cdot \tan \left[\sqrt{\frac{h_2}{R}} \cdot \frac{H_n}{2} \right], \quad \text{Ec. 2.26}$$

Después de calcular H_n la magnitud del ángulo neutro ϕ_n entonces es posible determinarla⁴.

2.3.1 MÉTODO EMPLEADO PARA EL CÁLCULO DEL RADIO DEL RODILLO DE TRABAJO CON DEFORMACIÓN.

Dentro de algunas condiciones de laminación, es posible desarrollar altas presiones de reducción, las cuales deforman la mordida de laminación. Así que al inicio del cálculo del modelo suele suponerse una forma del ángulo de contacto circular, pero conforme avanza el desarrollo para tener una aproximación más exacta debe de manejarse un radio deformado (R'), si se mantuviera circular el ángulo de contacto sin un cambio en el Radio (R) las cargas calculadas podrían ser erróneas, por lo que debe de realizarse este nuevo cálculo a partir de los datos obtenidos.

Al inicio del cálculo el ángulo de contacto se supone que permanece circular, y esto se demostró en el documento publicado de Orowan¹¹. La figura 2.06 muestra un ejemplo de las colinas de fricción en el ángulo de contacto o mordida.

Sin embargo para llevar al cálculo del radio deformado R' esto se realiza inicialmente a partir de la ecuación de Hitchcock¹³; presentada a continuación.

La expresión se obtiene partiendo de un ángulo de contacto deformado, la cual es determinada de la relación existente con el radio sin deformar:

$$\frac{R'}{R} = 1 + \frac{CP}{w(h_0 - h_1)} \quad \text{Ec. 2.27}$$

En donde

P	=	Es la carga de laminación basada en R
w	=	Ancho del material
h_0	=	Espesor de entrada
h_1	=	Espesor de salida
C	=	constante basada en el módulo de elasticidad caracterizada bajo la siguiente ecuación:

$$C = \frac{16(1-\gamma^2)}{\pi E} \quad \text{Ec. 2.28}$$

.El valor de E es el módulo de elasticidad para rodillos de acero, hierro templado y forjado puede ser tomado como 18.69, 16.32 y 9.49 ton_m/mm^2 , y aquí los valores de C usando 0.35 para γ la cual es la relación de Poisson son:

$$\begin{aligned} C &= 3.34 \times 10^{-4} \text{ para rodillos de acero} \\ C &= 3.82 \times 10^{-4} \text{ para rodillos de hierro templado} \\ C &= 6.57 \times 10^{-4} \text{ para rodillos de hierro vaciado} \end{aligned}$$

El radio deformado R' no se puede determinar directamente y el cálculo debe corregir el valor de P por simultaneas o aproximaciones⁴.

2.3.2 VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

La velocidad de deformación en la laminación en frío suele ser del orden de 10 a 1000 s^{-1} . Se establece en operación que el esfuerzo de cedencia dinámico medido en este intervalo puede ser el doble del esfuerzo de cedencia medido en condiciones convencionales de tensión, lo cual es deseable, así que para una mejor exactitud, entre más datos tengamos para la determinación del rango de deformación ($\dot{\varepsilon}$) basados en el esfuerzo de cedencia (σ_y) para varios aceros, es posible derivar una expresión para la velocidad de deformación que se lleve a cabo durante la laminación en frío.

Larke⁴, desarrolló la siguiente ecuación para la velocidad de deformación para fricción de deslizamiento.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V h_\phi \cos \phi}{h_0 h_1} \sqrt{\frac{2(h_0 - h_1)}{D}} \quad \text{Ec. 2.29}$$

En donde:

- V es la velocidad de laminación
- h_ϕ es el espesor de la pieza en el plano neutral,
- ϕ es el ángulo sustentado en el centro del rodillo de trabajo por el segmento del arco de contacto dejándolo entre el plano neutral y de salida,
- h_0 es el espesor de entrada de la cinta laminada.
- h_1 es el espesor de salida de la cinta laminada, y
- D es el diámetro del rodillo de trabajo

De la derivación de esta ecuación se asume un rodillo de trabajo rígido.

Alternativamente, la expresión se puede reescribir;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V h_\phi \cos \phi}{h_0^2 (1 - r)} \sqrt{\frac{2 h_0 r}{D}} \quad \text{Ec. 2.30}$$

En donde r representa la reducción expresada como una fracción decimal.

Al suponer que el plano neutral coincide con el plano de salida (en donde el deslizamiento hacia delante es cero), por lo que:

$$\begin{aligned} \frac{h_1}{h_0} &= (1 - r) \\ h_\phi &= h_1 \\ \cos \phi &= 1 \end{aligned}$$

la ecuación 2.30 puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon} &= \frac{Vh_1(1)}{h_0^2(h_1/h_0)} \sqrt{\frac{2h_0r}{D}} \\ \dot{\varepsilon} &= V \sqrt{\frac{2r}{Dh_0}}\end{aligned}\quad \text{Ec. 2.31}$$

Esta expresión ha sido desarrollada por otros investigadores¹⁴ y suponen empíricamente que el diámetro del rodillo deformado suele ser dos veces y medio al diámetro inicial. Por consiguiente se dice que la velocidad de deformación $\dot{\varepsilon}$ puede ser calculada en términos de segundos a la menos uno (s^{-1}) usando la ecuación siguiente:

$$\dot{\varepsilon} \cong 0.0358 V \sqrt{\frac{r}{Dh_0}}\quad \text{Ec. 2.32}$$

En donde V está en unidades de *mm/seg*, mientras que el D y h_0 se expresan en *mm*. La expresión o ecuación 2.32 relaciona la velocidad de deformación promedio en la mordida.

En realidad, la velocidad de deformación varía a lo largo de la longitud del arco de contacto, decreciendo continuamente desde un valor máximo que inicia en el plano de entrada a un valor mínimo en el plano de salida¹⁵.

2.3.3 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN DESDE LA FUERZA DE SEPARACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA CINTA.

Contando con las tensiones de las cintas, velocidad de operación y la característica de la cedencia dinámica de la cinta es posible calcular el coeficiente de fricción solamente desde la medición de la fuerza de separación. La facilidad con lo cual se obtenga la solución depende de la naturaleza del

modelo matemático que se emplee para este propósito¹⁶; Un modelo algebraico simple del proceso de laminación es el tipo más conveniente a usar, a continuación se presenta un ejemplo del mismo:

Refiriéndose a la figura 2.07 el modelo matemático consiste básicamente de las siguientes relaciones:

1. La expresión para el rango de deformación e (*segundos*⁻¹), donde V_R es la velocidad de laminación (*mm/seg*) y h_0 es el espesor de entrada de la cinta en (*mm*);

$$\dot{e} = 0.0356 V_R \sqrt{\frac{r}{Dh_0}} \quad \text{Ec.2.33}$$

2. La expresión para el esfuerzo de constricción σ_c , donde σ_{yt} es el esfuerzo de cedencia en tensión y a es un parámetro con un valor alrededor de 36.20 *MPa* por década del cambio del rango de deformación,

$$\sigma_c = 1.155 \left(\sigma_{yt} + a \log_{10} 1000 e \right) \quad \text{Ec. 2.34}$$

3. La expresión para el diámetro del rodillo deformado D' , donde f es la fuerza específica de laminación y E es el módulo elástico del material laminado.

$$D' = \left(1 + 2 \sqrt{\frac{f}{Eh_0r}} + \frac{2f}{Eh_0r} \right) D \quad \text{Ec. 2.35}$$

4. La expresión para el coeficiente de fricción será:

$$\mu = 2 \sqrt{\frac{2h_0}{D'r}} \left(\frac{f(1-r)}{\sigma_c - \sigma_1} \sqrt{\frac{2}{D'h_0r}} - 1 + \frac{5r}{4} \right) \quad \text{Ec. 2.36}$$

Donde σ_1 es el promedio de la resistencia tensil en la entrada y salida de la mordida de laminación.

Contando con los datos del proceso de laminación bajo ciertos criterios de reducción es posible determinar primeramente los valores del rango de deformación por medio de la ecuación 2.33, en donde posteriormente estos valores serán sustituidos en la ecuación 2.34. El esfuerzo de cedencia será utilizado para la determinación del esfuerzo de constricción σ_c . Al obtener los valores correspondientes se utilizará la ecuación 2.36. la solución de las ecuaciones 2.35 y 2.36 sería por simultaneas (suposición), lo cual es lo más conveniente para la solución de la ecuación 2.37 en la forma.

$$f = \frac{(\sigma_c - \sigma_1)}{(1-r)} \sqrt{\frac{D'h_0r}{2}} \left\{ 1 - \frac{5r}{4} + \frac{\mu}{2} \sqrt{\frac{D'r}{2h_0}} \right\} \quad \text{Ec. 2.37}$$

Atribuir valores fijos a $(\sigma_c - \sigma_1)$ y h_0 , el siguiente procedimiento se adopta:

1. Para varias reducciones ($r = 0.1, 0.2, 0.3, \text{etc.}$) un grupo de curvas que relacionan a f y D sobre la base de la ecuación 2.35 se pueden dibujar. Así como se ilustra en la figura 2.08.
2. Para los mismos valores de r y para varios valores de μ ($\mu = 0.02, 0.03, 0.04, \text{etc.}$) una grupo similar de curvas se obtienen de la ecuación 2.36 y se pueden dibujar utilizando las mismas escalas para los ejes como en el paso 1. La figura 2.09 representa las mismas curvas.
3. Al sobreponer las dos graficas, las soluciones para la fuerza f pueden se pueden leer desde la intersección de las curvas, apropiadas para varios valores de μ y r .

4. Partiendo de los datos obtenidos en el punto 3, un grupo de curvas se relaciona con f a r para diferentes valores de μ puede y se pueden presentar como se ilustra en la figura 2.10.

Experimentalmente se han determinado valores para la fuerza de laminación y ahora pueden ser leídos directamente de las curvas tal y como se muestra en la figura 2.10 y los valores del coeficiente de fricción pueden ser determinados directamente.

Esto será más notorio para diámetros menores de los rodillos de trabajo, tal como se ha considerado en el cálculo en la curva de la figura 2.09, corresponde a diferentes valores del coeficiente, y son agrupados especialmente en bajas reducciones. Esto implica que el esfuerzo de cedencia dinámico en la velocidad de laminación será determinado exactamente y la fuerza de separación podría ser cuidadosamente medida si el valor confiable del coeficiente de fricción sea obtenido¹⁵.

Actualmente con el desarrollo de modelos para la laminación en frío, es posible determinar el coeficiente de fricción por medio de la velocidad de operación, proporcionando una rápida respuesta al estudio del mismo; para esta investigación se apoyo el cálculo por medio de la ecuación de Mójica y Garza, Arimura y coautores¹⁷.

2.4 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LOS PRODUCTOS LAMINADOS EN FRÍO

El término perfil de cinta se utiliza para describir una variación del espesor de la cinta a lo largo del ancho en el plano a su longitud.

El perfil de cinta en general tiene una forma irregular que es afectada por los siguientes factores:

- Deflexión del rodillo por carga de laminación
- Deflexión del rodillo por el mecanismo de flexión de rodillos
- Aplastamiento de los rodillos
- Corona mecánica del rodillo
- Expansión térmica del rodillo
- Desgaste de rodillos
- Desgaste localizado de los rodillos

A pesar de las irregularidades extremas del perfil de cinta, es posible identificar en cada perfil las zonas indicadas en la figura 2.11

- Zona de centro
- Zona de caída en orilla
- Zona de orilla

Al estar dividido en tres zonas el perfil de cinta puede ser descrito en términos más precisos y así es más conveniente analizar los efectos de varios factores en la forma de estas zonas.

2.4.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE MEDICIÓN DEL PERFIL ESPESOR A LO ANCHO DE CINTA.

Generalmente el término perfil de espesor medido a lo ancho de la cinta se puede describir como una serie de mediciones del espesor en intervalos predeterminados a través del ancho de la cinta, aunque este tipo de mediciones nos permite obtener una descripción más precisa de cada perfil del espesor de una manera individual, en ciertos casos no puede ser efectivo al evaluar y

comparar varios perfiles de cintas. La comparación del perfil de cinta debe ser acompañada por las siguientes características del espesor¹⁸, tal y como se muestra en las figuras 2.12 y 2.13.

Calibre central (hc) – El calibre central es el espesor medido en el centro o a mitad del ancho de la cinta, vista de una manera frontal. El calibre central es uno de los principales parámetros en la caracterización de la geometría de los productos laminados.

Espesor de caída en orilla (hj); Es el espesor usualmente medido en una distancia J , de 50 a 75 mm de la orilla de la cinta. El espesor de la cinta decrece rápidamente hacia la orilla a partir de esta distancia, lo cual es un fenómeno de orilla caída.

Espesor de Orilla (hI); Es el espesor de la cinta a una distancia I desde 9.25 a 25 mm desde la orilla de la cinta.

Espesor de orilla (he); Es el espesor medido en una distancia e que va desde 2 a 3 *mm* de la orilla de la cinta.

El perfil de la cinta no es exactamente simétrico, por lo que los espesores son medidos desde ambos lados de las cintas y el promedio aritmético de estas mediciones es también comúnmente utilizado como se ilustra en la Tabla 2.01.

2.4.2 TIPOS DE PERFILES DE CORONAS

Los tipos de coronas se pueden identificar en el perfil de la cinta de acero de la siguiente manera: (Tabla 2.02):

- Corona central (simétrica)

➤ Corona del tipo asimétrico (cuña)

Corona en el centro se define como la diferencia entre el espesor del centro y el promedio aritmético de espesor de orilla. La forma se designa como una corona de centro y el último como una corona parcial¹⁹. Así que la corona central será igual a:

$$chI = hc - hI \quad \text{Ec. 2.40}$$

En donde:

hc = calibre central

hI = espesor de orilla promedio

la corona parcial estará dada:

$$chJ = hc - hJ \quad \text{Ec. 2.41}$$

en donde

hJ = espesor promedio aritmético de caída de orilla

En las figuras 2.12 y 2.13, se muestran coronas chI y chJ mayores a cero. Así que cuando la corona central chI decrece por un actuador, resulta también en la reducción de la corona parcial chJ . Sin embargo en el segundo caso, la corona central chI y la parcial chJ tienen signos opuestos e intenta reducir la corona central chI pudiera llevar un incremento en la convexidad de la corona parcial chJ .

Se define a la corona de perfil asimétrico (cuña), como la diferencia entre el espesor central y el espesor de caída de orilla del lado motor o del operador. Así que la corona será igual a:

$$chI' = hc - hI' \quad \text{Ec. 2.42}$$

y la corona del lado del operador será igual a

$$chI'' = hc - hI'' \quad \text{Ec. 2.43}$$

en donde

hI' = espesor de caída de orilla al lado del motor principal

hI'' = espesor de caída de orilla al lado del operador

Es común expresar relacionar la corona de la cinta al calibre central del material. Este término se conoce como *relación de corona*.

La relación de corona central total es definida como:

$$crI = \frac{chI}{hc} \times 100\% \quad \text{Ec. 2.44}$$

donde

chI = Corona central total

hc = Corona central

2.4.3 PERFIL DEL TIPO ASIMÉTRICO (CUÑA) Y NIVELACIÓN.

El perfil del tipo asimétrico o cuña en conjunto con el nivelado²⁰ son términos utilizados para evaluar la asimetría del perfil de la cinta de acero laminada, las definiciones de los términos se muestran en la Tabla 2.03.

Perfil asimétrico o cuña, el término perfil de cuña describe la asimetría de la cinta de acero en términos cualitativos.

El perfil de cuña del lado del motor es identificado como el perfil de cinta que abarca el calibre central *hc* el cual es menor que el espesor del lado de caída de orilla *hI'* y mayor que el del lado del operador *hI''*.

El perfil de cuña del lado del operador se identifica como el perfil de la cinta que abarca el calibre central *hc* y que es menor que la del lado del operador del *hI''* y mayor que el del lado del motor principal *hI'* como se muestra en la Tabla 2.03.

Cuña o Nivelación, este término da una definición cuantitativa de la asimetría de la pieza trabajada y es definida como la diferencia entre la orilla del motor principal y la orilla del lado del operador hI' y hI'' como se muestra en la Tabla 2.03.

2.4.4 ORILLA CAÍDA, INTERMEDIA, PICOS Y VALLES

El cambio en el espesor en un perfil de cinta varía generalmente a través del ancho de la cinta. Este cambio de espesor es usualmente mínimo en la zona central del perfil de la cinta (figuras 2.11 y 2.12), mientras es mucho mayor en la zona de la orilla y máximo en la zona de caída de la orilla.

Los términos cuantitativos describen el cambio en el perfil del espesor en ambas zonas de la orilla las cuales son conocidas como caída y punta de orilla respectivamente. Las longitudes de estas zonas son predefinidas (ver tabla 2.01) y los cambios en el perfil de espesor de la cinta pueden ser obtenidos desde los valores medidos desde las orillas.

Existen tres clases de orillas caídas²⁰ y pueden ser identificadas como orilla caída del lado del motor, operador y el promedio de ambas, Tabla 2.04.

Existen tres clases también de extremo de orilla o punta de orilla caída y se identifican de manera similar a la anterior, como extremo de orilla del lado del operador, motor y el promedio.

Los parámetros de rugosidad picos y valles describen respectivamente el adelgazamiento o expansión en el perfil de la pieza trabajada como se ve en la figura 2.14 cuantitativamente los picos y valles se miden como la desviación del espesor superior o inferior del espesor nominal en el perfil que se proyecta hacia el ancho predefinido como b y altura h con dimensiones dadas en la Tabla

2.04. el espesor nominal puede ser determinado por una curva no lineal utilizando un análisis de regresión²⁰.

2.5 GEOMETRÍA DE LA VISTA PLANAR DE LA PIEZA TRABAJADA

Los dos parámetros que son convencionalmente usados para evaluar la pieza trabajada del punto de vista de geometría son desviación de rectitud y desviación fuera de escuadre.

2.5.1 DESVIACIÓN DE RECTITUD CONTRA DESVIACIÓN FUERA DE ESCUADRE

De acuerdo a la norma *ASTM A568*²¹ la desviación de rectitud se define como la mayor desviación del lado de la orilla de la cinta con respecto a una línea recta, la medición se toma en el lado cóncavo con un borde recto como se muestra en la figura 2.15.

La desviación fuera de escuadre es también definida por la *ASTM A568* como la desviación más grande de la orilla de la cinta desde una línea recta en ángulos rectos a un lado y que toca una esquina ver figura 2.16. Es también obtenida por la medición de la diferencia entre las diagonales (ac y bd) del corte en hojas. La desviación de descuadre es la mitad de esa diferencia.

2.5.2 PLANICIDAD CONTRA ELONGACIÓN

Una relación cualitativa que puede distinguirse entre elongación y planicidad se puede observar en la figura 2.17, de donde se derivan tres

defectos de forma más comunes de cintas. Se pueden derivar varias relaciones cualitativas entre planicidad y elongación para expresar la elongación de la cinta en términos diferenciales como se muestra en la figura 2.18²².

Los valores de $\Delta\epsilon_e$ y $\Delta\epsilon_q$ mostradas en la figura 2.19 son determinadas por la ecuación:

$$\Delta\epsilon_e = \frac{\epsilon'_e + \epsilon''_e}{2} - \epsilon_c \quad \text{Ec. 2.45}$$

$$\Delta\epsilon_q = \frac{\epsilon'_q + \epsilon''_q}{2} - \epsilon_c \quad \text{Ec. 2.46}$$

Donde

- $\Delta\epsilon_e$ = Elongación diferencial de orilla ondulada.
- $\Delta\epsilon_q$ = Elongación diferencial de un cuarto de orilla ondulada.
- ϵ'_e = Elongación de onda a un lado del motor.
- ϵ''_e = Elongación de onda a un lado del operador.
- ϵ'_q = Elongación de un cuarto de onda a un lado del motor.
- ϵ''_q = Elongación de un cuarto de onda a un lado del operador.
- ϵ_c = Elongación en centro de la cinta.

El uso de los diferenciales de elongación $\Delta\epsilon_e$ y $\Delta\epsilon_q$, permite la predicción de defectos más sofisticados como se ilustra en la figura 2.19.

2.5.3 FÓRMULAS PARA PLANICIDAD

Los 5 principales parámetros usados comúnmente para la evaluación cuantitativa de la planicidad²⁰ de la lámina son los que se muestran en la Tabla 2.05.

Unidad I es expresada como:

$$I = \frac{\Delta L}{L} \times 10^5 \quad \text{Ec. 2.47}$$

En donde:

$\Delta L/L$ = Cambio de longitud de Onda

L = longitud de onda

La ondulación de la cinta correspondiente a la manifestación de la forma de la cinta es igual a:

$$\frac{\Delta L}{L} = \left(\kappa \frac{H}{L} \right)^2 \quad \text{Ec. 2.48}$$

En donde

κ = factor de ondulación

H = Altura de la onda

Para la onda senoidal $\kappa = \pi/2$ donde se obtendrá de las ecuaciones (2.47) y (2.48) lo siguiente:

$$I = \left(\frac{\pi H}{2L} \right)^2 \times 10^5 \quad \text{Ec. 2.49}$$

Altura (H) es la amplitud de longitud de onda como se ilustra en la figura 2.20.

Porcentaje de inclinación (S) está dado por:

$$S = \frac{H}{L} \times 10^2 \quad \text{Ec. 2.50}$$

Porcentaje de elongación (e) para una onda senoidal es igual a:

$$e = \left(\frac{\pi H}{2L} \right)^2 \times 10^4 \quad \text{Ec. 2.51}$$

Porcentaje de planicidad (f) para una onda senoidal se expresa como sigue:

$$f = \left(\frac{\pi H}{2L} \right)^2 \times 10^2 \quad \text{Ec. 2.52}$$

2.6 PRINCIPALES PARÁMETROS QUE AFECTAN EL PERFIL DE LA CINTA Y LA PLANICIDAD

- Parámetros geométricos
- Parámetros del material
- Parámetros de fuerza

Los parámetros geométricos describen la geometría básica de los rodillos y la cinta como se muestra en la figura 2.21. Los principales parámetros geométricos de laminación que son considerados en el modelo son los siguientes:

- Diámetro del rodillo de apoyo, D_b .
- Tabla del rodillo de apoyo, L_b .
- Diámetro del cuello del rodillo de apoyo, D .
- Diámetro del rodillo de trabajo, D_w .
- Tabla del rodillo de trabajo, L_w .
- Diámetro del cuello del rodillo de trabajo, d .
- Longitud de contacto entre el rodillo de apoyo y del trabajo, L_c .
- Distancia que existe entre los engranes del rodillo de apoyo, L_{bb} .
- Distancia que existe entre los engranes del rodillo de trabajo, L_{wb} .
- Corona del rodillo de apoyo, C_b .
- Corona del rodillo de trabajo, C_w .

Los parámetros del material incluyen lo siguiente:

- Espesor de entrada de la cinta, h_i .
- Espesor de salida de la cinta, h_f .
- Ancho de la cinta, w .
- Corona de entrada de la cinta, c_i .
- Corona de salida de la cinta, c_θ .

- Perfil de la cinta.
- Parámetros de planicidad de la cinta.

El centro de corona de la cinta, chI , es seleccionado como el parámetro que representa el perfil de la cinta, como se muestra en la figura 2.11 y puede ser definido por la siguiente ecuación²³

$$chI = hc - hI \quad \text{Ec. 2.53}$$

Donde

hc = calibre central.

hI = espesor en la caída de orilla o espesor a una distancia I desde la orilla.

Los parámetros del material describen las propiedades elásticas de los rodillos, cinta, y elementos interfase entre los rodillos de apoyo y de trabajo así como entre los rodillos de trabajo y la cinta. Las propiedades elásticas de la cinta pueden ser matemáticamente expresados por el módulo de la cinta M el cual está definido por:

$$M = \frac{P}{w\Delta} \quad \text{Ec. 2.54}$$

Donde

P = Fuerza de separación del rodillo

w = Ancho de cinta.

Δ = Reducción de altura

Los parámetros de fuerza que afectan el perfil de cinta y planicidad son:

- Fuerza de separación de laminación, P
- Fuerza positiva de flexión de rodillos (corona negativa), Fp

- Fuerza negativa de flexión de rodillos (corona positiva), F_n

La cédula de laminación utilizada en este análisis junto con la fuerza de separación P/w y el modulo M son mostrados en la Tabla 2.06.

2.6.1 EFECTO DEL ANCHO DE LA CINTA EN LA CORONA DE LA CINTA

La corona que presente la cinta depende fuertemente del ancho de está. Esto es debido a que al cuerpo de la cinta se le transmite la carga de laminación del rodillo de trabajo, y este presenta una tabla de operación mayor con respecto al ancho de la cinta.

La teoría de deformación de una viga simple⁴, predice la deflexión presente en laminación, y ahí se aprecia como la corona de la cinta se incrementa con el aumento de la fuerza de separación. En donde está fuerza estará en relación directa con el ancho de la cinta, y con esto se tendrá un cambio en la corona para productos laminados. El estudio de la fuerza de separación por elementos finitos muestra que esta relación será válida para ciertos anchos de cintas. La figura 2.22 muestra la dependencia que existe entre la corona de la cinta y el ancho de la cinta.

Las siguientes observaciones se pueden hacer a partir de la figura antes mencionada:

- ❖ La corona de la cinta cambia sustancialmente con el ancho de la cinta, para cintas angostas la corona del centro se incrementa y para mayores la corona en el centro de la cinta irá decreciendo conforme se incremente el ancho de la cinta, estando en proporción con respecto a la tabla del rodillo.
- ❖ La corona base en el centro de la cinta generalmente será mayor para molinos de banda mayor.

- ❖ Conforme el módulo de la cinta se incrementa, la corona de la cinta decrece.

El efecto del ancho de la cinta sobre la corona central de la cinta puede ser relacionado con el parámetro k_w que es definido por la ecuación:

$$k_w = \frac{\Delta c}{\Delta w} = \frac{c - c_0}{w - w_0} \quad \text{Ec. 2.55}$$

Donde:

Δc = Cambio en la corona de la cinta

Δw = Cambio en el ancho de la cinta que produce cambio en la corona de la cinta Δc .

c, c_0 = Corona de la cinta correspondiente para el ancho de la cinta w y w_0 respectivamente.

2.6.2 EL EFECTO DE LA FUERZA DE SEPARACIÓN EN LA CORONA DE LA CINTA.

La fuerza de separación que es la carga que aplica el molino sobre el cuerpo de la lámina, es uno de los principales factores que afectan la corona de la cinta. Un incremento en la fuerza de separación incrementa la deflexión del rodillo de apoyo, y por consiguiente el diámetro del rodillo de trabajo resulta en una corona mayor que se reflejará en la cinta.

Debido a esta característica que es proporcional entre la fuerza resultante del rodillo de trabajo y la fuerza de separación, la corona de la cinta será proporcional a la fuerza de separación. Para la laminación de calibres delgados los cuales requieren una menor fuerza de separación P/w , el efecto de esta fuerza sobre la corona de la cinta será más notorio. Este efecto de la

fuerza de separación en la corona de la cinta podrá caracterizarse por el parámetro k_p que es expresado por la ecuación:

$$k_p = \frac{\Delta c}{\Delta \left(\frac{P}{w} \right)} = \frac{c - c_0}{\left(\frac{P}{w} - \frac{P}{w_0} \right)} \quad \text{Ec. 2.56}$$

Donde $\Delta(P/w)$ es el cambio en la fuerza de separación por unidad del ancho de la cinta que produce cambio de corona en la cinta Δc .

La figura 2.23 marca los resultados de los cálculos simultáneos de la relación entre la fuerza de separación y la contribución del efecto k_p y el ancho de la cinta w para varios castillos de un molino de laminación en caliente de 1,676 mm de ancho²⁴.

2.6.3 EFECTO DEL DIÁMETRO DEL RODILLO DE TRABAJO EN LA CORONA DE LA CINTA

Se estableció en un principio que el perfil de cinta se ve afectado por la rigidez del conjunto de laminación así como también del incremento del diámetro del rodillo de trabajo, al tener una mayor resistencia a la deformación por parte del conjunto de laminación esto resulta en un menor coronamiento de la cinta.

El efecto del diámetro del rodillo de trabajo en el centro de la corona de la cinta se puede mostrar por la contribución de k_{dw} que es expresada por la ecuación:

$$k_{dw} = \frac{\Delta c}{\Delta D_w} = \frac{c - c_0}{D_w - D_{w0}} \quad \text{Ec. 2.57}$$

Donde

ΔD_w = cambio en el diámetro del rodillo de trabajo (superior y inferior) que produce cambio en la corona en la cinta Δc

c, c_o = corona de la cinta correspondiente al diámetro de los rodillos de trabajo D_w y D_{wo} respectivamente.

La figura 2.24 muestra los resultados de cálculos simultáneos entre la contribución del efecto del rodillo de trabajo k_{dw} y el ancho de la cinta para varias estaciones del molino de 1676 mm de ancho de capacidad²⁴.

2.6.4 EL EFECTO DEL DIÁMETRO DEL RODILLO DE APOYO EN LA CORONA DE LA CINTA

Los diámetros de los rodillos de apoyo son usualmente de 1.5 a 2.5 veces más grandes que los de los rodillos de trabajo. En donde la rigidez de los rodillos con respecto a su deflexión es proporcional al diámetro del rodillo a la cuarta potencia, llegando a ser obvio que el perfil de la cinta es más sensible a un cambio en el diámetro de rodillo de apoyo que a un cambio en el diámetro del rodillo de trabajo.

La contribución del diámetro del rodillo de apoyo en la corona central de la cinta puede ser mostrada por la contribución del efecto del diámetro k_{db} que está dado por la ecuación:

$$k_{db} = \frac{\Delta c}{\Delta D_b} = \frac{c - c_o}{D_b - D_{bo}} \quad \text{Ec. 2.58}$$

Donde

ΔD_b = Al cambio en el diámetro de ambos rodillos de apoyo superior y inferior que produce cambio en la corona de la cinta Δc .

c, c_o = es la corona de la cinta correspondiente al diámetro del rodillo de apoyo D_b y D_{bo} respectivamente.

La figura 2.25 muestra la relación existente entre la contribución del efecto del rodillo de apoyo k_{db} y el ancho de la cinta para varias estaciones de un molino de 1676 mm de ancho. La relación entre la contribución del rodillo de trabajo k_{dw} y el ancho de la cinta se muestra en la figura 2.24, la contribución del efecto del rodillo de apoyo se incrementa con el aumento del ancho de la cinta²⁴.

2.6.5 EFECTO DE LA CORONA DE LA CINTA EN LA PLANICIDAD

Las ondulaciones presentes en la cinta laminada son causadas por un diferencial de elongación en la cinta a lo largo del ancho. Esta elongación está relacionada al cambio de corona de la cinta durante la reducción del pase y está dada por:

$$\delta = \frac{c_1}{h_1} - \frac{c_2}{h_2} \quad \text{Ec. 2.59}$$

Donde

δ = cambio de corona en la cinta por unidad

c_1, c_2 = corona de entrada y salida de la cinta respectivamente

h_1, h_2 = espesor de entrada y salida respectivamente

En donde $\delta < 0$, la cinta tenderá a desarrollar ondulaciones en la orilla. Convencionalmente cuando $\delta > 0$ la cinta tenderá a formar ondulaciones en el centro. Sin embargo, debido a los esfuerzos internos del material, la baja planicidad de las cintas no se da en la medida de los cambios en la corona relativa de la cinta δ y están dentro de un rango que es conocido como banda muerta de planeza.

En el modelo de la planeza que fue desarrollado por Shohet y Townsend²⁵ y que más tarde fue estudiado por Somers²⁶, la banda muerta de planeza en laminación en caliente estará dada por:

$$-80\left(\frac{h_2}{w}\right)^a < \delta < 40\left(\frac{h_2}{w}\right)^b \quad \text{Ec. 2.60}$$

De acuerdo con Shohet y Townsend, para aceros de bajo carbono, $a = b = 2$, mientras que Somers, tiene que $a = b = 1.86$

En la figura 2.26 muestra la relación de la corona con respecto al ancho de la cinta en función del espesor de salida para un molino laminador en caliente de 6 castillos de 1,676 mm de ancho. Eso muestra que la cinta después de las estaciones F1, F2 y F3 están dentro de las tolerancias de planicidad, mientras que la cinta después de la estación F4 está ligeramente dentro del parámetro de planicidad y después del F5 tiene orillas onduladas.

Otros métodos de cálculo de planicidad fueron propuestos por Guo y Schunk²⁷, Ishikawa²⁸ y Takashima²⁹.

El cambio de corona por unidad δ que se describe en la ecuación 2.59 está relacionado a los parámetros de planicidad usados en la siguiente relación:

$$\delta = \frac{\Delta L}{L} = \frac{c_1}{h_1} - \frac{c_2}{h_2} \quad \text{Ec. 2.61}$$

Donde

L = longitud de onda de la cinta

ΔL = diferencia entre la longitud de onda medio y en la orilla de la cinta

Así que la formula establecida para planicidad³⁰ puede ser expresada como sigue:

$$\text{Unidad } I \quad I = \left(\frac{c_1}{h_1} - \frac{c_2}{h_2} \right) 10^5 \quad \text{Ec. 2.62}$$

El porcentaje del índice de inclinación de onda estará dado por:

$$S = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{c_1}{h_1} - \frac{c_2}{h_2}} 10^2 \quad \text{Ec. 2.63}$$

2.7 PROPÓSITO Y ESTRATEGIA DEL CONTROL DEL PERFIL Y PLANICIDAD

El propósito principal del control del perfil y planicidad de la cinta en los molinos laminadores es alcanzar el perfil deseado sin exceder las tolerancias de planicidad requerida³¹. Para la aplicación en los molinos laminadores en caliente el sistema de control que comúnmente se diseña, debe cumplir con los siguientes objetivos:

- Rango de control de corona desde 0 a 75 μm .
- Tolerancias de coronas de cintas de aproximadamente $\pm 12.5 \mu\text{m}$.
- Planicidad de la cinta de aproximadamente 25 *UI*
- Reducción de orilla caída

En los molinos en frío, la corona está generalmente definida por la corona del laminado en caliente de la cinta.

Así que los principales objetivos en alcanzar en el molino en frío son:

- Planicidad de la cinta de acero con perfil de espesor a lo ancho de la cinta simétrico de 10 *UI*.
- Reducción de orilla caída

La planicidad ideal mencionada será representativa de los molinos de laminación en frío con características simétricas en cuanto al ancho de la cinta

entrante, aquellos materiales o cintas con un perfil de espesor entrante asimétrico, obtener una planicidad ideal de operación de máxima $30UI$ podrá considerarse estable, en donde posteriormente al aplicarse los procesos de recocido y seguidos del temple mecánico podrá entonces conseguirse planicidad aceptables en el rango de $10 UI$.

Para el desarrollo de un programa del control de espesor y de planicidad, se pueden considerar los siguientes pasos:

- Selección del control de planicidad óptimo y activador de planicidad.
- Identificar las etapas del proceso de laminado en el cual la corrección de cada perfil o planicidad se pueda realizar.
- Determinar la óptima secuencia cuando más de un actuador se aplica.
- Determinar la cantidad óptima de corrección que podría ser provista por cada actuador.

2.7.1 MÉTODOS PARA RECONOCIMIENTO DE LA FORMA DE LA CINTA.

Una de las tareas básicas del sistema de control de planicidad es reconocer la forma de la cinta que es detectada por medidores de forma. El propósito de reconocer la línea de forma es que será corregido apropiadamente por el activador de la forma.

Se han propuesto numerosas técnicas para el reconocimiento de la forma entre ellos se pueden mencionar los siguientes:

- Método del índice de forma³²⁻³³
- Método del vector de forma³⁴

- Método modelo integrado³⁵⁻³⁶
- Método de montaje encorvado³⁵⁻³⁹
- Método neurales⁴⁰

A continuación se da un breve comentario del método de índice de forma, el cual fue utilizado para tener una representación gráfica de la cinta laminada en frío en un molino reversible del tipo cuarto, grado de acero 1006 en donde la forma es explícita de una manera senoidal.

2.7.2 MÉTODO DE ÍNDICE DE FORMA

El método del índice de forma fue desarrollado por el Centro de Investigaciones Metalúrgicas de Bélgica (*C.R.M*)³² y pueden ser aplicado para reconocer la forma de la cinta, a partir del registro de un sensor de la altura y la longitud de onda, valores importantes de este método para el reconocimiento de la forma.

En este método la forma de la cinta puede ser llamada como índice de forma ρ y se calcula por medio de la determinación de una altura H y una longitud L , en donde se supone un comportamiento de forma senoidal del parámetro de planicidad (Fig. 2.27) y puede ser determinado el índice de forma por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{1}{L} \left[\int \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi H}{L} \right)^2 \cos^2 \frac{2\pi x}{L}} dx - L \right] \quad \text{Ec. 2.64}$$

Un resultado positivo indica que la cinta presenta una ondulación central, mientras que un valor negativo de " ρ " estará generalmente asociado a una ondulación hacia los extremos, propiamente la orilla de la cinta tal y como se muestra en la figura 2.28.

2.8 VARIACIÓN DE CALIBRE

Entre los factores que causan descalibre en función de la lubricación del molino reductor y que están relacionados a la velocidad del molino son:

- ❖ Espesor de la película de aceite aplicado en el engrane del rodillo de apoyo.
- ❖ Espesor de la película lubricante en la mordida

El espesor de la película de aceite suele depender de la velocidad del molino y de la fuerza de laminación.

Para mantener la película de aceite uniforme a bajas velocidades se suele utilizar un sistema de lubricación, el cual entra en operación cuando la velocidad del molino decrece. Cuando este sistema de lubricación en el molino se encuentra en uso, la viscosidad del aceite se mantiene constante, entonces es posible establecer una relación con respecto al espesor de la película de aceite h_f el cual podrá ser expresado por la siguiente ecuación:

$$h_f = \frac{\alpha(V/P)}{(V/P)+b} \quad \text{Ec. 2.74}$$

En donde

- V = velocidad del rodillo
- P = fuerza de laminación
- α, b = parámetros de ajustes

La figura 2.29 compara la ecuación 2.74 con las pruebas obtenidas por Kawamata⁴¹. Las observaciones se realizaron bajo condiciones de recalibración, por ejemplo con carga en el molino sin la cinta, las mediciones fueron tomadas también después de acelerar o desacelerar el molino así como manteniendo el molino a velocidad constante. La formación de la película de

aceite durante la aceleración y desaceleración, resulta en una variación del espesor de la película de aceite y son compensadas en función de la aceleración del molino.

El espesor de la película de aceite cambia con la velocidad en la misma manera como el espesor de la película de aceite en los engranes. Como la velocidad del molino se incrementa, mayor cantidad de lubricante es succionado dentro de la mordida, incrementando con esto el espesor de la película de aceite. A consecuencia de este proceso, el tamaño de la mordida decrece y se produce un adelgazamiento del espesor. El efecto acumulativo de la película de aceite y la variación del espesor de la película de aceite en la cinta se muestra en la figura 2.30. La cinta fue laminada en un molino de castillos sin un control de compensación. Un incremento en el espesor de la cinta se puede ver a velocidades bajas especialmente inferiores a 2.54 m/seg . El desarrollo del calibre es casi siempre independiente de la velocidad del molino cuando la velocidad es mayor a 5.080 m/seg ⁴².

2.8.1 EFECTO DE VIBRACIÓN EN EL CALIBRE

Vibración es un fenómeno que ocurre durante el laminado de la cinta y causa la apariencia de ligeras líneas oscuras a través del ancho de la cinta laminada. Ahí puede o no haber variación de calibre asociado con estas líneas marcadas^{43,44}.

En molinos de grandes producciones, el modo torsional hace que normalmente ocurra vibración con una frecuencia natural de un intervalo que va desde 5 a 20 Hz . En los sistemas de oscilación de resorte-masa que produce vibración, los rodillos actúan principalmente con inercia rotacional I y el par torsional actúa principalmente como resorte. Las vibraciones torsionales producen pequeñas fluctuaciones en el espesor de la cinta laminada, el cambio

máximo de calibre debido a la vibración, expresado como un porcentaje del espesor de la cinta laminada sin vibración estará dado por la ecuación (2.75):

$$\delta = \frac{\pi f_t D_w \theta_m}{V} \times 100 \quad \text{Ec. 2.75}$$

Donde

θ_m = desplazamiento angular máximo del rodillo de trabajo asociado con la vibración

f_t = frecuencia de vibración torsional, **Hz**

D_w = diámetro del rodillo de trabajo

V = velocidad de la cinta

La frecuencia torsional de vibración f_t , se puede calcular mediante la ecuación:

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{J}} \quad \text{Ec. 2.76}$$

Donde

k = Constante torsional de la cinta

J = Inercia rotacional total

La inercia rotacional total J estará dada por:

$$J = J_w + \left(\frac{D_w}{D_b}\right)^2 J_b \quad \text{Ec. 2.77}$$

Donde:

J_w, J_b = es la inercia rotacional de un rodillo de trabajo y un rodillo de apoyo respectivamente

D_w, D_b = diámetros de los rodillos de trabajo y de apoyo respectivamente.

La longitud de onda de la vibración torsional es relativamente grande, por ejemplo, una vibración con frecuencia de 10 **Hz** podría corresponder a una longitud de 1,270mm en una velocidad de 760 **m/min** (2,500 **ft/min**).

2.8.2 MODO VERTICAL 3^{er}. OCTAVO.

El modo vertical de 3^{er}-octavo de vibración usualmente ocurrirá en el intervalo del 3^{er}. octavo musical (entre 128 y 258 Hz) y es caracterizado por una rápida presencia, alcanzando una máxima amplitud dentro de pocos segundos (Fig. 2.31)⁴⁵, este modo de vibración resultará en severas variaciones de calibre en el laminado de la cinta y muy pronunciadas fluctuaciones de tensiones, lo cual frecuentemente causa fractura de cinta.

De acuerdo a Roberts¹⁴, la frecuencia resonante de 3^{er} octavo de vibración f_3 podría ser definida desde la siguiente ecuación:

$$f_3 = \frac{7600}{D_b} (Hz) \quad \text{Ec. 2.78}$$

Donde

D_b = diámetro del rodillo de apoyo

El modo vertical de 3^{er} octavo está usualmente caracterizado por una frecuencia natural de 130 Hz . Una similar vibración se ha observado en molinos quintos de reducción de lámina estañada en un rango de frecuencia entre 230 a 260 Hz . La vibración de frecuencia más alta no parece ser tan severa como a baja frecuencia y está usualmente acompañada por una modulación en el rango de 10-20 Hz .

2.8.3 MODO VERTICAL 5^{to} OCTAVO

Este modo ocurre en molinos de alta velocidad y exhibe una frecuencia natural en el rango de 500 a 700 Hz . De acuerdo a Roberts, la frecuencia de vibración de 5^{to}-octavo se puede aproximar a la siguiente ecuación:

$$f_5 = \frac{14200}{D_w} (Hz) \quad \text{Ec. 2.79}$$

Donde

D_w = diámetro del rodillo de trabajo

Contrariamente al tercer modo de vibración, el 5^{to} modo de vibración tiende a desarrollarse gradualmente y es acompañada por el desarrollo de marcas de vibración en los rodillos. Estas marcas de rodillos pueden excitar el molino dentro de resonancia y causar líneas paralelas impresas en la superficie de la lámina. El modo 5^{to} de vibración no afecta el calibre de la cinta sólo es perjudicial desde el punto de vista estético⁴⁶.

2.8.4 DEFINICIÓN Y CAUSAS DE LA EXCENTRICIDAD DEL RODILLO

La excentricidad del rodillo puede ser descrita por variaciones de calibre cíclicas en materiales laminados causados por irregularidades en los rodillos del molino y sus engranes⁴⁷. Estas irregularidades pueden incluir lo siguiente:

- Excentricidad de los cojinetes del rodillo de apoyo con respecto al cuerpo del rodillo.
- Rodillo de trabajo ovalado y rodillos de apoyo con una determinada diferencia entre las dimensiones de su diámetro.
- Excentricidad de las mangas rotacionales de los cojinetes.
- No-uniformidad del cuerpo del rodillo de apoyo.
- No-uniformidad de los cojinetes.
- No-uniformidad de las mangas del cojinete del rodillo de apoyo.
- No-uniformidad de los rodillos en los cojinetes.

El descalibre del resultado cíclico es comúnmente llamado excentricidad de laminación. Las causas de la excentricidad de laminación se pueden clasificar dentro de los siguientes grupos:

Imperfecciones de diseño - son principalmente rasgos de diseños de los cojinetes, tipo de película de aceite de los cojinetes, la cual produce una no-uniformidad en los cojinetes rotativos de los rodillos de apoyo.

Imperfecciones de ensamblaje – son debido a grietas y material extraño, los cuales se dan cuando se desensambla o ensambla los cojinetes y también durante el montaje de los rodillos y en las chumaceras. En el caso de los cojinetes del rodillo, la excentricidad puede deberse por un impropio montaje de los cojinetes⁴⁸.

Distorsión del rodillo y sus cojinetes – la distorsión o pandeamiento de ambos rodillos y los cojinetes puede ocurrir después de cargar más allá de su capacidad de diseño, resultando en una deformación plástica local y ruptura del metal. La sobrecarga de los cojinetes del rodillo de apoyo producirá distorsión de la geometría de laminación como resultado del cambio de cojinetes con respecto al árbol de laminación⁴⁹. Cuando el desgaste de los rodillos y cojinetes no es uniforme en su periferia, causara excentricidad de laminación.

Imperfecciones de polvo o molienda – imperfecciones de pulverización son causadas por las deficiencias en el equipo de limpieza y por negligencias en la operación y mantenimiento⁵⁰.

El efecto de la excentricidad del rodillo de apoyo en la fuerza de separación - Cuando la posición de los actuadores de la mordida se mantiene constante por un sistema de control, estos estarán dentro de cambios periódicos largos, con una posición angular del rodillo fija y está en función de la mordida producida por la excentricidad de los rodillos, si la mordida se cierra, la excentricidad de rotación de los rodillos producirá cambios en la fuerza de separación.

La variación cíclica de la fuerza de separación no será de forma senoidal debido a que es afectada por imperfecciones del rodillo, cambios de espesor en el material y dureza, así como variaciones de tensión en la cinta. La frecuencia principal del ciclo de tiempo será dependiente de la frecuencia de rotación del rodillo de apoyo (Fig. 2.32).

La excentricidad del rodillo muestra un fenómeno de golpeteo causado por la diferencia en el diámetro del rodillo de apoyo superior con respecto al inferior (Fig. 2.33), un ciclo de golpeteo T_b es el período de tiempo durante el cual uno de los rodillos de apoyo tiene un diámetro menor, rotando una revolución más que el otro⁵¹.

El tiempo de ciclo de golpeteo T_b está dado por:

$$T_b = \frac{\pi}{V} \frac{D_1 D_2}{D_2 - D_1} \quad \text{Ec. 2.80}$$

Donde

D_1, D_2 = diámetros mayor y menor de los rodillos de apoyo respectivamente, *mm*.

V = Velocidad del molino, *mm/seg*

El fenómeno de golpeteo es fácilmente registrado por la variación de la fuerza de laminación durante la rotación de los rodillos dentro de condiciones de recalibración, durante cada ciclo, la fuerza de separación varía de un valor mínimo a máximo regresando al valor mínimo como se muestra en la figura 2.33. la variación de la fuerza de separación es máxima cuando la posición angular del rodillo de apoyo es tal que la excentricidad de los rodillos de apoyo superior e inferior se juntan y es mínima cuando la excentricidad sale de la mordida.

2.9 DEFECTOS DE PLANICIDAD GENERADOS POR LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN EL ESPESOR.

Los defectos de planeza pueden ser causados por diferentes condiciones de laminación tanto en la parte superior o inferior de la mordida de laminación¹⁴

Los principales defectos son:

- Desviación en planeza (figura 2.34a)
- Comba (figura 2.34b)
- Torcido (figura 2.34c)
- Orilla ondulada (figura 2.34d)
- Desviación en rectitud (figura 2.34e)

Desviación de planeza. Este defecto es muy común y es debido a una variación transversal del esfuerzo a través de la dirección del espesor (figura 2.34a), así como también en la dirección del ancho (forma).

En la figura 2.35 se ilustra una distribución de esfuerzo (a través de la dirección del espesor) mostrando un esfuerzo tensil en la superficie de la cinta y un esfuerzo compresivo a mitad del plano de la cinta.

Un componente asimétrico a esta distribución de esfuerzo puede deberse a los siguientes factores:

- Diferencia de diámetros del rodillo de trabajo tanto superior con respecto al inferior.
- Velocidades periféricas diferentes para los rodillos de trabajo.
- Diferentes condiciones de fricción a lo largo de las dos áreas de contacto, usualmente debido a diferentes superficies rugosas de laminación.

- El plano que contiene los rodillos de trabajo no es perpendicular al plano de la cinta.
- La cinta tiende a flexionarse en la entrada y salida del material.

2.9.1 COMBA Y ORILLA ONDULADA

El defecto comba es una distorsión simétrica, la figura 2.34b muestra una sección transversal del defecto antes mencionado. El defecto orilla ondulada, se define como una forma asimétrica en donde solo un medio de la cinta o menos se ve afectada, ver figura 2.34d.

Estos defectos son atribuibles a la flexión horizontal del rodillo de trabajo a diferentes grados y tiende a ser más notoria con rodillos de menor rigidez. La flexión horizontal puede darse por coronas excesivas en los rodillos de trabajo. Así como también debido a la influencia de la fuerza de separación y por los rodillos de apoyo, uno de los rodillos de trabajo tiende a flexionarse más hacia la salida del molino que el otro, dentro de estas condiciones cuando un elemento de la cinta sale desde la mordida de laminación en la discontinuidad de la deformación plástica, las capas de la superficie de una de las caras están sujetas a diferentes tipos de esfuerzos en una dirección transversal que la otra cara, así que cuando la cinta es liberada de cualquier fuerza externa, la cinta predice una sección curvada con la superficie que estaba dentro de alta tensión o un esfuerzo compresivo en el centro de curvatura, la figura 2.34b ilustra la manera en la cual el defecto de comba se desarrolla. El defecto de orilla ondulada puede ser por consiguiente del defecto de comba y puede resultar de una combinación del abombamiento horizontal y des-alineamiento del rodillo de trabajo.

Para minimizar los problemas asociados con comba y el ondulado de orilla, el coronamiento de los rodillos de trabajo deberá ser mínimo y así la

tendencia para que los rodillos sean flexionados horizontalmente en la dirección opuesta de laminación también disminuye. Otra causa probable que produce estos defectos puede atribuirse al reducir la fuerza de separación con el uso de lubricantes o al manejar altas tensiones que habiliten el problema⁸.

2.9.2 TORCIDO

El defecto de torcido es causado por esfuerzos residuales de diferentes magnitudes actuando en ambas caras de la superficie en la dirección de laminación y transversal. Cada lámina cortada exhibe un defecto que tiende a achinarse en una manera idéntica como se ilustra en la figura 2.34c, Se cree que el defecto se atribuye a un des-alineamiento de los rodillos de trabajo, no solamente a estos sino también con respecto a la tensión aplicada por los enrolladores a la salida de molino. Es de esperarse que este tipo de defecto se puede eliminar o mejorar con una alineación exacta de los rodillos del molino y el de bajar las tensiones a la salida del molino en el enrollador⁸.

2.9.3 DESVIACIÓN EN RECTITUD

La desviación en rectitud es un defecto que algunas veces se refiere como un ligero abombamiento y se manifiesta por una curva lateral de la cinta lo cual es ilustrada en la figura 2.34e, este defecto es conocido comúnmente con el nombre de camber y puede ser el resultado del proceso de laminación, pudiendo presentarse de la siguiente manera: *1)* Al tener en la cinta una mordida de laminación uniforme pero con una sección de corona asimétrica lo cual da una forma ondulada en el molino, ó *2)* Puede ser lo contrario contar con una laminación de cinta aceptable en el molino pero con una mordida de laminación no uniforme. En donde la recuperación del defecto puede realizarse

por medio de ajuste de la mordida de laminación que pueda eliminar este problema.

Los defectos en los perfiles de laminación pueden ser eliminados; la figura 2.36 muestra la intensidad del perfil de espesor para el perfil de mordida de laminación en frío, en donde la cinta está esencialmente dentro del plano de deformación y la figura 2.37 muestra el trabajar con espesores altos para tratar de eliminar defectos como ondulación durante la laminación. Cuando el perfil de la cinta se puede mantener, es recomendable tener buena planicidad para eliminar los defectos de forma; se debe de tener como objetivo para la eliminación de defectos de forma 12 *UI* para el proceso de laminación en frío, este número bajaría para espesores delgados⁸.

CAPÍTULO 2

TABLAS

Tabla 2.01. Claves para el perfil de espesor de la cinta de acero de bajo carbono 1006.

Parámetro	Símbolo	Definición	Formula
Calibre Central	hc	espesor medido en el centro de la cinta a lo ancho del material	-
Espesor en caída de orilla a un lado del motor principal	hJ'	Espesor medido en una distancia J' del lado del motor principal	J' = 50 a 75 mm
lado del operador	hJ''	Espesor medido en una distancia J'' del lado del operador del molino	J'' = 50 a 75 mm
Promedio	hJ	Promedio aritmético de hJ' y hJ''	$hJ = (hJ' + hJ'')/2$
Espesor de orilla del lado del motor principal	hl'	Espesor medido en una distancia l' del lado del motor principal	l' = 9.5 a 25 mm
lado del operador	hl''	Espesor medido en una distancia l'' del lado del operador del molino	l'' = 9.5 a 25 mm
Promedio	hl	Promedio aritmético de hl' y hl''	$hl = (hl' + hl'')/2$
Espesor en orilla del lado del motor principal	he'	Espesor medido en una distancia e' del lado del motor principal	e' = 2 a 3 mm
lado del operador	he''	Espesor medido en una distancia e'' del lado del operador del molino	e'' = 2 a 3 mm
Promedio	he	Promedio aritmético de he' y he''	$he = (he' + he'')/2$

Tabla 2.02 Tipos de corona para la cinta de acero de bajo carbono.

Parámetro	Símbolo	Definición	Formula
Calibre Central	hc	espesor medido en el centro de la cinta a lo ancho del material	-
Centro de Corona total	chl	Diferencia entre el calibre central y el promedio aritmético del espesor de caída de orilla	$chl = hc - hl$
parcial	chJ	Diferencia entre el calibre central y el promedio aritmético del espesor de orilla	$chJ = hc - hJ$
Corona a un lado del lado del motor principal	chl'	Diferencia entre el calibre central y el espesor de caída de orilla del lado del motor	$chl' = hc - hl'$
lado del operador	chJ'	Diferencia entre el calibre central y el espesor de orilla del lado del operador	$chJ'' = hc - hJ''$

Tabla 2.03. Claves para el perfil de espesor con respecto a su asimetría y cuña de la cinta de acero.

Parámetro	Símbolo	Definición	Fórmula
Perfil de cuña Del lado del motor principal		perfil de la cinta con un calibre central siendo menor que el de la orilla caída del motor y mas grande que el del operador	$hl' > hc > hl$
Lado del operador		perfil de cinta con calibre central menor que del lado de la zona de orilla y mas grande que la del motor	$hl'' > hc > hl$
Perfil Nivelado	δhl	Diferencia entre el calibre de la orilla zona 1 del operador con respecto al motor	$\delta hl = hl' - hl''$

Tabla 2.04. Clasificación de zonas del perfil de espesor con respecto al ancho de la cinta de acero definidas: como zonas de orilla caída, orilla en extremo del espesor, y rugosidad de la cinta - picos y valles.

Parámetro	Símbolo	Definición	Formula
Orilla caída:			
• Lado motriz	eh'	Diferencia entre la orilla caída del lado del operador y el la caída al extremo del espesor	eh'=hJ'-hl'
• Lado del operador	eh''	Diferencia entre la orilla caída del lado del operador intermedio con respecto al extremo del espesor.	eh''=hj''-hl''
• Promedio	eh	Promedio aritmético de eh' y eh''	eh'=(eh'+eh'')/2
Orilla caída extremo:			
• Lado motriz	fh'	Diferencia entre el extremo de orilla lado motriz y el lado motriz del espesor	fh'=hl'-he'
• Lado del operador	fh''	Diferencia entre el extremo de orilla lado operador y el lado del operador del espesor	fh''=hl''-he''
• Promedio	fh		fh'=(fh'+fh'')/2
• Picos y Valles	hs	Desviación en el espesor nominal con respecto al valor máximo y mínimo en el perfil de la cinta que se proyecta hacia la pared rectangular del ancho predeterminado b y la altura h.	b=10 mm h=10µm

Tabla 2.05 Parámetros para la evaluación cuantitativa de la planicidad.

Parametro	Unidad l (l)	Altura (H)	% Inclinacion (Steepness) (S)	% Elongacion (e)	% Planicidad (f)
Unidad l (l)	1	$\frac{2L}{\pi} \sqrt{lx10^{-5}}$	$\frac{2}{\pi} \sqrt{lx10^{-1}}$	$lx10^{-1}$	$lx10^{-3}$
Altura (H) (pico a pico)	$\left(\frac{\pi H}{2L}\right)^2 10^6$	1	$\left(\frac{H}{L}\right) 10^{-2}$	$\left(\frac{\pi H}{2L}\right)^2 10^{-4}$	$\left(\frac{\pi H}{2L}\right)^2 10^{-2}$
% Inclinacion (Steepness) (S)	$\left(\frac{\pi S}{2L}\right)^2 10^{-5}$	$\frac{LS}{100}$	1	$\left(\frac{\pi S}{2}\right)^2$	$\left(\frac{\pi S}{2}\right)^2 10^{-2}$
% Elongacion (e)	$e \times 10$	$\frac{2L\sqrt{e}}{\pi} x10^{-2}$	$\frac{2L\sqrt{e}}{\pi}$	1	$e \times 10^2$
% Planicidad (f)	$f \times 10^3$	$\frac{2L\sqrt{f}}{\pi} x10^{-1}$	$\frac{2\sqrt{f}}{\pi} x10$	$f \times 10^2$	1

Tabla 2.06 Parámetros de laminación utilizados en un análisis de elementos finitos en 3D.

Numero de stand	Espesor de salida de la cinta (mm)	Fuerza de rolado por unidad de ancho (t/mm)	Modulo de cinta (kg/mm ²)
-	33.000	-	-
F1	18.160	1.107	75
F2	10.540	1.045	137
F3	6.350	1.023	244
F4	4.060	0.962	420
F5	2.845	0.845	695
F6	2.286	0.580	1,038
F7	2.000	0.384	1,343

FIGURAS



Figura 2.01. Molino de laminación en caliente continuo del tipo cuarto, compuesto por varios castillos de trabajo.

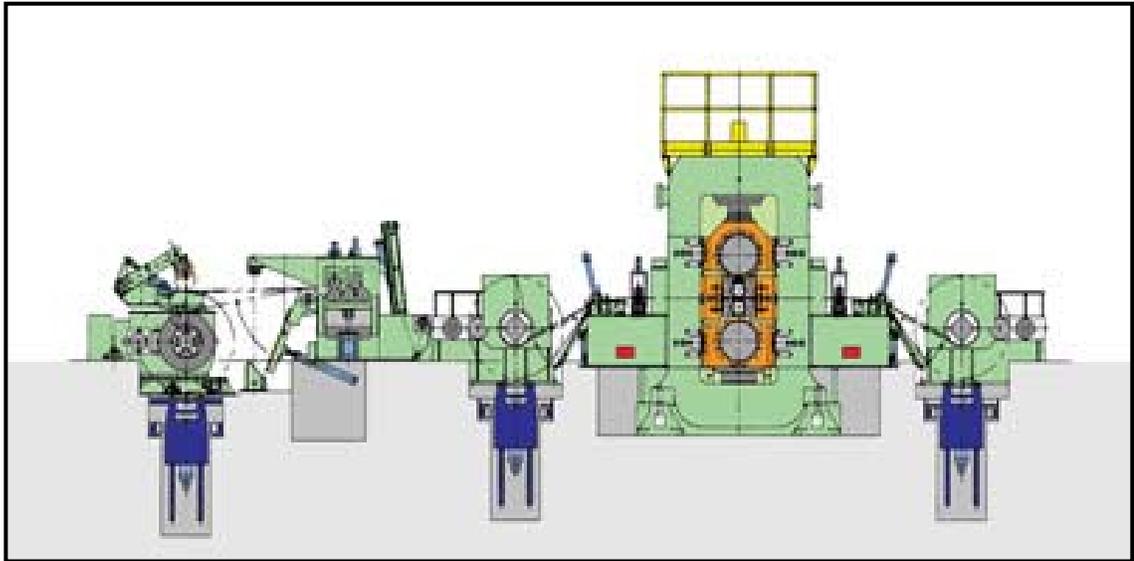


Figura 2.02. Molino de laminación en frío reversible del tipo cuarto, utilizado para el proceso de laminación en frío de cintas de ancho angosto.

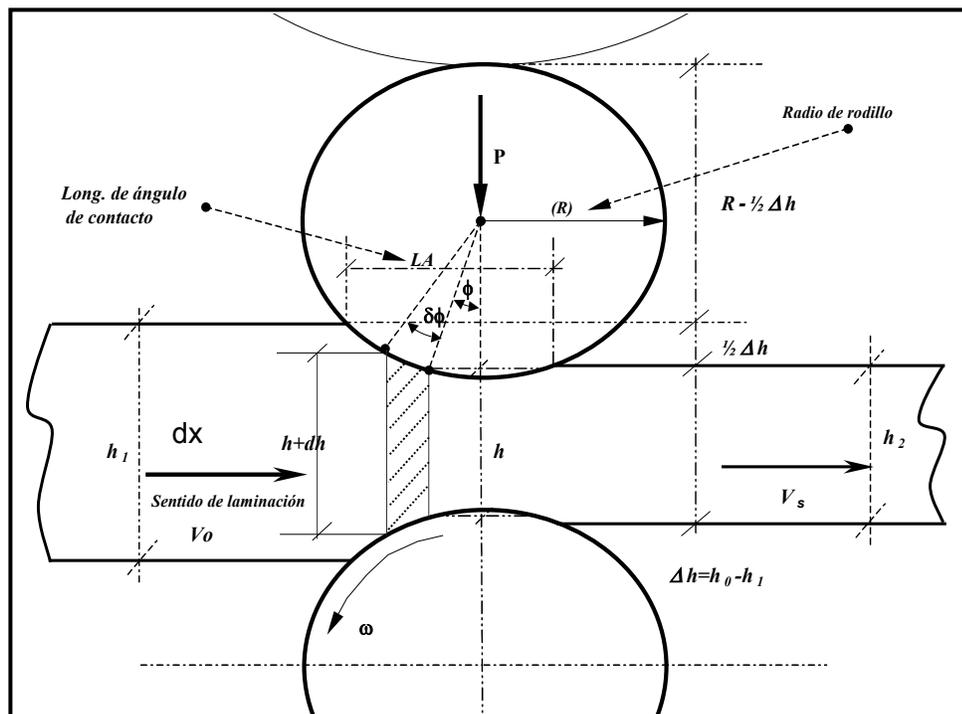


Figura 2.03. Análisis geométrico para un elemento dentro de deformación planar en el proceso de laminación en frío.

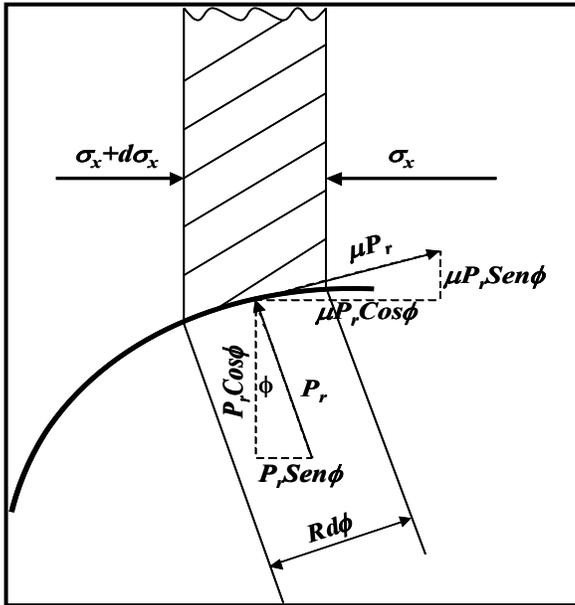
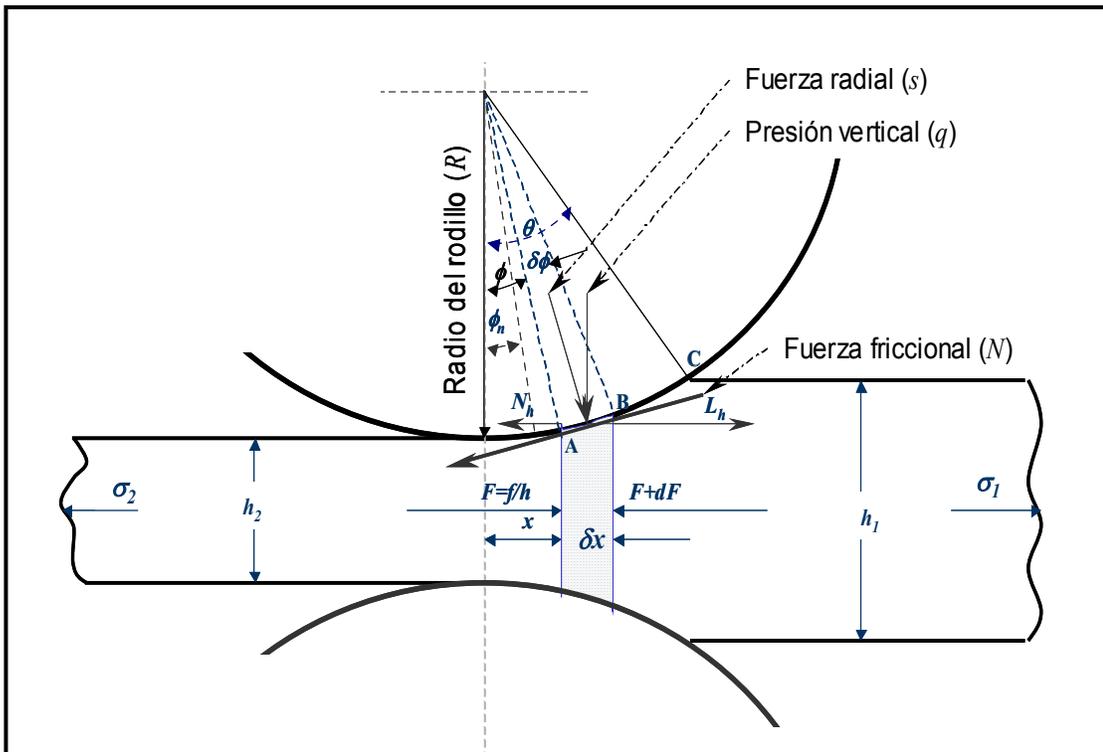


Figura 2.04. Esfuerzos actuando sobre el diferencial de un elemento en el área de contacto de

Figura 2.05. Fuerzas actuando en la mordida de laminación.



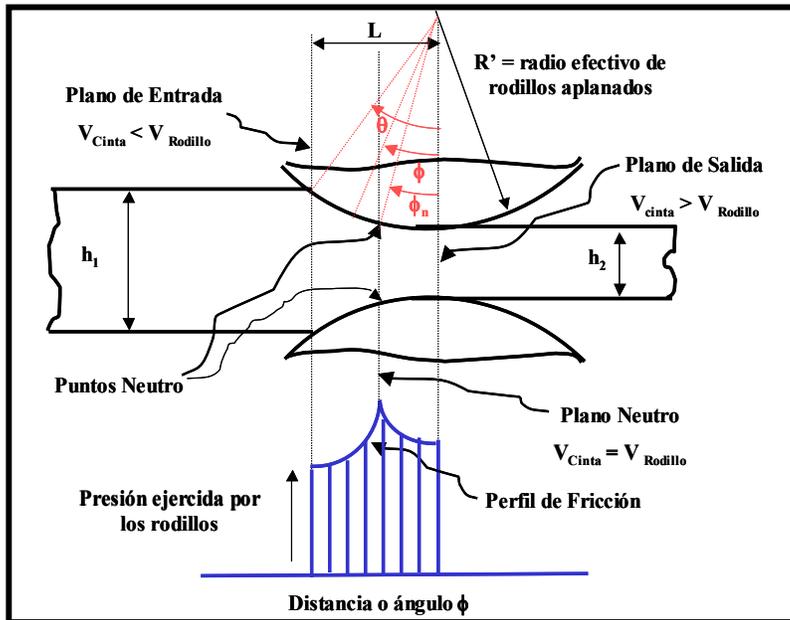


Figura 2.06.
Dibujo esquemático que ilustra las colinas de fricción en la mordida de laminación

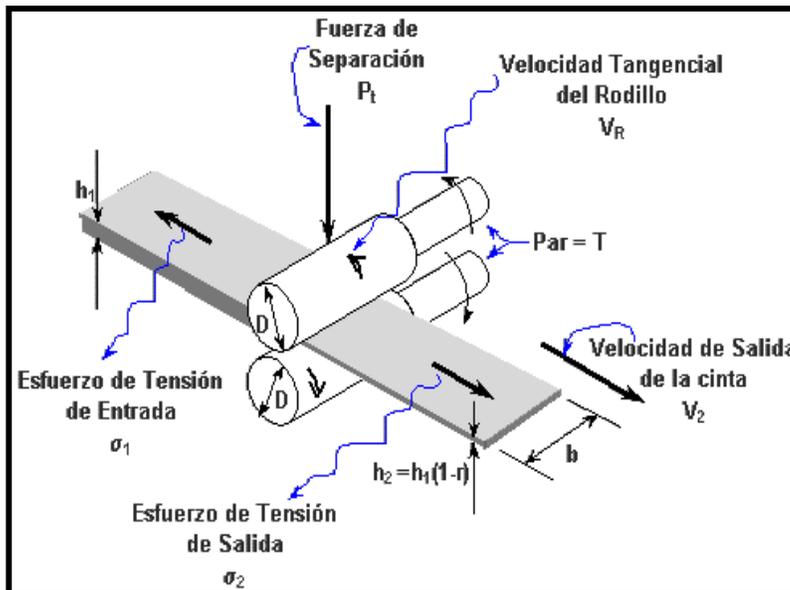


Figura 2.07.
Dibujo esquemático que ilustra los componentes más importantes del proceso de laminación.

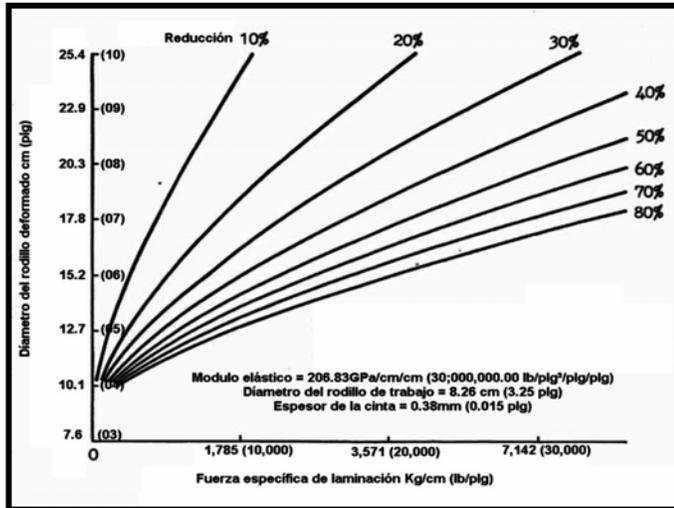


Figura 2.08. Gráfica que representa la ecuación 2.35.

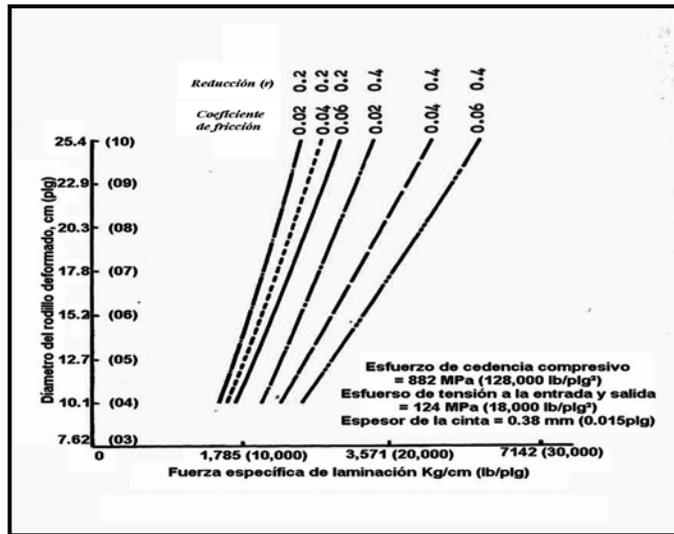


Figura 2.09. Gráfica que representa la ecuación 2.36.

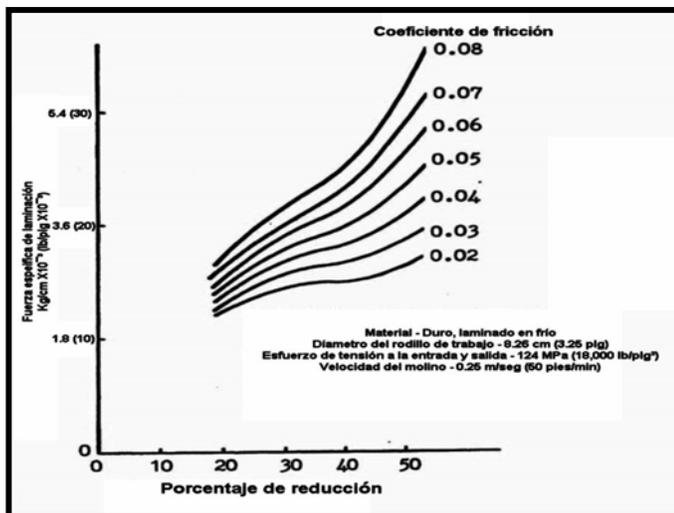


Figura 2.10. Gráfica que representa la ecuación 2.37.

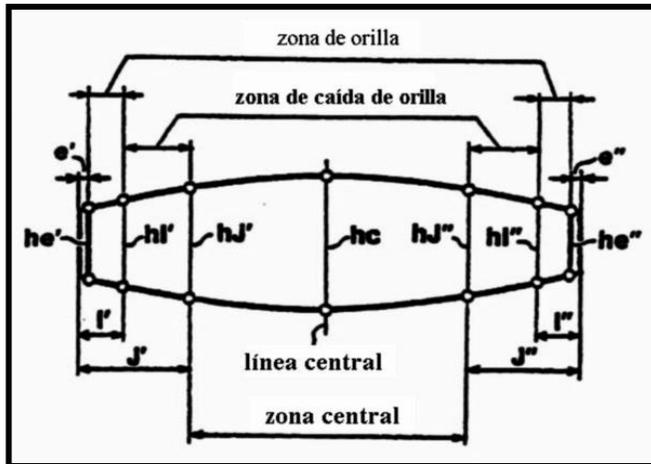


Figura 2.11. Corte transversal a lo ancho de la cinta

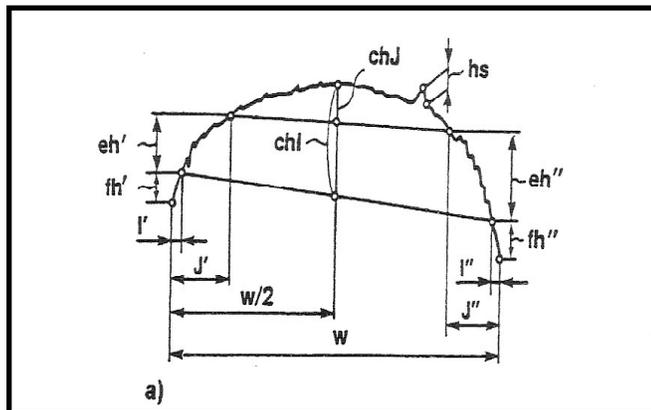


Figura 2.12. Principales parámetros del perfil de espesor medidos a lo ancho de la cinta.

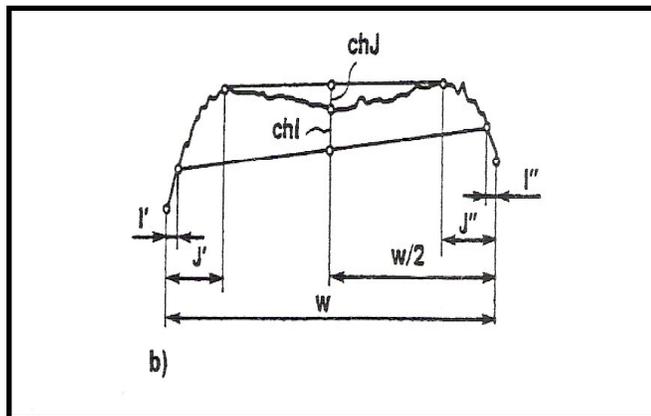


Figura 2.13. Principales parámetros del perfil de espesor medidos a lo ancho de la cinta - coronas.

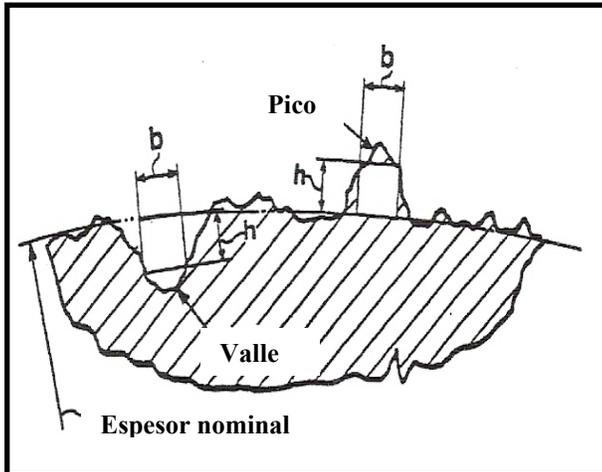


Figura 2.14. Definición de picos y valles.

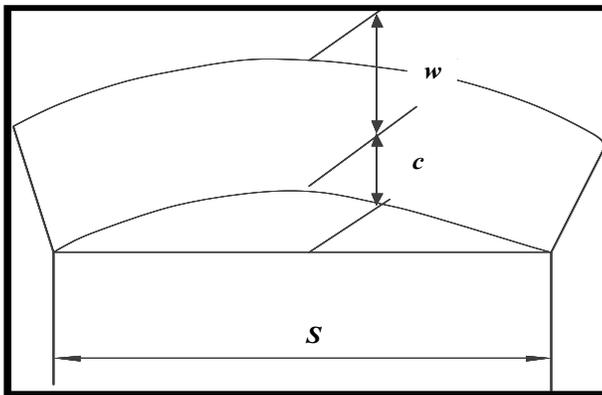


Figura 2.15. Parámetro geométrico de desviación de rectitud.

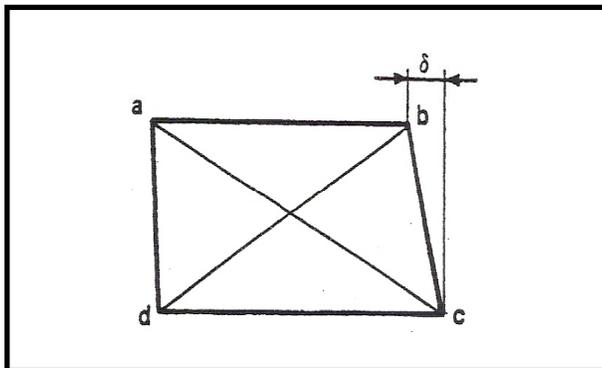
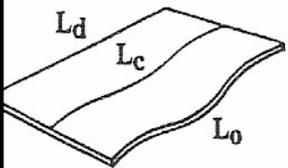
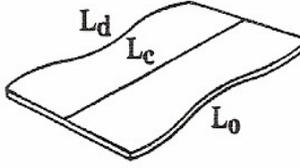
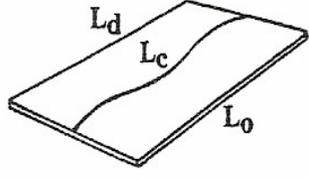


Figura 2.16. Parámetro geométrico de descuadre.

Figura 2.17. Relaciones cualitativas entre elongación y planicidad

Ondulación solo un lado de la orilla	Ondulación ambos lados de la orilla	Ondulación central
		
$L_d < L_c < L_0$ $(L_d > L_c > L_0)$	$L_c < L_d$ $L_c < L_0$	$L_c > L_d$ $L_c > L_0$

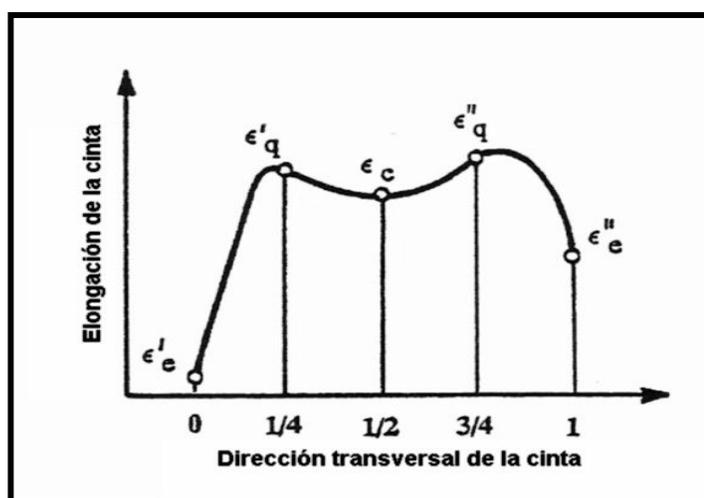


Figura 2.18. Longitud de la cinta en dirección transversal.

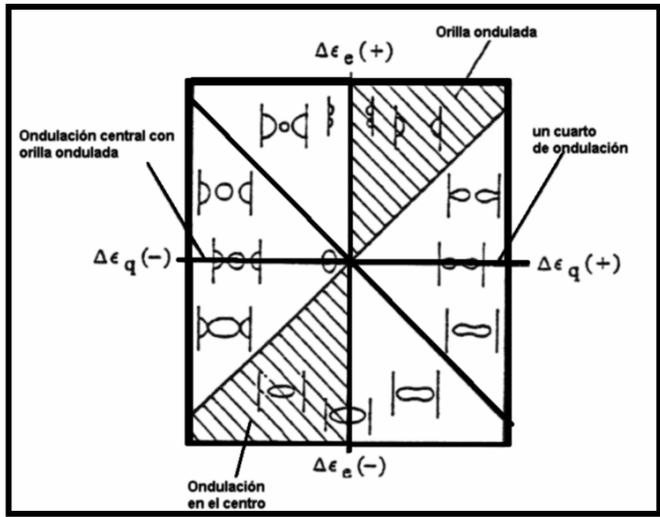


Figura 2.19. Relación cualitativa entre el diferencial de elongación a través del ancho y planicidad.

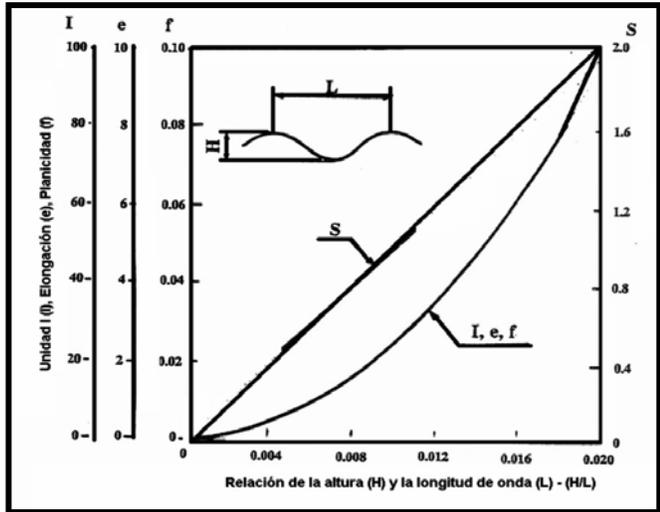


Figura 2.20. Relación entre varios parámetros de planicidad.

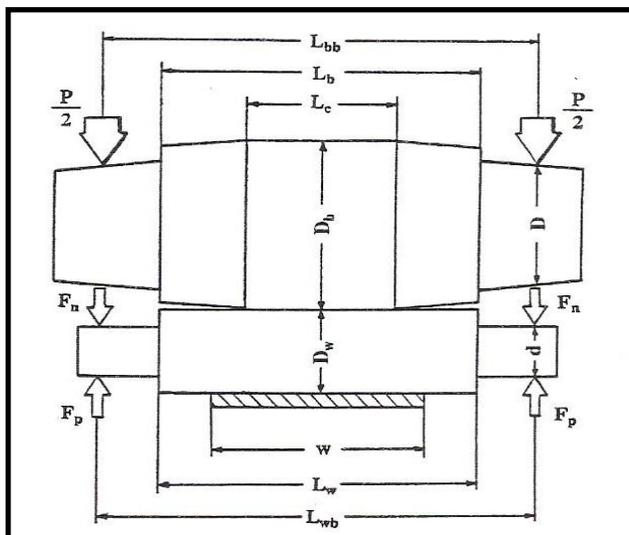


Figura 2.21. Principales parámetros que afectan el perfil de cinta y planicidad en un molino cuarto.

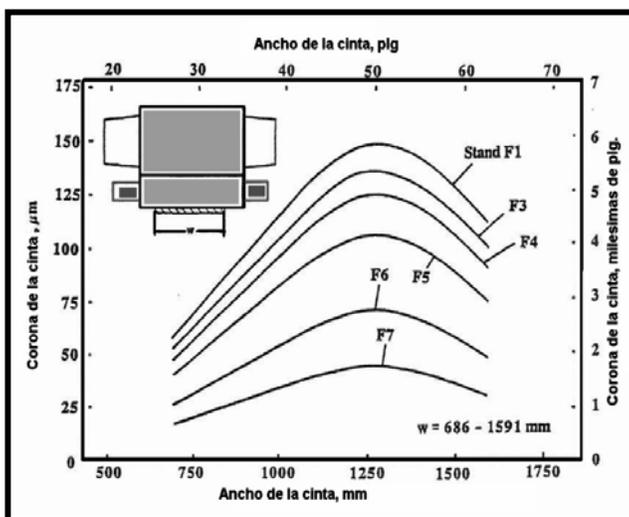


Figura 2.22. Variación de la corona central de la cinta con el ancho para un molino laminador en caliente de 1,676 mm.

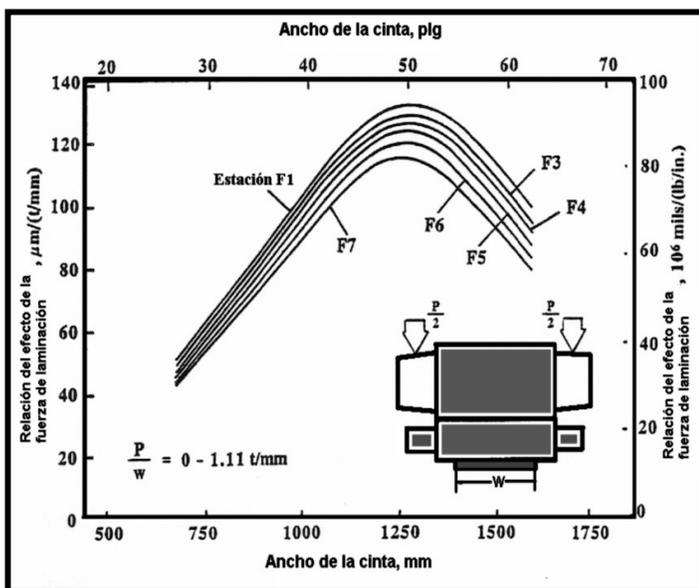


Figura 2.23. Efecto de la variación de la fuerza de separación de laminación con el ancho de la cinta para un molino laminador en caliente de 1676 mm.

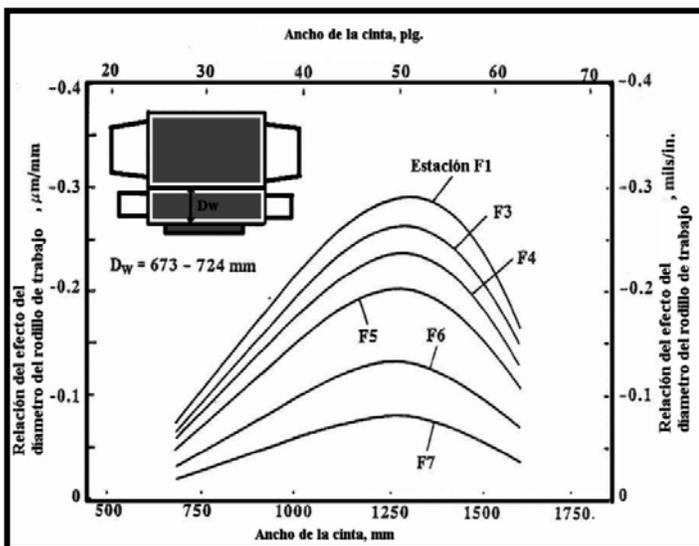


Figura 2.24. Variación del diámetro del rodillo de trabajo con el ancho de cinta para un molino laminador en caliente de 1676 mm.

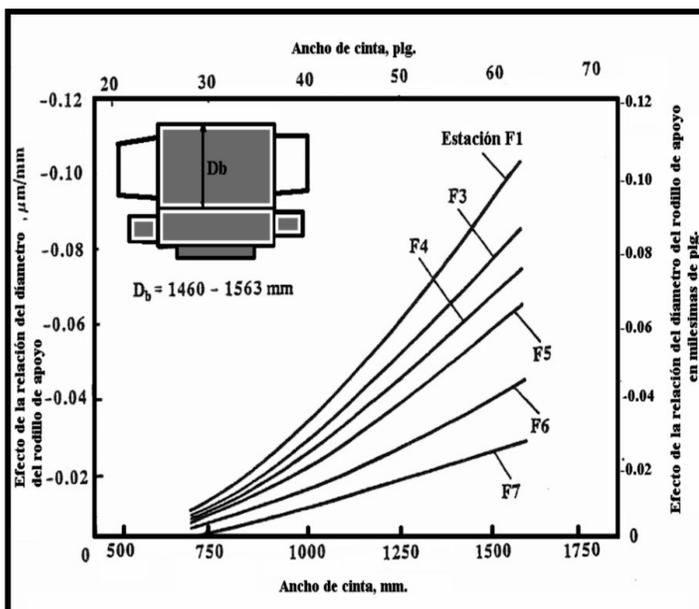


Figura 2.25. Variación del efecto del diámetro del rodillo de apoyo con el ancho de la cinta para un molino laminador de 1676 *mm*.

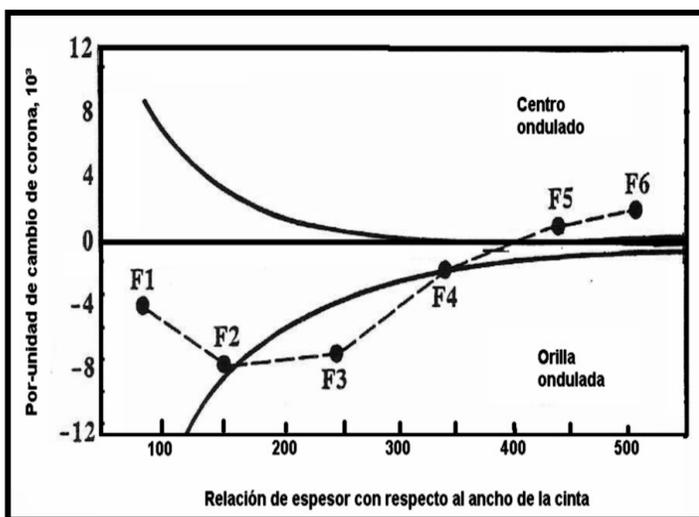


Figura 2.26. Relación del cambio de corona con respecto al ancho de la cinta en función del espesor de salida de la cinta para un molino laminador de 6 castillos a un ancho de 1,676 *mm*.

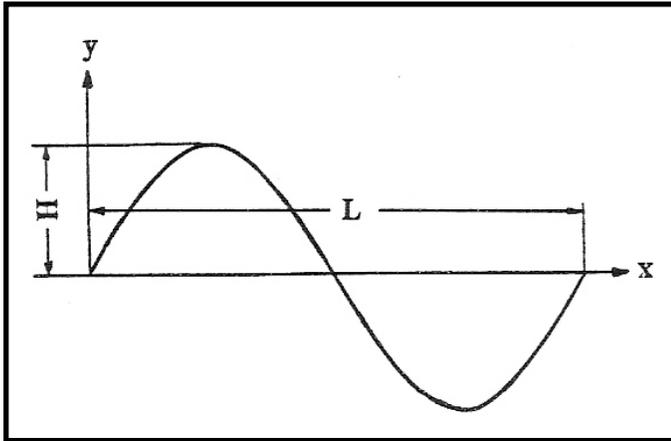


Figura 2.27 Aproximación senoidal del defecto de forma de la cinta.

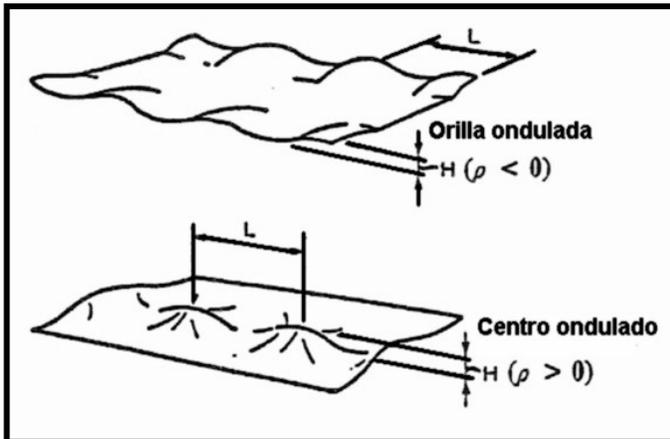


Figura 2.28. Parámetros del perfil de cinta.

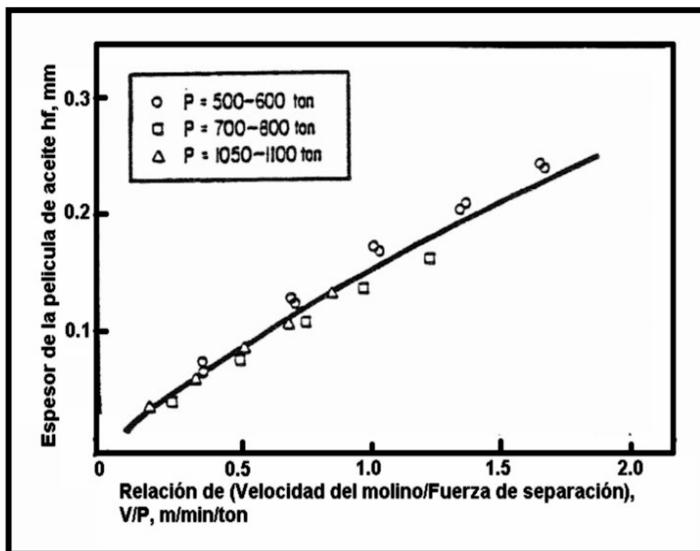


Figura 2.29. Relación entre espesor de la película de aceite h_f y la relación de velocidad v a la fuerza de separación P .

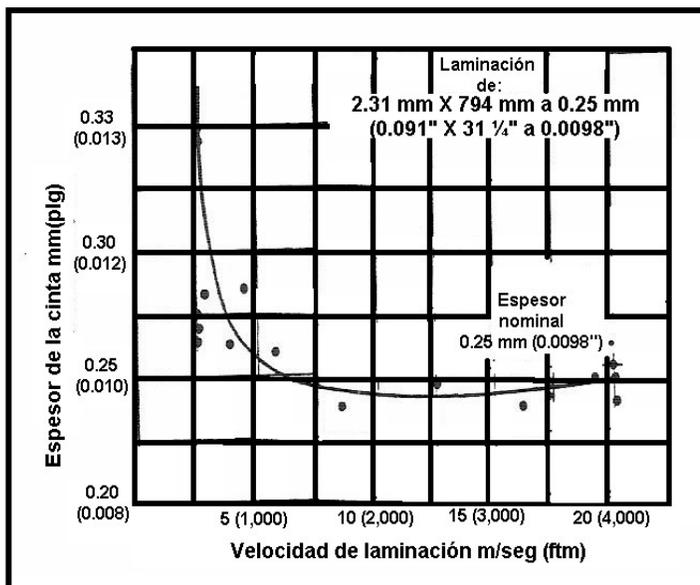


Figura 2.30. Espesor de la cinta a la salida del castillo quinto de un molino en frío en función de velocidad sin compensación del efecto de velocidad.

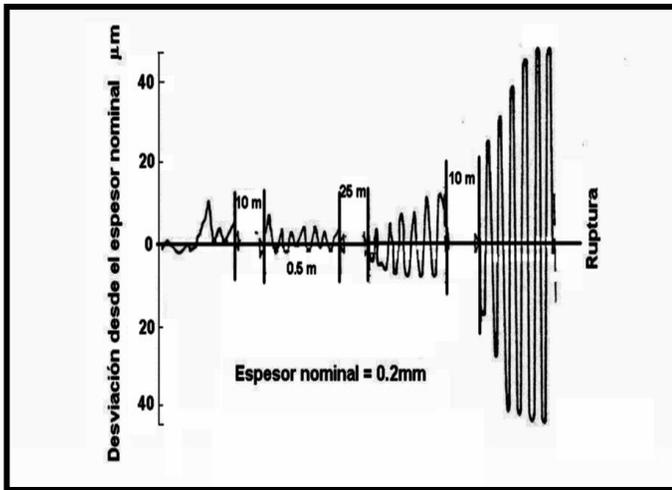


Figura 2.31. Variación del espesor de la cinta durante vibración en el castillo quinto del molino en frío.

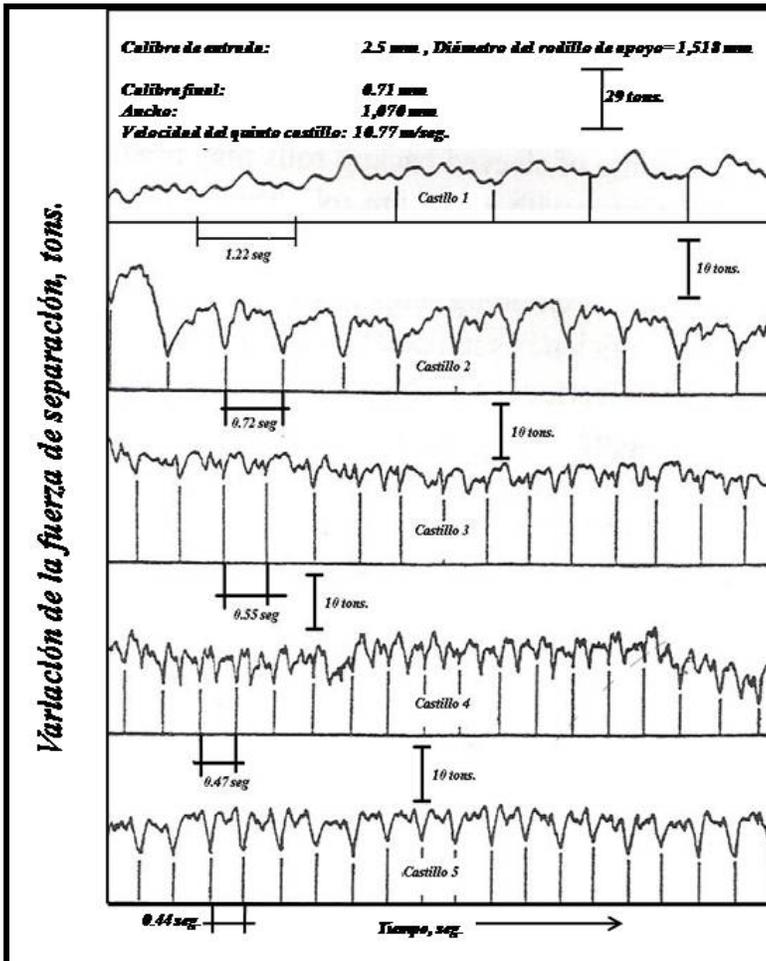


Figura 2.32. Variación en la fuerza de laminación durante el quinto castillo del molino en frío.

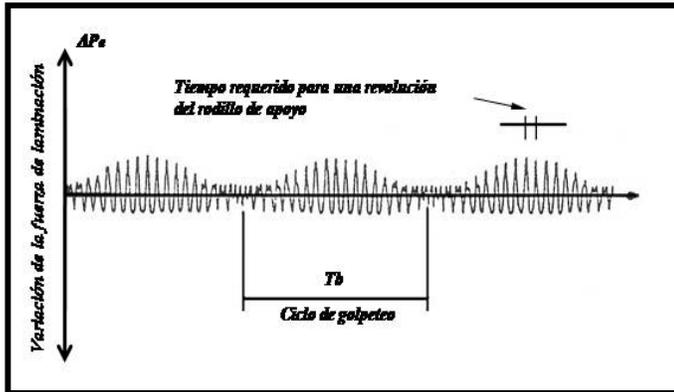
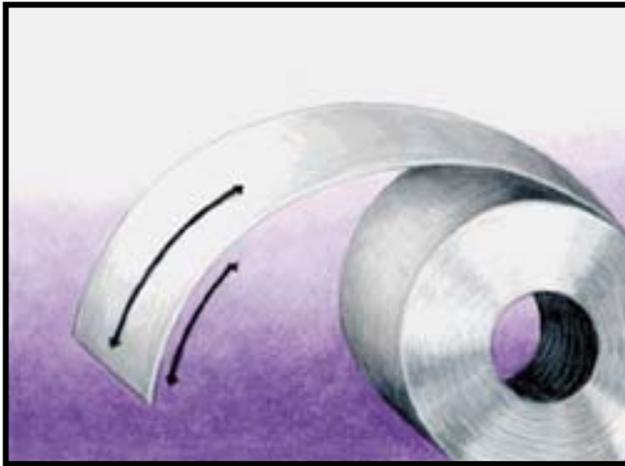


Figura 2.33. Fenómeno de golpeteo en un molino del tipo cuarto.

Figura 2.34. Principales defectos de forma que se producen durante laminación en frío.



2.34a Desviación de planicidad.



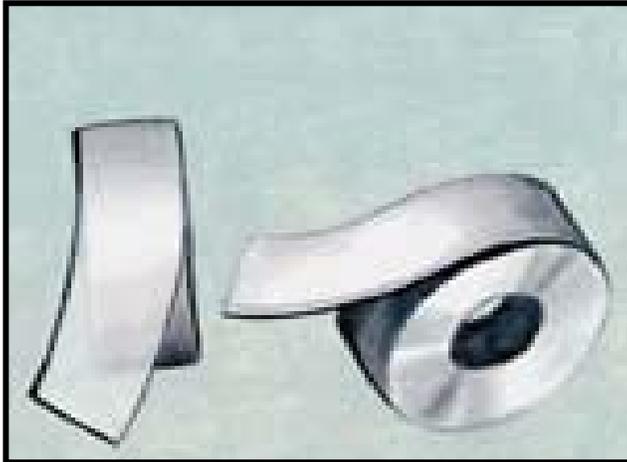
2.34b Comba.



2.34c Torcido.



2.34d Orilla ondulada.



2.34e Desviación de rectitud

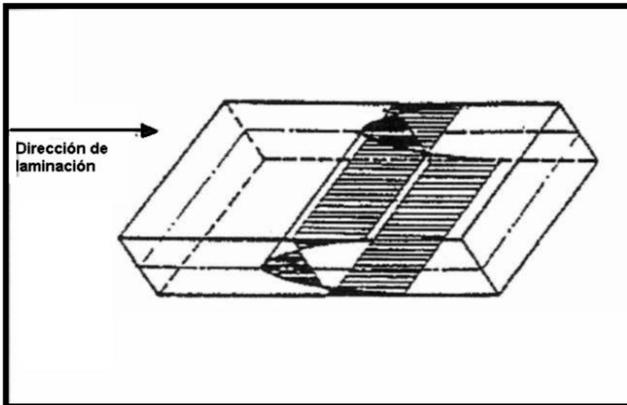


Figura 2.35, Distribución de esfuerzos residuales en cintas laminadas en frío.

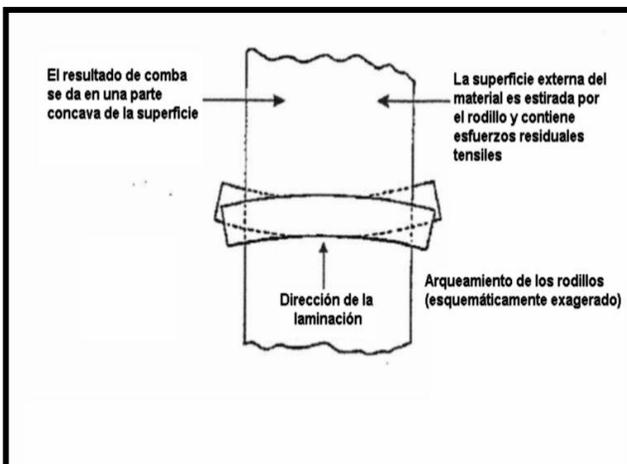


Figura 2.36, Ilustra la formación del defecto de coma.

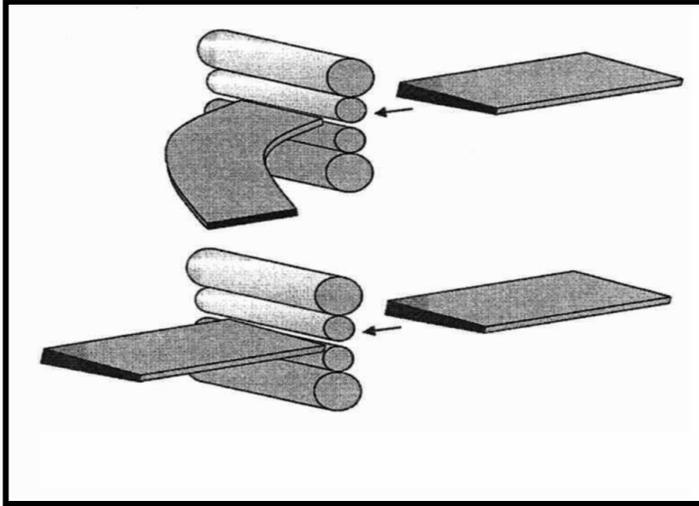


Figura 2.37. Ilustra el efecto de quitar los errores del perfil de laminación en frío.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo se dividió en diferentes etapas; La primera se basó en la recopilación de información del molino laminador en frío reversible, verificando sus registros, capacidad máxima de operación, incluyendo la del mandril del desenrollador, mandril de salida y de entrada y así como del motor principal, la figura 3.01 describe las partes principales del molino laminador en frío. La capacidad de los motores es importante ya que esto está regido por un factor de seguridad, el factor del motor principal afecta la capacidad de los motores secundarios como los del mandril del desenrollador, de entrada y salida.

Para la recopilación de información del desarrollo de las cédulas de laminación en frío, fue de vital importancia establecer un patrón de velocidades de operación, espesor de entrada, espesor de salida, porcentajes de reducción de operación por pase, fuerza de separación y su distribución durante el pase.

De la información recopilada se realizaron las primeras preguntas para llevar a cabo el desarrollo de un modelo que permitió generar una cédula de laminación óptima; manteniendo calibre, calidad de forma, minimizando el consumo de energía e incrementando la productividad del molino, además se logró evitar vicios de operación.

Las primeras preguntas que se establecen al generar cédulas de laminación son:

1. ¿Cuál es el número correcto de pases?
2. ¿Cuál es la reducción que debe de realizarse en cada pase?
3. ¿Cuál es la velocidad ideal de operación para espesores delgados o gruesos que permita mantener una variabilidad de espesor controlada?

Con respecto al consumo de energía y a la productividad:

1. ¿Cuál es el consumo óptimo de energía por pase y total? y
2. ¿Cuál es el tiempo óptimo de operación?.

El modelo desarrollado para la investigación está bajo los conceptos ya establecidos anteriormente esta aplicado a un proceso de laminación en frío para molinos reversibles de tolerancia estricta en espesor y ancho que trabajan con perfiles asimétricos de la cinta, producto del corte longitudinal de ésta, limitado por la potencia máxima del equipo de operación.

La puesta en práctica del modelo y comprobación del mismo es de importancia para verificar la diferencia existente con respecto al valor real de la fuerza de separación del molino reversible y el valor predicho del modelo, obteniendo registros de operación.

3.1 POTENCIA MÁXIMA DE OPERACIÓN.

La información que se obtuvo primeramente fue la capacidad del equipo de operación, para el molino reversible de cuatros rodillos, la potencia máxima del motor principal es de 932 kJ/seg (1250hp), velocidad máxima de operación de 7.62 m/seg ($1,500 \text{ pies/min}$) y una tabla del rodillo de 863 mm (34 pulg.) ; además de datos de amperaje de los motores, registros de valores de la fuerza

de separación, capacidad máxima de carga, diámetros de rodillos de trabajo así como la corona que utilizan, tabla 3.01.

El molino reversible registra una fuerza de separación porcentual de la carga máxima. Esto es, el molino tiene una carga máxima de operación y registra en pantalla un valor porcentual con respecto al valor total, por ejemplo un 40%, indica que la carga que se aplica es el 40% de la capacidad de carga máxima del molino.

Los primeros registros que se realizaron fueron para diferentes grados de acero entre ellos están: SAE 1006, 1008, 1010, 1050, 1527 y el acero de alta resistencia baja aleación de tipo estructural grado 050⁵². La investigación se centra sobre el acero de bajo carbono 1006 calmado al aluminio.

Una segunda de recopilación de datos se lleva a cabo para determinar cuales son los porcentajes de reducción que se suelen aplicar en los pases, así como el porcentaje individual por pase.

Revisión de literatura para el desarrollo del modelo matemático que permitiera predecir la fuerza de separación que ejercerá el molino sobre el material.

3.2 DESARROLLO DEL MODELO.

El modelo se desarrolla sobre la base de los conceptos matemáticos de Bland y Ford¹ y soportado del principio de Orowan⁴. Para el modelo se aplican varios principios en especial el cálculo del rodillo deformado, el cual está basado de la ecuación de Hitchcock², y el desarrollado por la ecuación de Bland y Ford¹, el modelo inicialmente calcula parámetros como el diámetro del rodillo deformado, ángulo de contacto, potencia o consumo de energía durante el

pase, velocidad de deformación y el coeficiente de fricción, este último se calcula en base la velocidad del molino.

Se desarrolló una carátula en donde se alimentan los datos reales del material como es el espesor de entrada y salida, ancho del material, radio del rodillo de trabajo, y la aplicación del rodillo balanceador que sólo se utiliza en el último pase, posteriormente se genera una segunda carátula en donde se calculan los primeros datos como es el radio del rodillo deformado, coeficiente de fricción basado en la velocidad del molino o velocidad por pase, posteriormente se genera una tabla que calcula el arco de contacto durante el pase generando con esto las curvas de presión durante el pase, existe un segundo cálculo en donde se determina el radio del rodillo deformado durante el pase generando las curvas de presión reales, generando datos como el par torsional así como la potencia o consumo de energía. El modelo matemático tiene de plataforma Windows y está desarrollado en una hoja de cálculo de Excel.

3.2.1 CURVAS CONSTITUTIVAS.

La figura 3.02 muestra la curva constitutiva obtenida para el desarrollo del modelo de laminación en frío. Las curvas constitutivas del acero a analizar se desarrollaron para el acero 1006 calmado al aluminio, el cual tiene un uso mayor en el proceso de transformación de la planta, la Tabla 5.1, presenta diferente grados de acero con sus características obtenidas durante el desarrollo de la cédula de laminación, en donde se seleccionaron varios rollos y al final de cada pase se cortaba una muestra con el espesor final del pase para llevar a cabo ensayos de tensión basados bajo la norma *ASTM A370-07b*⁵³, determinando sus propiedades mecánicas como son esfuerzo máximo, esfuerzo de cedencia, elongación del material y dureza superficial además de sus características dimensionales. El valor utilizado para el desarrollo de la

curva constitutiva fue el esfuerzo de cedencia en conjunto con el porcentaje de reducción acumulado durante el pase para el desarrollo de la gráfica a la que se ajustó una línea de tendencia para obtener una ecuación polinomial que es utilizada en el modelo.

3.2.2 COMPROBACIÓN DEL MODELO.

La comprobación del modelo se lleva a cabo por la realización de pruebas de laminación. Las primeras cédulas se basaron en el concepto de que la máxima reducción será al principio o en el primer pase y el porcentaje de reducción ira decreciendo gradualmente durante cada pase, figura 3.03. Una segunda cédula se formuló basada sobre las prácticas de laminación de la planta que presenta un comportamiento en forma de campana, figura 3.03, a lo que se denominó cédula de campana. La cédula comprende un primer pase con un bajo porcentaje de reducción, un segundo pase alto y el tercero decrece y así sucesivamente, estas primeras cédulas de prueba tuvieron un máximo de cuatro pases.

El ajuste del modelo se realiza basándose en la comparación de varios cálculos del coeficiente de fricción por medio de ecuaciones que estaban en función de diferentes parámetros, aplicando aquel que permitió obtener una estabilidad en el resultado de la fuerza de separación, la figura 5.06, presenta los resultados obtenidos de la fuerza de separación con respecto a otros parámetros de medición.

3.3 EVALUACIÓN DEL PERFIL DEL ESPESOR.

Durante las prácticas de laminación se evaluaron diferentes tipos de cédulas con diferentes velocidades durante el pase, con el fin de investigar la

variabilidad del espesor y así establecer velocidades óptimas de operación para un buen control del perfil de espesor de la lámina.

Durante la investigación del perfil de espesor se buscó establecer que variables afectan el perfil para el buen desarrollo de la cédula de laminación.

La figura 3.04 compara la variabilidad del espesor durante el pase de laminación para las dos primeras cédulas de laminación propuestas para el desarrollo de la investigación a partir de aquí se establecerá un estudio estadístico medido por medio de los Cpk^{54} para el concepto de variabilidad de espesor.

3.4 CALIDAD SUPERFICIAL.

Durante la generación de cédulas y puesta en práctica de las mismas se evaluó la forma del material, lo que es planicidad medido en unidades $I (UI)$, así como el porcentaje de inclinación de la ondulación, porcentaje de elongación, porcentaje de planicidad y el índice de forma o comportamiento senoidal de la ondulación, las prácticas se llevaron a cabo de acuerdo a las normas *ASTM* A1030/A1030M-05⁵⁵. De cada pase de laminación se cortaron muestras de acuerdo a la norma para evaluación de la forma. Una de las variables que afecta la forma de la cinta es la corona térmica del rodillo y la deformación que sufre. Durante la práctica se determinaron diámetros teóricos para que no se produzca una ondulación excesiva.

Se utilizó un método para la evaluación de la forma mediante un comportamiento senoidal basado en el sistema denominado como índice de forma el cual muestra el comportamiento de la cinta procesada después del laminador en frío, este método tiene sus bases en las mediciones realizadas en la cinta tanto en altura así como la longitud de onda. Este método en especial

se utilizó como apoyo, el uso fue sobre los resultados de las cédulas, en donde posteriormente se desarrolló la ecuación por medio de un programa de Matemática 5, el cual permitió simular con los datos obtenidos de planicidad y ver los resultados obtenidos de las cédulas por medio del comportamiento senoidal de las ondulaciones presentes en la cinta de acero de bajo carbono y su distribución durante un cierto periodo de mediciones o puntos de medición. Se vuelve interesante el método ya que no es posible a bajos valores de planicidad apreciar el comportamiento de la cinta y al aplicarlo es posible apreciar el comportamiento de la cinta de una manera senoidal.

Además de realizar la evaluación de calidad de superficie por medio de un rugosímetro estableciendo un comportamiento de rugosidad del material durante el pase, las mediciones se basaron por medio de las normas internacionales *EN ISO 1302*⁵⁶, complementándose con la norma *ASTM A109*⁵⁷ para cintas de acero de tolerancia estricta.

3.5 DESARROLLO DE CÉDULAS DE REDUCCIÓN PROGRESIVA Y CONSUMO DE ENERGÍA.

Con el modelo desarrollado y su aplicación en operación, el cual predice la fuerza de separación, se establecieron parámetros de velocidad, los cuales se soportaron en los registros de cédulas laminación y pruebas, en donde fue posible establecer la velocidad promedio en el último pase, la cual mantiene al molino de laminación estable produciendo un perfil de espesor dentro los parámetros de tolerancia específica del material de $\pm 0.0254 \text{ mm}$ (0.001”) y para algunos espesores es posible obtener una tolerancia más cerrada dentro de $\pm 0.0127 \text{ mm}$ (0.0005”)

Dentro del mismo modelo se determina el radio del rodillo deformado en donde fue posible ver que a partir de ciertos valores, estos resultados afectan la

forma de la cinta de acero y, con esto, se establece un valor ideal del rodillo deformado o corona térmica teórica.

Se desarrollaron varias pruebas de cédulas de laminación para la reducción de pases; primeramente cédulas estándar y posteriormente, cédulas soportadas por el modelo. Las cédulas que se desarrollaron con el menor número de pases verificando el perfil de espesor, forma y consumo de energía basándose en la fuerza de separación, energía utilizada por pase y radio de rodillo deformado.

En la etapa del desarrollo de cédulas con el mínimo de pases, se busco disminuir aún más la potencia utilizada en la reducción de la cinta de acero, por medio de la representación gráfica de la cédula y las predicciones del modelo fue posible establecer una distribución de los porcentajes de reducción durante cada pase que permitió bajar la carga del molino, con esto mejorando el uso de potencia.

En estos estudios se experimentó un perfil de espesor muy bueno dentro de tolerancia del molino y algunos espesores se mejoraron notablemente, durante las prácticas de laminación el modelo sufre cambios con el fin de tomar en cuenta uno de los puntos más importantes hoy en día, el consumo de energía.

CAPÍTULO 3

TABLAS

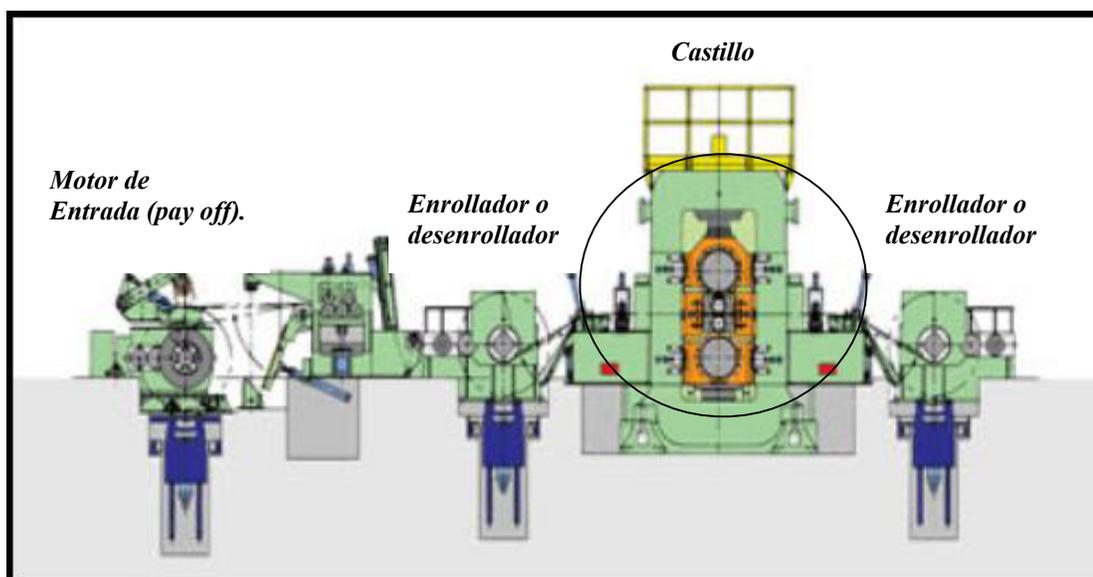
Tabla 3.01 Características del molino laminador en frío reversible del tipo cuarto, donde se llevo a cabo el desarrollo de la investigación.

<i>Medidor de espesor DMC 450</i>	<i>Potencia máxima (KJ/seg)</i>	<i>Diámetro máximo (mm)</i>	<i>Velocidad máxima (m/seg)</i>	<i>Ancho máximo (mm)</i>	<i>Ancho mínimo (mm)</i>	<i>Espesor mínimo (mm)</i>	<i>Espesor máximo (mm)</i>
Mandril de arranque	11	1,524					
Enrollador y desenrollador	298	495					
Motor principal (Molino)	933		7.62	762	406	0.23	4.75
Fuerza de Separación (Kg)	498,866						
Presión máx. (N/mm ²)	20						
Corona utilizada para la prueba μm	76/51						

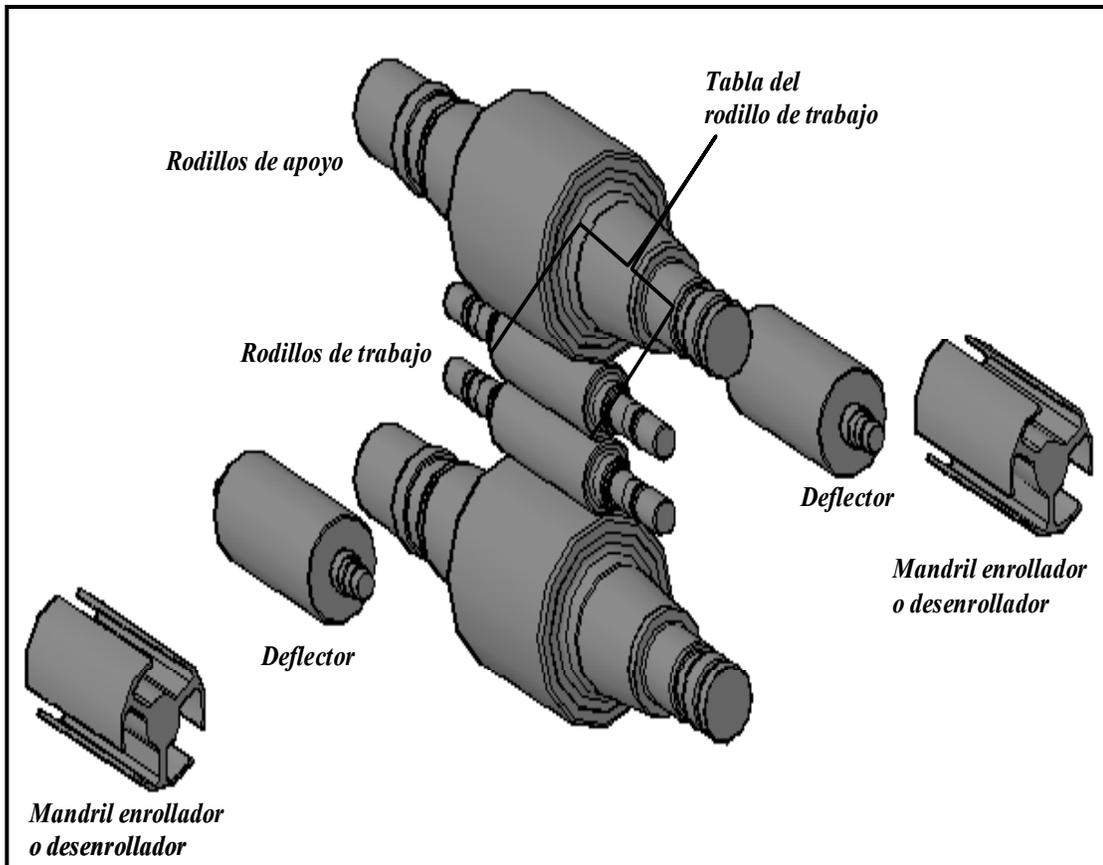
FIGURAS

Fig. 3.01 Dibujo esquemático del molino reversible del tipo cuarto utilizado durante el desarrollo de la investigación.

a) Partes principales de la estación de trabajo del molino reversible en frío.



b) Principales componentes del castillo de laminación, el cual esta marcado con un círculo en la figura inciso a.



Motor principal, 933 *kJ/seg.* (1,250 *hp*)

Motor tensión enrollador y desenrollador, 298 *kJ/seg.* (400 *hp*)

Tabla del rodillo de trabajo 863 *mm* (34.00")

Presión máxima 20 *Nt/mm²* (2,880 *psi*)

Fuerza máxima 500,000 *kg.* (1;000,000.00 *lb.*)

Fig. 3.02 Gráfica del acero de bajo carbono 1006 utilizada para el desarrollo del modelo de laminación en frío - curva constitutiva.

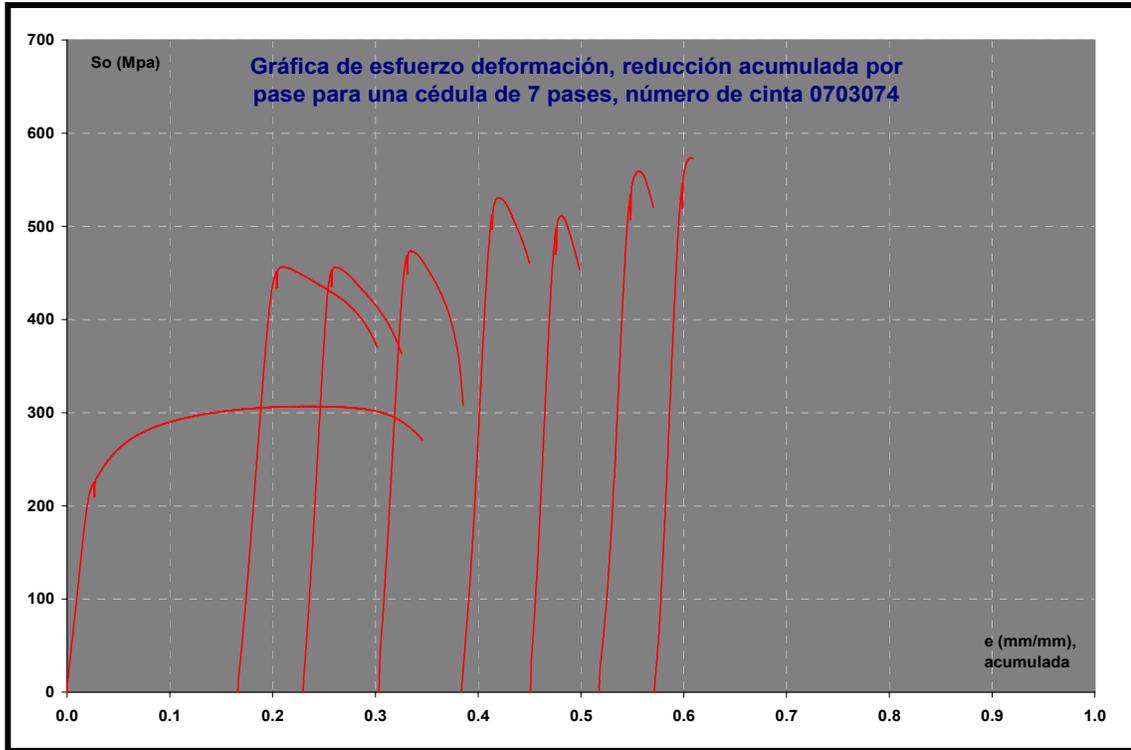


Fig. 3.03 Representación gráfica de las campañas de reducción del tipo progresiva, cédula No. 2 y del tipo de campana, cédula número 1.

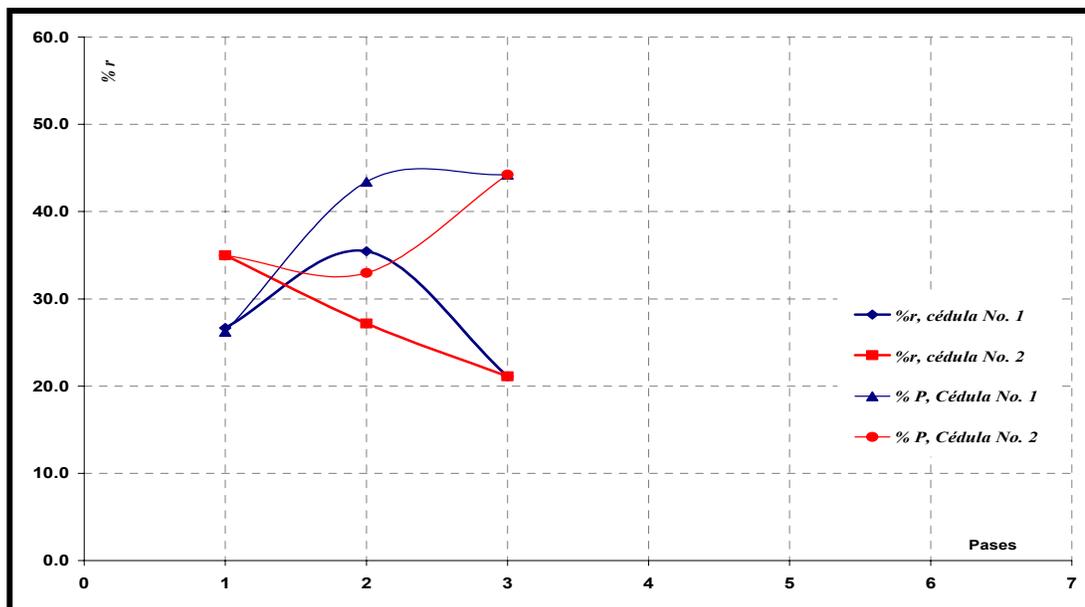
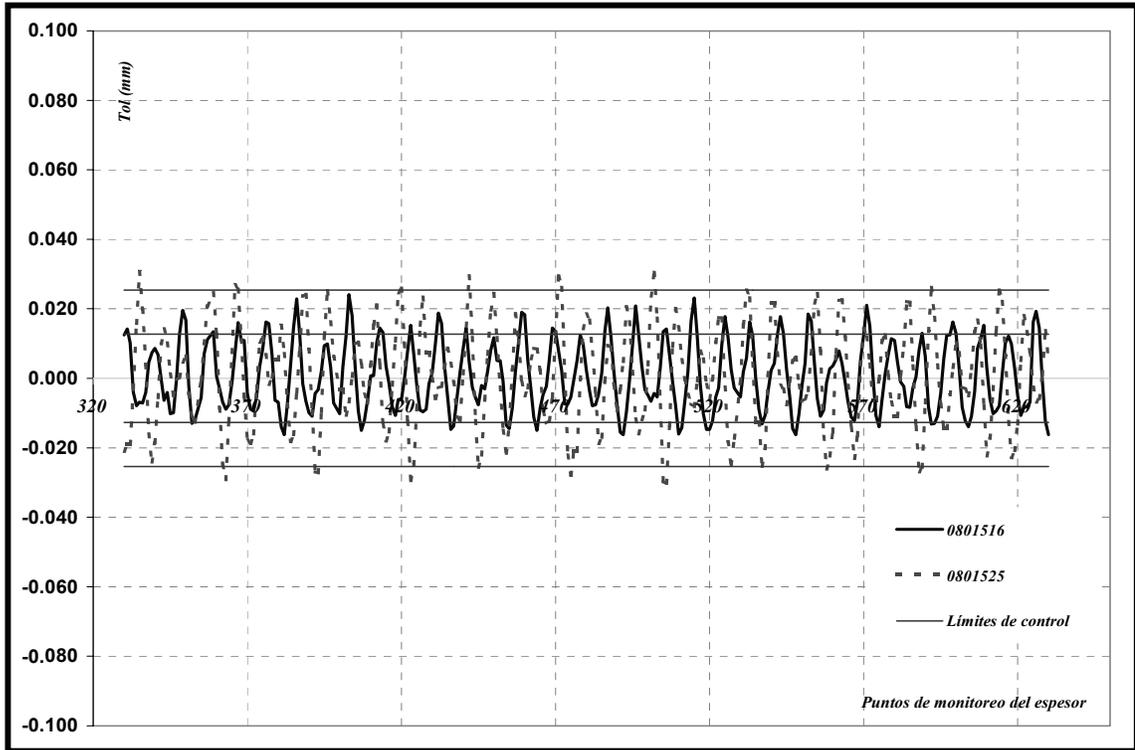


Fig. 3.04. Comparativo de la variabilidad del espesor durante el pase para la cédula No. 1 o del tipo campana, número de rollo 0801516 y cédula No. 2, tipo progresiva, número de rollo 0801519.



CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos de las cédulas propuestas y las campañas de reducción, en las cuales se discuten los tipos de cédulas desarrolladas, como son: a) Cédulas de laminación bajo secuencia de campana, b) Cédula de laminación bajo secuencia progresiva y c) Cédula progresiva lineal; Así como el comportamiento de la fuerza de separación bajo el modelo y su variación con respecto al comportamiento real, variabilidad del espesor con respecto a los cambios de velocidad durante el pase, pases óptimos de operación dependiendo de las características de planta, equipo y el consumo de energía durante el pase.

Durante la secuencia de las cédulas de laminación se presentarán los resultados de calidad y forma del material, para las cintas de acero grado 1006 calmado al aluminio laminadas en frío en un molino reversible de cuatro rodillos, en donde se presentan los resultados de acuerdo al modelo como: ángulo de contacto (o mordida), corona térmica o diámetro del rodillo deformado durante el pase. Las características de forma expuestas en este documento son: *1)* planicidad, *2)* índice de forma y *3)* relación de corona presente en la lámina.

4.2 COMPROBACIÓN DEL MODELO

La comprobación del modelo se realizó en las primeras cédulas de laminación, generando las cédulas de los registros de programas anteriores y otras bajo una secuencia decreciente, se puede decir que la cédula de secuencia decreciente o de tipo rampa mostrará la máxima reducción o porcentaje de reducción del acero al principio de la cédula y posteriormente ira decreciendo gradualmente, a este tipo de cédula se denomino cédula progresiva, la segunda cédula tendrá un comportamiento de tipo campana, donde la reducción máxima se presentará en el segundo pase y no en el primero.

Con el modelo ya desarrollado y la puesta en marcha se realizó un registro de los valores reales de la fuerza de separación obtenidos de las primeras cédulas y los valores predichos de la fuerza de separación por el modelo para diferentes campañas de reducción y cédulas de laminación, la Tabla 4.01 muestra un resumen de los resultados obtenidos y presenta el error absoluto por pase, la figura 4.01 muestra el comportamiento de la carga predicha con respecto a la carga real.

De acuerdo a los resultados que se obtuvieron de los registros de laminación al comparar los resultados tanto del valor predicho por el modelo para un valor del espesor de entrada y compararlo con los valores obtenidos durante la cédula se obtuvo un error absoluto del 3.6% lo cual significa una alta confiabilidad pudiendo decir de 1 a 3 puntos máximos de diferencia y con esto aplicarlo posteriormente para el desarrollo de cédulas.

Se establece a partir de aquí valores predeterminados para el modelo son aquellos que están basados en registros, practicas de operación y capacidad del equipo de operación, las constantes fijas para las cédulas de laminación son: *1)* Tensión del mandril de entrada, mandril enrollador y

desenrollador durante los pases, tensión máxima ideal por pase (Tabla A1), 2) Corona de diámetros del rodillo (Tabla A2), 3) Pase de aplicación del balanceador, el cual imprime en el rodillo de apoyo una carga ligera que mantiene fija la fuerza sobre el rodillo de apoyo inferior con el fin de conservar la forma del material. 4) Lubricante o emulsión para el desarrollo de las cédulas. 5) Velocidad constante durante el pase. 6) Ancho del material, el cual no presenta variación durante el desarrollo de las pruebas de las cédulas de laminación.

4.3 VARIACIÓN DEL ESPESOR

En los primeros desarrollos de las cédulas de laminación, al establecer y monitorear una velocidad promedio de operación por pase, se obtuvieron resultados importantes en cuanto a la variación del espesor durante el pase, se comprobó que los cambios de velocidad afectan dicho perfil, lo cual se puede ver en la figura 4.02, los incisos a, b y c de la figura presenta un comportamiento inestable, en donde al aplicar un estudio de control estadístico del proceso (*SPC*)⁵⁴ para medir la capacidad real del proceso, da como resultado en ambos gráficos un índice de capacidad del proceso (*Cpk*) menor a 1, indicando con esto una inestabilidad del proceso, por lo que fue conveniente establecer una velocidad estable durante el pase para continuar con la realización de pruebas.

De los primeros resultados obtenidos basados en registros y monitoreo de laminación, se procedió a generar las primeras pruebas de laminación, seleccionando diferentes velocidades de laminación durante el pase, definiendo las primeras dos cédulas de sólo tres pases. Estas dos cédulas tendrán una secuencia de reducción en forma de campana, esto es con un porcentaje bajo en el primer pase, el segundo pase será de reducción mayor al primer pase y el último será menor al primer pase. Una segunda cédula se desarrolla con

secuencia de operación progresiva decreciente o de tipo rampa, esto es, el primer pase será el de mayor reducción, el segundo pase será menor al primero y el tercer pase será el de menor reducción. Esto se desarrolló con el fin de ver el comportamiento de la variabilidad de espesor durante el pase y el comportamiento de las demás variables del proceso.

De los resultados de las dos primeras cédulas, la variación de velocidad durante el pase suele ser la principal característica que afecta el perfil del espesor, se observa que durante las pruebas de laminación existieron materiales que se comportaron de una forma con respecto a otra, esto es, aquellos materiales que presentaron una variación dentro de la tolerancia especificada y otros materiales que estuvieron con tolerancias más cerradas, otros materiales presentaron una variación arriba de la tolerancia especificada. Por lo que se procedió a realizar más pruebas de laminación con el fin de encontrar una velocidad de laminación que pueda producir para ciertos espesores una tolerancia cerrada de 0.0127mm ($0.0005''$) y otra velocidad que producirá una tolerancia en el espesor de 0.0254mm ($0.001''$). El contar con una velocidad establecida para el molino ideal que se encuentre en sincronía con el módulo del molino para la cinta de tolerancia estricta permitirá obtener un perfil de espesor deseado.

4.31 VELOCIDAD IDEAL DE OPERACIÓN DURANTE LA SECUENCIA DE PASES Y PASE ÚLTIMO.

La determinación de las velocidades ideales de operación durante el pase para el molino de laminación en frío se fijó inicialmente por medio de los resultados obtenidos de las pruebas de cédulas de laminación y por los registros de laminación, posteriormente se fijaron por los resultados obtenidos de la investigación. La Tabla 4.02 muestra los primeros programas de cédulas conteniendo las características de velocidad por pase, porcentajes de reducción

en frío, fuerza de separación, potencia y el radio del rodillo deformado para el último pase.

En la figura 4.03 se caracteriza la cédula del tipo campana, inciso a, representación gráfica de la cédula, inciso b, Diagrama de presión y c, resultado de la variación de calibre, la figura 4.04 se caracteriza la del tipo progresiva de similar incisos. La cédula de tipo campana presenta una campaña de reducción de tres pases, el segundo pase presenta un incremento de reducción originando un incremento de la fuerza y potencia, lo cual se refleja en el resultado obtenido del modelo y son comparados con los datos reales del proceso, la Tabla No. 4.01 muestra los resultados reales contra los resultados predichos del modelo.

A partir de las primeras pruebas de laminación y cédulas establecidas, la velocidad predeterminada se mantuvo constante evitando cambios durante el pase, esto mejoró la variabilidad del espesor, ver las figuras 4.03 y 4.04 incisos c, donde la capacidad real de proceso se mejora notablemente, en la cédula del tipo progresiva se obtuvo un Cpk mayor a 1.3 mientras que para la cédula de tipo campana el Cpk fue menor a 1.3 , con esto se define que las campañas de reducción con tendencia lineal decreciente tendrán una capacidad de proceso más satisfactoria con respecto a las que presentan campañas de reducción con forma de campana.

Para demostración se realizaron otras pruebas las cuales comprueban los resultados obtenidos pero con diferente velocidad de prueba, a su vez, al realizar las pruebas de capacidad de proceso sobre el resultado, se concluyo que al aumentar la velocidad del último pase, a pesar de mantenerla constante, la capacidad del proceso decrece, en las primeras dos pruebas la velocidad del último pase se mantuvo a 2.54 m/seg (500 ft/mín) y para las otras dos cédulas se aplicó una velocidad de 3 m/seg (600 ft/mín) con el fin de reducir el tiempo de operación de la cédula, se concluye que la velocidad del último pase baja la capacidad del proceso (Cpk) proporcionalmente, en especial la cédula

progresiva. La figura 4.04 inciso d muestra los resultados estadísticos obtenidos del perfil de espesor con el cambio de velocidad establecido, con el fin de reducción del tiempo de operación, afectando Cpk del proceso notablemente, definiendo una velocidad óptima del último pase en 2.54 m/seg (500 ft/min).

Posteriormente se generaron diferentes cédulas de laminación, manteniendo secuencias progresivas y con una velocidad de operación predeterminada, generando cédulas con velocidad del último pase con 3 m/seg para comprobación de los datos antes mencionados, seguido a esto se generaron cédulas con la velocidad óptima para un control de perfil de espesor homogéneo, estableciendo la velocidad de operación del último pase de 2.54 m/seg , obteniendo cédulas con una capacidad de proceso de 3 ($Cpk = 3$) mejorando notablemente el perfil de espesor.

4.32 COMPORTAMIENTO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN DURANTE LOS CAMBIOS DE VELOCIDAD.

Basándose en los resultados obtenidos del modelo se encuentra que es dependiente de la velocidad del molino laminador. El comportamiento durante el pase y la secuencia de operación o reducción es muy similar, está irá decreciendo gradualmente conforme aumenta la velocidad del molino, esto sobre la base de los resultados obtenidos de experimentación, la figura 4.05 muestra dos números de rollo, y registran el comportamiento del coeficiente de fricción con respecto a la velocidad de laminación, comparando el comportamiento del coeficiente de fricción durante el pase con respecto a la reducción.

4.4 DIAGRAMA DE PRESIÓN

El diagrama de presión presenta un comportamiento diferente para los dos tipos de cédulas, sobre todo en el primer pase; Esto es debido a que el primer pase para la campaña de reducción progresiva, la máxima reducción será al inicio del pase, presentó un ángulo de contacto mayor con respecto a la cédula de reducción bajo campana debido a que ésta presenta su máxima reducción en el segundo pase, reflejándose en un aumento de carga, y esto se verifica en los valores reales de carga obtenidos del molino, afectando la planicidad del material y el perfil del espesor del material a laminar, esto se puede ver en las figuras 4.03 y 4.04 incisos “d”, que de acuerdo a los resultados obtenidos del modelo, afecta directamente la potencia requerida por el molino para laminar aumentando consumo de energía.

La diferencia más importante de una cédula de laminación a otra es que el primer pase para la cédula progresiva presenta un incremento ligero del porcentaje de carga aplicada, mientras que para la cédula del tipo campana el incremento se da en el segundo pase y al ser en la fase inicial de la campaña de laminación la cédula progresiva presenta una menor potencia requerida para llevar a cabo el proceso de laminación a diferencia de la cédula de tipo campana la cual presenta un mayor uso de potencia. El tercer pase para ambas cédulas de laminación presenta un comportamiento similar, esto se ve en la figura 4.04 inciso “e”.

El diagrama de presión a su vez muestra que conforme aumentan los pases de laminación, el ángulo de contacto en la mordida de laminación ira disminuyendo gradualmente por consiguiente aumenta la carga y teniendo el menor ángulo al final de la cédula o propiamente el último pase.

4.5 PLANICIDAD E INDICE DE FORMA

Estos parámetros fueron evaluados en varias etapas, la primera etapa se evaluó para las primeras cédulas de laminación y posteriormente para sólo un grupo de materiales. La medición de los parámetros de planicidad, porcentaje de inclinación de onda, y porcentaje de elongación se calcularon basándose en la norma *ASTM A1030/A1030-05*⁵⁵, teniendo como datos de medición la altura y longitud de onda, para esto se utilizó una mesa de trabajo de mármol estandarizada.

La Tabla 4.03 muestra los resultados obtenidos de diferentes números de rollos para diferentes cédulas de laminación, resultados que muestran la relación existente entre la altura y longitud de onda, Se encontró que la relación existente entre la altura con respecto a la longitud de onda influye en los resultados obtenidos de planicidad esto quiere decir que se puede tener valores de altura de onda baja y longitud de onda larga obteniendo buenos resultados, pero, por el contrario, altura baja y longitud de onda corta influye en los resultados de planicidad.

Para la cédula de laminación del tipo campana, la cual como se ha comentado anteriormente está compuesta por tres pases, siendo el segundo el que presentó un incremento de la reducción y por consiguiente un aumento de carga, resultando en una planicidad ligeramente superior a la requerida para un proceso de laminación en frío en 40 *UI*, para la cédula de tipo 2 o progresiva presentó 30 *UI* apenas en el rango especificado para materiales laminados en frío, para los segundos lotes de pruebas estos materiales no presentaron un comportamiento similar sino ligeramente superior a los obtenidos de la primera prueba, lo que puede deberse a las variaciones de velocidad que afectan el coeficiente de fricción y que no permitieron obtener un resultado más satisfactorio, aún así es posible decir que la conducción de las pruebas por medio del modelo permite mantener un rango de planicidad uniforme, lo cual se

puede apreciar en los resultados obtenidos en las demás cédulas de laminación.

En el Capítulo 2 se mencionó acerca de un método para determinar la forma de la cinta, el cual fue desarrollado en Bélgica y que permite ver el comportamiento senoidal de la cinta y ésta es medida por un sensor tanto de altura como de longitud de onda y posteriormente muestra la forma senoidal. Con los resultados de las pruebas de planicidad en unidades I , se desarrolló la ecuación matemática que permite ver el comportamiento de forma de la cinta en una manera senoidal, esto fue con el fin de identificar la forma descrita matemáticamente, ya que visualmente no es tangible ver o definir parámetros de planicidad menores a 40 unidades I , ya sea por ondulación central o que se presente hacia las orillas.

Durante este mismo análisis es posible apreciar que en la cédula progresiva se obtuvo una longitud de onda mayor comparándola con la cédula de tipo campana y también muestran una altura ligeramente mayor con respecto a la cédula progresiva, esto se puede ver en el comportamiento senoidal, donde la ondulación es más notoria en cédulas de tipo campana con respecto a las cédulas del tipo progresiva la cual presentan una menor ondulación, comprobándose en los resultados de la planicidad. El comportamiento senoidal indica la cantidad de ondulaciones presentes en cierta longitud del rollo. A pesar de realizar un aumento de velocidad no fue posible conseguir en la cédula de campana una disminución de las ondulaciones presentes, la cédula progresiva siguió mostrando una formación de ondulación menor con respecto a la cédula del tipo campana.

Al realizar una comparación con otras cédulas de laminación progresivas se observa que aquellas cédulas que presentaron un número de pases mayor con respecto a otras tuvieron una longitud de onda mayor con respecto a las presentaron un número de pases menor. En la figura 4.06 se observa el efecto

de distribución de la longitud de onda representada de una manera senoidal en donde se puede apreciar dicho efecto, en el capítulo 5 se revisará más este punto comparando valores reales de la figura 5.03, esto se debe a una distribución de carga gradual con respecto a las de menor número de pases. Ambas cédulas reflejan una onda senoidal larga con respecto a la cédula de 3 pases. La figura 4.06 representa el comportamiento de forma de las primeras cédulas de laminación vistas de una manera visual y de forma senoidal, el comportamiento de forma se puede visualizar mejor de una manera senoidal.

4.6 RUGOSIDAD.

Las mediciones de rugosidad se realizaron por medio de un rugosímetro y sus resultados están en unidades de Ra^{56} y se expresan en μm , las pruebas se realizaron en las primeras cédulas de laminación. Primeramente se realizó un análisis de la materia prima, del acero laminado en caliente, posteriormente del primer pase de laminación en frío, y así sucesivamente. Se evaluaron varios rollos de diferentes cédulas de laminación con el fin de ver su comportamiento al final de los pases, de acuerdo a los resultados del análisis de rugosidad, ésta mantiene una curva decreciente, inicialmente el material entra con una rugosidad de 1.5 a 2.5 μm y termina dentro de una rugosidad menor a 0.5 μm y esto es lo que se pide para estos productos de acuerdo a la norma *ASTM A109*⁵⁷ denominándose acabado brillante regular, el comportamiento de la rugosidad durante los pases se puede ver en la figura 4.07 inciso b en donde se ve que inicialmente principia en 1.4 μm y termina en el último pase en 0.25 μm , en donde la rugosidad final es mantenida constante para diferentes rollos en el último pase lo cual se muestra en la figura 4.07 inciso a.

4.7 RADIO DEL RODILLO DE TRABAJO DEFORMADO

Los resultados obtenidos del modelo de una manera teórica de las cédulas de laminación son mostrados en la Tabla 4.03. En la figura 4.08 se presenta el comportamiento de acuerdo al modelo del radio deformado con respecto al número de pases en donde es posible decir que conforme aumenta el número de pases para un calibre en especial el radio deformado del rodillo trabajo irá creciendo y, a su vez, será influenciado por el tipo de cédula que se genere, es decir esta cédula en especial presente una campaña de reducción no progresiva y su distribución de carga no es la adecuada influyendo en la calidad del material. Una cédula de laminación desarrollada sin un criterio de optimización afectará la forma del material, ver figura 4.08.

De acuerdo a los resultados del modelo y resultados de planicidad de las pruebas realizadas es posible decir que los materiales que experimentaron o trabajaron mediante un valor o radio deformado del rodillo de trabajo alto presentaron problemas de forma y aquellos materiales que presentaron un radio de rodillo de trabajo teórico bajo presentan una planicidad buena.

Una manera de controlarlo durante la campaña de laminación es por medio de una distribución de carga durante los pases, lo cual permite caracterizar más una cédula de laminación del tipo de secuencia progresiva y que serán descritas en el punto siguiente.

4.8 VARIABILIDAD DEL CONSUMO DE ENERGÍA DURANTE EL PASE Y SECUENCIA DE OPERACIÓN

El molino de laminación en frío reversible del tipo cuarto consta de cuatro motores de operación. Estos motores participan en la construcción de la cédula de laminación de la siguiente manera, para el primer pase el motor

desenrollador será el motor de entrada, este motor tiene una capacidad inferior con respecto al motor principal, al motor del enrollador y desenrollador, la capacidad de este motor es una tercera parte del motor del enrollador, alrededor $11 \text{ kJ/seg. (15hp)}$, para los motores del desenrollador y enrollador la potencia máxima de operación será de $298 \text{ kJ/seg. (400 hp)}$, esto indica que el primer pase será de un consumo de energía menor con respecto al segundo pase aunado a un programa de cédulas de laminación progresivas de una manera decreciente nos proporcionará un perfil de energía con un pico alto en el segundo pase e irá decreciendo gradualmente durante los pases, este comportamiento de la potencia utilizada para el primer pase es debido a que la tensión del primer pase es la mitad de la que se aplica en el segundo pase.

La figura 4.09 indica el consumo de energía durante los diferentes pases de laminación para diferentes tipos de cédulas, indicando un comportamiento para el primer pase de baja potencia con respecto al segundo pase, este pase presenta el mayor consumo de energía utilizada del motor principal debido al incremento de tensión por la reducción de longitud que mantienen el par torsional de los mandriles.

Siendo el segundo pase el de mayor importancia por el uso de potencia debido al incremento de tensión y al endurecimiento del material; la secuencia de laminación progresiva afecta el valor de carga porcentual, lo incrementa en este pase, por lo que la predicción del modelo se vuelve importante para evitar paros de molino.

De acuerdo a los resultados del modelo y comparándolo con los resultados de las prácticas de las cédulas de laminación, se establece una potencia máxima disponible de operación de laminación en el segundo pase de $447 \text{ kJ/seg (600 hp)}$; Conociendo la capacidad máxima de operación predicha por el modelo es posible aumentar la reducción por pase reduciendo así aun más el número de pases para la cédula de laminación.

4.9 CAMPAÑAS DE REDUCCIÓN EN FRÍO BAJO DIFERENTES CÉDULAS PROGRESIVAS

Este punto en especial se refiere al desarrollo de cédulas de laminación que fueron creadas para ver el comportamiento de la potencia requerida al laminar, el desarrollo de este tipo de cédulas es con el fin de optimizar la campaña de reducción ya establecida con un número de pases mínimo, trabajar sobre lo que se denominó secuencia progresiva y lineal distribuyendo de una forma más controlada el porcentaje de reducción durante el pase mediante el apoyo del modelo de laminación que predice la fuerza de separación.

La figura 4.10, presenta ambas cédulas de laminación que tienen igual porcentaje de reducción total, número de pases y velocidad, lo que las hace diferentes es la secuencia de operación diferenciándose en la manera que se distribuye los porcentajes de reducción por pase, de una forma tal que la reducción presenta una forma gráfica de menor pendiente. Es posible establecer diferentes cédulas con el mismo número de pases, velocidad, etc. pero con diferentes porcentajes de reducción por pase que modifican la pendiente de la reducción, permitiendo se optimicé la cédula por potencia e influya en este insumo.

La figura 4.10 b, muestra los resultados obtenidos en cuanto a la variación de espesor para la cédula número 88, dentro de la figura 4.10 a, también se indica la potencia utilizada para laminación, en donde se observa en los resultados obtenidos que todavía es posible optimizar los pases de laminación mediante un control o distribución adecuada de los porcentajes de reducción para este tipo de molino de laminación en frío reversible con perfil asimétrico.

Otra de las características que fueron medidas para este tipo de cédulas y algunas otras anteriores fue lo que se denomina relación de corona, la figura

4.11 da la representación gráfica de los resultados obtenidos del perfil de corona, mediante un análisis del espesor a lo ancho de la cinta, comparando como entran a proceso las cintas de acero y como salen al final de la reducción, en ambas cédulas de laminación se pudo apreciar que si fue posible medir el perfil de corona de dicho material, los resultados se pueden apreciar en los incisos a, b y c. En el inciso (a) se observa el comportamiento desde inicio y después de terminar la cédula, los valores registrados son los espesores medidos a 3, 25, 50 *mm* tanto del lado del operador así como del lado del motor y al centro de la cinta, medidos a lo ancho de la cinta.

CAPÍTULO 4

TABLAS

Tabla 4.01 Registros de los valores de la fuerza de separación predicha contra lo registrado en el molino de laminación.

No. Pase	No. rollo	v (m/seg)	% Carga real	% Carga Predicha	Amp 1	Amp 2	Tensión del enrollador (kg)	Tensión del desenrollador (kg)	Error absoluto
1	0801516	1.96	26.00	26.35	296	149	2,148	1,074	0.35
1	0801519	1.91	30.00	34.98	295	146	2,141	980	4.98
1	0801522	1.93	27.00	26.23	345	149	2,503	1,125	0.77
1	0801525	1.93	31.00	34.99	345	127	2,494	1,388	3.99
1	0801681	2.01	28.00	34.30	155	345	-	-	6.30
1	0801685	1.93	27.00	34.30	146	325	1,134	2,313	7.30
1	0801710	1.73	29.00	36.00	155	436	-	198	7.00
1	0801714	1.58	30.00	35.30	145	346	-	198	5.30
1	0801772	1.93	42.00	36.40	146	535	1,134	3,855	5.60
1	0801778	1.93	41.00	34.00	146	535	1,134	3,855	7.00
1	0801787	1.93	40.00	32.40	140	535	1,134	3,855	7.60
1	0801793	1.93	35.00	26.80	146	535	1,134	3,855	8.20
1	0802162	1.98	41.50	34.20	535	146	3,882	1,059	7.30
1	0802180	1.93	32.00	31.40	146	535	3,855	1,134	0.60
1	0803300	1.93	33.00	27.90	155	335	1,125	3,628	5.10
1	0803302	1.91	33.00	27.90	155	535	1,125	243	5.10
1	0803304	1.84	32.00	27.90	164	535	1,132	3,882	4.10
1	0803306	1.91	32.00	27.90	155	535	1,125	243	4.10
1	0806005	1.88	30.00	27.40	155	535	1,125	3,882	2.60
1	0806214	1.93	24.00	25.00	144	445	1,388	3,220	1.00
2	0801516	2.78	44.00	43.41	246	325	1,778	2,293	0.59
2	0801519	2.77	36.00	34.07	240	296	1,727	2,141	1.93
2	0801522	3.46	40.00	42.34	255	346	1,850	2,503	2.34
2	0801525	3.46	34.00	33.38	256	340	1,814	2,494	0.62
2	0801681	3.46	31.00	33.30	285	348	-	-	2.30
2	0801685	3.46	38.00	33.30	256	330	1,837	2,358	4.70
2	0801710	3.45	35.00	35.00	285	410	129	186	0.00
2	0801714	3.40	33.00	34.80	285	413	129	186	1.80
2	0801772	3.46	38.00	35.50	535	520	3,855	3,628	2.50
2	0801778	3.46	38.00	31.70	535	504	3,855	3,628	6.30
2	0801787	3.46	40.00	30.20	505	535	3,628	3,855	9.80
2	0801793	3.46	33.00	27.10	535	500	3,855	3,628	5.90
2	0802162	3.51	37.00	30.20	536	536	3,882	3,882	6.80
2	0802180	3.46	34.00	31.20	535	500	3,855	3,628	2.80
2	0803300	3.46	32.00	28.80	535	535	3,855	3,855	3.20
2	0803302	3.38	36.00	28.80	535	530	3,882	1,578	7.20
2	0803304	3.39	33.00	28.80	535	535	3,882	3,831	4.20
2	0803306	3.38	33.00	28.80	535	535	3,882	3,882	4.20
2	0806005	3.49	36.00	29.30	536	535	3,867	3,863	6.70
2	0806214	3.46	28.00	26.13	376	445	2,721	3,220	1.87

3	0801516	2.68	49.00	43.72	196	256	1,640	1,916	5.28
3	0801519	2.71	41.00	44.28	195	255	1,408	1,858	3.28
3	0801522	3.05	47.00	42.16	165	251	1,850	1,197	4.85
3	0801525	2.95	44.00	42.22	165	255	1,179	1,814	1.78
3	0801681	3.04	35.00	34.80	285	173	-	-	0.20
3	0801710	3.46	40.00	43.70	255	196	116	88	3.70
3	0801714	3.31	38.00	43.30	285	225	129	102	5.30
3	0801772	3.05	40.00	39.86	506	290	3,605	2,154	0.14
3	0801778	3.46	42.00	32.30	506	290	3,605	2,154	9.70
3	0801787	3.46	35.00	23.70	505	470	3,628	3,424	11.30
3	0801793	3.46	30.00	25.70	500	535	3,628	3,855	4.30
3	0802162	3.54	38.00	30.70	535	535	3,837	3,837	7.30
3	0802180	3.46	32.00	29.40	535	500	3,628	3,855	2.60
3	0803300	3.46	31.00	28.50	535	535	3,855	3,855	2.50
3	0803302	3.42	32.00	28.50	531	534	3,882	3,882	3.50
3	0803304	3.57	32.00	28.50	535	535	3,882	3,882	3.50
3	0803306	3.49	31.00	28.50	538	533	3,882	3,882	2.50
3	0806005	3.61	40.00	29.60	534	495	3,886	3,541	10.40
3	0806214	3.46	30.00	26.65	375	265	2,721	1,927	3.35
4	0801710	3.19	34.00	35.90	165	295	75	91	1.90
4	0801714	3.13	33.00	35.80	165	221	75	100	2.80
4	0801787	3.05	35.00	21.40	275	460	1,973	3,333	13.60
4	0801793	3.46	30.00	25.40	495	500	3,560	3,628	4.60
4	0802162	3.04	34.00	28.20	306	505	2,220	2,220	5.80
4	0802180	3.46	32.00	30.30	535	500	3,855	3,628	1.70
4	0803300	3.46	32.00	30.00	535	535	3,855	3,628	2.00
4	0803302	3.42	31.00	30.00	535	532	3,882	3,882	1.00
4	0803304	3.43	29.00	30.00	534	532	3,882	3,882	1.00
4	0803306	3.41	32.00	30.00	535	535	3,882	3,882	2.00
4	0806005	3.53	41.00	30.70	435	525	3,156	3,672	10.30
4	0806214	3.46	31.00	30.38	235	325	1,678	2,358	0.62
5	0801793	2.95	28.00	23.80	495	300	3,560	1,814	4.20
5	0802180	2.95	30.00	29.80	280	500	2,177	3,628	0.20
5	0803300	3.46	31.00	29.80	480	450	3,628	3,628	1.20
5	0803302	3.44	30.00	29.80	535	425	3,882	3,091	0.20
5	0803304	3.55	31.00	29.80	535	425	3,882	3,091	1.20
5	0803306	3.40	30.00	29.80	535	535	3,882	3,084	0.20
5	0806005	3.46	43.00	32.20	455	376	3,316	2,744	10.80
5	0806214	3.46	35.00	36.77	250	215	1,814	1,542	1.77
6	0803300	3.46	30.00	28.20	480	450	3,401	3,175	1.80
6	0803302	3.41	33.00	28.20	406	438	2,939	3,164	4.80
6	0803304	3.41	30.00	28.20	406	444	2,946	3,185	1.80
6	0803306	3.40	30.00	28.20	415	430	3,016	3,175	1.80
6	0806005	2.84	34.00	25.10	235	376	1,705	2,774	8.90
6	0806214	2.67	38.00	32.73	170	270	1,202	1,905	5.27
6	0806221	3.41	30.00	35.00	205	250	1,488	1,850	5.00
6	0806222	3.53	36.00	35.00	224	313	1,633	2,271	1.00
7	0803300	2.95	25.00	26.70	430	350	3,175	2,268	1.70
7	0803302	3.04	22.00	26.70	411	205	2,908	1,488	4.70
7	0803304	3.00	30.00	26.70	405	225	1,640	1,640	3.30
7	0803306	3.05	25.00	26.70	450	411	3,016	1,429	1.70
7	0806221	3.55	34.00	34.00	214	175	1,560	1,277	0.00
7	0806222	3.66	38.00	34.00	262	180	1,879	1,277	4.00
8	0806221	3.66	27.00	23.00	175	205	1,270	1,488	4.00
8	0806222	3.51	35.00	23.00	138	215	987	1,560	12.00
9	0806221	2.62	28.00	38.00	195	125	1,422	907	10.00
9	0806222	2.70	33.00	38.00	265	146	1,930	1,052	5.00
								Promedio	4.12
								Desv. Std.	3.07
								Rango	13.60

Tabla No. 4.03, Resultados obtenidos del ensayo de planicidad para el desarrollo de las cédulas de laminación, de acuerdo a norma *ASTM A1030/A1030-05*.

<i>No. Rollo</i>	<i>L (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>UI</i>	<i>% S</i>	<i>% Elong.</i>	<i>% Planicidad</i>
0801516	178	2.26	40.04	1.27	4.00	0.0400
0801519	430	4.79	30.69	1.12	3.07	0.0307
0801522	356	4.76	44.26	1.34	4.43	0.0443
0801525	305	3.18	26.77	1.04	2.68	0.0268
0801607	290	4.00	46.94	1.38	4.69	0.0469
0801681	101	1.60	61.92	1.58	6.19	0.0619
0801682	485	2.80	8.22	0.58	0.82	0.0082
0801683	279	1.50	7.13	0.54	0.71	0.0071
0801684	228	2.20	22.97	0.96	2.30	0.0230
0801685	914	1.60	0.76	0.18	0.08	0.0008
0801686	254	2.80	29.98	1.10	3.00	0.0300
0801710	152	1.50	24.03	0.99	2.40	0.0240
0801711	228	2.80	37.21	1.23	3.72	0.0372
0801712	1,117	7.00	9.69	0.63	0.97	0.0097
0801713	114	1.60	48.60	1.40	4.86	0.0486
0801714	651	2.65	4.09	0.41	0.41	0.0041
0801715	101	1.40	47.41	1.39	4.74	0.0474
0801772	910	9.00	24.13	0.99	2.41	0.0241
0801775	580	3.00	6.60	0.52	0.66	0.0066
0801778	750	4.50	8.88	0.60	0.89	0.0089
0801781	850	12.00	49.18	1.41	4.92	0.0492
0801784	1,115	6.00	7.14	0.54	0.71	0.0071
0801787	650	8.00	37.38	1.23	3.74	0.0374
0801790	800	10.00	38.55	1.25	3.86	0.0386
0801793	800	3.50	4.72	0.44	0.47	0.0047
0801796	1,110	15.00	45.06	1.35	4.51	0.0451
0801799	1,005	5.00	6.11	0.50	0.61	0.0061
0801802	1,120	2.00	0.79	0.18	0.08	0.0008
0801805	1,010	9.50	21.83	0.94	2.18	0.0218
0801808	830	5.00	8.95	0.60	0.90	0.0090
0802297	891	10.00	31.08	1.12	3.11	0.0311
0802299	687	5.00	13.07	0.73	1.31	0.0131
0802301	1,074	14.00	41.93	1.30	4.19	0.0419
0802303	537	5.00	21.39	0.93	2.14	0.0214
0802305	590	3.85	10.51	0.65	1.05	0.0105
0802307	410	5.00	36.70	1.22	3.67	0.0367
0803046	620	10.00	64.19	1.61	6.42	0.0642
0803048	625	7.00	30.95	1.12	3.10	0.0310
0803051	410	1.75	4.50	0.43	0.45	0.0045
0803053	500	2.00	3.95	0.40	0.39	0.0039
0803054	755	1.50	0.97	0.20	0.10	0.0010
0803055	165	2.40	52.20	1.45	5.22	0.0522
0803056	235	2.50	27.92	1.06	2.79	0.0279
0803057	270	1.50	7.62	0.56	0.76	0.0076
0803058	450	2.00	4.87	0.44	0.49	0.0049
0803061	650	1.00	0.58	0.15	0.06	0.0006
0803071	904	9.00	24.46	1.00	2.45	0.0245
0803120	550	2.00	3.26	0.36	0.33	0.0033
0803121	1,100	0.50	0.05	0.05	0.01	0.0001
0803124	435	2.50	8.15	0.57	0.81	0.0081
0803126	500	5.00	24.67	1.00	2.47	0.0247
0803128	570	4.00	12.15	0.70	1.22	0.0122
0803132	975	6.00	9.34	0.62	0.93	0.0093
0803292	880	5.00	7.97	0.57	0.80	0.0080
0803294	975	9.00	21.02	0.92	2.10	0.0210
0803300	750	2.00	1.75	0.27	0.18	0.0018
0803302	575	1.50	1.68	0.26	0.17	0.0017
0803304	800	2.50	2.41	0.31	0.24	0.0024
0803306	1,110	1.00	0.20	0.09	0.02	0.0002
0804303	200	2.00	24.67	1.00	2.47	0.0247
0804306	450	3.50	14.93	0.78	1.49	0.0149
0801606R	300	4.00	43.87	1.33	4.39	0.0439
0801612R	335	2.00	8.79	0.60	0.88	0.0088
0801617R	224	1.90	17.75	0.85	1.78	0.0178
0801618R	135	1.00	13.54	0.74	1.35	0.0135
0801619R	315	4.00	39.79	1.27	3.98	0.0398
0803058A1	160	1.50	21.69	0.94	2.17	0.0217

FIGURAS

Fig. 4.01 Fuerza de separación predicha por el modelo con respecto a la registrada del molino de laminación.

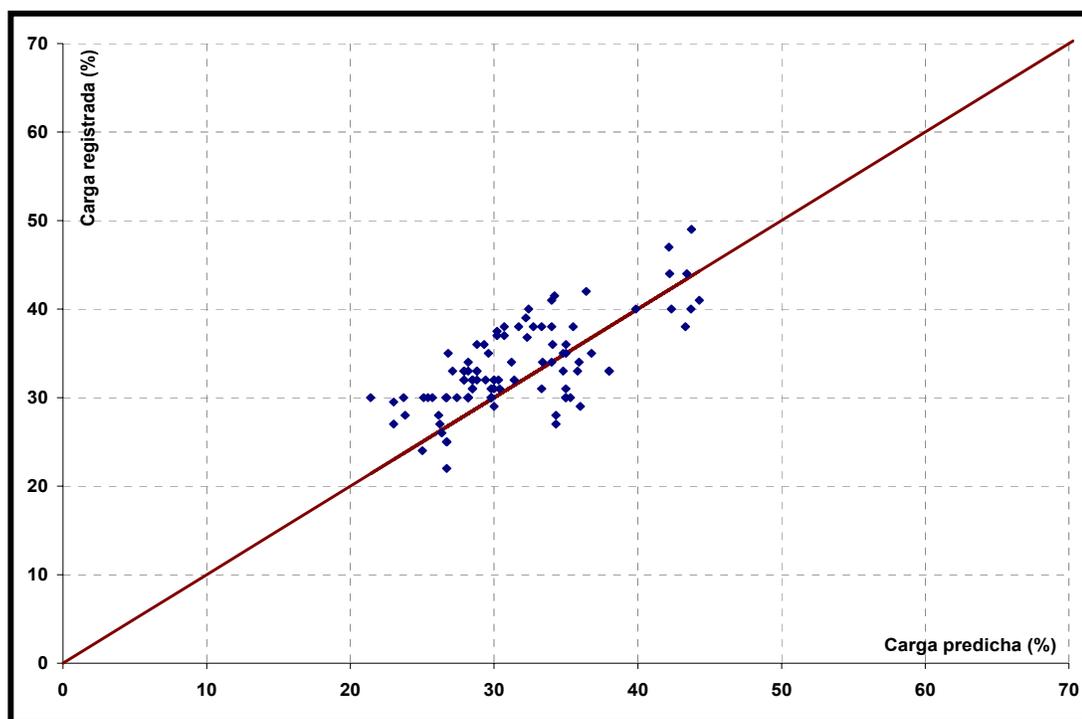
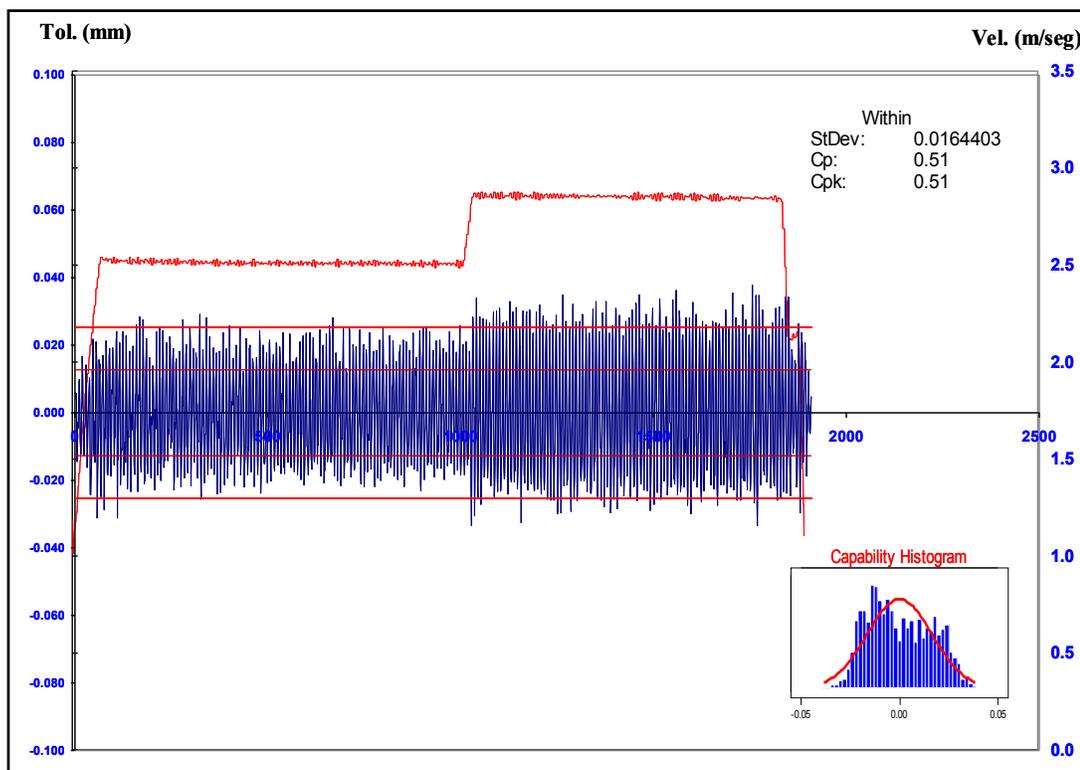
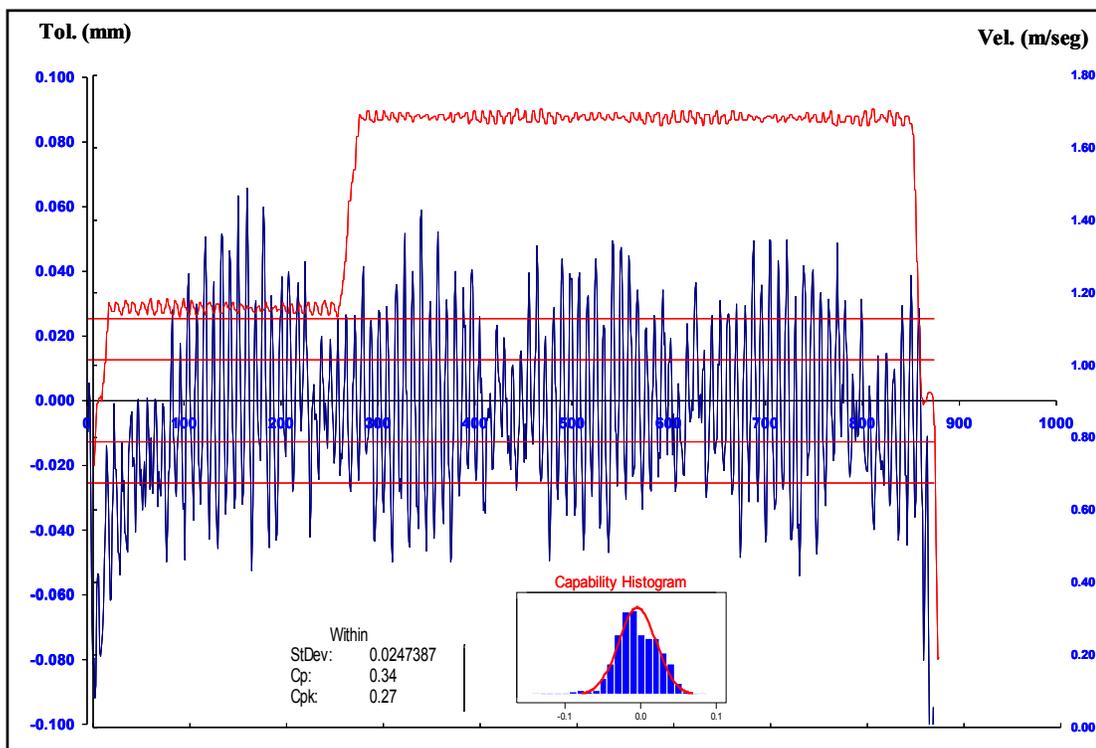


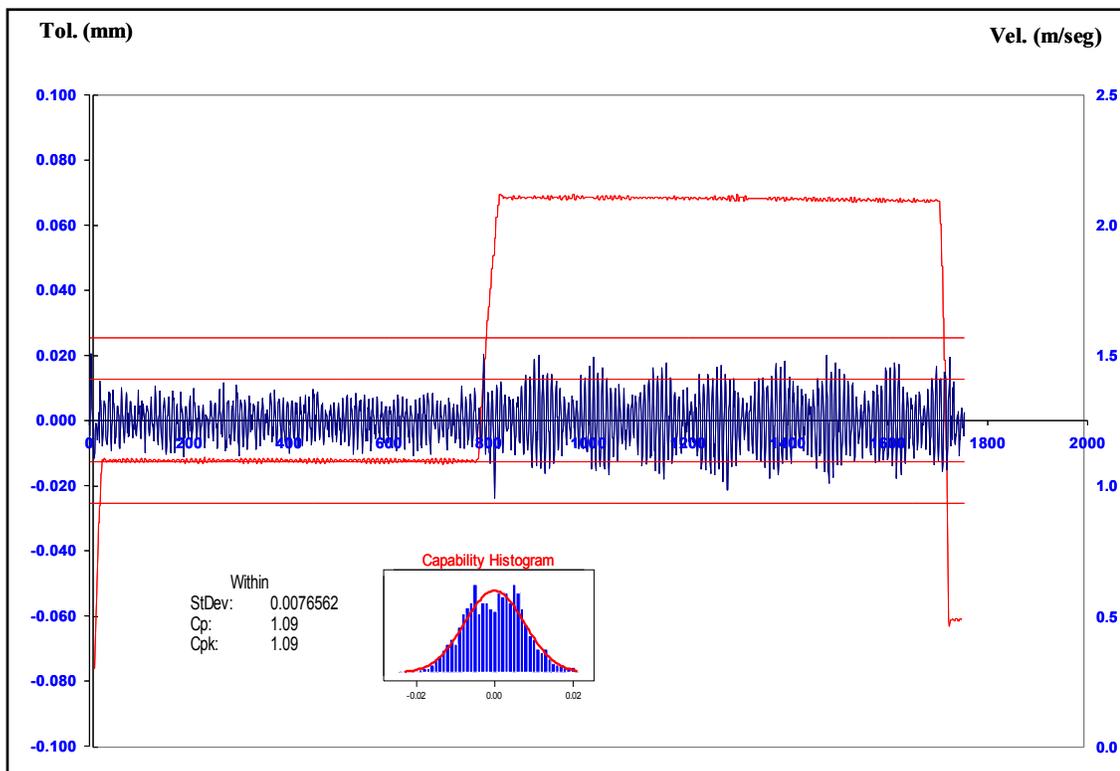
Fig. 4.02 Variación del espesor con respecto a los cambios de velocidad efectuados durante el pase.



a), Variabilidad del espesor durante el pase de laminación con respecto a la velocidad de operación del molino laminador, parámetros sin modificación de cédulas, número de cinta de acero 0712342.



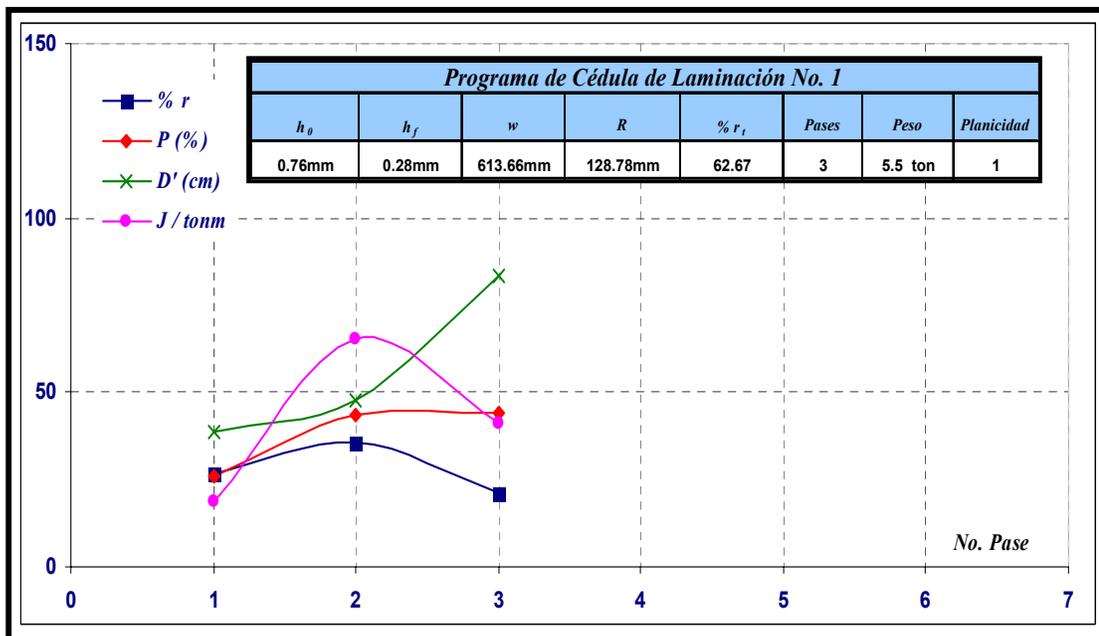
b), Variabilidad del espesor durante el pase de laminación con respecto a la velocidad de operación del molino laminador, parámetros sin modificación de cédulas, número de cinta de acero 0801017.



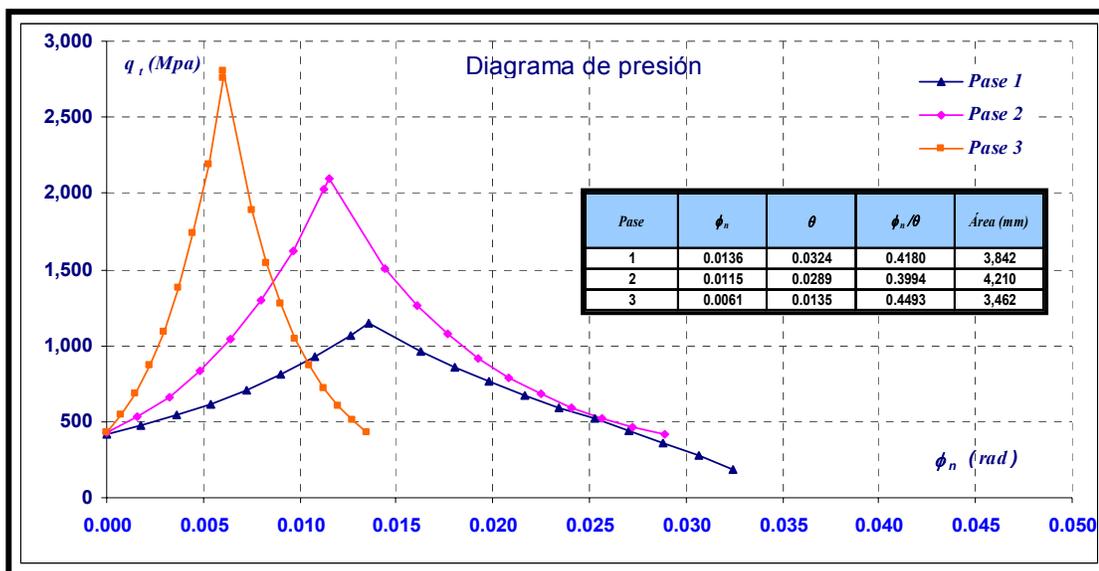
c) Variabilidad del espesor durante el pase de laminación con respecto a la velocidad de operación del molino laminador, parámetros sin modificación de cédulas, número de cinta de acero 0712330.

Fig. 4.03. Variables de la primera cédula de laminación para el número de rollo 0801516, las variables son porcentaje de reducción por pase, porcentaje de carga total, radio de rodillo deformado y la potencia requerida por pase junto con el diagrama de presión.

a) Campaña de reducción, cédula del tipo campana.



b) Diagrama de presión de cédula No. 1



c) Resultados del análisis estadístico de la cédula de tipo campana.

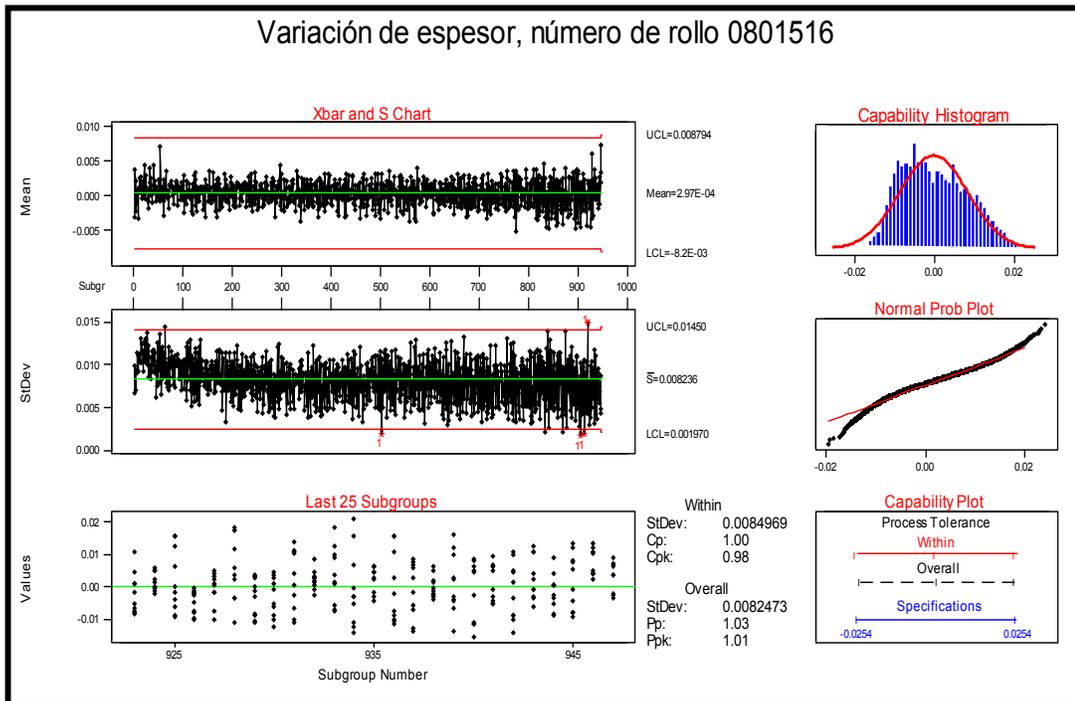
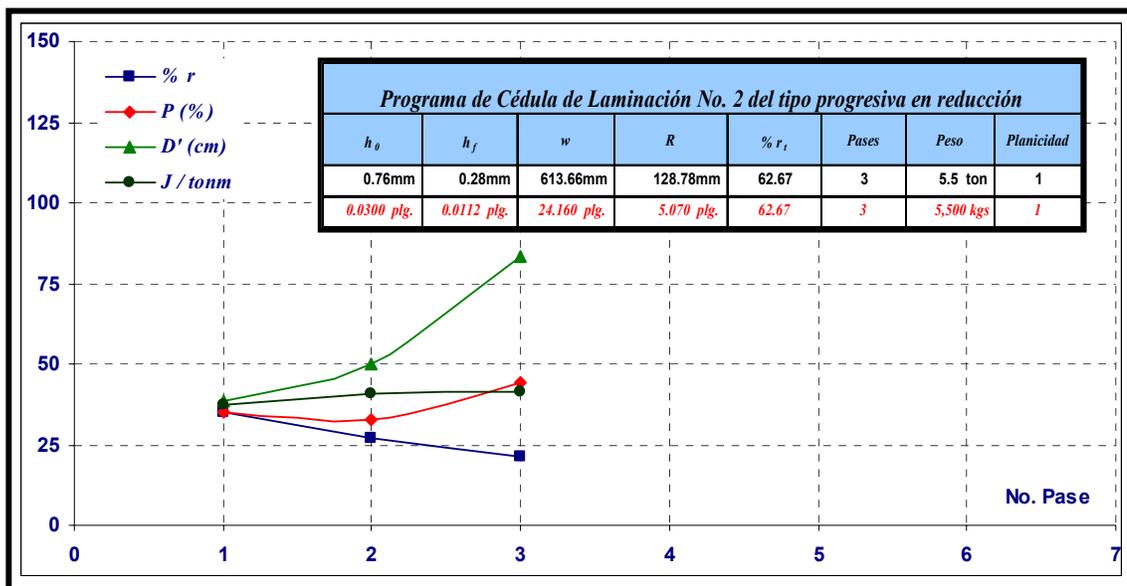
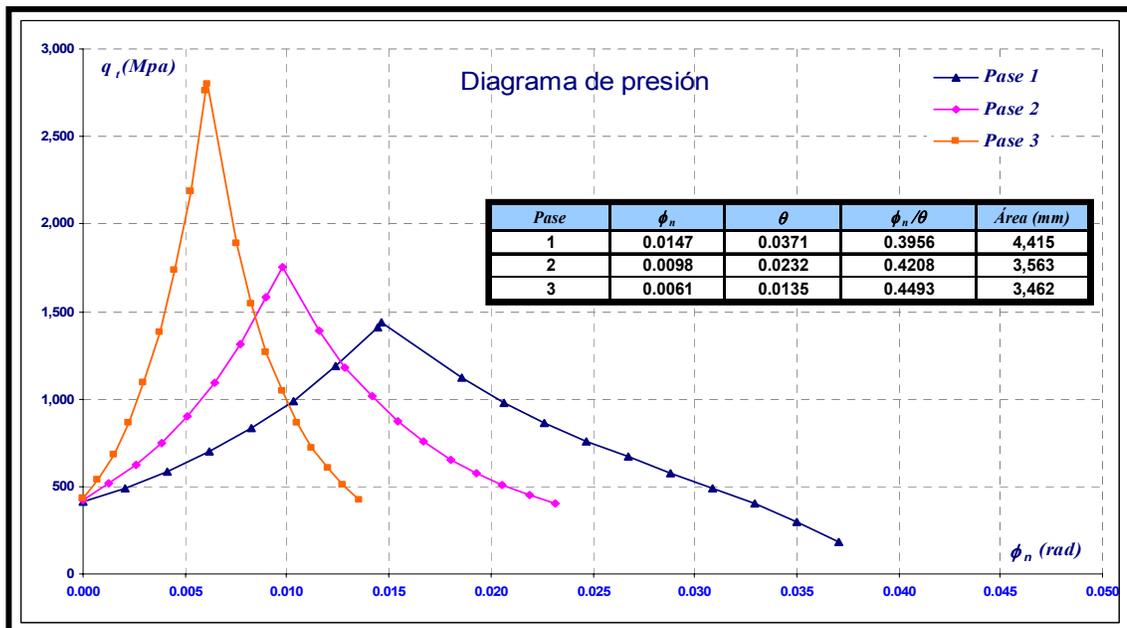


Fig. 4.04. Variables de la segunda cédula de laminación, estas son porcentaje de reducción por pase, porcentaje de carga total, radio de rodillo deformado y potencia requerida por pase junto con el diagrama de presión.

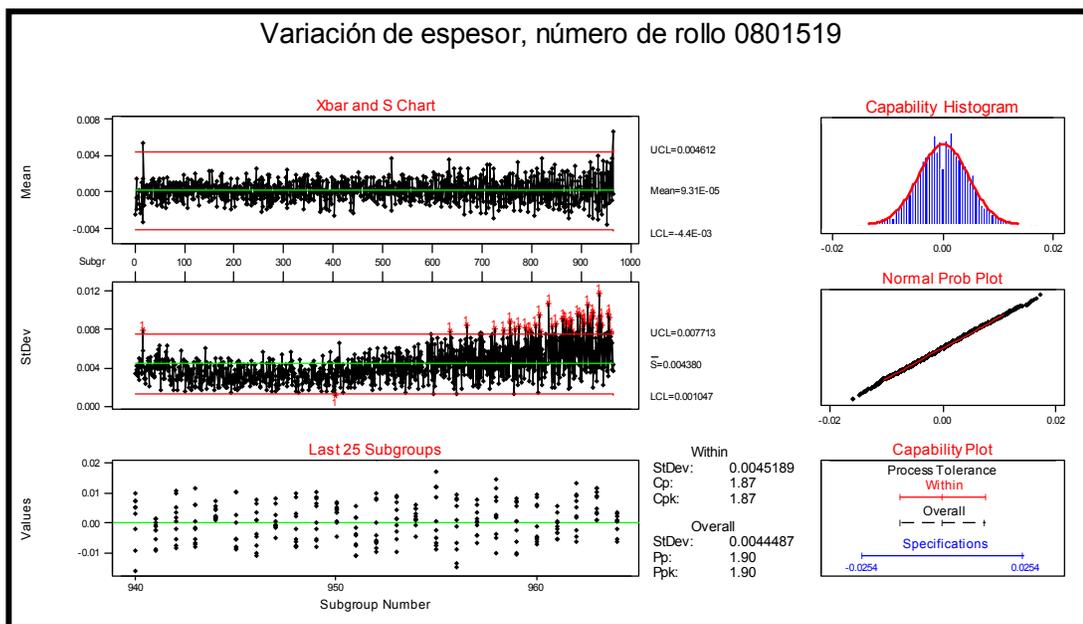
a) Campaña de reducción



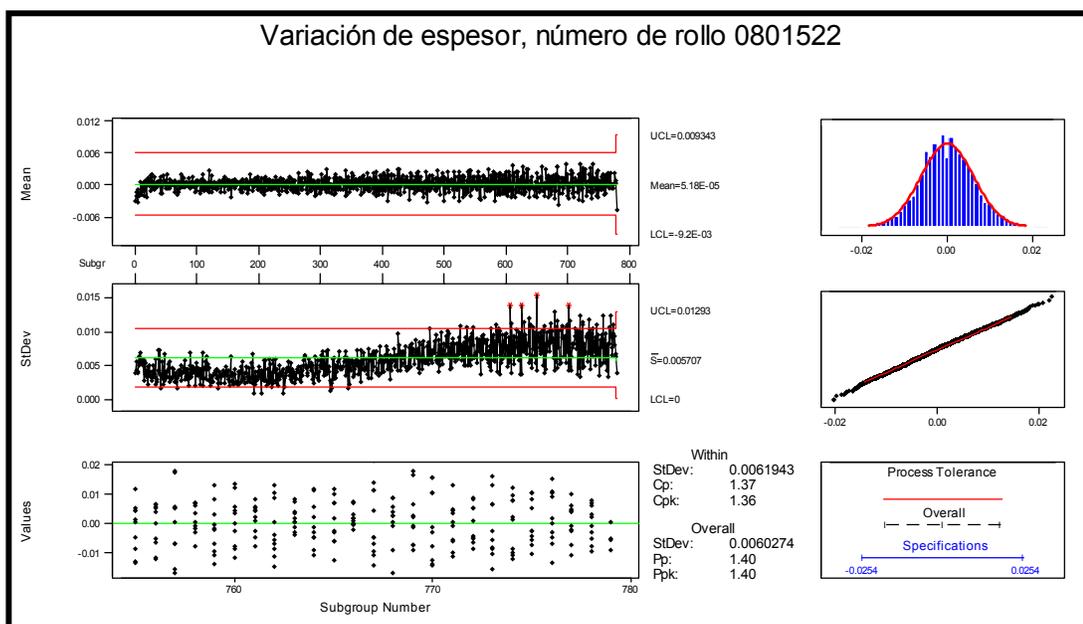
b) Diagrama de presión de cédula 2

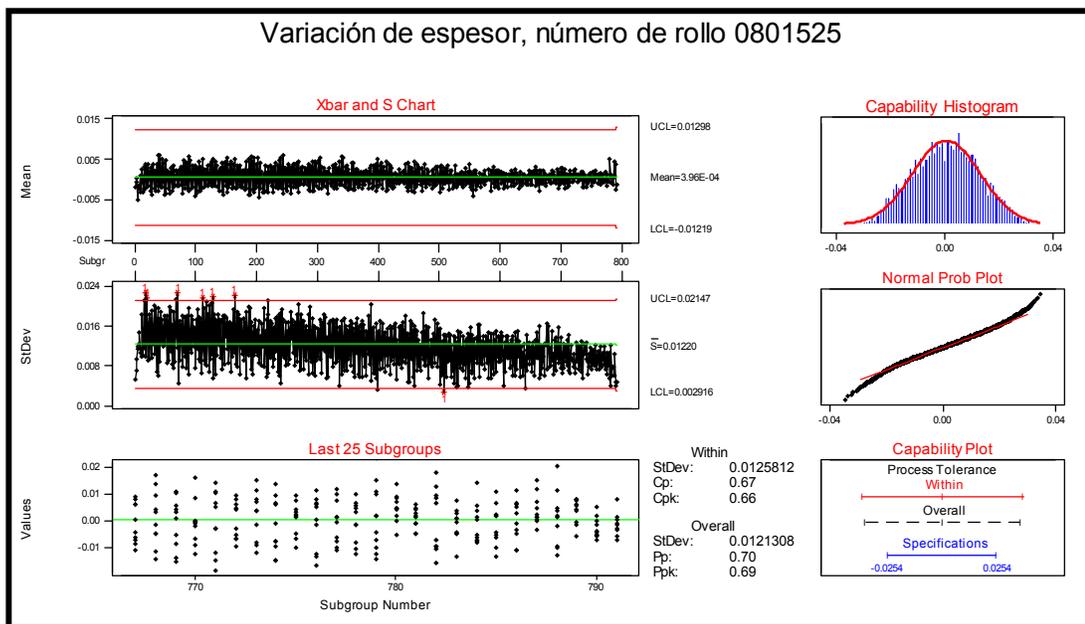


c) Resultados del análisis estadístico de la cédula de tipo progresiva.



d) Resultados del análisis estadístico de la tercera y cuarta cédula de laminación con cambio en la velocidad del último pase se pasa de 2.54 *m/seg* a 3 *m/seg*





e) Comparativo del análisis del diagrama de presión con respecto a la cédula de tipo 1 o de tipo de campana y la cédula de tipo 2 denominada progresiva.

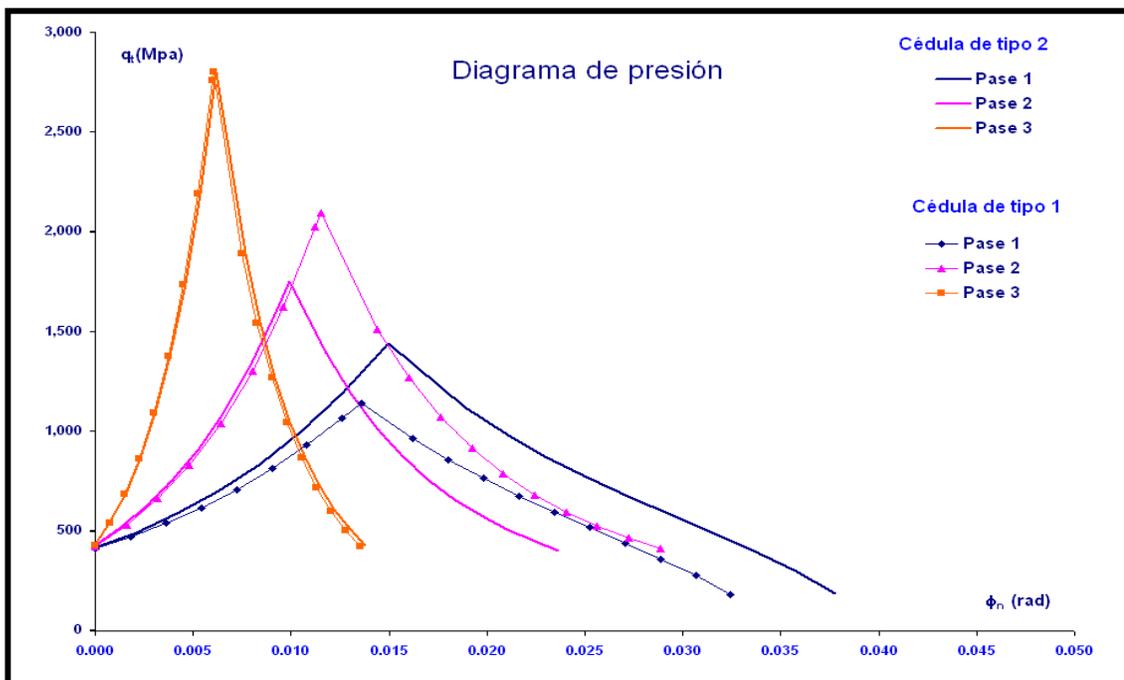


Fig. 4.05. Comportamiento del coeficiente de fricción con respecto a la velocidad del molino laminador. a) cédula número 1, b) cédula número 2

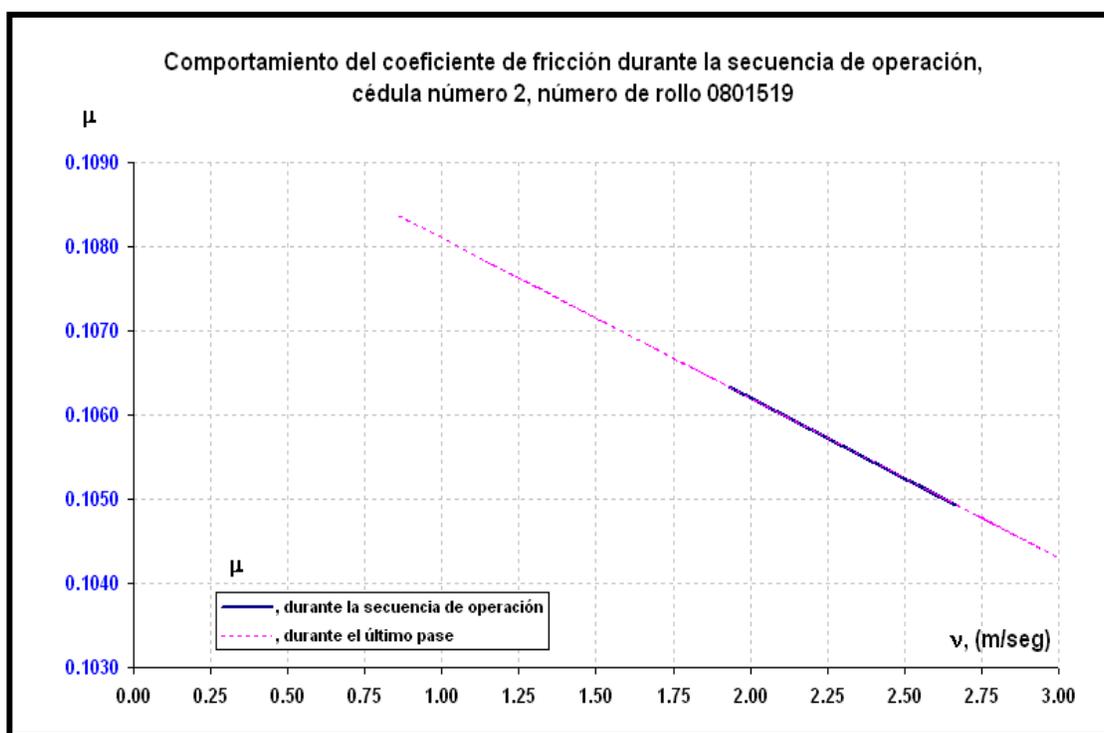
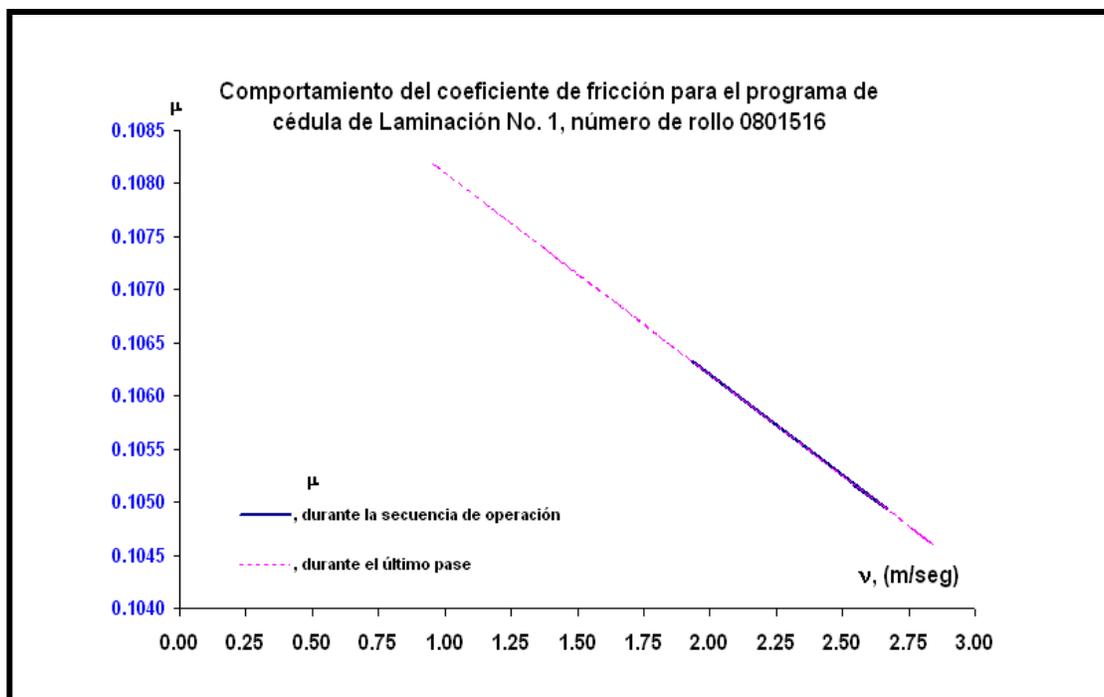


Figura 4.06. Representación senoidal y esquemática del resultado de forma de las primeras cédulas de laminación. Incisos, a) Cédula del tipo campana y cédula del tipo progresiva.

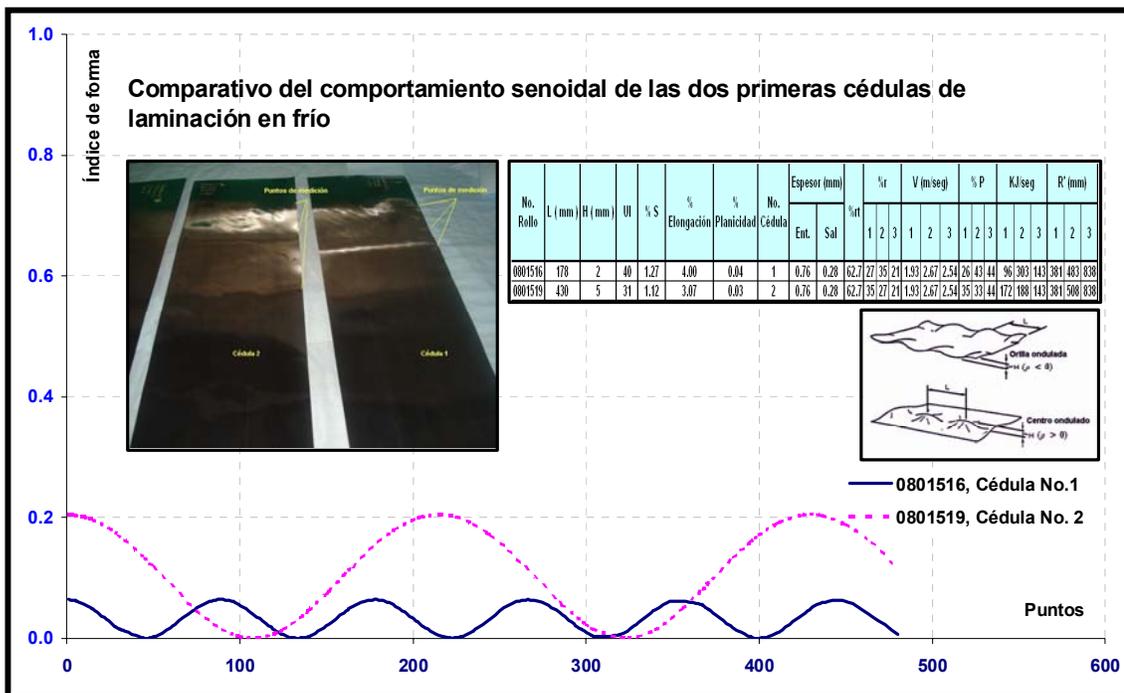
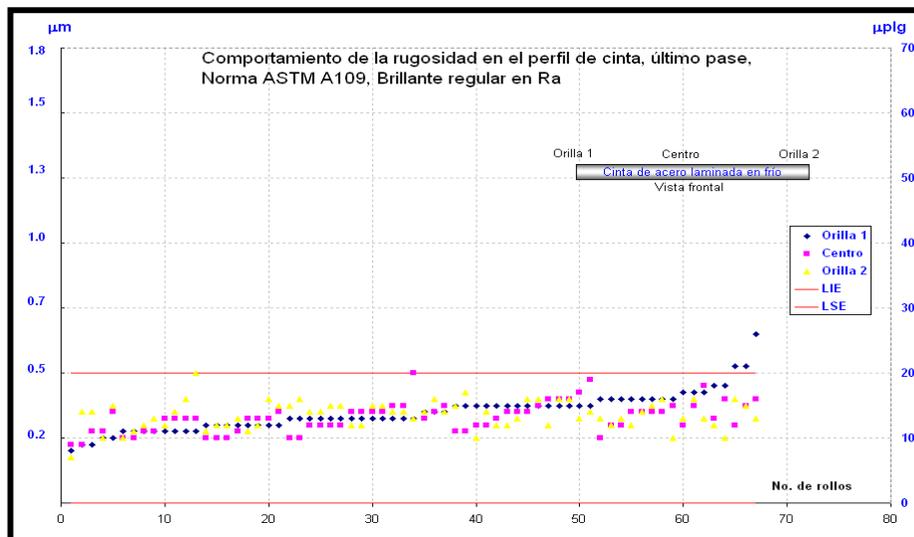


Figura 4.07. a) Comportamiento de la rugosidad en el perfil de cinta para el último pase, aplicado a diferentes rollos, análisis realizado basándose en la norma *EN ISO 1302*⁵² y diferenciado bajo la norma *ASTM A109*⁵³, b) Comportamiento de la rugosidad para tres números de rollo durante la campaña de reducción.

a)



b)

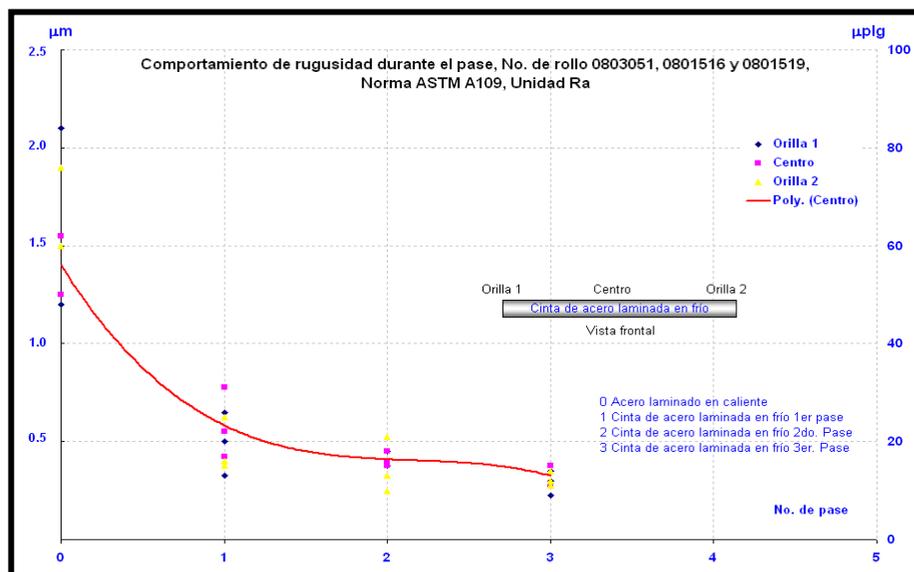


Figura 4.08. Comportamiento del radio del rodillo deformado del rodillo de trabajo con respecto al número de pases. Los números del lado de las gráficas indican el número de cédula que se encuentra descrita por esa línea.

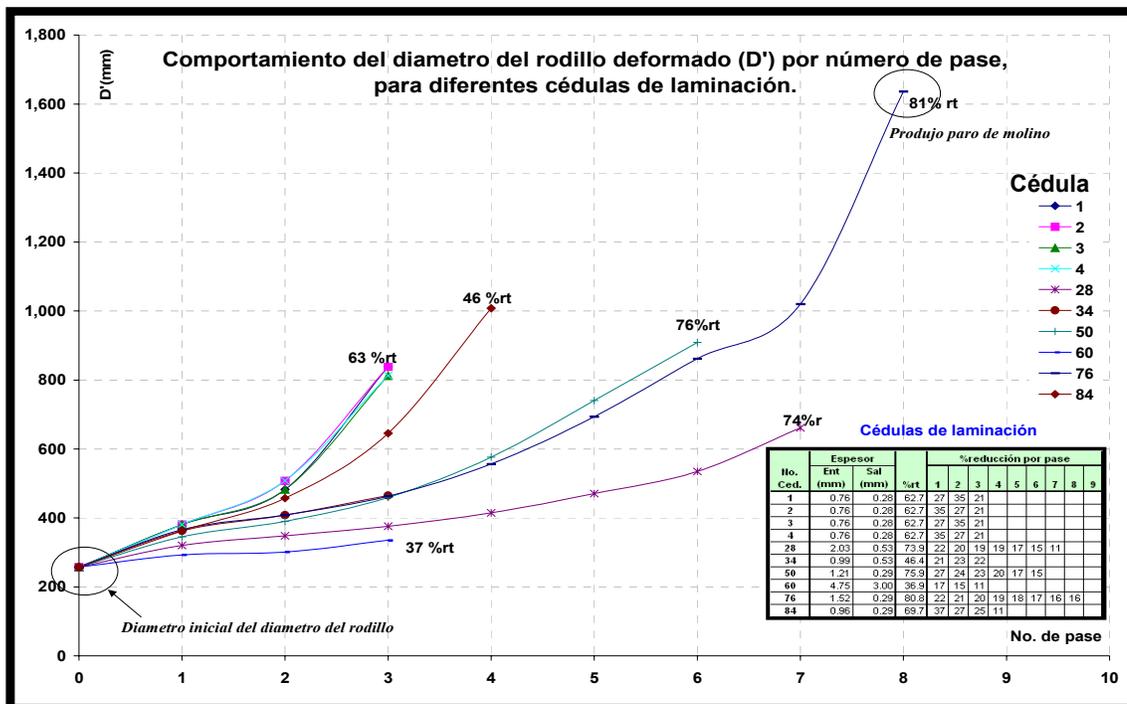


Figura 4.09. Comportamiento de la potencia estimada para el desarrollo de cédulas de laminación.

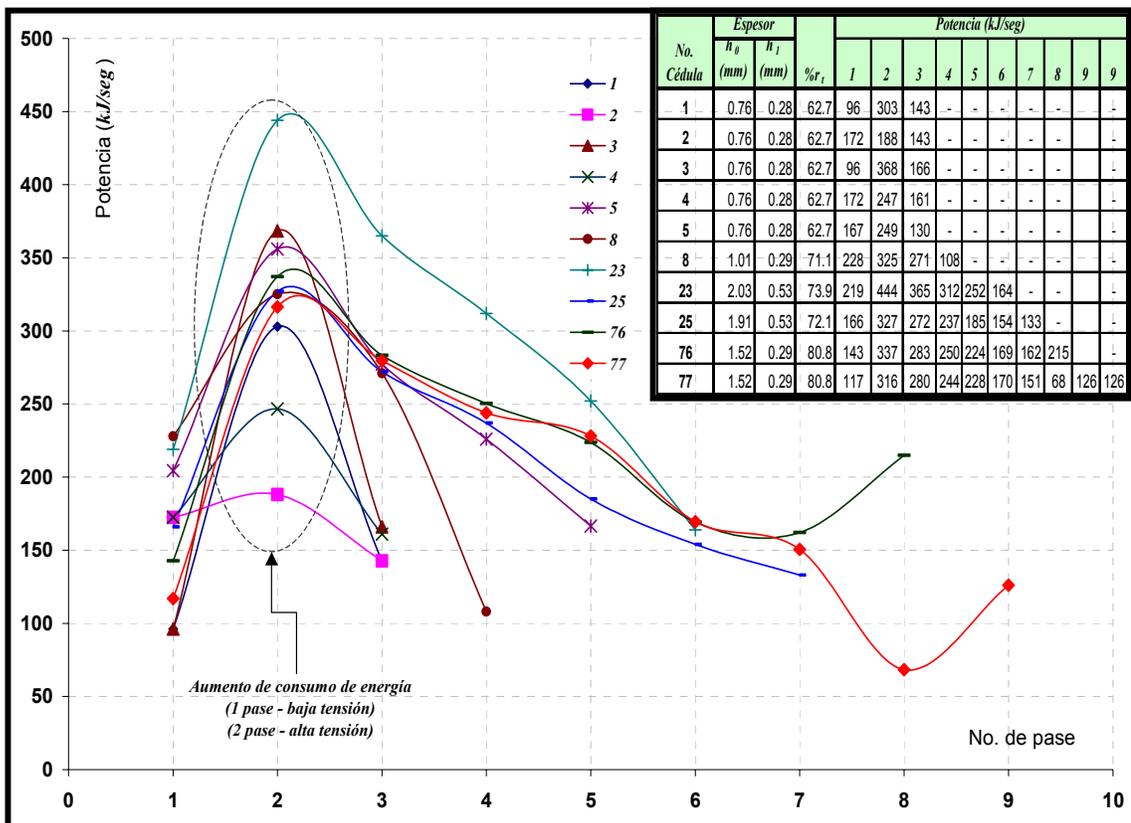
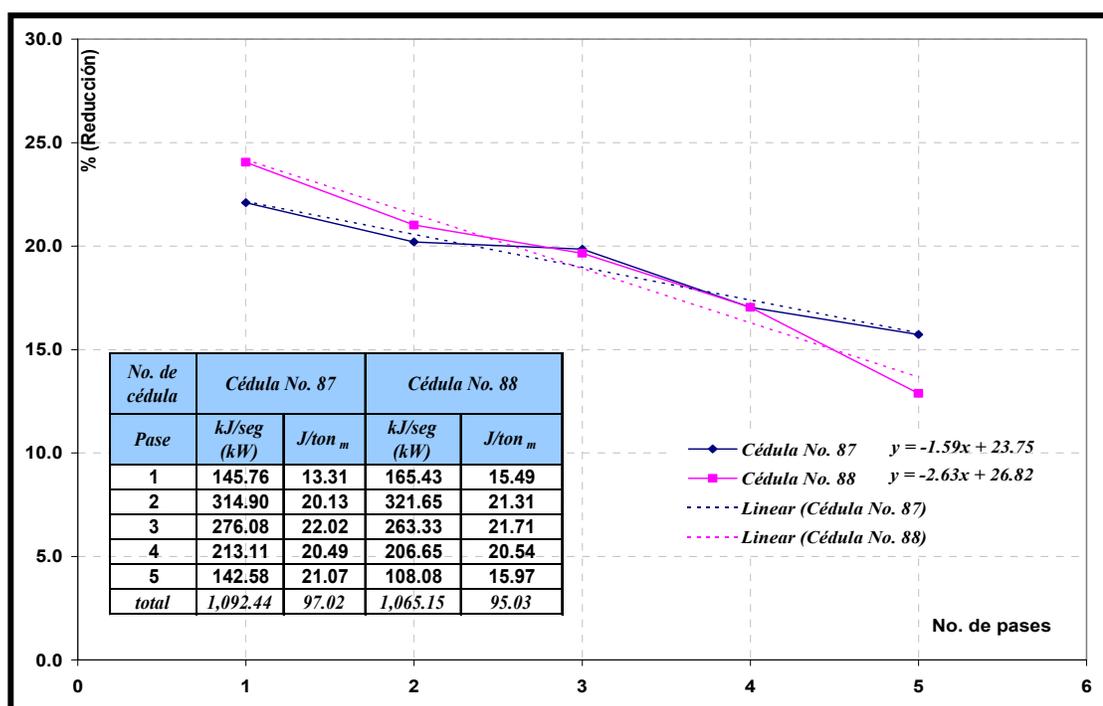
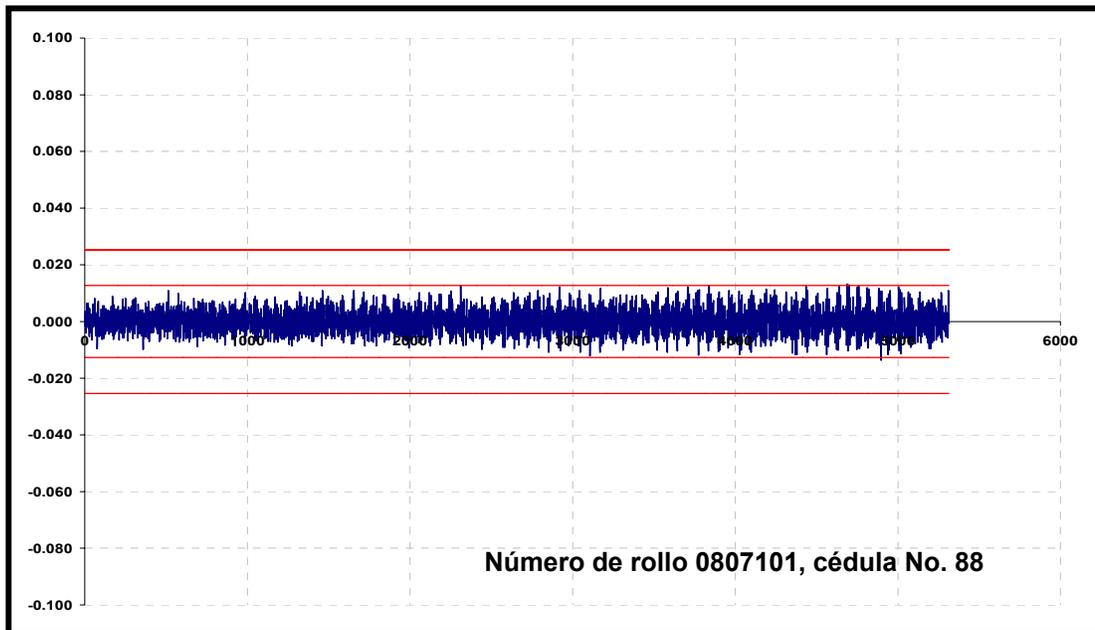


Figura 4.10. Cédulas de laminación en frío que experimentaron diferente pendiente de laminación durante la generación de la cédula de laminación.

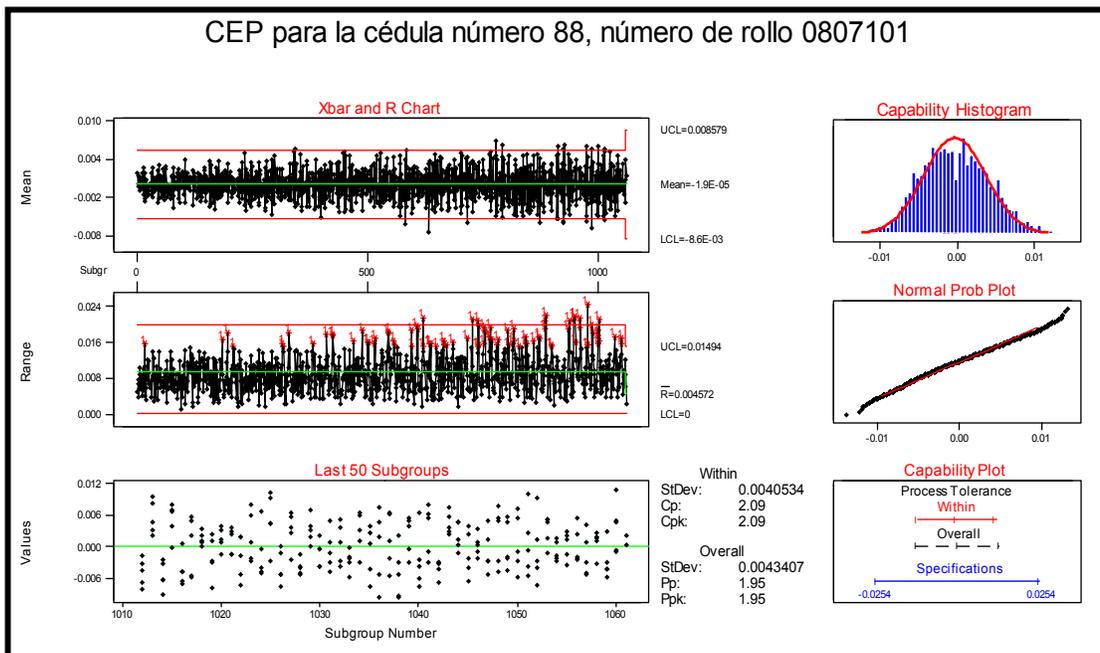
a) Comparativo de cédula número 87 con respecto a la cédula número 88, comparativo con respecto a eficiencia (J/ton_m) y potencia (kJ/seg).



b) Variabilidad del espesor durante el último pase de laminación, Cédula de laminación número 88 de 5 pases.



c) Control estadístico del proceso para el rollo 0807101, bajo cédula progresiva número 88.



d) Comparativo de los diagramas de presión para ambas cédulas de laminación.

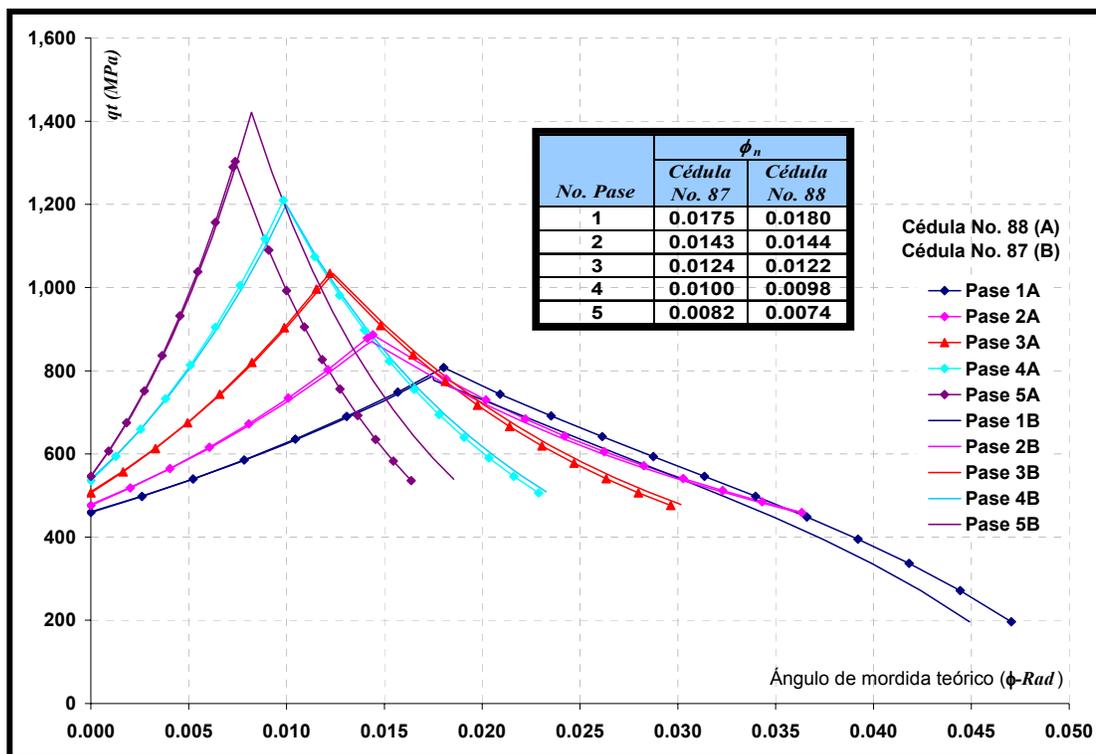
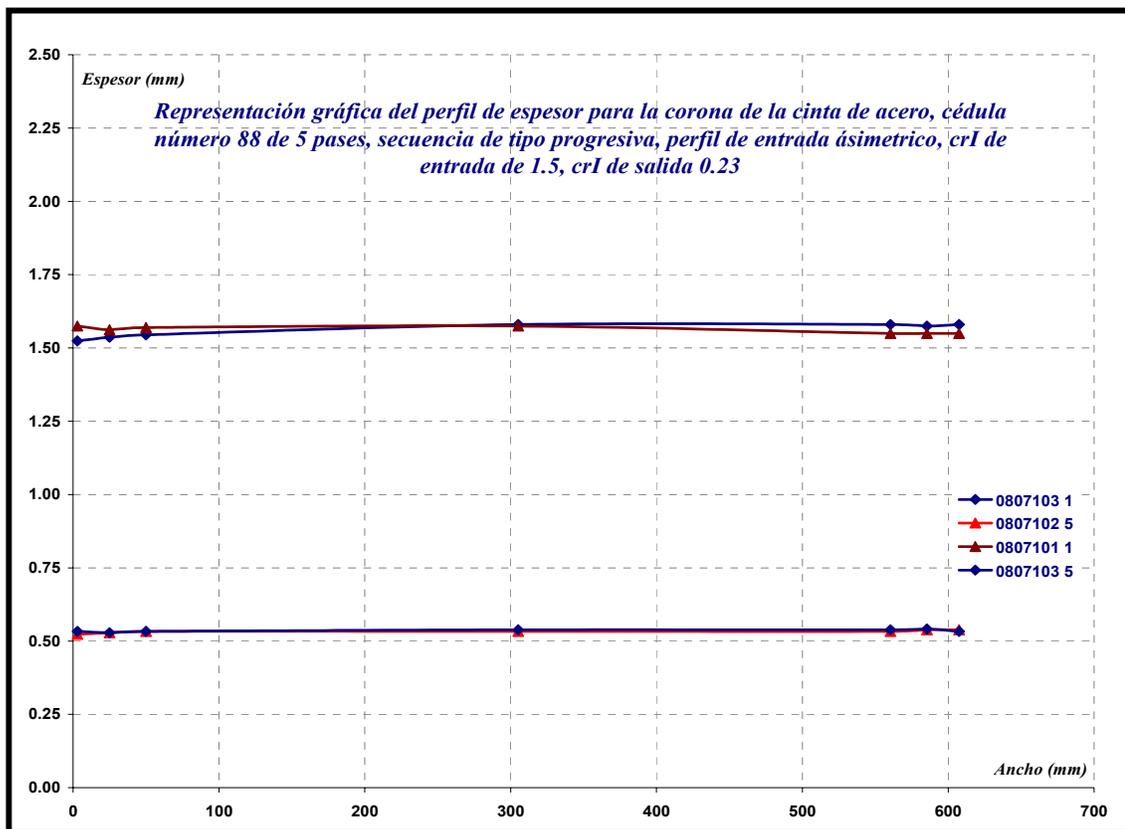


Figura 4.11. Representación gráfica del perfil de corona para cintas de acero 1006 de las cédulas de laminación número 88.



CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

INTRODUCCIÓN

Una de las principales características de la investigación para la optimización de cédulas de laminación fue el dar una representación gráfica de las cédulas de laminación con el fin de distinguir parámetros característicos de la misma cédula y así poder determinar zonas o pases que se consideren importantes en el desarrollo de la cédula de laminación.

La figura 5.01 nos indica el comportamiento de diferentes cédulas de laminación que han sido desarrolladas en operación sin un control adecuado del mismo, en donde es posible identificar zonas de la misma cédula que muestran porcentajes de reducción variando de un pase a otro sin una homogeneidad que permita garantizar no solo un flujo adecuado de material sino una optimización de la misma cédula tanto en energía, tiempo y calidad del material.

Esta misma representación gráfica proporciona los cambios inapropiados de espesores que pueden no garantizar un resultado óptimo de operación tanto en calibre, forma y insumos del molino. Una de las características de estas cédulas es que durante la secuencia de pases es posible ver que la no-

homogeneidad de la cédula no garantizara resultados adecuados del mismo desarrollo.

Para llevar cabo el desarrollo de la investigación se generó un método que parte de un análisis inicial de cédulas de tres pases, con un número de pases ya estables, desarrollando dos tipos; Una que presentara un incremento de la reducción en el segundo pase y la otra que presentara una secuencia progresiva decreciente en el porcentaje de reducción durante los pases, con el fin de demostrar la cédula de operación optima.

Cédulas de laminación del tipo campana y progresivas. Estas cédulas desarrolladas durante la investigación fueron con el fin de buscar la que mejor comportamiento tenga para el molino de laminación y al desarrollar el método que permita la optimización de las mismas para aplicación en campo e influya tecnológicamente en la operación del molino, involucrando un conjunto de herramientas que nos den el uso y obtención de la máxima capacidad del equipo para la mejor calidad y forma del material, entre las principales herramientas utilizadas para el desarrollo de cédulas de laminación están:

- ❖ Modelo matemático que permite predecir la fuerza de separación, construido bajo los siguientes criterios forma:
 1. Desarrollo de la curva constitutiva bajo el ensayo de tensión para los diferentes número de pases, obteniendo una ecuación polinomial de este tipo de curva.
 2. Diagramas de presión
 3. Desarrollo de cédula mediante la programación del porcentaje de reducción.

- ❖ Validación de los parámetros de espesor por medio del control estadístico del proceso.

- ❖ Validación del parámetro de planicidad basándose en la norma *ASTM A1030*.
- ❖ Influencia de la longitud de onda en la planicidad de la cinta por medio del índice de forma, el cual muestra comportamiento de la longitud y altura de onda basándose en el método de forma senoidal.

La optimización e innovación de la cédula no-solo por la reducción del número de pases se llega a ella sino por medio de la descripción gráfica de la misma es posible cuantificarla y desarrollar un comportamiento progresivo decreciente que permita innovar o perfeccionar dicha cédula aun teniendo la influencia o no de los motores de entrada de los desenrolladores de los molinos reversibles en frío.

5.1 MODELO DEL CÁLCULO DE LA FUERZA DE SEPARACIÓN.

El modelo (desarrollado bajo plataforma de Windows) permite obtener el cálculo de la fuerza de separación está basado en los conceptos de Bland y Ford, la parte del desarrollo está constituida bajo dos carátulas de operación, las cuales indican los parámetros de laminación que deben de entrar para obtener o desarrollar una cédula de laminación óptima. Al desarrollar la cédula de laminación se pudo contar con un valor predicho de la fuerza de separación, con este valor fue posible predecir la carga de operación del molino y poder controlar por medio del porcentaje de reducción los parámetros de potencia y corona térmica.

Se estableció una carga máxima de operación de en un rango de 50-70% de la fuerza permitida, así como los valores que permiten obtener una secuencia de operación estable, se constata que al sobrepasar estos valores

los rodillos de trabajo experimentarán alta fricción que genera coronas térmicas altas que el efecto del lubricante no sea tan eficaz, ocasionando un alto consumo de energía provocando el paro del molino. Por el contrario al tener fuerzas de separación menores puede ocasionar baja fricción y condiciones de deslizamiento que no sea posible laminarlo.

La Tabla 4.02 presenta diferentes cédulas y se marcan aquellas que presentaron problemas de laminación por los parámetros antes mencionados. El diámetro del rodillo deformado experimenta calentamiento, siendo los valores de diámetro del rodillo deformado indicativos del comportamiento de la corona térmica que puede experimentar el rodillo de trabajo, pero que es controlado en la práctica de laminación por medio de lubricantes o emulsiones que reducen de una manera eficiente el calentamiento que experimentan los rodillos de laminación.

La variable en especial que movía el modelo de laminación es el porcentaje de reducción en frío, el cual se fijó en base práctica asumiendo un porcentaje máximo para el primer pase de alrededor 30%, el cual está sujeto a la capacidad del motor de entrada y se ve reflejado en el modelo por la potencia utilizada, posteriormente se realizan porcentajes menores al primero y así gradualmente, excluyendo a la cédula de tipo campana que presenta una reducción máxima en el segundo pase pero la cual está sujeta a la capacidad de operación del motor principal.

5.1.1. CURVA CONSTITUTIVA

La curva constitutiva del acero se realizó primeramente en varias etapas, inició con la selección de diferentes números de rollos de diferentes pases de laminación, la cual incluye diferentes grados de acero utilizando un formato que permitiera registrar todos los datos posibles de laminación y con esto

determinar el acero de mayor uso con mayor variabilidad en el número de pases y características de laminación, siendo el de mayor demanda dentro de la operación de laminación (figura A1 del apéndice). La Tabla 5.1 presenta diferentes ensayos de tensión realizadas a diferentes grados de acero en las diferentes etapas de laminación.

Las curvas constitutivas, las cuales se llevaron a cabo con el desarrollo de los diferentes ensayos de tensión, es posible caracterizar al acero *SAE* 1006⁵² de una manera práctica o constitutivamente mediante el comportamiento del esfuerzo de cedencia del acero, y esto a su vez permite afirmar que el acero 1006 ira disminuyendo su capacidad de deformación conforme aumente el número de pases, lo cual se ve ligado a los porcentajes de reducción que se le apliquen.

Durante el desarrollo de las curvas constitutivas fue posible compararlo con otros dos grados de acero de alta importancia dentro de las especialidades de cintas de acero; lo que es el grado de acero de ultra bajo carbono libre de elementos intersticiales (*IF*) y el acero de medio carbono *SAE* 1050, ambos aceros de importancia o de especialidad en ingeniería pero de una menor demanda dentro de planta.

El desarrollo de las curvas constitutivas fue similar para los diferentes grados de acero, pero de acuerdo a sus composiciones químicas⁵², los tres aceros mostrarán características únicas que los diferencian uno de otro y estas características nos permiten concluir lo siguiente: 1). El acero 1050 presenta una capacidad menor para deformación, afectando su característica de tenacidad y por consiguiente con esto durante la secuencia del número de pases es importante manejar porcentajes de reducciones bajos debido a su endurecimiento por deformación, 2). Para el acero libre de elementos intersticiales, este acero presenta una capacidad mayor de deformación permitiendo el desarrollo de cédulas con un mayor porcentaje de reducción al

inicio de la cédula de laminación, las gráficas de los ensayos de tensión de estos dos grados de acero se pueden ver en las figuras A2 y A3.

El acero 1006 utilizado para la investigación presenta un comportamiento intermedio al realizar un comparativo de sus propiedades mecánicas con respecto a los otros dos grados de acero, en donde conforme aumenta el número de pases ira disminuyendo su capacidad de deformación y el área bajo las curvas de tensión ira disminuyendo gradualmente, al aumentar el porcentaje de reducción acumulada afectará sus características de tenacidad o su capacidad de absorber energía, debido a la deformación del material.

De la Tabla 5.1 se seleccionaron varios números de rollos, en especial del acero de bajo carbono 1006, actualmente para la planta es el de mayor demanda además de esto presenta una variabilidad mayor dentro de los parámetros de la cédula de laminación. En las figuras 5.05 y 5.06 presentan los diferentes números de pases junto a las curvas de esfuerzo - deformación del acero 1006 para los dos números de rollo seleccionados de 7 pases, a cada uno de estos dos rollos se construyeron las curvas constitutivas del acero 1006.

Ambos números de rollos presentaron un comportamiento similar en el desarrollo de la curva constitutiva, de esto se obtiene mediante los resultados del ensayo de tensión el esfuerzo de cedencia utilizado para estas curvas y el desarrollo correspondiente de la ecuación, la ecuación polinomial desarrollada describe el comportamiento del esfuerzo de cedencia al ir incrementándose la reducción durante el pase.

El desarrollo de la curva constitutiva del acero 1006 fue a partir de los ensayos de tensión y determinación del esfuerzo de cedencia del material, posteriormente se gráfica esta curva de estos esfuerzos y se obtiene la ecuación polinomial, ec. 5.01,

$$\sigma_0 = 0.006894(-0.0149r^4 + 2.5769r^3 - 153.07r^2 + 4018.9r + 26193) \quad \text{Ec. 5.01}$$

Donde, r es la reducción durante el proceso de deformación dentro del ángulo de contacto y σ_0 representa el esfuerzo de cedencia del material durante la deformación del material dentro del ángulo de contacto en N/mm^2 .

La ecuación permitió calcular el esfuerzo de cedencia durante la deformación en el ángulo de contacto y de este valor desarrollar el esfuerzo de constricción.

Además de incluir dentro de los ensayos de tensión, las microestructuras correspondientes para los diferentes números de rollos utilizados para la construcción de la curva constitutiva, la investigación no profundiza en un estudio microscópico debido al enfoque propio de la tesis que es el diseño de cédulas de laminación bajo parámetros de reducción en frío con el fin como se ha mencionado antes de optimizar e innovar cédulas de laminación en frío.

5.1.2. AJUSTE DEL MODELO DE LAMINACIÓN POR MEDIO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

Para todo proceso de deformación, la fricción es importante y necesaria debido a que transmite la energía de deformación de los rodillos de laminación a la cinta y previene la expansión lateral de la cinta siendo deformada.

Uno de los parámetros prácticos de la operación de laminación es el uso de coronas en los rodillos de trabajo y de apoyo que permite generar una flexión en ambos extremos motivando una fricción óptima que permita la deformación del material, el uso de rodillos planos para los procesos de laminación en frío se limita a cuestión de dar planeza a la cinta de acero más no de deformación.

La fricción es importante en el proceso de deformación en frío ya que es necesaria para laminar, uno de los parámetros que afecta la fricción o propiamente el exceso de fricción durante el pase es la corona térmica que experimentan los rodillos de trabajo llegando incluso a detener el molino de laminación, por lo que el control de fricción durante el pase se vuelve importante y el uso práctico de lubricantes se vuelve necesario para controlar las coronas térmicas que experimentan los rodillos de trabajo.

En la figura 5.07 se presentan dos curvas, una que indica el comportamiento de fricción con respecto a la velocidad de operación del molino laminador la cual es utilizada para comparación, y una segunda basada en resultados obtenidos de la fuerza de separación con respecto a diferentes cálculos del coeficiente de fricción. La gráfica incrustada indica primeramente que el coeficiente de fricción disminuye conforme la velocidad aumenta, a su vez se puede apreciar o observar que, dependiendo del cálculo del coeficiente de fricción visto por diferentes autores, el coeficiente de fricción puede experimentar caídas fuertes o decrementos que están también influenciados por la velocidad del molino al ir incrementándose, significando o repercutiendo con caídas o inestabilidad de la fuerza de separación en los valores obtenidos, donde puede alejarse del valor real de la fuerza de separación.

La gráfica a su vez indica el uso de otros dos cálculos del coeficiente de fricción que mantienen una estabilidad del coeficiente de fricción durante el aumento de velocidad, vistos como el cálculo de Mojica y Garza, Arimura y coautores¹⁷ que presentan estabilidad del coeficiente de fricción durante el aumento de velocidad con un decremento estable, por lo que el uso del primero para el cálculo del coeficiente de fricción y su aplicación al modelo de la fuerza de separación permitió mantener un ajuste adecuado o estable, acercando al valor real de la fuerza de separación.

De la misma figura 5.07 donde se presenta los resultados de la fuerza de separación medidos, basándose en diferentes cálculos del coeficiente de fricción y comparados uno con respecto a otros, los cálculos del coeficiente de fricción indican una fuerte caída del mismo que repercute sobre los valores de la fuerza de separación, esto indica que el mantener el coeficiente de fricción bajo o caídas durante los pases existirá un mayor deslizamiento que afecta la fuerza de separación y que en el caso del modelo se aleje del valor real. El uso de este cálculo del coeficiente de fricción permitió mantener un decremento estable del coeficiente de fricción durante los diferentes números de pases a diferentes velocidades mostrando valores más estables de la fuerza de separación.

5.1.3. CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS DEL DIAGRAMA DE PRESIÓN

El diagrama de presión se construye basándose en los resultados obtenidos de la carga aplicada por el molino sobre el arco de contacto y proporciona la distribución de la presión aplicada a la cinta de acero a través del área de contacto, conocida como mordida de laminación, en conjunto con el comportamiento del endurecimiento por deformación, colinas de fricción, un plano de entrada, un plano neutro y un plano de salida, en el plano neutro se centrará la máxima presión que experimenta la cinta durante el proceso de deformación en frío, el plano de salida se desplazará de un pase a otro dependiendo de la distribución de los porcentajes de reducción afectando el área de contacto la curva del diagrama de presión, siendo al inicio de la cédula de laminación el de mayor área y el último pase el de menor área pero en lo que respecta a sus propiedades la máxima carga se centrará en el último pase y la más baja en el primero.

Se compara los resultados de dos cédulas de laminación propuestas tomándolas como ejemplo, de estos resultados se define que la cédula de tipo progresiva experimentará un arco de contacto mayor con respecto a la cédula del tipo campana en el primer pase, debido a que la fuerza de separación en conjunto con el porcentaje de reducción durante el pase será mayor afectando el área de contacto proporcionalmente, se mantiene un coeficiente de fricción constante durante el pase manteniendo una longitud del arco de contacto mayor con respecto a la cédula de campana,

Para la cédula de tipo campana en el segundo pase el área de contacto será mayor debido al incremento del porcentaje de reducción en conjunto con la fuerza de separación, en este caso, siendo mayor la longitud del arco de contacto, debido a los incrementos de fuerza y reducción.

Durante el desarrollo de los pases de laminación el aumento del porcentaje de reducción en frío promueve un incremento en la longitud del arco de contacto. Se puede decir que al ir aumentando la presión sobre el arco de contacto, el área sobre este mismo disminuye, afectando el endurecimiento por deformación en conjunto con la fricción que experimente el material. Es importante mencionar que el ángulo de contacto varía en función de los porcentajes de reducción.

La figura 5.02, inciso a describe el comportamiento de la distribución de la presión sobre el arco de contacto, los incrementos de los porcentajes de reducción para un pase sobre todo al inicio de la cédula, repercuten en un aumento del área del arco de contacto, mientras para un tercer pase tanto la presión como el área en ambas cédulas de laminación mantuvieron un comportamiento similar, debido a las bajas reducciones que se aplican.

El aumento del área de contacto es proporcional al incremento del porcentaje de reducción durante el pase y en especial en el primer pase, el cual permite controlar los pases subsecuentes, figura 5.02 inciso b.

5.2 INESTABILIDAD DE LA FUERZA DE SEPARACIÓN.

La inestabilidad de la fuerza de separación durante el pase suele deberse a diferentes factores, siendo el de mayor importancia la geometría de laminación, donde suele involucrarse coronas de los rodillos de trabajo así como la de los rodillos de apoyo, excentricidad del molino laminador, velocidad de operación durante el pase y, por consiguiente, una distribución del porcentaje de reducción. Una manera de controlar la inestabilidad de la fuerza de separación es trabajar con los parámetros antes mencionados y así establecer una cédula óptima de laminación.

En la investigación se estableció el uso de coronas para el rodillo de trabajo de 76 - 51 μm (3-2 μplg) y se complementó la cédula con el uso de los rodillos balanceadores durante los primeros pases, con esto se permitió mantener baja la inestabilidad de la fuerza de separación. El uso del balanceador durante los primeros pases y su exclusión en el último pase fue primordial, permitió mantener una baja inestabilidad en la fuerza, esto es debido a que durante los primeros pases es donde existe una variabilidad de espesor mayor, en donde se establecieron los porcentajes de reducción mayores desde inicio de la cédula.

Los resultados que se muestran en la tabla 4.01 y en la figura 4.01, reflejan una distribución de carga uniforme al ser comparados los valores predichos del modelo contra los valores registrados del molino laminador. Para esta investigación no se pudo contar con registro punto por punto de la fuerza de separación, dado que los valores fueron tomados al momento de su lectura.

La dispersión del valor predicho contra el real fue de un error absoluto del 4%, con lo que se muestra la confiabilidad del modelo desarrollado.

5.3 VARIABILIDAD DEL PERFIL DE ESPESOR

Los resultados presentados en la figura 4.02 incisos a, b y c generados en base a registros y prácticas operativas, indican que las tres cintas de acero experimentaron cambios de velocidad durante el pase y estos cambios afectaron la variación del espesor, obteniendo valores del índice de capacidad del proceso inferior a *1*.

Los cambios de velocidad durante el pase se producen por diferentes causas, pero en especial por la manipulación del molino laminador durante operación y por consiguiente, afecta el espesor proveniente del molino. Se puede definir que la variación de velocidad durante el pase afecta el perfil del espesor y por ende debe evitarse y mantenerse constante durante todo el pase.

Otra de las razones que influye en la variación de espesor es la inestabilidad que suele presentar la fuerza de separación durante el pase, y que ésta, como se mencionó en los párrafos anteriores puede estar afectada por la geometría de laminación.

El estudio que se realizó a las dos cédulas propuestas refleja la necesidad de mantener constante la velocidad en todo el pase y estable la rampa para alcanzar la velocidad de operación. El incrementar o disminuir la velocidad durante el pase de laminación provoca el cambio en la fricción que experimenta el material en el área de contacto y con esto se genera inestabilidad de carga que afecta directamente el resultado el espesor deseado.

Establecer velocidades de operación óptimas en el último pase es con el fin de mantener una mínima variación de espesor y conseguir un índice de

capacidad del proceso superior al *1.33*, ya que al mantener la velocidad en el molino es posible decir que esta velocidad entra en sincronía con el molino y que por consiguiente no promueve una inestabilidad de carga que pueda provocar variación no deseable en el espesor. Al mantener una velocidad óptima en el último pase es posible mantener un perfil de espesor con valores superiores del *1.33*, dando confiabilidad de operación.

El comportamiento del coeficiente de fricción fue muy estable debido a que el cálculo se desarrolla en función de la velocidad de operación del molino laminador, conforme aumenta la velocidad del molino la fricción ira decreciendo gradualmente; Esto es debido a las condiciones hidrodinámicas que se establecen en el proceso de laminación en donde el lubricante fluye mucho mejor a mayor velocidad manteniendo un espesor de película de aceite mayor que en otras condiciones de operación donde el molino trabaja en baja velocidad, en la figura 5.03 mediante la simulación del modelo

5.4 COMPORTAMIENTO DEL PORCENTAJE DE REDUCCIÓN

Al discutir ambas cédulas de laminación se puede observar un comportamiento diferente de una cédula a otra presentándose principalmente en su primero y segundo pase. Para la cédula que presenta un comportamiento de reducción progresiva, esta cédula en el primer pase mostrará una longitud del arco de contacto mayor con respecto a la cédula de campana. Para la cédula con secuencia de campana la máxima reducción será en el segundo pase, y esto puede afectar aquellas cédulas que presenten un número de pases bajo (por ejemplo de 3 pases) en donde la planicidad del material puede ser el parámetro de mayor afectación. Al compararla cédula de campana con la cédula del tipo progresiva, en la cédula progresiva los defectos de forma pueden ser más fácilmente controlables sobre la secuencia de operación, el

comportamiento de la longitud del arco de contacto y el ángulo de contacto en el diagrama de diagrama de presión se puede observar en la figura 5.02 inciso a.

Mantener ciertos parámetros de laminación constantes fue con el fin de conseguir resultados óptimos de operación, entre ellos se puede mencionar la tensión que se aplica tanto en los enrolladores, desenrollador y el motor de entrada con el fin de manejarse siempre en máxima tensión, lo que debe de estar de acuerdo a la capacidad de operación del equipo, manejando el modelo de laminación por medio del porcentaje de reducción, el cual es utilizado como variable haciéndolo más estable.

En un punto aparte se puede mencionar que otros molinos reversibles no cuentan con motor de entrada o desenrollador, lo que condiciona una cédula con máxima reducción el segundo pase y un primer pase bajo en comparación al segundo, formando una cédula que se denominó de tipo campana, no siendo posible aplicar cédulas de uso progresivo debido a la falta de tensión del motor de entrada.

5.5 COMPORTAMIENTO DE LA PLANICIDAD

Hablar de la planicidad es un tema difícil ya que involucra un comportamiento en algunas ocasiones aleatorio influenciado por la geometría del mismo molino y en algunos casos interviene en especial la materia prima que se está utilizando. Se ha mencionado que así como se recibe el material, así es como debe salir, esto indica que si el material es recibido en buenas condiciones como por ejemplo libre de defectos (ondulación, camber, o algún otro defecto que suela afectar la forma del material) es posible obtener resultados satisfactorios de planicidad. No se debe descartar una buena cédula de laminación que garantice la forma del material.

Los resultados que se obtuvieron en este estudio fueron satisfactorios, demuestran que las cédulas desarrolladas permiten mantener la forma y calidad del material. Una regla fundamental es mantener criterios de calidad desde el inicio, es decir la corona para los rodillos de trabajo, materia prima de buenas condiciones, geometría de laminación adecuada para el pase, la velocidad de operación estándar y estable, diámetro de rodillos de trabajo ideal para el espesor adecuado, lubricación del material constante y con su concentración dentro de tolerancia, manteniendo todos estos parámetros dentro de las tolerancias permisibles es entonces posible obtener resultados satisfactorios de forma.

Para el desarrollo de las cédulas, así como se ha mencionado anteriormente, se mantuvieron parámetros constantes de laminación los cuales se pueden ver en el apéndice Tabla A2, los resultados indican que la cédula que presentó un comportamiento progresivo mostró una mejor planicidad y esto fue posible al tener una carga mayor al inicio de la cédula, permite obtener una recuperación adecuada del material en los pases subsecuentes. Tener pases intermedios con altos porcentajes de reducción puede generar problemas de forma, que posteriormente no son posibles de recuperar en los subsecuentes pases de laminación. Por lo que una buena práctica de laminación ayuda a mejorar notablemente la planicidad del material, así como también la distribución adecuada de los porcentajes de reducción durante el pase. Una buena práctica de laminación puede ser utilizar una reducción mínima y baja velocidad de operación en el último pase que permita controlar forma y calidad superficial de la cinta laminada en frío.

Cuando se desarrollan cédulas de laminación con el fin de buscar forma y calidad superficial, lo que desea es mantener una longitud de la ondulación de cresta a cresta lo más larga posible y, por consiguiente, manteniendo oscilaciones de baja altura.

La figura 5.04 muestra el comportamiento de la longitud de ondulación dependiendo el número de pases que se aplican en las cédulas de laminación, en la figura 5.04 incisos a, b y c, se aprecia que conforme aumenta el número de pases, el porcentaje de cintas que están dentro del parámetro de planicidad ideal de 40 *UI* tenderá a ser menor, debido a que el material empezara a experimentar calentamiento por la corona térmica que experimentan los rodillos de trabajo, donde como se ha mencionado anteriormente el mantener una concentración adecuada del lubricante así como su mantenimiento preventivo permite lograr resultados óptimos de planicidad, en algunas pruebas que arrojaron valores no ideales se pudo constatar que la concentración no era la adecuada por lo que se segregaron lotes de prueba.

Cierto número de cédulas de laminación se trabajaron con el mismo número de pases, pero con rampa en la velocidad de operación en el último pase y otras cédulas propuestas sin rampa en el último pase, comparando inciso a y b de la figura 5.04 tenemos que las cédulas que no tiene rampa, la longitud de ondulación se incrementa mientras aquellas que se desarrollaron con rampa reflejan longitud de ondulación corta repercutiendo sobre el valor de unidades *I*.

Una de las causas que afectan la cantidad de ondulaciones presentes en la cinta es el cambio de velocidad, debido a la compensación que realiza el molino con el aumento de velocidad, modificando la fuerza de separación que se aplica a la cinta de acero. La Tabla 5.2 indica el comportamiento de los parámetros de planicidad con respecto a los diferentes parámetros de laminación. Esta tabla representa un resumen de las diferentes cédulas propuestas, junto con sus resultados de planicidad. En la figura 4.06 por medio de una representación senoidal se puede ver la cantidad de ondulaciones presentes en una cinta al compararse una cédula con otra. En donde es posible aseverar que la manera en que se desarrolle la cédula de laminación, el número

de ondulaciones por longitud de la cinta ira aumentando o disminuyendo gradualmente.

5.6 RUGOSIDAD

El comportamiento de la rugosidad es similar en los diferentes tipos de cédulas, especialmente el último pase, en que la rugosidad es parecida en todos los materiales y está influenciado básicamente por la rugosidad que logra imprimir el rodillo de trabajo a la superficie de la cinta de acero, dando como resultado un acabado brillante regular de acuerdo a la norma, este comportamiento indica que la rugosidad de la cinta de acero es dependiente del matizado que logre imprimirse en los rodillos de trabajo y para un molino laminador en frío es muy consistente. En la figura 4.07, se muestra el comportamiento de la rugosidad para diferentes cintas de acero.

5.7 RADIO DEFORMADO

El radio del rodillo deformado es calculado en un segundo plano del modelo de laminación y está en base a la ecuación de Bland y Ford. Inicialmente se tomó la ecuación de Hitchcok pero después se descartó debido al ajuste requerido para el cálculo de la fuerza de separación.

El radio del rodillo deformado reflejaba en las diferentes cédulas de laminación que conforme aumentaba el número de pases el radio del rodillo deformado se incrementaba gradualmente, esto se puede ver en la figura 4.08, la cual refleja las características antes mencionadas, en lo que respecta la práctica, el resultado que arrojaba el modelo indicaba que para ciertos valores teóricos del radio del rodillo deformado el molino experimentaba una corona

térmica alta ocasionando incluso en algunas cédulas de laminación paro de proceso.

En la figura antes mencionada se ve el ejemplo de una cédula que experimentó alto valor del radio del rodillo deformado y en la práctica ocasionó problemas de forma y problemas de laminación debido a una inadecuada distribución de los porcentajes de reducción que pueden afectar la fuerza de separación, ocasionando como se ha mencionado antes, paros de molino.

Al unir este tipo de análisis con los resultados de potencia, figura 4.09 y Tabla 4.02 se pudo constatar prácticamente que el molino laminador trabajaba a la mitad de su capacidad de laminación debido al factor de seguridad del motor principal. De esta misma tabla se ve, que de acuerdo a los valores del rodillo deformado, a pesar de que el modelo arrojava valores altos de corona térmica, era posible controlarlos mediante el uso del lubricante que proporciona las condiciones hidromecánicas para llevar a cabo el proceso de deformación en frío.

El lubricante actúa directamente sobre este punto afectando el coeficiente de fricción, el uso de lubricantes o emulsiones es crear un sistema hidrodinámico que permita la reducción en frío, controlando la corona térmica que experimente el rodillo de trabajo.

Como un dato adicional, la fuerza de separación al ser un parámetro importante de cualquier proceso de laminación en frío, mediante las predicciones del modelo es posible ver el comportamiento del molino y decir que para valores arriba del 70% de carga ocasionará paros de proceso o inestabilidad del mismo.

5.8 CÉDULAS DE LAMINACIÓN PROGRESIVAS

Durante las diferentes etapas de la investigación se describieron cédulas mediante una representación gráfica, con el propósito de mantener una distribución de carga uniforme durante el pase, al apoyarse con los valores predichos por el modelo. El desarrollo de las cédulas permite trabajar con la mejor distribución de potencia utilizada para laminación, y la manera de lograr reducir el consumo de energía es distribuyendo los porcentajes de reducción durante la secuencia de pases respetando límites de carga para cada reducción, en la práctica repercute sobre la operación de laminación al momento de que el operador describe el comportamiento del molino con un menor esfuerzo de laminación durante la reducción.

En la figura 4.10 inciso a, se plasman las representaciones gráficas de dos cédulas de laminación en donde se pone en práctica el desarrollo de la investigación, más aparte una redistribución de la reducción empleada durante los pases y la carga de laminación empleada, se registran valores del modelo predicho en cuanto potencia utilizada de laminación. La reducción de potencia se obtuvo debido a la redistribución de los porcentajes de reducción durante el pase en conjunto con carga empleada. El perfil del espesor se mantiene satisfactoriamente y presenta una dispersión debajo de los límites de control, la figura 4.10 inciso b, plasma estos resultados.

5.9 PERFILES ASIMÉTRICOS - CUÑA

La cuña es una característica típica de los procesos de cinta estrecha de bajo carbono de tolerancia estricta, esto es debido a la capacidad de los molinos laminadores de ancho angosto regidos bajo la norma *ASTM A109*. Una cinta de acero se define como una lámina de acero de un ancho menor a los

610 *mm* (24.00”) y en un espesor de 0.2032 - 4.75 *mm* (0.008”- 0.187”) de tolerancia estricta dimensionalmente y en propiedades mecánicas.

La cuña estará presente en las cintas de acero y describirá el espesor a lo ancho de la cinta como un perfil del tipo asimétrico, la cinta de acero presenta un espesor mayor en el centro, y las orillas de la cinta serán diferentes una ligeramente mayor que la otra pudiendo variar de un extremo a otro el espesor, en algunos casos al ser dividido en dos múltiplos podrá presentarse el caso del espesor mayor estar al extremo de las orillas. De estos dos casos mencionados, el caso que más presencia tiene es el primero de los perfiles asimétricos descritos, la Tabla 5.3 muestra los diferentes valores obtenidos para la medición de la cuña en la cinta de acero.

Dentro de los defectos característicos que se suelen presentar al tener una cuña alta y que no sea controlada por medio de una cédula óptima de laminación es el defecto del tipo de orilla ondulada en donde un extremo de la cinta presentara más ondulación que el otro extremo, presentando un cierto tipo de inclinación en la ondulación, aunado a la excentricidad del molino, por lo que el uso de cédulas progresivas es de importancia en estos perfiles del tipo cuña o asimétricos.

El método utilizado para cuantificación permite medir el perfil de cuña por cinta de una manera práctica, en donde es posible identificar 3 zonas de la cinta a lo ancho: zona del centro, zona de la orilla y zona de caída de orilla, la figura 2.09 representa de una manera gráfica las zonas descritas para el ancho de la cinta de acero. La característica principal del método es medir o cuantificar la cuña de la cinta de acero lo cual denota un perfil de espesor asimétrico a lo ancho de la cinta, la cuña es descrita como la diferencia existente entre el espesor que se encuentra a 25 *mm* de la orilla de la cinta vista la cinta de una manera frontal y la diferencia existente entre un extremo y otro dará la cuña de la cinta de acero.

Se realizó primeramente la medición de este parámetro a diferentes números de cintas de acero, abarcando diferentes número de cédulas de laminación, y dando una aplicación especial a las dos últimas cédulas de laminación generadas, (en especial a la cédula número 88) en las cuales se investiga el comportamiento del espesor así como la relación de corona o el perfil del espesor a lo ancho de la cinta. De acuerdo a la figura 5.08 incisos a, b y c se puede ver que los perfiles de la cinta entran de forma asimétrica y con la aplicación de la cédula progresiva es posible recuperar el material, tanto en ambas cédulas aplicadas, se obtuvo un buen perfil del espesor de salida recuperando la simetría, pasando de una relación de corona de 1.5 a 0.71 completamente recuperado y una cuña que paso de 0.04 a 0.01 *mm* en esta cédula.

Estas pruebas demuestran que es posible corregir o controlar la cuña que presentan las cintas de acero desde inicio de proceso por medio de prácticas de laminación, la cédula progresiva es una de las más efectiva en este tipo de productos debido a que es posible recuperar después del primer pase la forma ideal de la cinta por lo que el aplicar un porcentaje alto desde el inicio permite recuperar adecuadamente las características de forma de la cinta de acero laminada en frío grado 1006 mediante el uso de un molino laminador en frío reversible de cuatro rodillos.

CAPÍTULO V

TABLAS

Tabla 5.1 Resultados de los ensayos de tensión desarrollados para la construcción de las curvas constitutivas de la cinta de acero *SAE 1006*, cinta de acero libre de elementos intersticiales (*IF*) y acero *SAE 1050*.

a).

Cinta de acero IF																
No. mta	No. de rollo	No. pase	orden fab.	Presión (%)	tensión enrollador (kg)	tensión desenrollador (kg)	h_0 (mm)	h_1 (mm)	h (mm)	% r	w (mm)	v (mm/seg)	σ_o (Mpa)	σ_{max} (Mpa)	% e	Dureza (HRB)
1	0702297	DEC					2.299				546.1		200	270	41.20	40
1	0702297	1	P06-2771	32	3882	1197	2.286	1.524	0.531	33.3	546.1	1,138	370	390	9.60	79
1	0702297	2	P06-2771	35	3875	3824	1.524	0.889	0.531	41.7	546.1	2,642	460	490	3.75	80
1	0702297	3	P06-2771	35	3447	834	0.889	0.533	0.531	40.0	546.1	1,260	510	510	2.60	93

b).

Cinta de acero 1006																
No. mta	No. de rollo	No. pase	orden fab.	Presión (%)	tensión enrollador (kg)	tensión desenrollador (kg)	h_0 (mm)	h_1 (mm)	h (mm)	% r	w (mm)	v (mm/seg)	σ_o (Mpa)	σ_{max} (Mpa)	% e	Dureza (HRB)
1	0702338	DEC					4.877				506.4		260.00	320.00	35.80	66
1	0702338	1	P06-2813	28	3,882	842	4.877	4.178	2.362	14.323	506.4	1,596	400.00	420.00	16.15	79
1	0702338	2	P06-2813	27	3,889	3,875	4.178	3.792	2.362	9.240	506.4	2,805	430.00	450.00	15.25	83
1	0702338	3	P06-2813	26	3,882	3,882	3.792	3.581	2.362	5.559	506.4	3,100	440.00	490.00	8.35	84
1	0702338	4	P06-2813	28	3,889	3,868	3.581	3.178	2.362	11.277	506.4	3,079	440.00	470.00	10.15	86
1	0702338	5	P06-2813	27	3,898	3,889	3.178	2.870	2.362	9.672	506.4	3,130	460.00	490.00	7.15	85
1	0702338	6	P06-2813	27	3,889	3,882	2.870	2.578	2.362	10.177	506.4	3,074	490.00	520.00	7.10	88
1	0702338	7	P06-2813	25	3,882	2,220	2.578	2.388	2.362	7.389	506.4	2,119	500.00	550.00	5.48	89
2	0703074	DEC					3.792				538.2		180.00	260.00	33.85	62
2	0703074	1	P06-2929	29	3,882	1,132	3.792	3.162	1.623	16.611	538.2	2,266	430.00	460.00	13.55	78
2	0703074	2	P06-2929	29	3,889	3,882	3.162	2.921	1.623	7.631	538.2	3,049	440.00	460.00	9.55	82
2	0703074	3	P06-2929	25	3,889	3,882	2.921	2.642	1.623	9.565	538.2	3,140	450.00	470.00	8.95	85
2	0703074	4	P06-2929	26	3,889	3,882	2.642	2.337	1.623	11.538	538.2	3,054	490.00	530.00	5.80	88
2	0703074	5	P06-2929	27	3,889	3,889	2.337	2.083	1.623	10.870	538.2	3,100	480.00	510.00	6.35	89
2	0703074	6	P06-2929	29	3,889	3,889	2.083	1.829	1.623	12.195	538.2	3,079	510.00	560.00	5.25	91
2	0703074	7	P06-2929	27	3,889	1,371	1.829	1.626	1.623	11.111	538.2	2,200	540.00	570.00	1.55	94

c).

Cinta de acero 1050																	
No. mta	No. de rollo	No. pase	orden fab.	Presión (%)	tensión enrollador (kg)	tensión desenrollador (kg)	h_0 (mm)	h_1 (mm)	h (mm)	% r	w (mm)	v (mm/seg)	σ_o (Mpa)	σ_{max} (Mpa)	% e	Dureza (HRB)	
1	0702062	DEC					0.914					520.7		280.00	400.00	14.25	76
1	0702062	1	P06-2600	28	3,381	2,286	0.914	0.749	0.419	18.056	520.7	2,134	390.00	600.00	4.25	80	
1	0702062	2	P06-2600	39	2,924	2,482	0.749	0.533	0.419	28.814	520.7	2,835	470.00	680.00	3.05	94	
1	0702062	3	P06-2600	43	2,649	624	0.533	0.439	0.419	17.619	520.7	1,865	410.00	700.00	1.80	96	

Tabla 5.2 Tabla de resultados de los valores de planicidad con respecto a los diferentes parámetros de laminación.

No. Rollo	UI	% Plan.	Cpk	Ppk	crI	Opc.	Pase	No. Cédula	Pases	v_{op} (m/seg)	v_r (m/seg)	h_0 (mm)	h_1 (mm)	$\%r_i$
0801516	40	0.040	1.01	1.01		S/R	pp	1	3	2.81	-	0.76	0.28	62.7
0801519	31	0.031	1.89	1.90		S/R	pp	2	3	2.77	-	0.76	0.28	62.7
0805324	13	0.013	2.50	2.11	0.43	S/R	up	58	3	2.56	-	0.44	0.29	33.5
0805328	14	0.014	3.05	2.56		S/R	up	58	3	2.72	-	0.44	0.29	33.5
0805325	14	0.014	2.61	2.35	0.25	S/R	up	58	3	2.68	-	0.44	0.29	33.5
0805327	74	0.074	3.26	2.86	0.43	S/R	up	58	3	2.83	-	0.44	0.29	33.5
0801685	1	0.001	1.14	1.07		C/R	pp	5/14	3	3.51	-	0.76	0.29	61.7
0801683	7	0.007	1.70	1.62		C/R	pp	5/14	3	3.45	2.71	0.76	0.29	61.7
0801682	8	0.008	0.75	0.70		C/R	pp	5/14	3	3.41	2.66	0.76	0.29	61.7
0801684	23	0.023	0.73	0.68		C/R	pp	5/14	3	3.43	min	0.76	0.29	61.7
0801686	30	0.030	1.11	1.05		C/R	pp	5/14	3	3.47	1.18	0.76	0.29	61.7
0801681	62	0.062	1.59	1.32		C/R	up	5/14	3	2.63	2.20	0.76	0.29	61.7
0801522	44	0.044	1.40	1.40		S/R	pp	4	3	3.49	-	0.76	0.28	62.7
0802307	37	0.037	0.79	0.77		C/R	up	34	3	3.14	1.99	0.99	0.53	46.4
0802308	93	0.093	1.31	1.27		C/R	up	34	3	3.15	1.70	0.99	0.53	46.4
0801525	27	0.027	0.73	0.69		S/R	pp	3	3	3.44	-	0.76	0.28	62.7
0801775	7	0.007	0.68	0.66		C/R	up	10	3	3.04	2.28	1.88	0.76	59.6
0801772	24	0.024	0.68	0.64		C/R	up	10	3	3.02	2.52	1.88	0.76	59.6
0801781	49	0.049	0.80	0.79		C/R	up	11/18	3	3.28	min	1.82	0.76	58.2
0801778	9	0.009	0.65	0.62		C/R	up	11/18	3	2.82	2.41	1.82	0.76	58.2

No. Rollo	UI	% Plan.	Cpk	Ppk	crI	Opc.	Pase	No. Cédula	Pases	v _{op} (m/seg)	v _r (m/seg)	h ₀ (mm)	h ₁ (mm)	%r _i
0801620R	98.70	0.099	1.10	1.03		S/R	pp	51	4	3.60	-	0.96	0.29	69.7
0804309	0.91	0.001	2.16	1.72		S/R	up	84	4	2.64	-	0.96	0.29	69.7
0804307	1.25	0.001	1.69	1.37		S/R	up	84	4	2.50	-	0.96	0.29	69.7
0804308	9.64	0.010	1.73	1.36		S/R	up	84	4	2.62	-	0.96	0.29	69.7
0804311A	249.80	0.250	1.78	1.39		S/R	up	84	4	2.52	-	0.96	0.29	69.7
0804312A	2.04	0.002	3.35	3.12		S/R	up	84	4	2.68	-	0.96	0.29	69.7
0804312B	53.17	0.053	3.63	3.13		S/R	up	84	4	2.67	-	0.96	0.29	69.7
0804314	0.17	0.000	2.43	2.03		S/R	up	84	4	2.55	-	0.96	0.29	69.7
0805373	1341	1.341	1.14	1.02		S/R	1er	73	4	1.33	var	0.76	0.29	61.7
0806031	34	0.034	1.91	1.82	4.76	S/R	up	65	4	3.03	-	1.12	0.53	52.5
0806035	42	0.042	1.39	1.31	-2.50	S/R	up	65	4	3.09	-	1.12	0.53	52.5
0806019	55	0.055	2.09	2.06	9.70	S/R	up	65	4	2.59	-	1.12	0.53	52.5
0806033	65	0.065	1.65	1.55	-1.96	S/R	up	65	4	3.05	-	1.12	0.53	52.5
0806037	132	0.132	1.32	1.20	8.27	S/R	up	65	4	2.74	-	1.12	0.53	52.5
0801710	24	0.024	1.24	1.01		C/R	up	8/16	4	3.21	var	1.01	0.29	71.1
0801711	37	0.037	1.30	1.07		C/R	up	8/16	4	3.21	var	1.01	0.29	71.1
0801714	4	0.004	2.81	2.36		C/R	up	9/15	4	1.66	1.15	1.00	0.29	70.8
0801712	10	0.010	2.18	1.96		C/R	up	9/15	4	3.36	2.63	1.00	0.29	70.8
0801715	47	0.047	1.59	1.36		C/R	up	9/15	4	3.14	min	1.00	0.29	70.8
0801713	49	0.049	2.01	1.71		C/R	up	9/15	4	2.60	2.37	1.00	0.29	70.8
0801784	7	0.007	0.60	0.61		C/R	up	12/17	4	3.23	var	1.78	0.76	57.3
0801787	37	0.037	0.58	0.60		C/R	up	12/17	4	3.70	var	1.78	0.76	57.3
0801790	39	0.039	0.68	0.68		C/R	up	12/17	4	3.29	var	1.78	0.76	57.3

No. Rollo	UI	% Plan.	Cpk	Ppk	crI	Opc.	Pase	No. Cédula	Pases	v _{op} (m/seg)	v _r (m/seg)	h ₀ (mm)	h ₁ (mm)	%r _i
0806140	55	0.055	0.83	0.86		C/R	pp	67	5	3.74	3.44	1.52	0.59	60.9
0802305	11	0.011	1.10	1.04		S/R	up	83	5	2.82	min	2.03	0.76	62.6
0802297	31	0.031	1.36	1.39		S/R	pp	83	5	3.39	-	2.03	0.76	62.6
0801793	5	0.005	0.50	0.51		S/R	pp	13	5	3.65	-	1.91	0.76	60.1
0801799	6	0.006	0.53	0.54		S/R	pp	13	5	3.58	-	1.91	0.76	60.1
0801796	45	0.045	0.52	0.54		S/R	pp	13	5	3.47	-	1.91	0.76	60.1
0801808	9	0.009	0.49	0.51		C/R	pp	13'	5	3.54	min	1.91	0.76	60.1
0801805	22	0.022	0.64	0.61		C/R	up	13'	5	2.99	min	1.91	0.76	60.1

No. Rollo	UI	% Plan.	Cpk	Ppk	crI	Opc.	Pase	No. Cédula	Pases	v _{op} (m/seg)	v _r (m/seg)	h ₀ (mm)	h ₁ (mm)	%r _i
0804024	30	0.030	1.85	1.51		C/R	up	82	6	2.15	var	0.96	0.29	69.7
0804020	315	0.315	1.70	1.45		C/R	up	82	6	3.17	2.08	0.96	0.29	69.7
0804309	18	0.02	2.19	1.72		C/R	up	82	6	2.64	-	0.96	0.29	69.7
0806148	35	0.035	1.74	1.64	3.77	C/R	up	66	6	2.78	var	2.03	0.59	70.8
0806146	204	0.204	1.20	1.13	2.82	C/R	up	66	6	3.11	2.97	2.03	0.59	70.8
0806144	238	0.238	0.69	0.68	3.20	C/R	pp	66	6	3.03	var	2.03	0.59	70.8
0806007	64	0.064	2.10	1.97	4.72	C/R	up	68	6	2.75	2.25	2.18	0.53	75.7
0806009	105	0.105	1.83	1.79	-2.63	S/R	up	68	6	2.69	-	2.18	0.53	75.7
0806024	88	0.088	2.47	2.10	7.69	S/R	up	71	6	2.11	-	1.12	0.31	72.3
0804303	25	0.025	3.11	2.50		S/R	up	54	6	2.67	-	1.21	0.29	75.9
0804304	99	0.099	3.35	2.90		S/R	up	54	6	2.68	-	1.21	0.29	75.9
0804305	888	0.888	3.34	2.75		S/R	up	54	6	2.67	-	1.21	0.29	75.9
0804306	15	0.015	2.45	1.95		S/R	up	54	6	2.69	-	1.21	0.29	75.9
0806213	28	0.028	2.05	1.74	0.48	S/R	up	74	6	2.65	-	1.08	0.29	72.9
0806214	139	0.139	2.08	1.72	4.40	S/R	up	74	6	2.76	-	1.08	0.29	72.9
0806005	46	0.046	2.08	2.070	13.62	S/R	up	63	6	2.95	-	1.91	0.53	72.1
0806001	109	0.109	1.90	1.760	-27.27	S/R	up	63	6	2.87	-	1.91	0.53	72.1
0803051	4	0.004	2.75	2.450		C/R	up	30	6	3.03	1.70	0.99	0.29	70.5
0803050	75	0.075	1.51	1.450		C/R	pp	30	6	3.34	1.64	0.99	0.29	70.5
0803058B	159	0.159	2.21	1.950		C/R	up	30	6	3.20	2.64	0.99	0.29	70.5

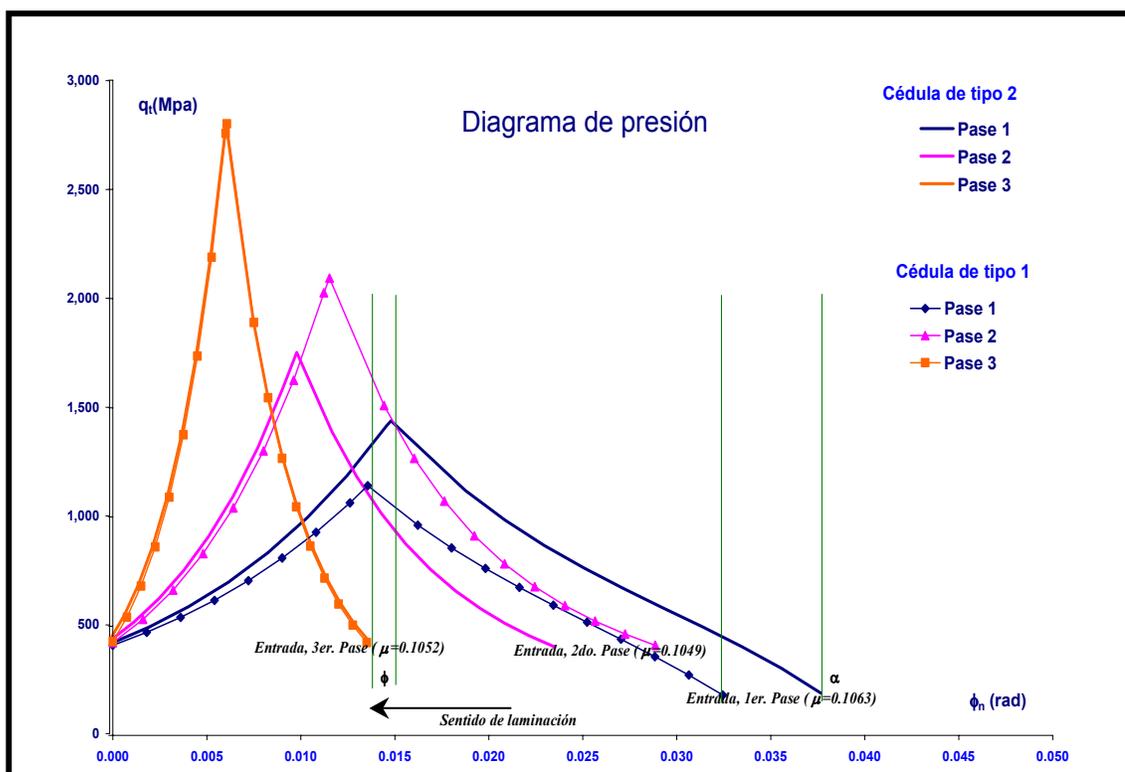
No. Rollo	UI	% Plan.	Cpk	Ppk	crI	Opc.	Pase	No. Cédula	Pases	v _{op} (m/seg)	v _r (m/seg)	h ₀ (mm)	h ₁ (mm)	%r _i
0806222	94	0.094	1.57	1.43		S/R	pp	75	7	3.51	-	1.52	0.29	80.8
0806221	885	0.885	1.94	1.59		S/R	up	75	7	2.63	-	1.52	0.29	80.8
0806218	983	0.983	1.89	1.53		S/R	up	75	7	2.68	-	1.52	0.29	80.8
0806217	2638	2.638	2.14	1.67		S/R	up	75	7	2.61	-	1.52	0.29	80.8
0803306	0	0.000	0.93	0.84	0.590	C/R	up	28/41	7	2.66	1.18	2.03	0.53	73.9
0803302	2	0.002	0.87	0.85	1.679	C/R	pp	28/41	7	3.40	2.59	2.03	0.53	73.9
0803300	2	0.002	0.94	0.87	3.061	C/R	pp	28/41	7	3.00	1.42	2.03	0.53	73.9
0803304	2	0.002	0.88	0.80	2.315	C/R	up	28/41	7	2.99	1.18	2.03	0.53	73.9
0802303	21	0.021	1.10	1.13		C/R	pp	28/41	7	3.66	3.37	2.03	0.53	73.9
0802301	42	0.042	1.33	1.21		C/R	up	28/41	7	1.83	1.14	2.03	0.53	73.9
0802295	88	0.088	1.67	1.74		C/R	pp	28/41	7	3.70	3.38	2.03	0.53	73.9

Tabla 5.3 Resultados de los ensayos del perfil cuña (asimétrico) a la cinta de acero de bajo carbono *SAE 1006*, en diferentes etapas del proceso de laminación.

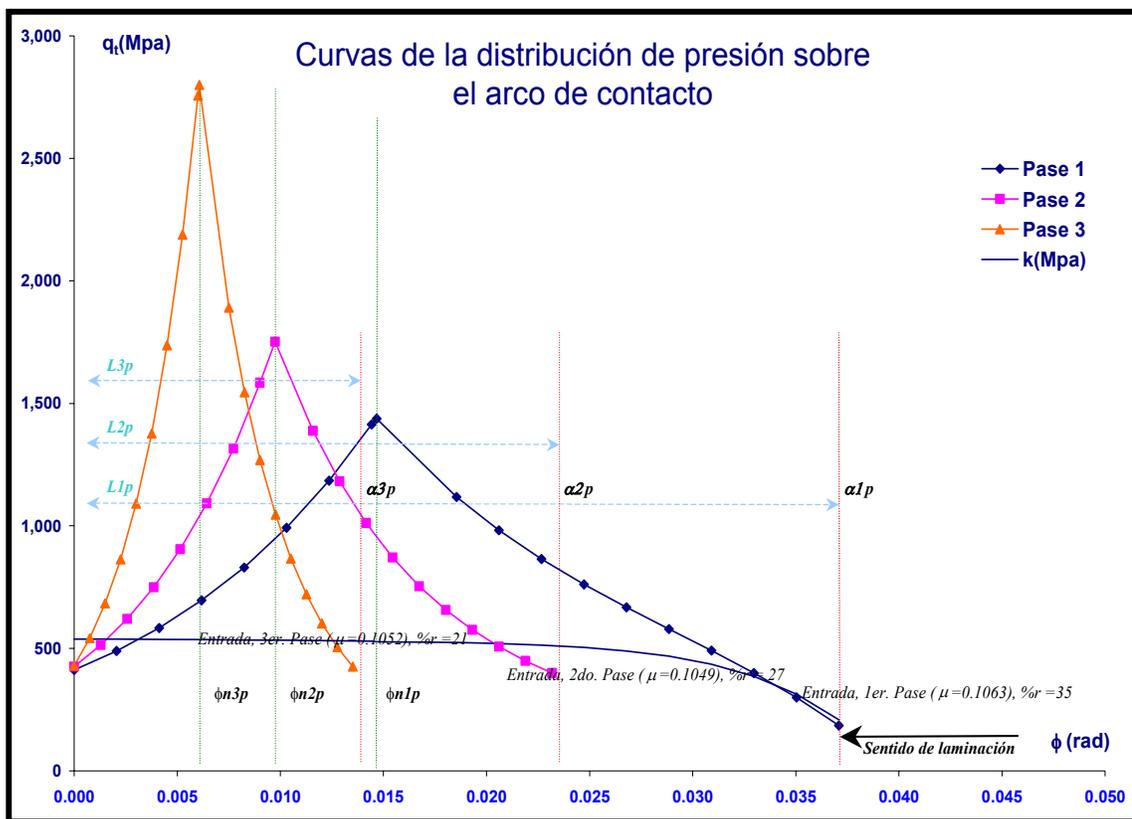
No. Rollo	No. de pase	w (mm)	No. Cédula	Espesores a 3, 25, 50 mm de la orilla en ambos extremos y centro de la cinta de acero								Promedios (mm)			Coronas parciales					Cuña		Corona
				he"	hl"	hJ"	hc	hJ'	hl'	he'	hJ	hl	he	chl	chJ	chl'	chJ''	chl''	chl	chl'		
0803304	7	611	28	0.54	0.55	0.55	0.55	0.53	0.53	0.53	0.54	0.54	0.53	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	-0.02	2.31		
0803306	7	611	28	0.53	0.53	0.55	0.54	0.54	0.54	0.52	0.55	0.54	0.52	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.59		
0803302	7	611	28	0.53	0.53	0.54	0.53	0.52	0.51	0.51	0.53	0.52	0.52	0.01	0.00	0.02	-0.01	0.00	-0.02	1.68		
0803300	7	611	41	0.51	0.53	0.54	0.56	0.55	0.56	0.55	0.54	0.54	0.53	0.02	0.02	0.00	0.02	0.03	0.03	3.06		
0805324	2	610	58	0.33	0.36	0.35	0.32	0.32	0.60	0.43	0.33	0.48	0.38	-0.17	-0.02	-0.29	-0.03	-0.04	0.24	-52.41		
0805324	3	610	58	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.31	0.32	0.30	0.30	0.30	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.25		
0805325	3	610	58	0.28	0.27	0.29	0.30	0.29	0.28	0.28	0.29	0.28	0.28	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	7.84		
0805325	3	610	58	0.29	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.43		
0805326	3	610	58	0.30	0.29	0.29	0.30	0.29	0.30	0.30	0.29	0.30	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.43		
0805326	3	610	58	0.28	0.29	0.29	0.28	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	-0.01	-0.01	-0.02	0.00	-0.01	0.01	-3.93		
0805328	3	610	58	0.27	0.29	0.30	0.26	0.28	0.28	0.27	0.29	0.29	0.27	-0.03	-0.03	-0.02	-0.04	-0.03	-0.01	-9.66		
0806005	3	611	63	1.09	0.80	0.95	0.99	0.93	0.91	0.96	0.94	0.85	1.02	0.13	0.05	0.08	0.04	0.19	0.11	13.62		
0806003	3	611	63	0.88	0.89	1.00	0.96	1.00	1.11	1.08	1.00	0.98	-0.04	-0.04	-0.15	-0.04	0.07	0.22	4.10			
0806001	4	611	63	0.71	0.64	0.61	0.64	0.86	0.99	0.93	0.74	0.82	0.82	-0.18	-0.09	-0.35	0.03	0.00	0.35	-27.27		
0806011	2	611	65	0.63	0.72	0.69	1.11	0.89	0.59	0.84	0.79	0.65	0.73	0.46	0.33	0.52	0.43	0.39	-0.13	41.14		
0806013	2	611	65	0.79	0.55	0.76	0.91	0.73	0.86	0.92	0.74	0.71	0.85	0.20	0.17	0.05	0.15	0.36	0.31	22.32		
0806017	3	611	65	0.76	0.58	0.73	0.87	0.78	0.54	0.53	0.75	0.56	0.65	0.30	0.11	0.32	0.14	0.29	-0.04	35.04		
0806031	4	611	65	0.53	0.53	0.53	0.52	0.53	0.53	0.51	0.53	0.53	0.52	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.01	-1.96		
0806033	4	611	65	0.53	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52	0.52	-0.01	0.00	-0.03	0.00	0.00	0.03	-2.50		
0806035	4	611	65	0.47	0.50	0.49	0.51	0.46	0.46	0.47	0.47	0.48	0.47	0.03	0.03	0.05	0.02	0.01	-0.04	5.50		
0806037	4	611	65	0.44	0.46	0.48	0.49	0.48	0.49	0.47	0.48	0.48	0.46	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	2.71		
0806144	6	676	66	0.58	0.60	0.60	0.62	0.59	0.59	0.59	0.60	0.60	0.59	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	-0.01	3.20		
0806146	6	676	66	0.60	0.61	0.60	0.59	0.58	0.60	0.61	0.59	0.61	0.60	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-2.36		
0806146	6	676	66	0.55	0.56	0.57	0.59	0.57	0.57	0.55	0.57	0.57	0.55	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	3.77		
0806148	1	676	66	0.53	0.53	0.53	0.57	0.53	0.54	0.52	0.52	0.53	0.53	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.01	5.39		
0806148	2	676	66	0.53	0.53	0.55	0.56	0.55	0.56	0.53	0.55	0.55	0.53	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	2.82		
0806142	2	676	67	0.51	0.53	0.54	0.62	0.57	0.56	0.54	0.55	0.54	0.53	0.08	0.07	0.07	0.08	0.09	0.02	12.73		
0806142	1	676	67	0.61	0.58	0.58	0.61	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.60	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	4.17		
0806140	1	676	67	0.56	0.56	0.56	0.58	0.56	0.56	0.58	0.56	0.56	0.57	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	4.35		
0806140	2	676	67	0.54	0.55	0.54	0.57	0.55	0.52	0.52	0.54	0.54	0.53	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	-0.02	5.38		
0806007	6	611	68	0.53	0.53	0.53	0.53	0.51	0.51	0.51	0.52	0.52	0.52	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00	-0.03	2.38		
0806009	6	611	68	0.45	0.46	0.47	0.48	0.47	0.47	0.45	0.47	0.46	0.45	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	4.72		
0806024	1	599	71	0.53	0.53	0.53	0.51	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	0.00	-5.00		
0806024	2	24	71	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.69		
0806024	2	599	71	0.28	0.30	0.30	0.33	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	7.69		
0806024	3	599	71	0.25	0.28	0.29	0.29	0.30	0.29	0.30	0.26	0.29	0.28	0.25	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	2.18		
0805373	3	631	73	0.36	0.30	0.36	0.33	0.33	0.30	0.36	0.34	0.30	0.36	0.03	-0.01	0.03	-0.03	0.03	0.00	7.69		
0805375	4	631	73	0.30	0.30	0.28	0.30	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.01	0.03	0.03	-0.03	0.00	-0.03	4.17		
0805375	4	631	73	0.28	0.30	0.30	0.28	0.30	0.28	0.28	0.30	0.29	0.28	-0.01	-0.03	0.00	-0.03	-0.03	-0.03	-4.55		
0805375	4	631	73	0.26	0.25	0.26	0.28	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.03	0.02	0.04	0.02	0.03	-0.01	12.39		
0805373	4	631	73	0.27	0.25	0.26	0.26	0.27	0.26	0.26	0.27	0.25	0.26	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	3.14		
0806213	1	622	74	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0806213	2	622	74	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.30	0.28	0.28	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0806214	1	622	74	0.27	0.26	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26	0.27	0.26	0.26	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	4.40		
0806214	2	622	74	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.48		
0806218	9	597	77	0.28	0.30	0.33	0.30	0.30	0.28	0.28	0.32	0.29	0.28	0.01	-0.01	0.03	-0.03	0.00	-0.03	4.17		
0806220	9	597	77	0.26	0.27	0.26	0.29	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.26	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	-0.01	7.08		
0806221	9	597	77	0.28	0.28	0.28	0.28	0.30	0.28	0.28	0.29	0.28	0.28	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0806221	9	597	77	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0806346	1	711	86	1.77	1.75	1.75	1.79	1.80	1.80	1.82	1.78	1.78	1.79	0.02	0.01	-0.01	0.04	0.04	0.05	0.85		
0806346	6	28	86	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23		
0806346	6	711	86	0.53	0.54	0.54	0.55	0.55	0.55	0.54	0.55	0.54	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.23		
0807094	1	610	87	1.57	1.57	1.58	1.58	1.55	1.54	1.56	1.56	1.55	1.57	0.02	0.01	0.03	-0.01	0.01	-0.02	1.37		
0807093	1	610	87	1.53	1.53	1.53	1.56	1.55	1.55	1.54	1.54	1.54	1.53	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.02	1.46		
0807095	1	610	87	1.53	1.52	1.54	1.56	1.55	1.56	1.56	1.54	1.54	1.55	0.02	0.02	0.00	0.02	0.04	0.03	1.26		
0807103	1	610	88	1.52	1.54	1.54	1.58	1.58	1.57	1.58	1.56	1.56	1.55	0.02	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	1.53		
0807102	5	610	88	0.53	0.53	0.53	0.54	0.54	0.54	0.53	0.54	0.53	0.53	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.71		
0807102	5	610	88	0.52	0.53	0.53	0.53	0.53	0.54	0.54	0.53	0.53	0.53	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.01	0.00		

Figura 5.02 Comparativo del análisis del diagrama de presión con respecto a la cédula del tipo 1 o de campana y la cédula de tipo 2 denominada progresiva.

a) Diagrama de presión, sobreponiendo la cédula del tipo campana (No. 1) sobre la cédula progresiva (No.2), comparando el comportamiento del ángulo y longitud del arco de contacto.



b) Diagrama de presión de la cédula de tipo progresiva (No.2) aplicada al primer lote de prueba y al número de cinta de acero 0801519.



c).Diagrama de presión de la cédula de tipo campana (No.1) aplicada al primer lote de prueba con número de cinta de acero 0801516.

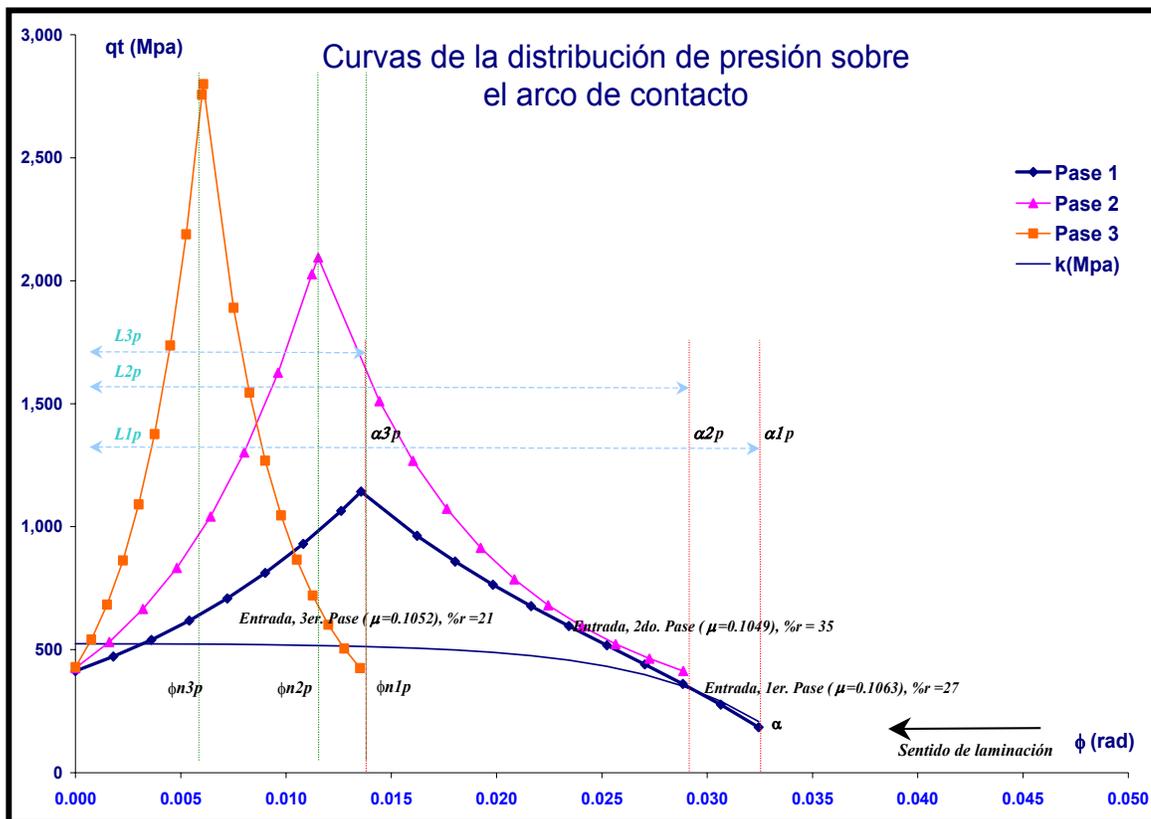


Figura 5.03 Comportamiento del parámetro de fricción de acuerdo al simulador con relación a la velocidad de operación del molino laminador.

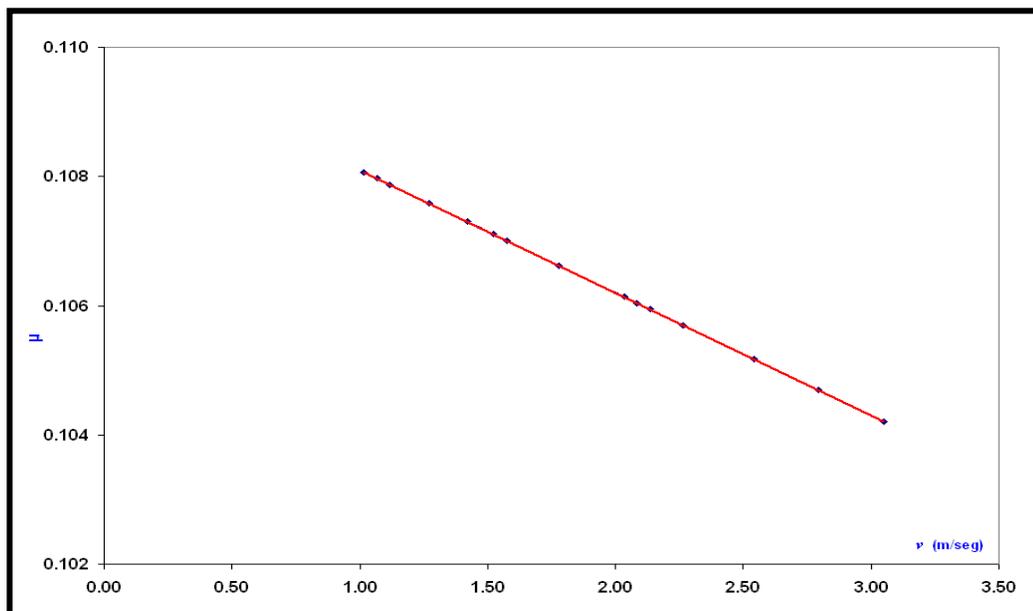
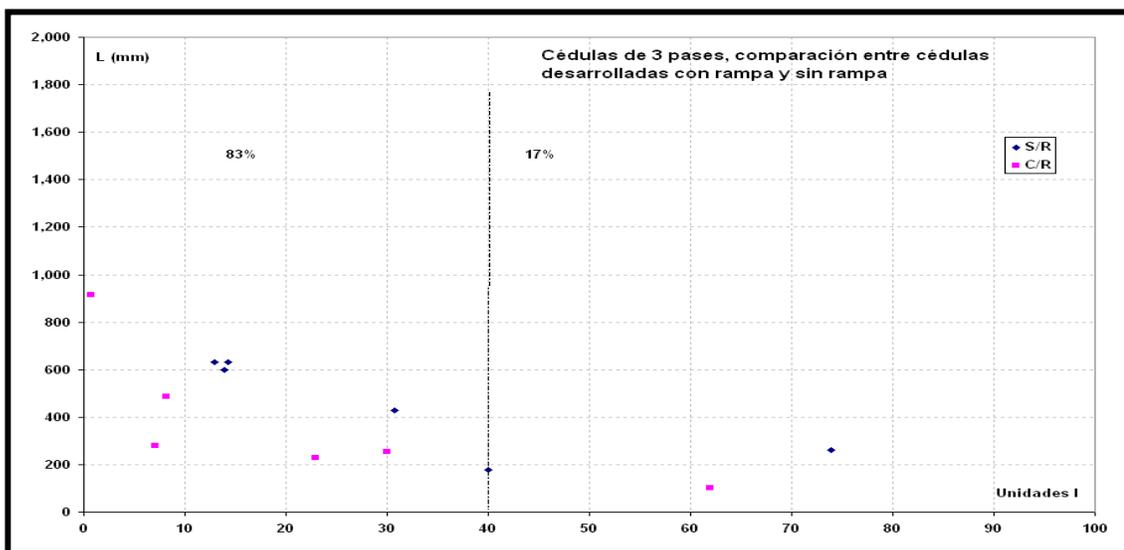
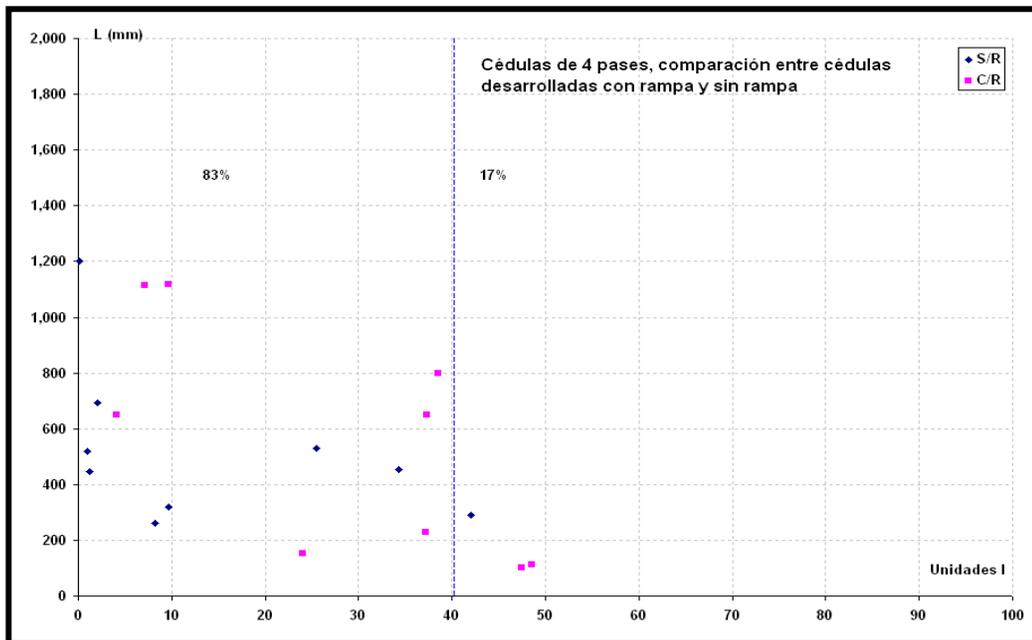


Figura 5.04 Comportamiento de la longitud de ondulación de la cinta con respecto a la planicidad del material en relación con el número de pases. Los porcentajes descritos en la figura representan los valores dentro del rango de planicidad ideal de operación 40UI.

a). Cédulas de 3 pases, comparación entre cédulas desarrolladas con rampa y sin rampa.



b). Cédulas de 4 pases, comparación entre cédulas desarrolladas con rampa y sin rampa



c). Cédulas de 5 pases, comparación entre cédulas desarrolladas con rampa y sin rampa

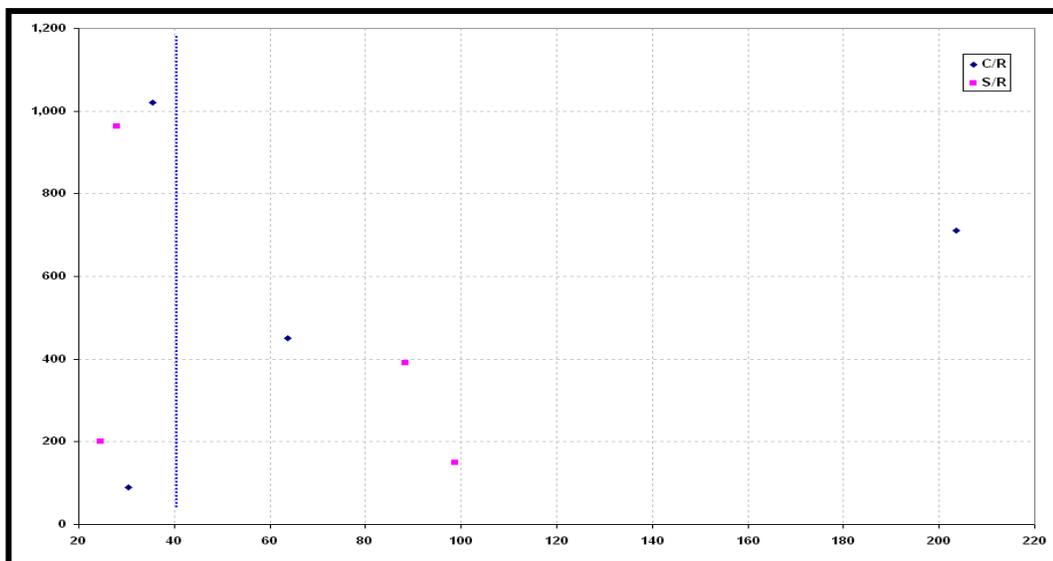
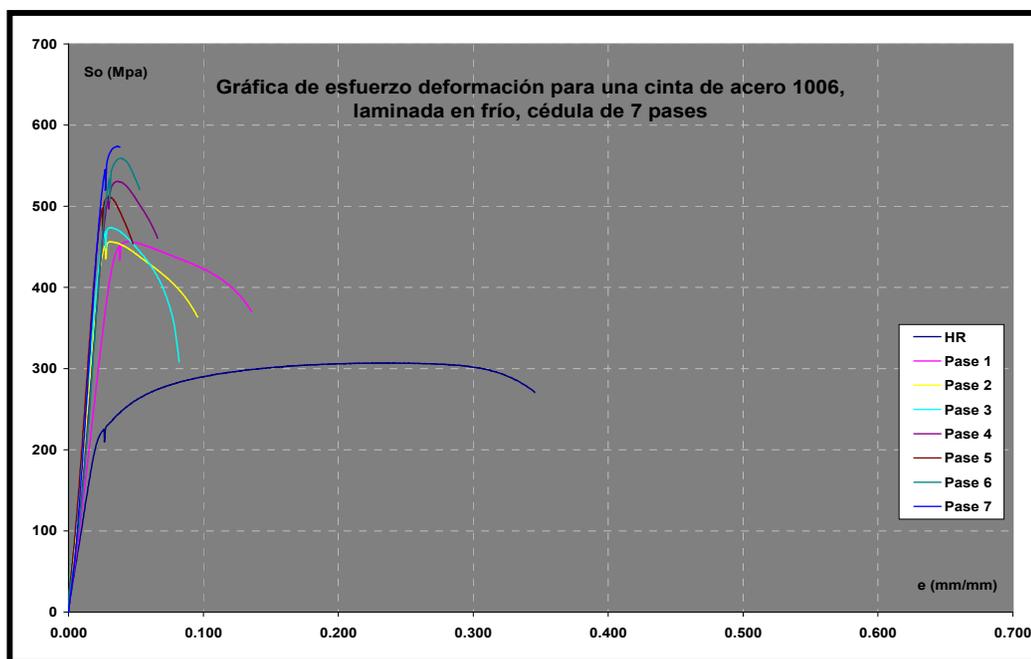


Figura 5.05. Resultados de los ensayos de tensión para el acero *SAE 1006*, número de cinta de acero 0703074, con una cédula de laminación de 7 pases.

a). Gráfica general del esfuerzo con respecto a la elongación del material para los 7 pases.



b). Gráfica de esfuerzo deformación con respecto a la reducción acumulada por pase.

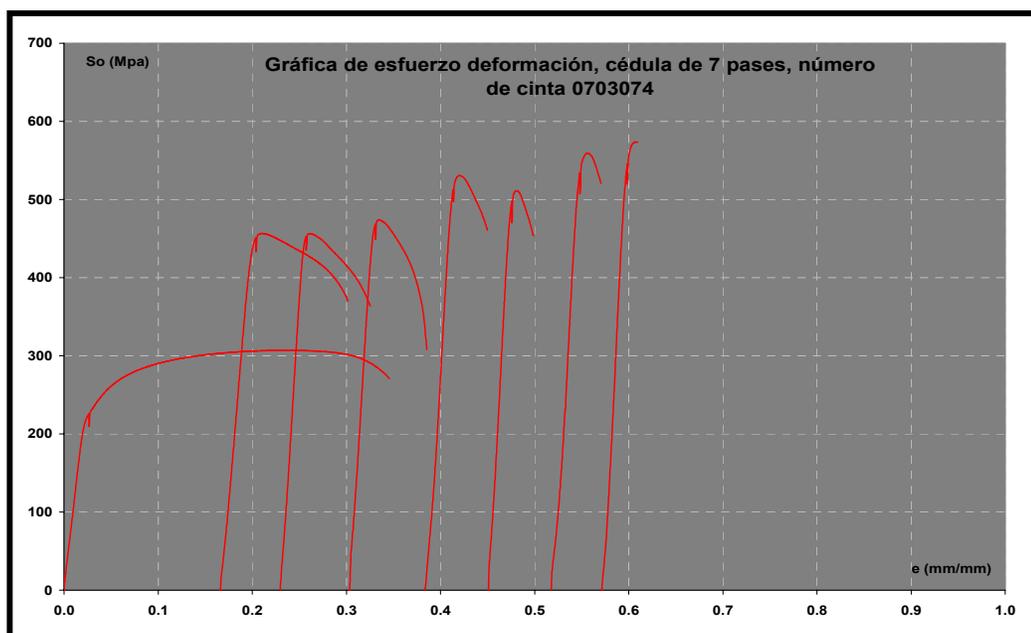
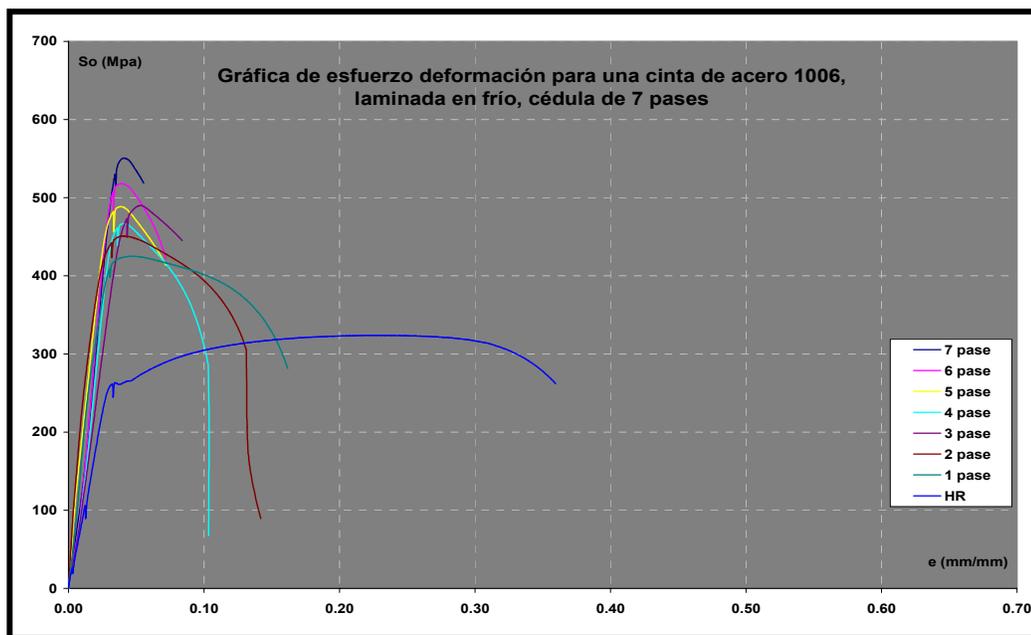


Figura 5.06. Resultados de los ensayos de tensión para la cinta de acero *SAE 1006*, número de cinta 0702338, con una cédula de laminación de 7 pases.

a). Gráfica general del esfuerzo con respecto a la elongación del material para los 7 pases.



b). Gráfica de esfuerzo deformación con respecto a la reducción acumulada por pase.

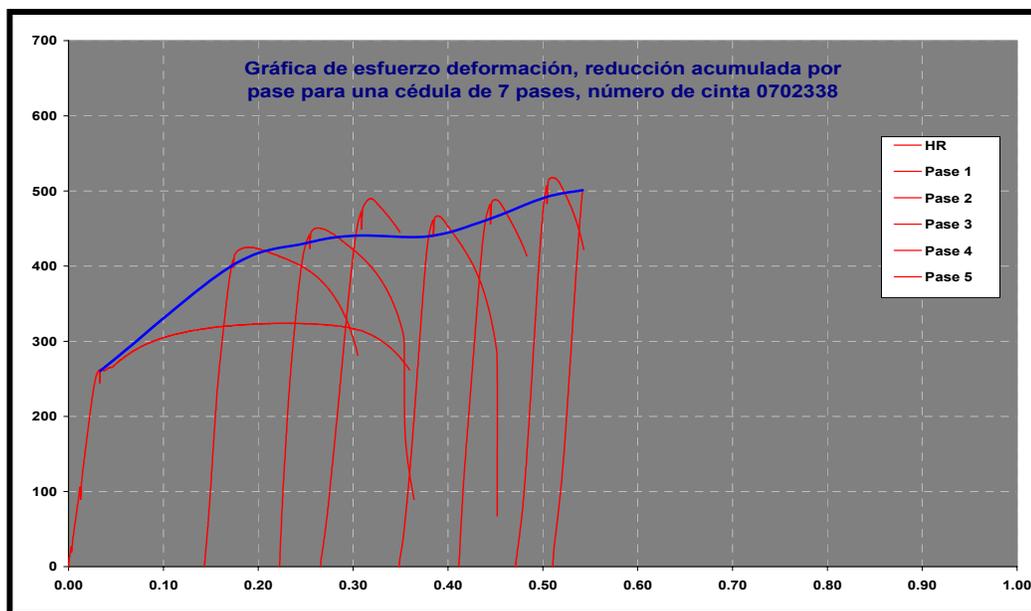


Figura 5.07. Ajuste del coeficiente de fricción para el modelo de laminación por medio del análisis de la velocidad de operación con respecto a otros autores.

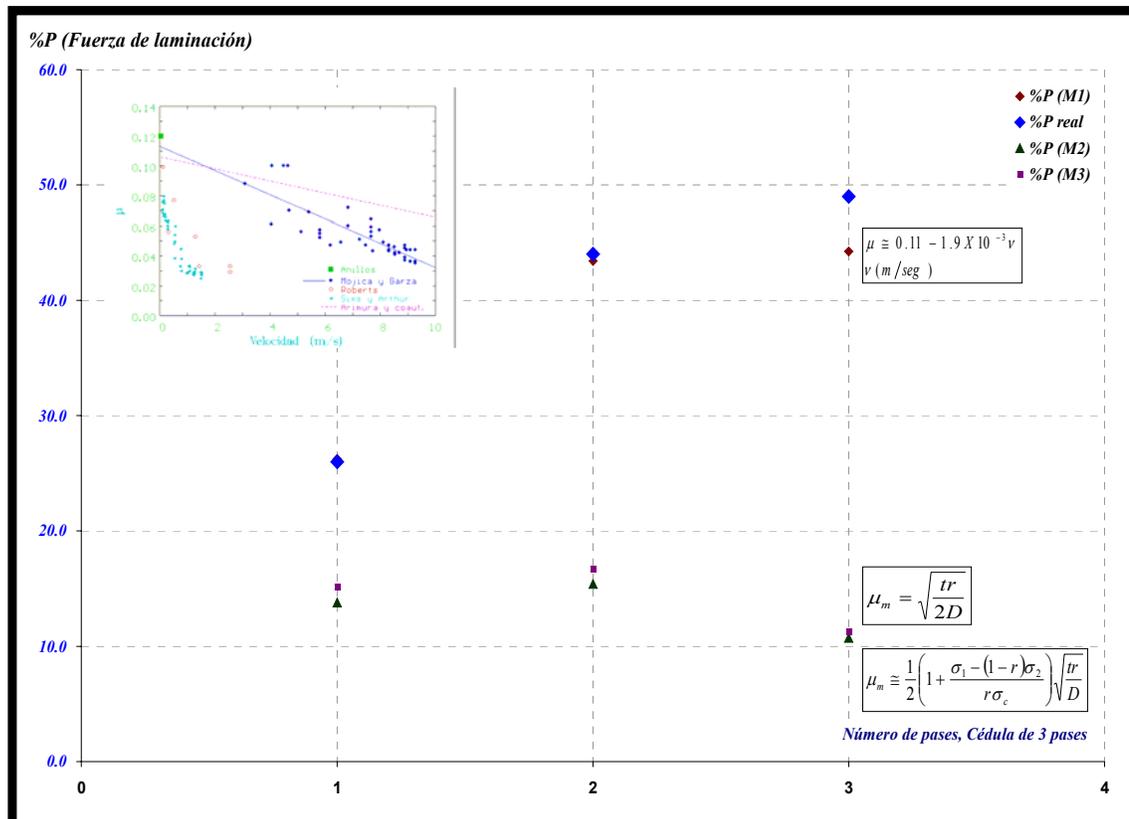
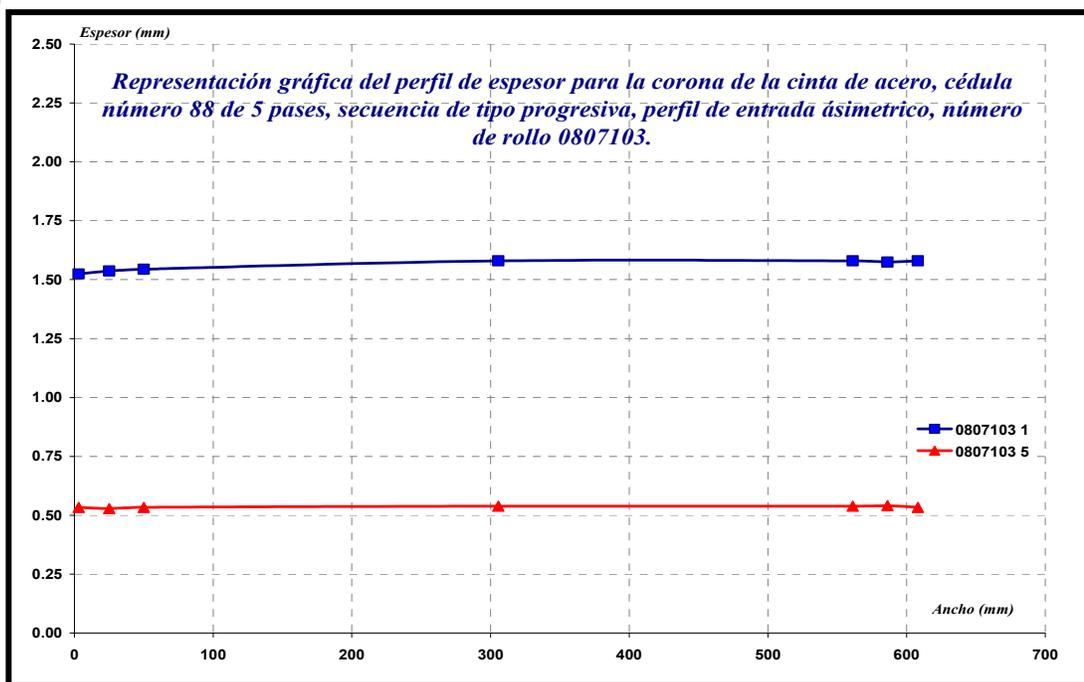
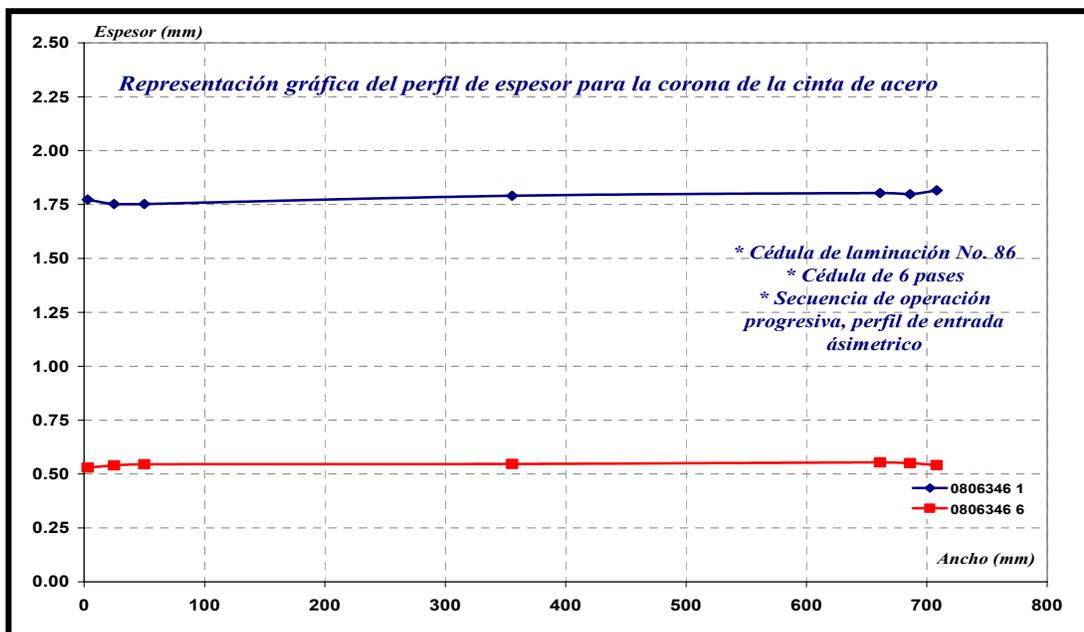


Figura 5.08 Representación gráfica del perfil de corona para cintas de acero 1006 de las cédulas de laminación número 88, a) Comportamiento de la cuña para los números de rollo *0807103 1P*, *0807103 5P*, b) Comportamiento de la cuña para los números de rollo *0806346 1P*, *0806346 6P*, c) Comportamiento de la cuña para los números de rollo *0806024 1P*, *0806024 2P*, *0806024 3P*.

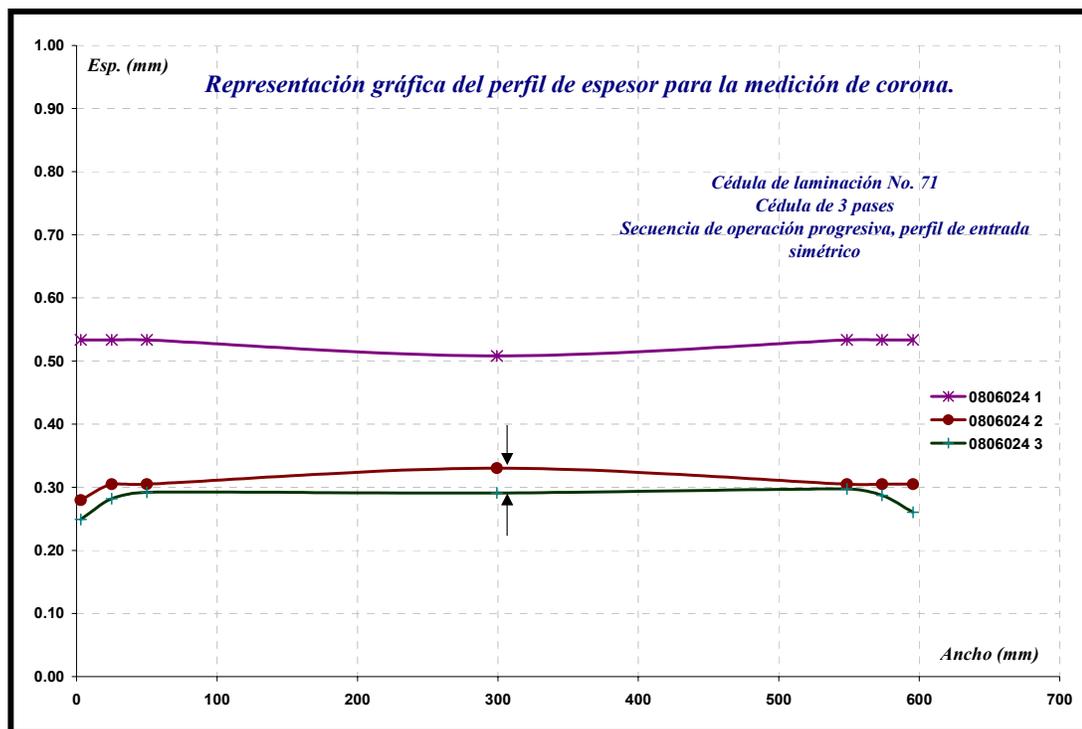
a)



b)



c)



CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Sé establecieron cédulas de reducción progresivas que permiten obtener un perfil de espesor consistente con baja planicidad en el producto final. Estableciendo la forma de controlar las condiciones de laminación en cintas de acero de banda asimétrico.

Se determinó la ecuación constitutiva que describe el endurecimiento del acero 1006 en función de la reducción en frío, desarrollando un modelo de laminación basado en el método Bland y Ford que permite cuantificar el efecto de la fricción, fuerza de separación, resistencia del material, así como el uso de energía por pase, para una estación reversible del tipo cuarto.

El desarrollo del modelo permite obtener un control estricto de calibre, al mismo tiempo optimiza las cédulas de laminación a partir de los porcentajes de reducción durante los pases de una manera progresiva.

La optimización de la fuerza de separación y predicción de la misma permite reducir la potencia y con esto no solo reduce el número de pases, además de esto controla el consumo de energía durante la operación.

La comprobación del modelo permitió generar 88 cédulas de laminación en frío, con las que se procesaron más de 1,500 toneladas de cinta de acero. El uso de estas cédulas resultó en la mejora de la tolerancia del espesor y forma, repercutiendo en las líneas de galvanizado y pintado al cumplir con las estrictas tolerancias especificaciones de forma y calibre en estas líneas.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se deberá desarrollar cédulas para los grados de acero de alta resistencia baja aleación, medio y alto carbono.

- Se debe establecer una interfase que permita un control adecuado del molino laminador a partir de predicciones del modelo. De esta forma se tendrá un mejor control sobre los parámetros de laminación que mejoran las características de la cinta y reducen el consumo de energía.

REFERENCIAS

1. John A. Schey, American Society for Metals, Tribology in Metalworking, Friction, Lubrication and Wear.
2. PMMA. S. S. Sternstein and L. Ongchin, Polym. Prep. Am. Chem. Soc. Div. Polym. Chem., September 1969.
3. George E. Dieter, Mechanical Metallurgy
4. Eustace C. Larke, AM.I. Mech. E., A, The Rolling of Strip, Sheet and Plate.
5. T. Von Kármán, Z. Angew. Math. Mech., vol. 5, pp. 139-141, 1925
6. W. Trinks, Blast Furn. Steel Plant, vol. 25 pp. 617-619.
7. E. Orowan, Proc. Inst. Mech. Eng. (London), vol. 150, pp. 140-167, 1943.
8. IRTC 24, 24th International Rolling Technology Course
9. Bland, D. R., and Ford, H. "The Calculation of Roll Force and Torque in Cold Rolling with Tensions." Proc. Inst. Mech. Eng., 1948, p144.
10. Ford, H., Ellis, F., and Bland, D. R. "Cold Rolling with Strip Tension." Part II. F. Iron and Steel Inst., 1952, 171, p.239.

11. Orowan, E. "The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling." Proc. Inst. Mech. Eng., 1943, p.140.
12. Nadai, A., and Wahl, A. M. "Plasticity." Published by McGraw-Hill Book Co. Ltd., 1931.
13. "Elastic deformation of Rolls during Cold Rolling." *A.S.M.E.* Research Publication "Roll Neck Bearing." Published by Amer. Soc. Mech. Eng. (New York), 1935.
14. W. L. Roberts, R. J. Bentz and D. C. Litz, " Cold Rolling Low Carbon Steel Strip to Minimum Gage", Iron and Steel Engineer Year Book, 1970, pp. 413-420.
15. William L. Roberts, Cold Rolling of Steel, Manufacturing Engineering and Materials Processing/2. 480. p 297-299.
16. W. L. Roberts, "Computing the Coefficient of Friction in the Roll Bite from Mill Data", Blast Furnace and Steel Plant, 1967, pp. 499-508.
17. Evaluation of the Frictional Characteristics of Rolling Emulsions, Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo, SOMIM, Vol.2, Número 6. Año 7, Marzo 2008. Vicente Espinosa Cantú, Martha P. Guerrero Mata, Tomás Lozano y Rafael Colas.
18. Ginzburg, V.B, Steel - Rolling Technology: Theory and Practice, Marcel Dekker, New York, 1989.
19. Ginzburg, V.B., "Strip Profile Control with Flexible Edge Backup Rolls," *AISE* Year Book, 1987, pp. 277-288.

20. *AISE* Hot Strip Mill Profile and Flatness Study, Phase 1, Association of Iron and Steel Engineers, Pittsburgh, Pa., 1986, pp. 20-22.
21. *ASTM* A568, American Society for Testing and Materials Standard Specification for Steel, Sheet, Carbon, and High Strength, Low Alloy, Hot Rolled and Cold Rolled, General Requirements for, Annual Book of *ASTM* Standards, Vol.01.03, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1992, pp. 232-250.
22. Fujita, F. et al, "Development of a New Type of Cold Rolling Mill for Sheet Products," *AISE* Year Book, 1985, pp.264-271.
23. Ginzburg, V.B., Geometry of Flat Rolled Products, Rolling Mill technology Series, Vol. 2, United Engineering, Inc Pittsburgh, Pa. 1990.
24. Ginzburg, V.B., and Robert Ballas " Flat Rolling Fundamentals", 2000
25. Shohet, K.N. and Townsend, N.A. "Flatness Control in Plate Rolling," Journal of the Iron and Steel Institute, Oct. 1971, pp. 769-775.
26. Somers, R.R., et al, "Verification and Applications of a Model for Predicting Hot Strip Profile, Crown and Flatness," *AISE* Year Book, 1984, pp. 441-450.
27. Guo, R.M. And Schunk, J.H., "Determination of Optimum Work Roll crown for a Hot Strip Mill," *AISE* Year Book, 19889, pp. 276-284.
28. Ishikawa, T., et al, "Analytical Approach to Occurrence and Suppression of Flatness Defect in Strip Rolling, "Proceedings of the 4th International Steel Rolling Conference: The Science and Technology of Flat Rolling, Vol. 2, Deauville, France, June 1-3, 1987, pp. E.7.1-E.7.10.

29. Takashima, Y., et al, "Studies on the Strip Crown Control for Hot Strip Rolling – Double Chock Work Bending System (DC-WRB), " IHI Engineering Review, Vol. 12 No. 3, Oct. 1979, pp. 28-34.
30. Shohet, K.N. and Townsend, N.A., "Flatness Control in Plate Rolling", Journal of the Iron and Steel Institute, Oct. 1971, pp. 769-775.
31. Ginzburg, V.B., "New Strip Profile and Flatness Control Technologies for Rolling Mills," Proceeding of 1999 *AISE* Convention, Cleveland, OH, Sept. 20-24, 1999.
32. Wilmote, S., et al, The Sigma-Ro Process: A New Approach to the Hot Strip Mill Computer Control," C.R.M reports.
33. Sivilotti, O. G., et al, "ASEA-ALCAN AFC System for Cold Rolling Flat Strip," *AISE* Year Book, 1973, pp. 263-270.
34. Yasuda, K. "Rolling of Dead Flat Strip Using UC Mill with Small Diameter Work Rolls, "Proceedings of the 4th International Steel Rolling Conference: The Science and Technology of Flat Rolling, Vol.2.
35. Fukura "Development of Shape Control System for Cluster-Type Cold Reduction Mill".
36. Saito, T., et al, " Automatic Flatness Control System in Tandem Cold Rolling Mill for Ultra-thin Gauge Strip," Kawasaki Steel Technical Report, No. 24, April 1991, pp. 41-46.
37. Asamura, T., et al, "Development of Shape Control System for Cold Rolling Process and Practical Application of High Reduction Rolling," Nippon Steel Technical Report, No. 18, Dec. 1981, pp. 22-36.

38. Imai I, "Development of Shape Control System for Cold Rolling Process and Practical Application of High Reduction Rolling," Nippon Steel Technical Report, No.18.
39. Hasegawa, A. and Taki, F., "Development of Fuzzy Set Theory-Based Shape Control System for Cold Strip Mill," Nippon Steel Technical Report, No. 49, April 1991, pp 59-62.
40. Katayama, Y., "Fuzzy / Neuro Control System," Hitachi Hi-Tech News, No. 12.
41. Kawamata, T., et al, "On-line Mathematical Models for Tandem Cold Mills," *AISE* Yearly Proceedings, 1972, pp. 419-426.
42. Stoltz, G. E. and Brinks, J. W., "Cold Rolling Tinplate," *AISE* Yearly Proceeding, 1950, pp. 654-673.
43. Gallenstein, J.H. "Torsional Chatter on a 4-High Cold Mill," *AISE* year Book, 1981, pp.60-65.
44. Roberts, W.L. Flat Processing of Steel, Marcel Dekker, Inc, New York, 1988.
45. Chefneux, L., et al, "Study and Industrial Control of Chatter in Cold Rolling," *AISE* Year Book, 1984, pp. 504-513.
46. Walker, M.J.A. and Davies, K.F., "Measurement of Backup Roll Eccentricity," *Iron and Steelmaker*, Oct. 1987, pp.27-33.
47. Barnes, K.R. "Close Tin Plate gage tolerances Through Low-Cost technological Improvements" *Iron and Steel Engineer*, Jan. 1988, pp. 49-55.

48. Faires Design of machine Elements, Mac Millan, New York, 1965, p.258.
49. Roberts, Hot Rolling of Steel, Marcel Dekker, New York, 1983, p.553.
50. Easter, H.C. and Gridley, T. H. "Automated Roll Grinding: Finish, Concentricity, and Roll Aluminum Association, Chicago, Nov. 4-5, 1987.
51. Hashimoto, K., et al, "A New Roll Eccentricity Control System (*MARECS*) for Rolling Mill," Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 18 No. 3, Oct. 1981, pp. 248-253.
52. *SAE J403*, Chemical Compositions of *SAE* Carbon Steel, The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space.
53. *ASTM A370-07b*, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
54. *SPC-3*, Statistical Process Control (*SPC*), Automotive Industry Action Group (*AIAG*), Second Edition 2005.
55. *ASTM A1030/A1030-05*, Measuring Flatness Characteristics of Steel Sheet Products1.
56. *EN ISO 1302*, Geometrical Product Specifications (*GPS*) — Indication of Surface Texture in Technical Product Documentation.
57. *ASTM A109/A109M – 08*, Standard Specification for Steel, Strip, Carbon (0.25 Maximum Percent), Cold-Rolled.
58. *AS / NZS 1365 :1996*, Tolerances for Flat-Rolled Steel Products. Australian / New Zealand Standard.

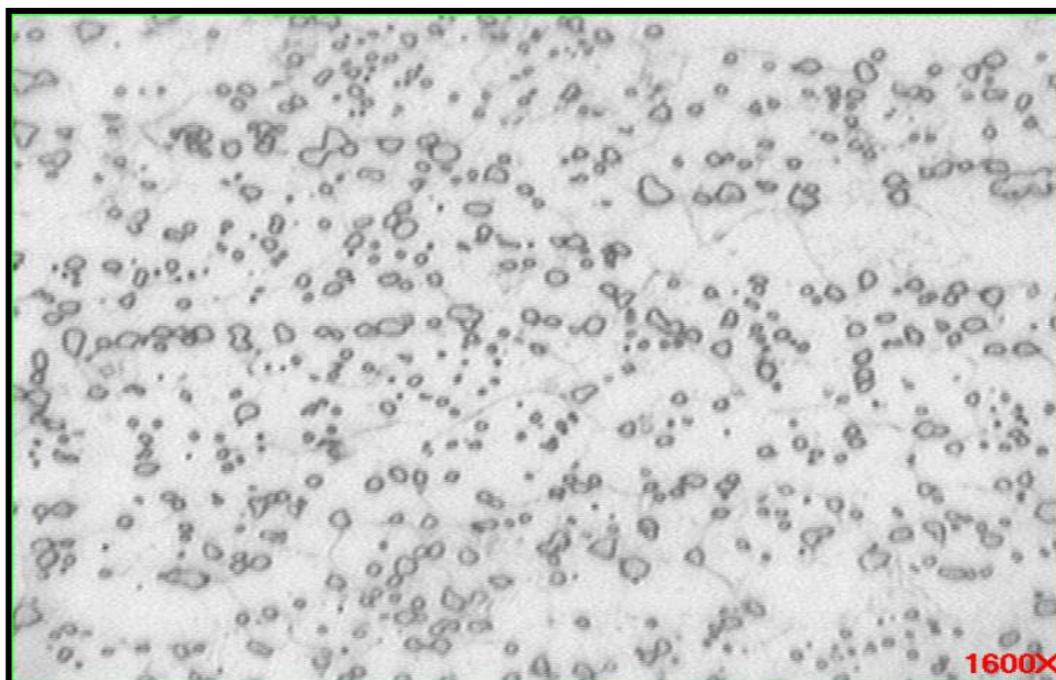
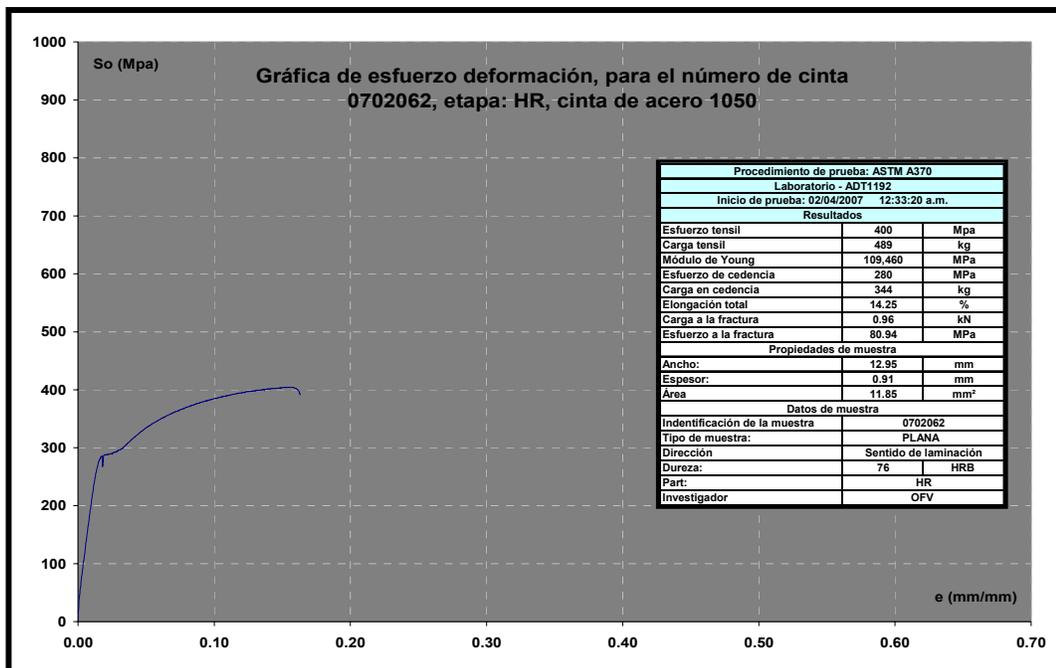
APÉNDICE A

Tabla A1, Tensiones aplicadas al molino laminador en frío.

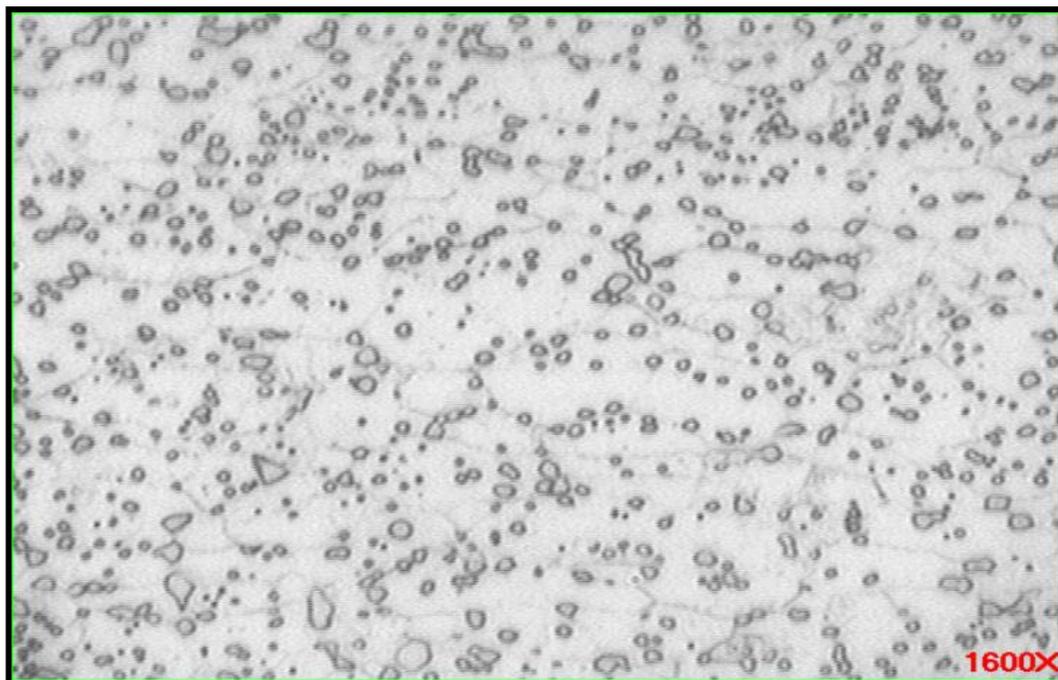
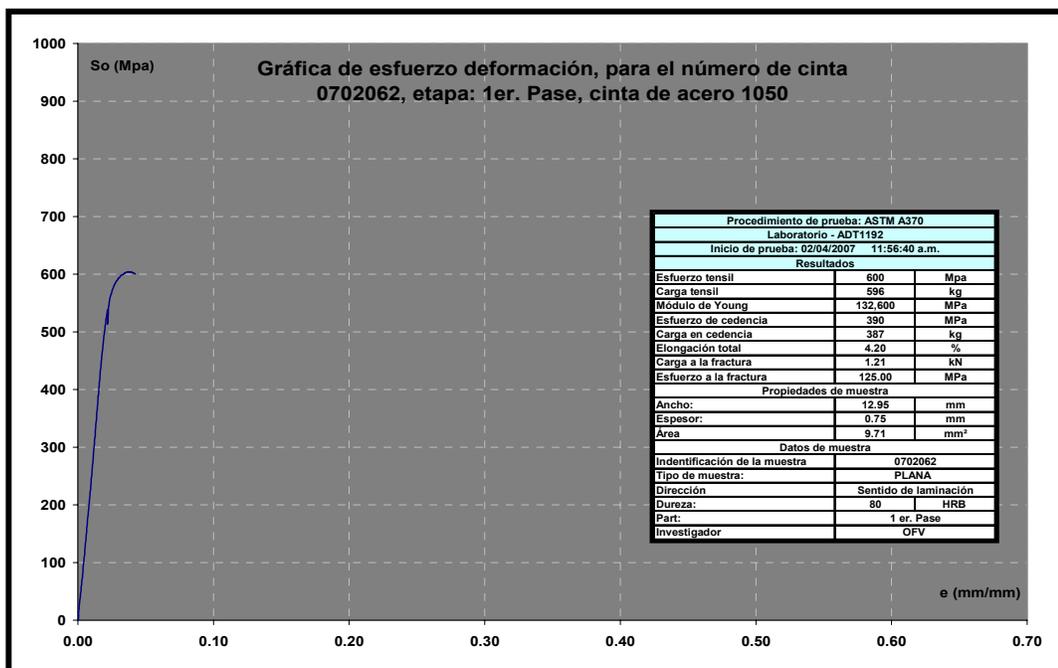
Anchos	Espesores		Amperes		Tensión	
	Entrada	Salida				
391 mm	0.203 mm	0.305 mm	55		1,930 Kg	0 Kg
413 mm	0.203 mm	0.305 mm	55		1,930 Kg	0 Kg
457 mm	0.203 mm	0.305 mm	85	75	2,982 Kg	2,631 Kg
533 mm	0.203 mm	0.305 mm	65	55	2,281 Kg	1,930 Kg
533 mm	0.203 mm	0.229 mm	65	55	2,281 Kg	1,930 Kg
610 mm	0.203 mm	0.000 mm	65	55	2,281 Kg	1,930 Kg
660 mm	0.203 mm	0.305 mm	95	85	3,333 Kg	2,982 Kg
711 mm	0.203 mm	0.305 mm	105	95	3,684 Kg	3,333 Kg
349 mm	0.229 mm	0.000 mm	45		1,579 Kg	0 Kg
381 mm	0.249 mm	0.000 mm	55		1,930 Kg	0 Kg
330 mm	0.305 mm	0.000 mm	65	55	2,281 Kg	1,930 Kg
356 mm	0.305 mm	0.000 mm	65	55	2,281 Kg	1,930 Kg
476 mm	0.305 mm	0.483 mm	85	75	2,982 Kg	2,631 Kg
305 mm	0.381 mm	0.000 mm	65	55	2,281 Kg	1,930 Kg
356 mm	0.381 mm	0.000 mm	75	65	2,631 Kg	2,281 Kg
508 mm	0.381 mm	0.457 mm	95	75	3,333 Kg	2,631 Kg
559 mm	0.381 mm	0.457 mm	95	85	3,333 Kg	2,982 Kg
610 mm	0.381 mm	0.457 mm	105	95	3,684 Kg	3,333 Kg
660 mm	0.381 mm	0.457 mm	105	95	3,684 Kg	3,333 Kg
711 mm	0.381 mm	0.457 mm	100	120	3,509 Kg	4,210 Kg
483 mm	0.406 mm	0.483 mm	95		3,333 Kg	0 Kg
279 mm	0.457 mm	0.508 mm	55		1,930 Kg	0 Kg
394 mm	0.483 mm	0.610 mm	115		4,035 Kg	0 Kg
508 mm	0.483 mm	0.635 mm	110		3,860 Kg	0 Kg
559 mm	0.483 mm	0.635 mm	110		3,860 Kg	0 Kg
610 mm	0.483 mm	0.635 mm	115		4,035 Kg	0 Kg
660 mm	0.483 mm	0.635 mm	120		4,210 Kg	0 Kg
711 mm	0.483 mm	0.635 mm	120		4,210 Kg	0 Kg
406 mm	0.610 mm	0.813 mm	115		4,035 Kg	0 Kg
474 mm	0.610 mm	0.000 mm	115		4,035 Kg	0 Kg
508 mm	0.660 mm	0.914 mm	110		3,860 Kg	0 Kg
635 mm	0.660 mm	0.914 mm	115		4,035 Kg	0 Kg
686 mm	0.660 mm	0.914 mm	130		4,561 Kg	0 Kg
737 mm	0.660 mm	0.914 mm	135		4,737 Kg	0 Kg
597 mm	0.686 mm	0.000 mm	135		4,737 Kg	0 Kg
610 mm	0.711 mm	0.762 mm	110		3,860 Kg	0 Kg
381 mm	0.787 mm	1.016 mm	80		2,807 Kg	0 Kg
495 mm	0.787 mm	0.000 mm	115		4,035 Kg	0 Kg
279 mm	0.889 mm	1.067 mm	60		2,105 Kg	0 Kg
445 mm	0.889 mm	0.000 mm	110		3,860 Kg	0 Kg
762 mm	0.914 mm	1.524 mm	300		10,526 Kg	0 Kg
483 mm	0.940 mm	1.143 mm	160		5,614 Kg	0 Kg
559 mm	0.940 mm	1.219 mm	175		6,140 Kg	0 Kg
584 mm	0.940 mm	1.219 mm	160		5,614 Kg	0 Kg
660 mm	0.940 mm	1.143 mm	160		5,614 Kg	0 Kg
737 mm	0.940 mm	1.143 mm	280		9,824 Kg	0 Kg
330 mm	0.965 mm	1.143 mm	100		3,509 Kg	0 Kg
397 mm	0.965 mm	1.016 mm	80		2,807 Kg	0 Kg
457 mm	1.143 mm	1.270 mm	135		4,737 Kg	0 Kg
533 mm	1.168 mm	1.524 mm	290		10,175 Kg	0 Kg
660 mm	1.168 mm	1.524 mm	300		10,526 Kg	0 Kg
686 mm	1.168 mm	1.524 mm	300		10,526 Kg	0 Kg
737 mm	1.168 mm	1.524 mm	300		10,526 Kg	0 Kg
298 mm	1.295 mm	0.000 mm	115		4,035 Kg	0 Kg
762 mm	1.524 mm	0.000 mm	375		13,157 Kg	0 Kg
445 mm	1.575 mm	0.000 mm	160		5,614 Kg	0 Kg
381 mm	1.676 mm	0.000 mm	160		5,614 Kg	0 Kg

Figura A2. Resultados de los ensayos de tensión para una cinta de acero 1050, número de cinta 0702062, número de pases 3.

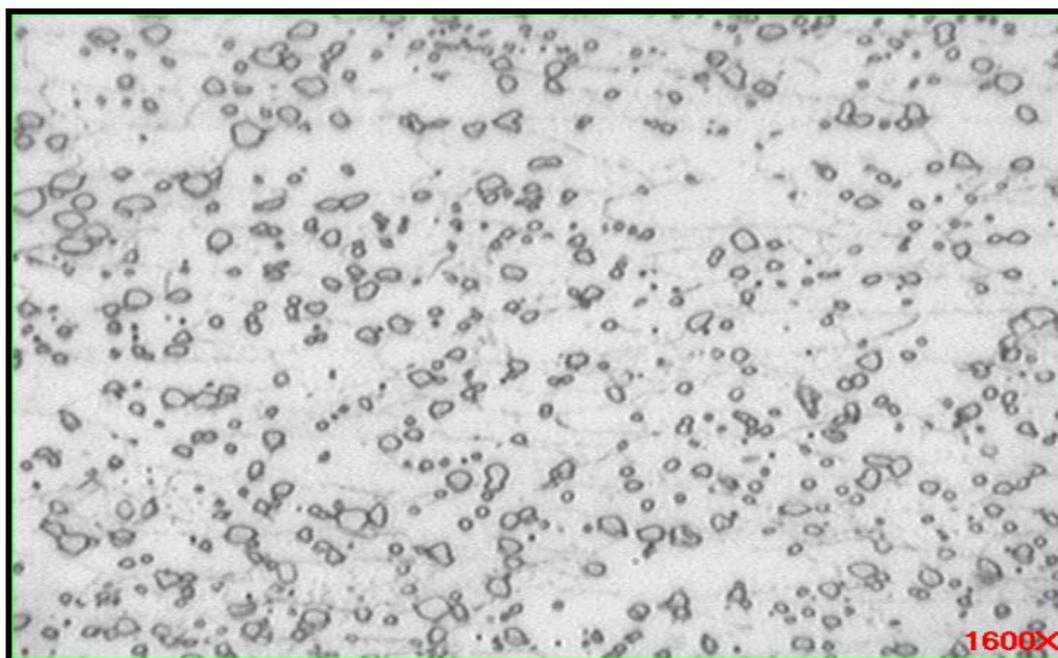
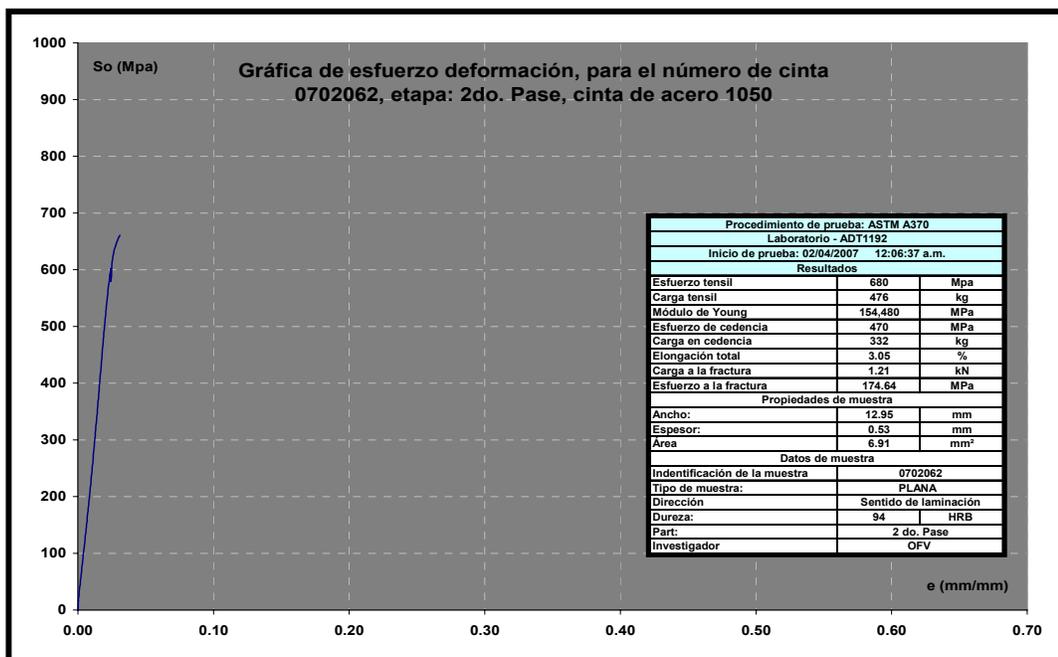
a).



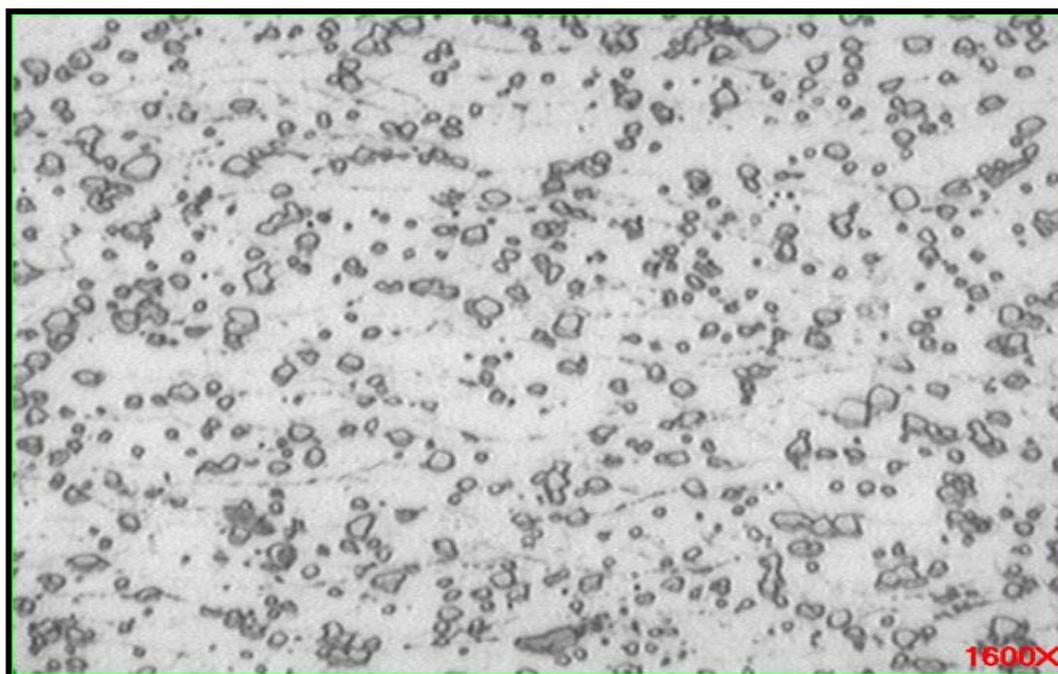
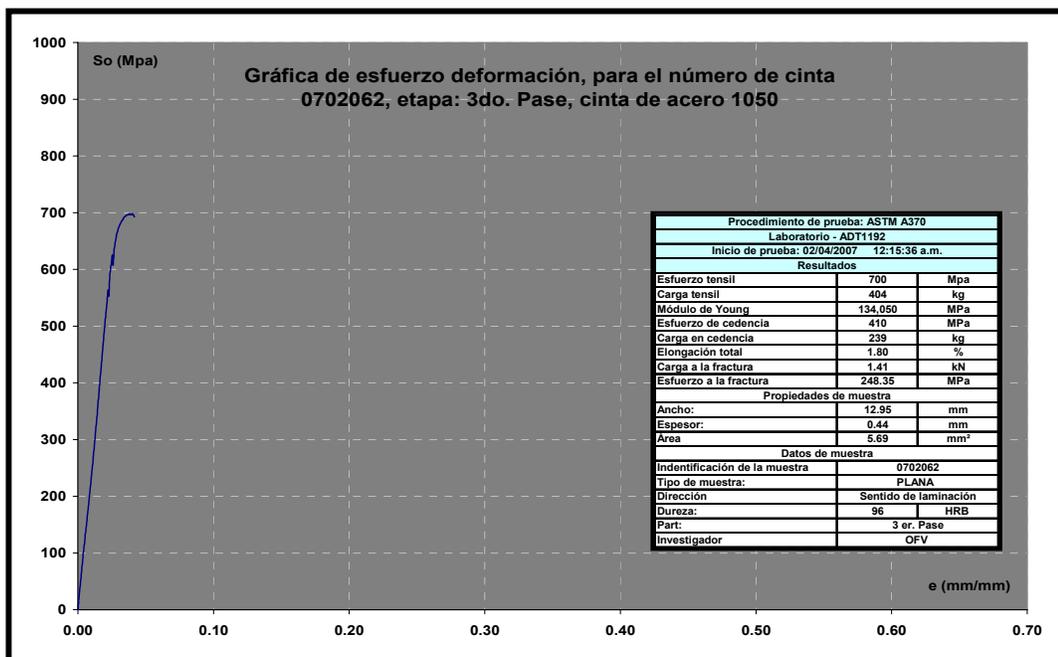
b).



c).



d).



e).

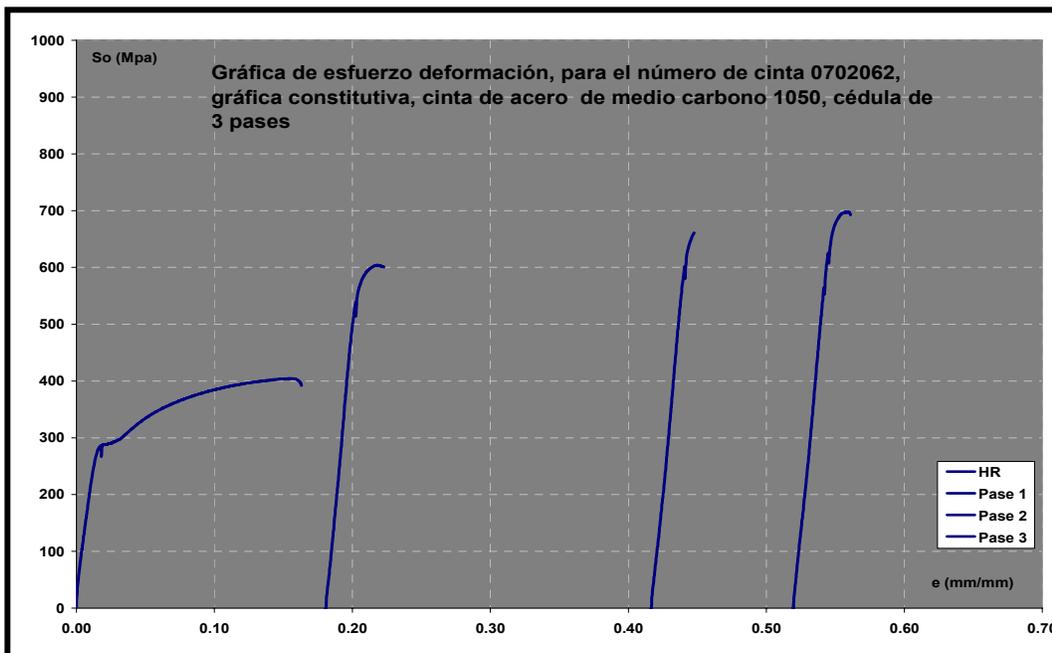
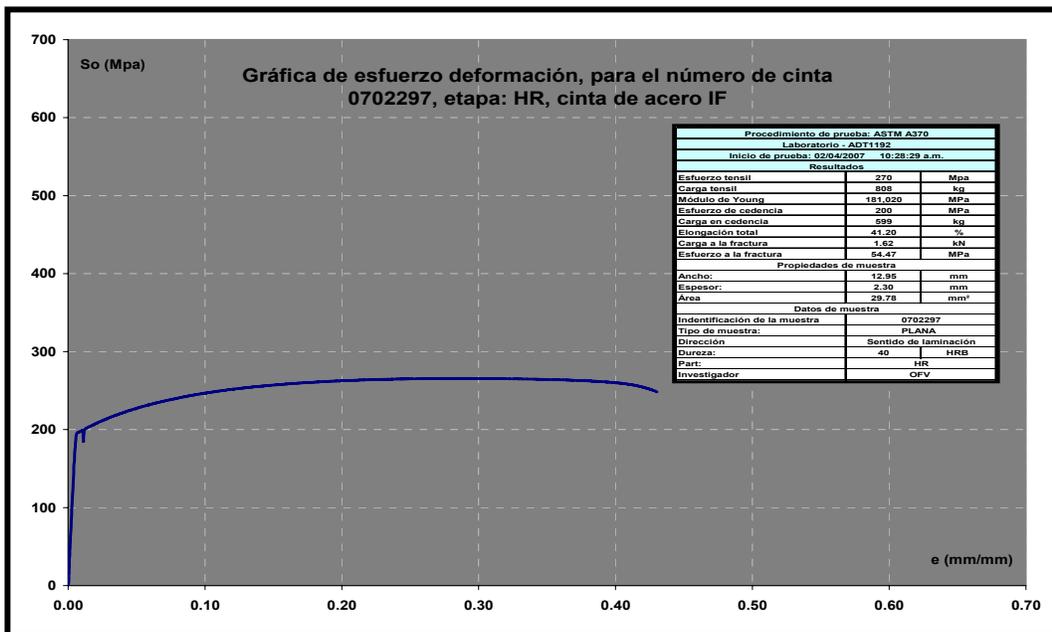
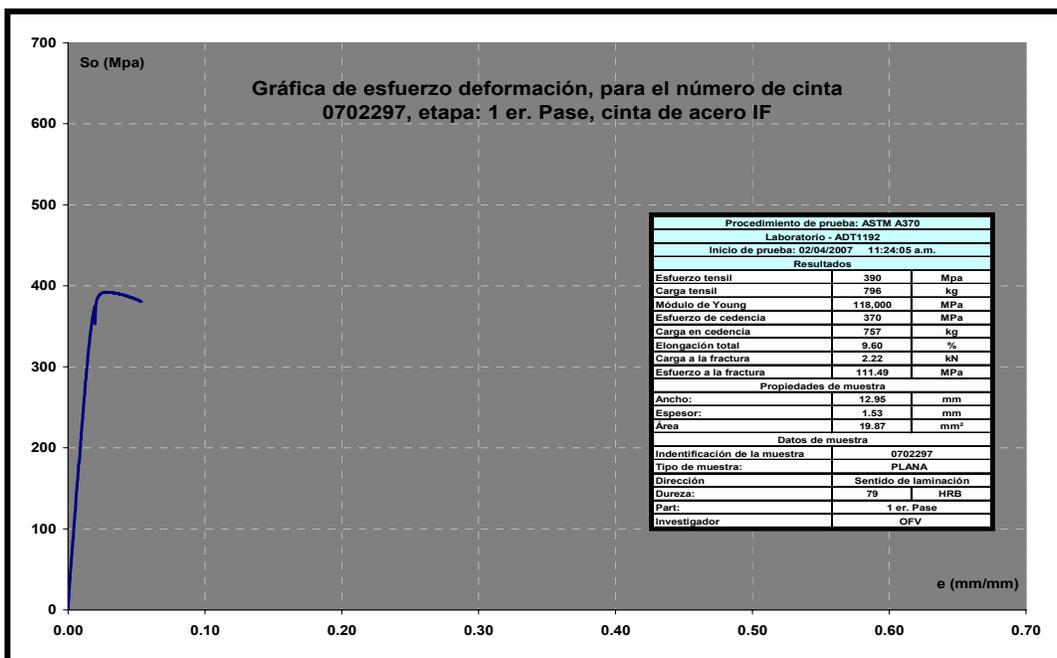


Figura A3, resultados del ensayo de tensión para el número de cinta 0702297, número de pases 3, tipo o grado de acero ultra bajo carbono libre de elementos intersticiales.

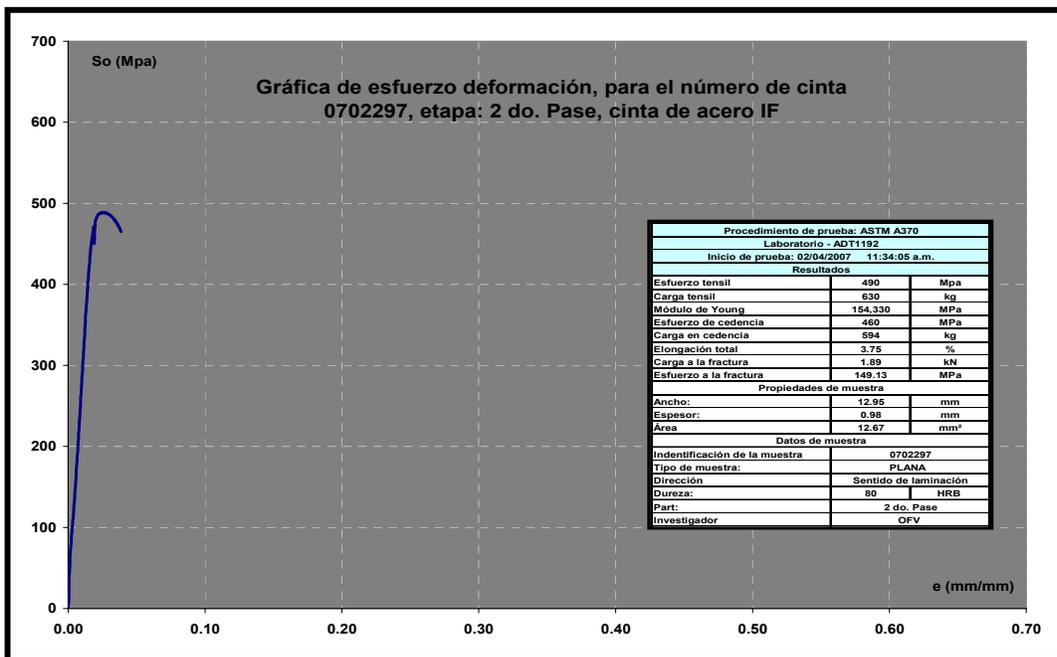
a)



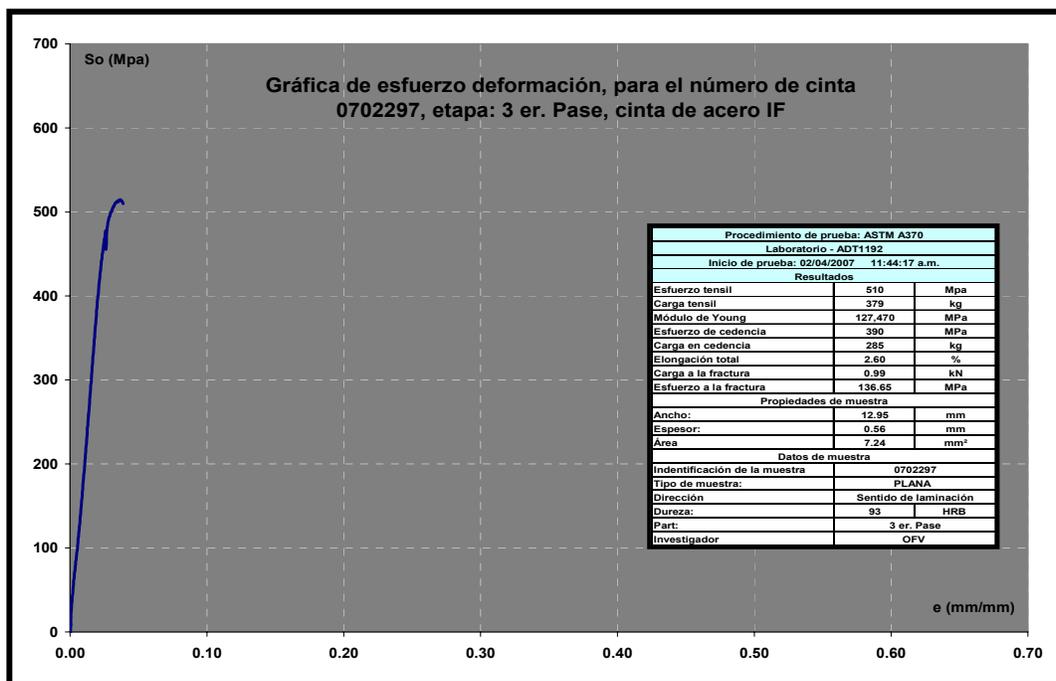
b).



c).



d).



e).

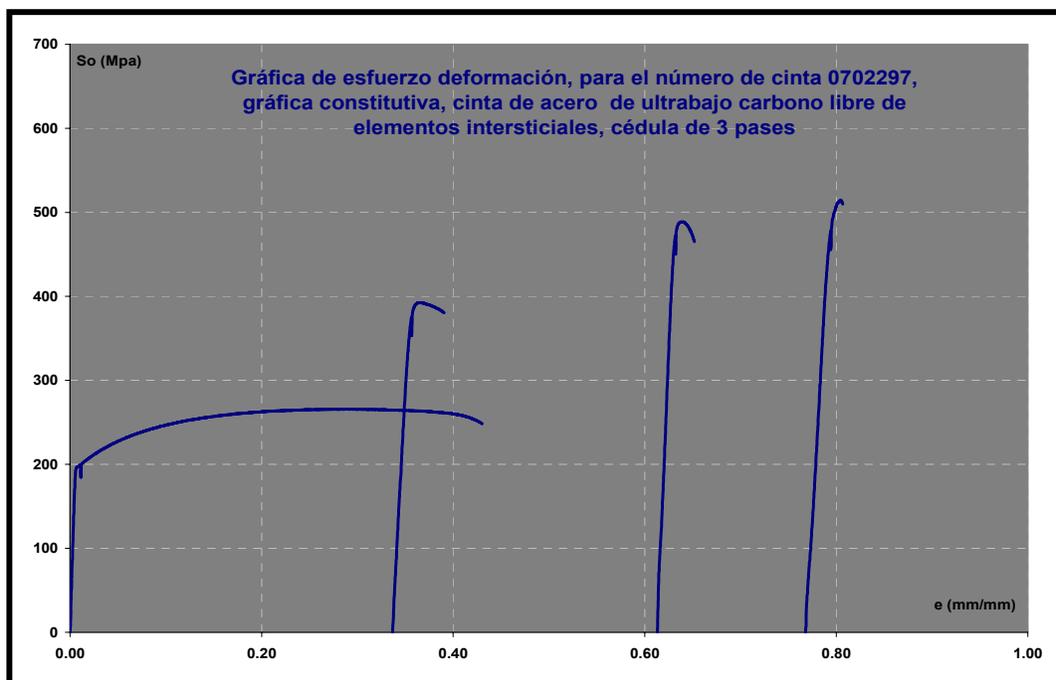
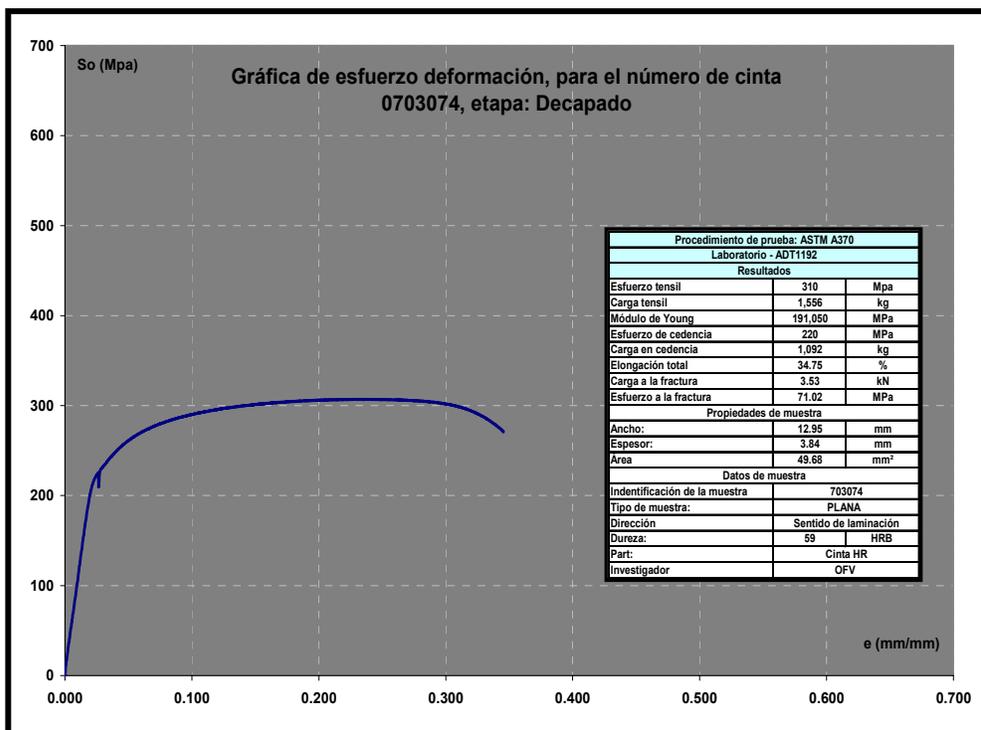
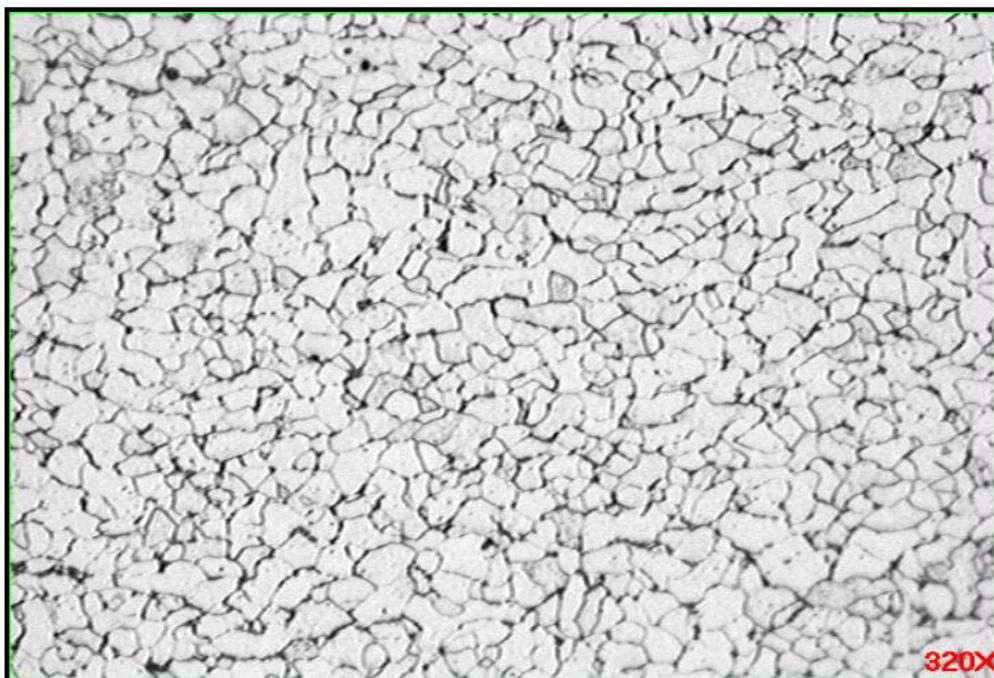


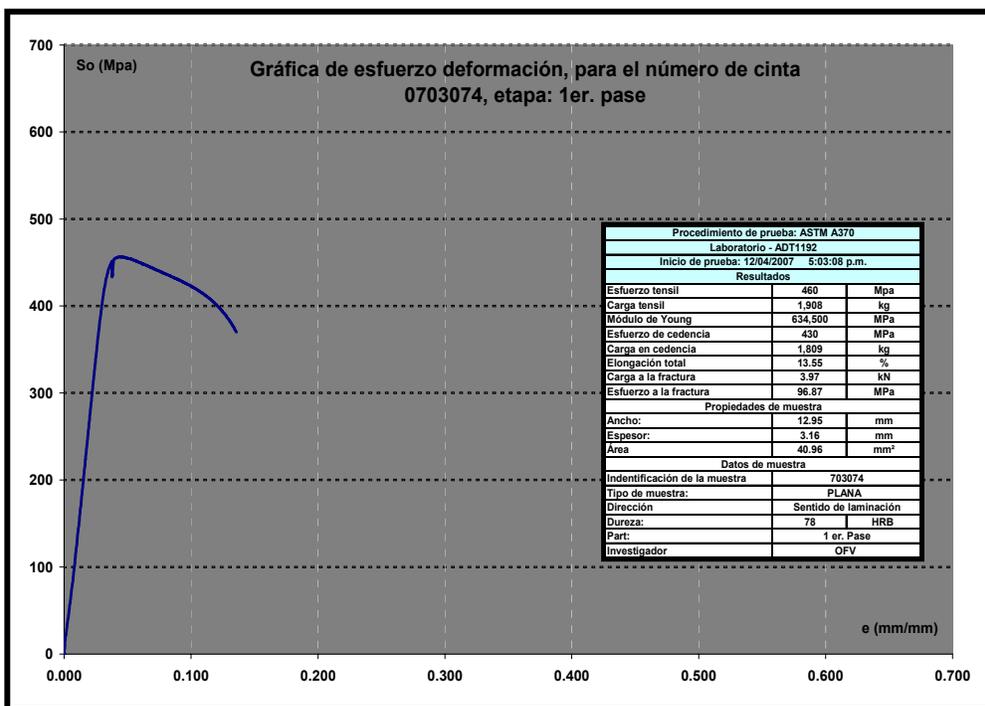
Figura A4, Resultados de los ensayos de tensión para el acero 1006, número de cinta de acero 0703074, número de pases 7.

a).

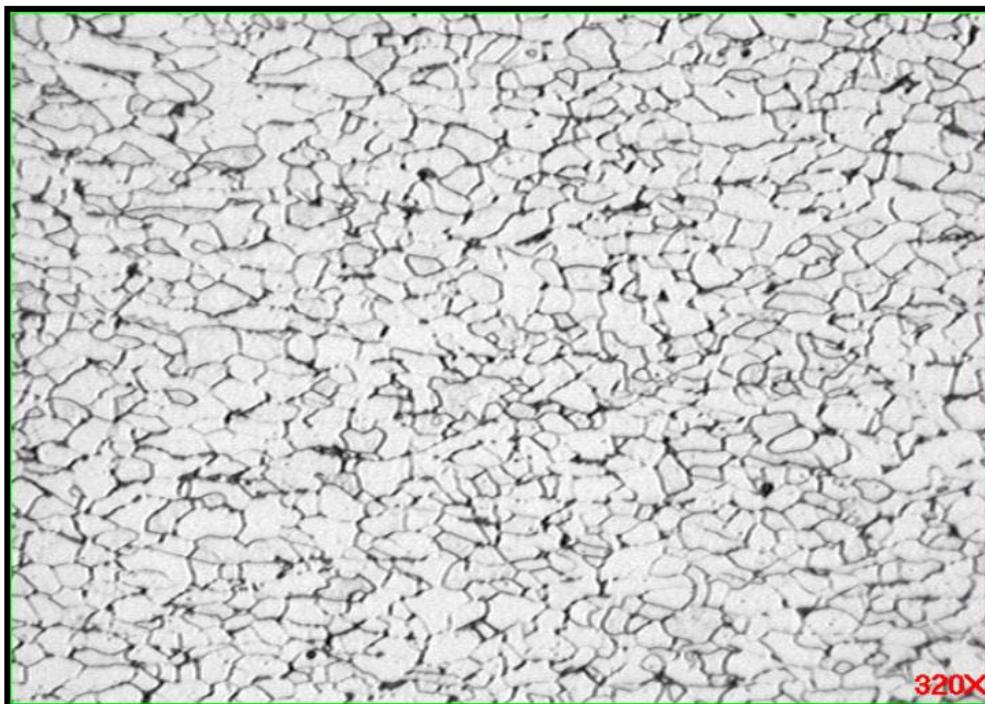


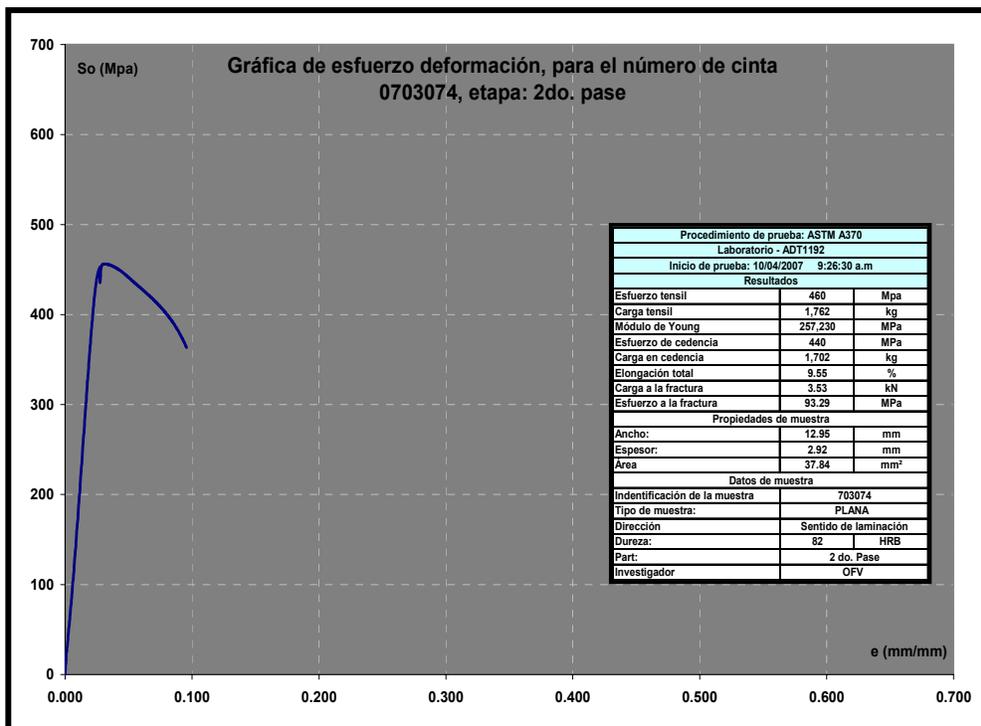
b).



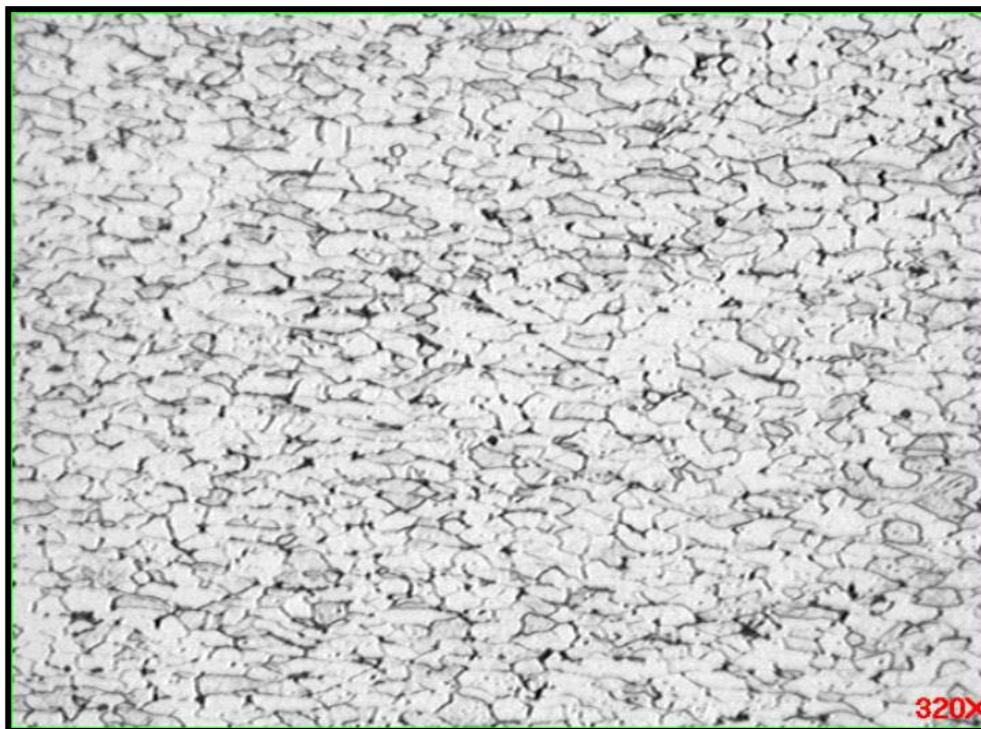
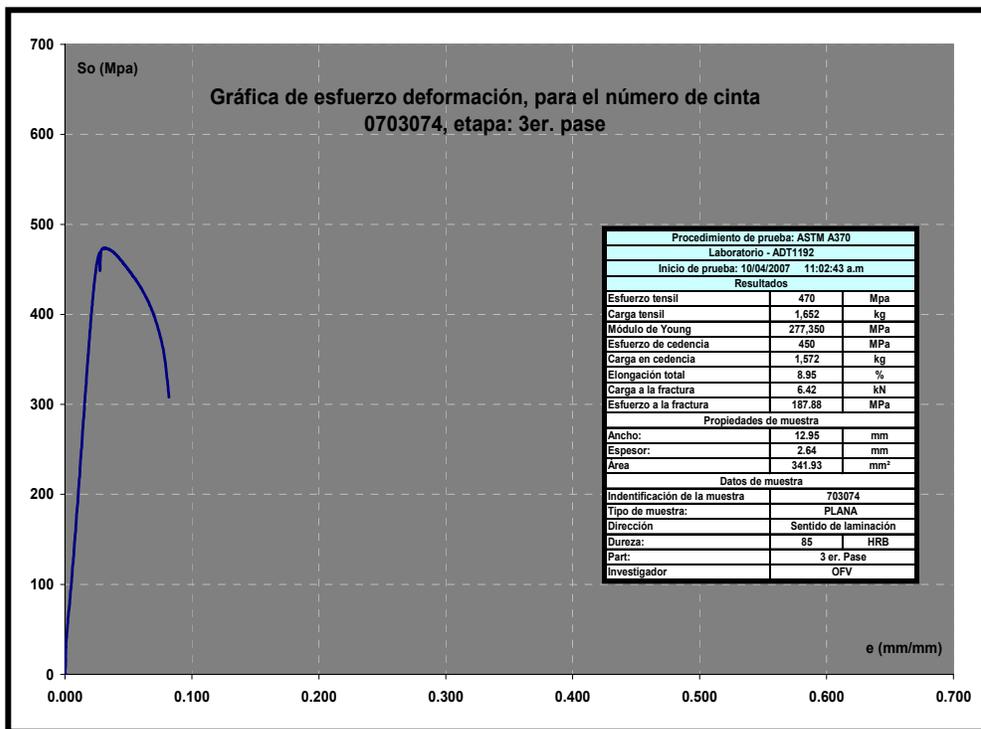


c).

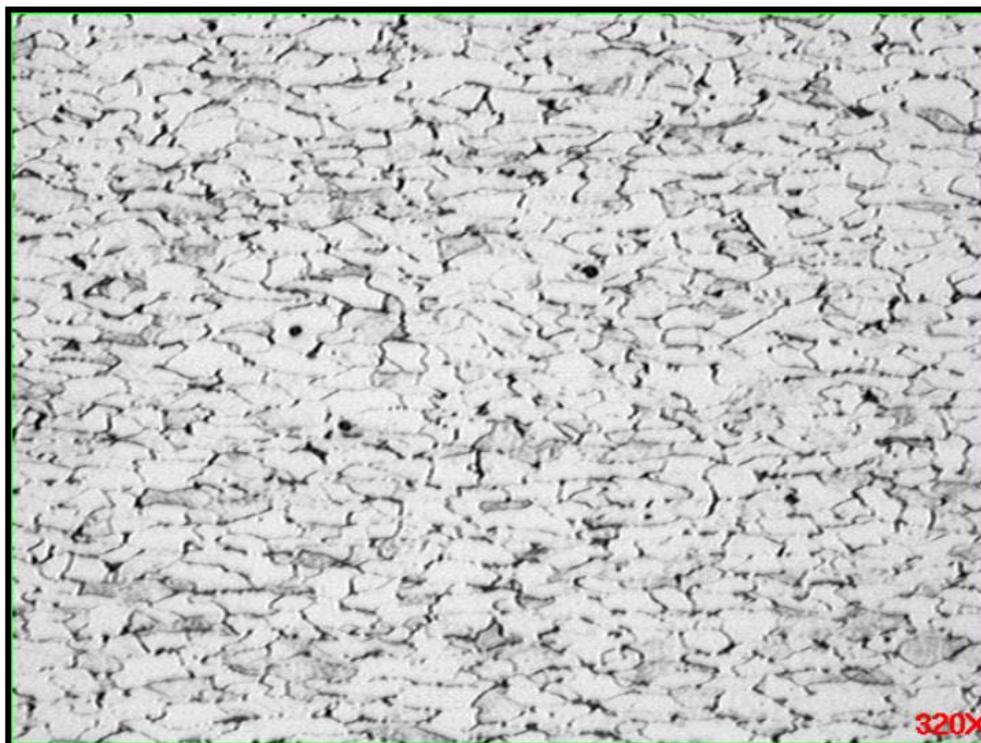
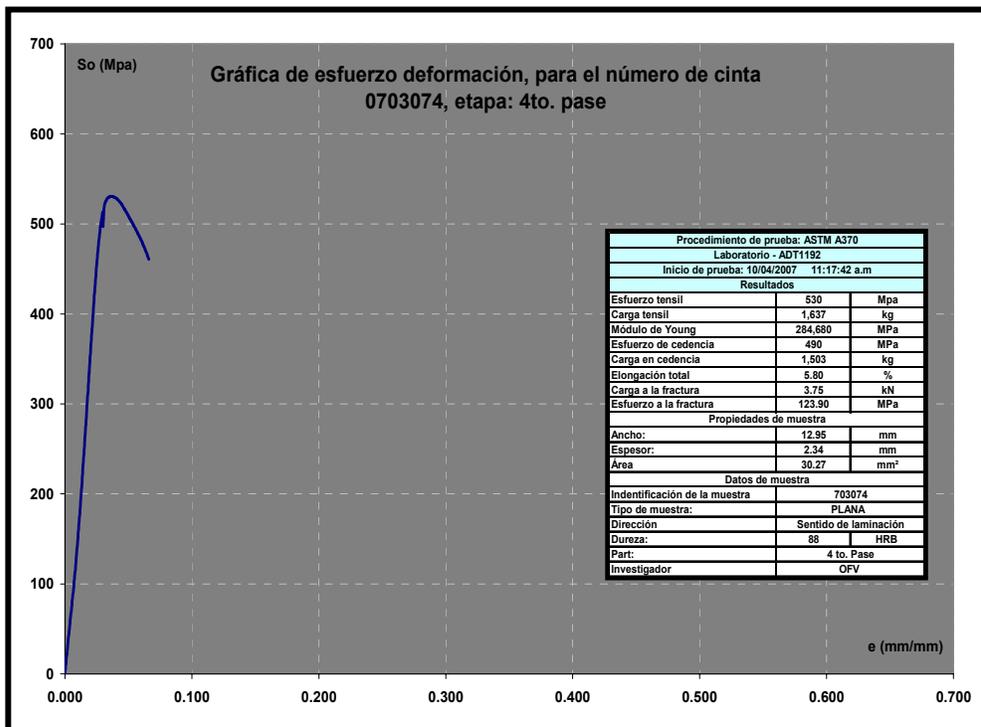




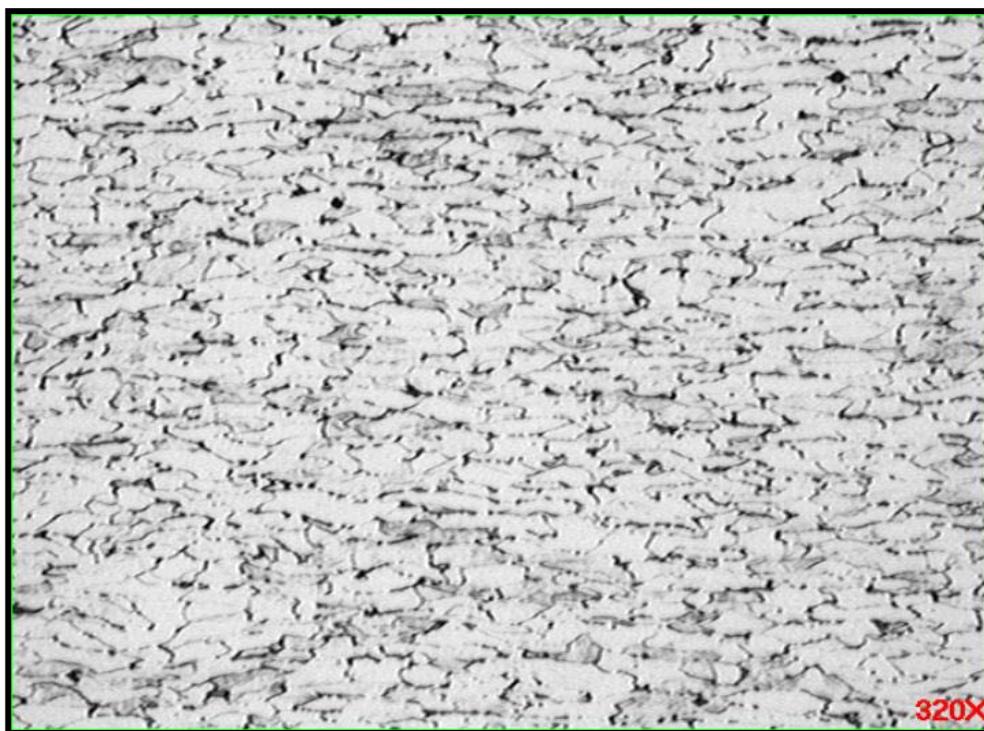
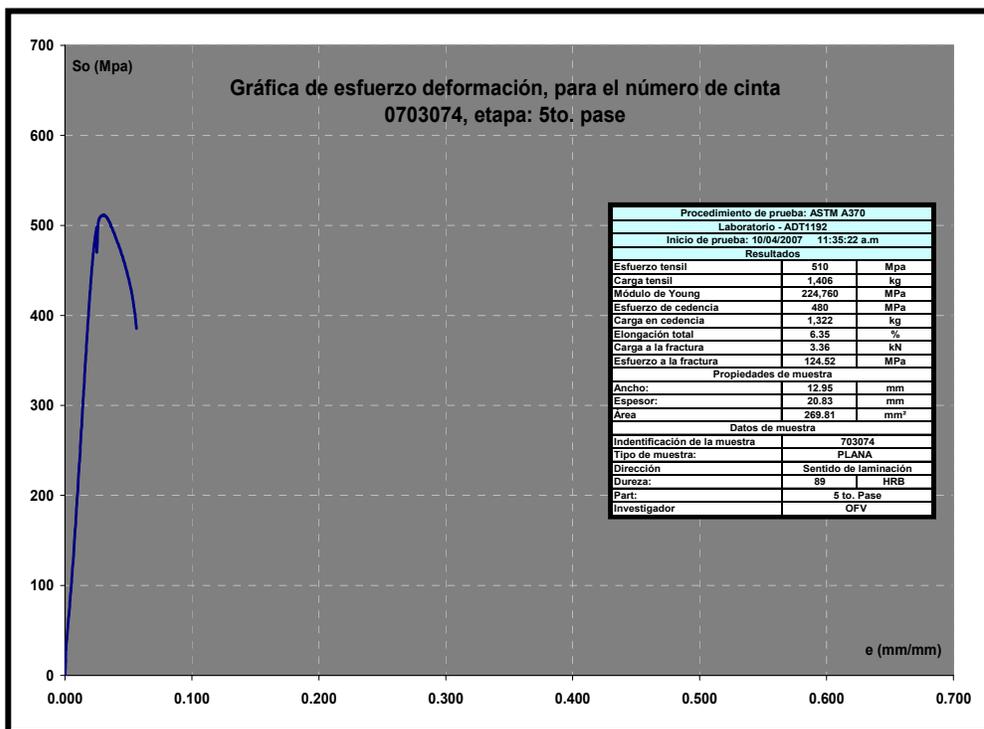
d).



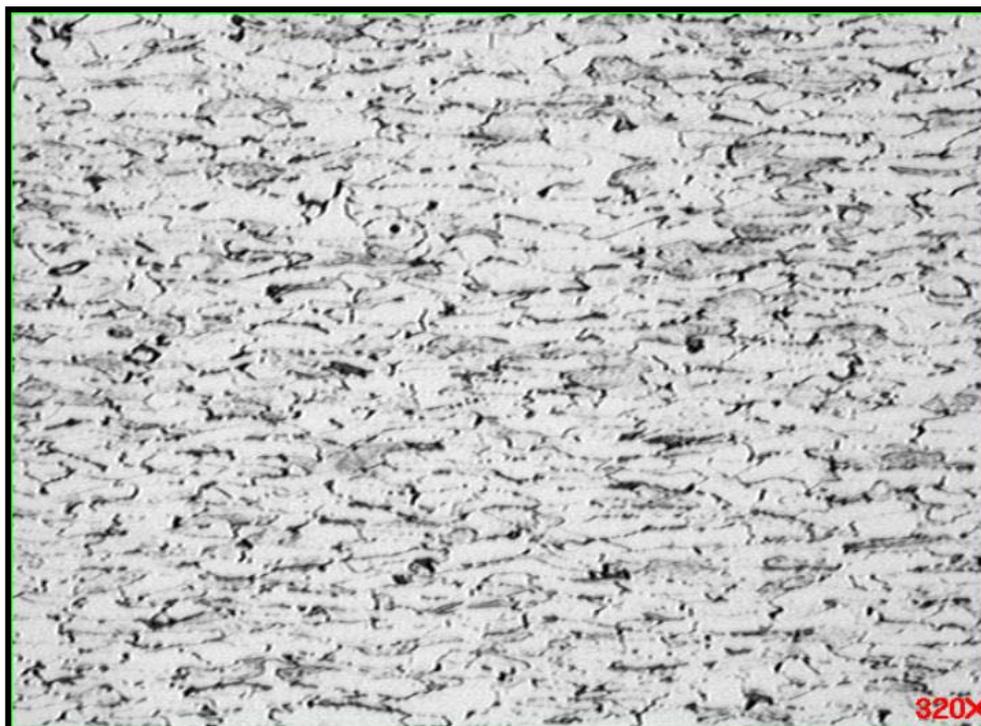
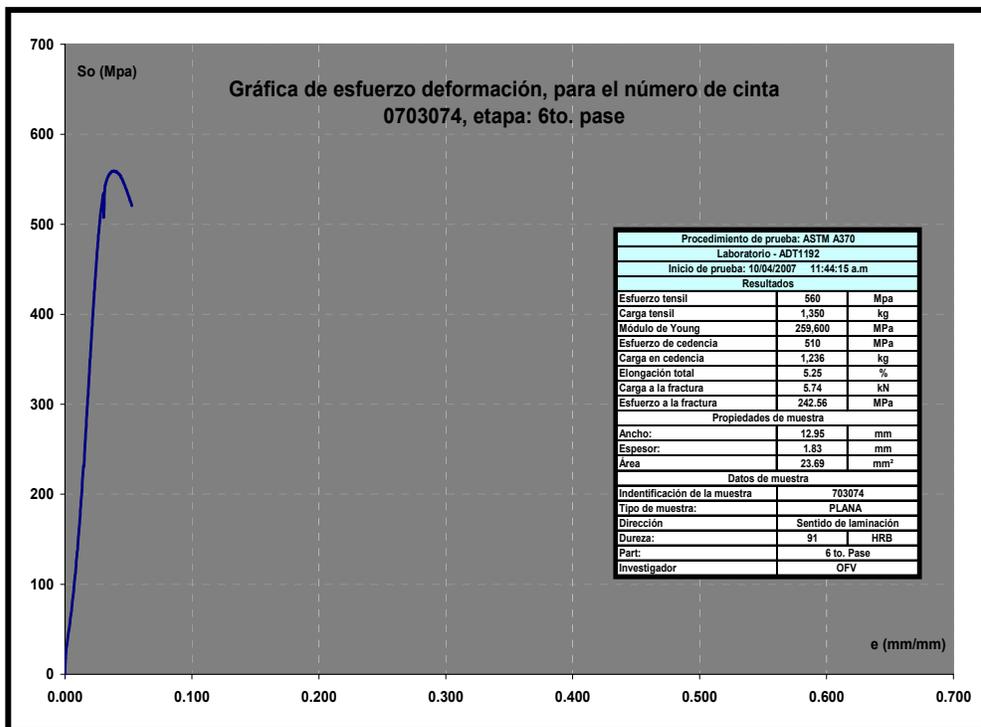
e).



f).



g).



h).

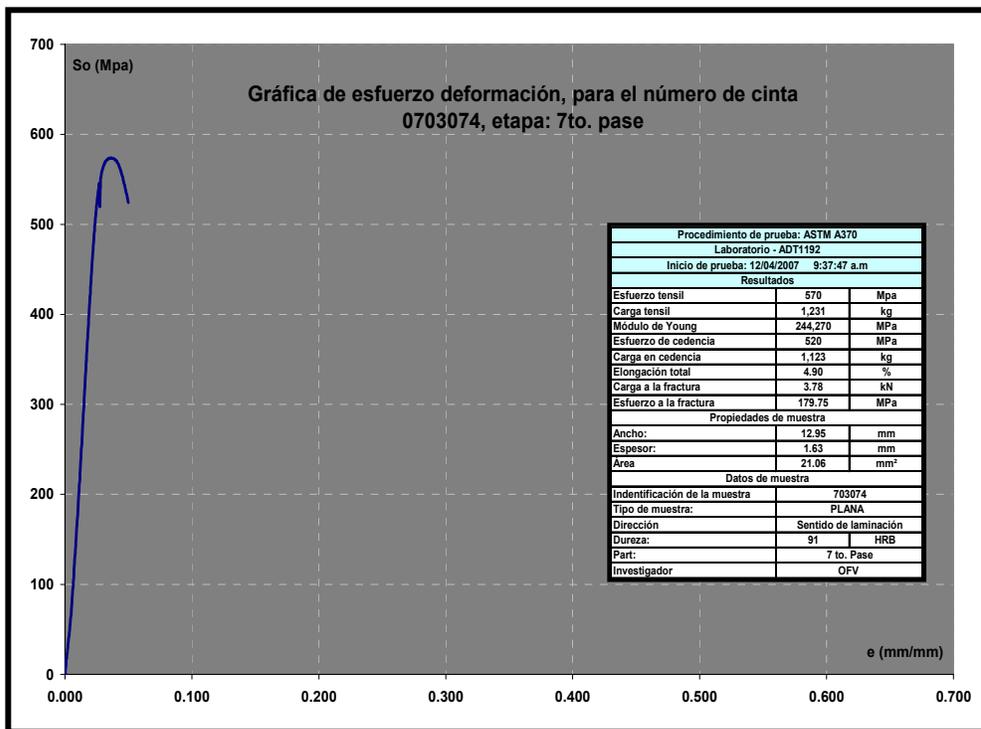
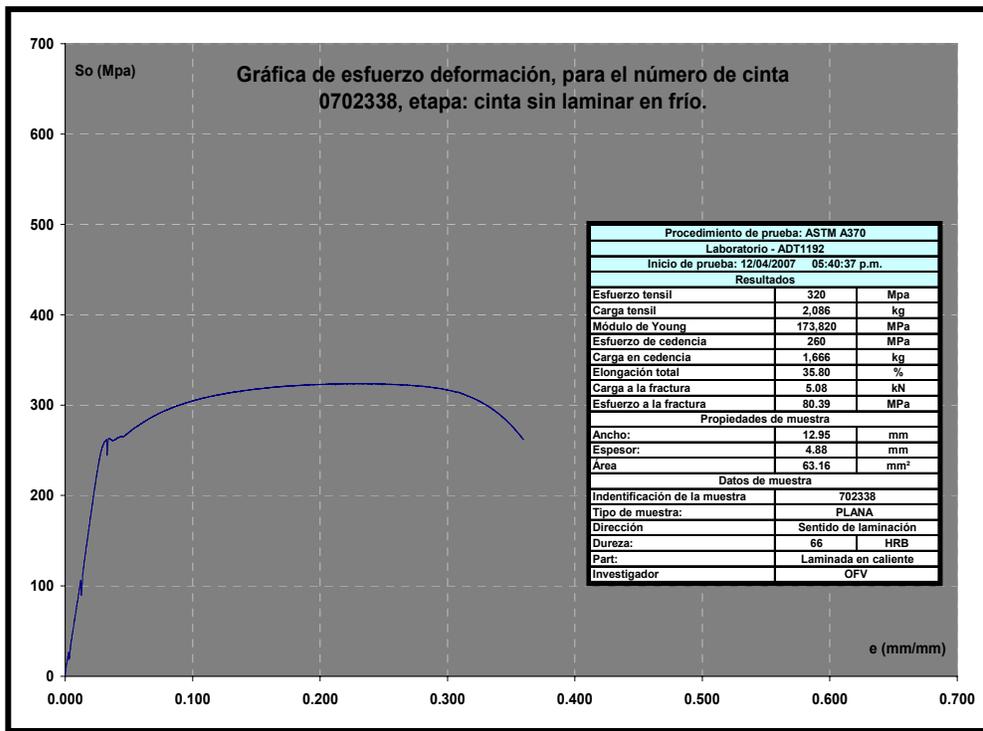
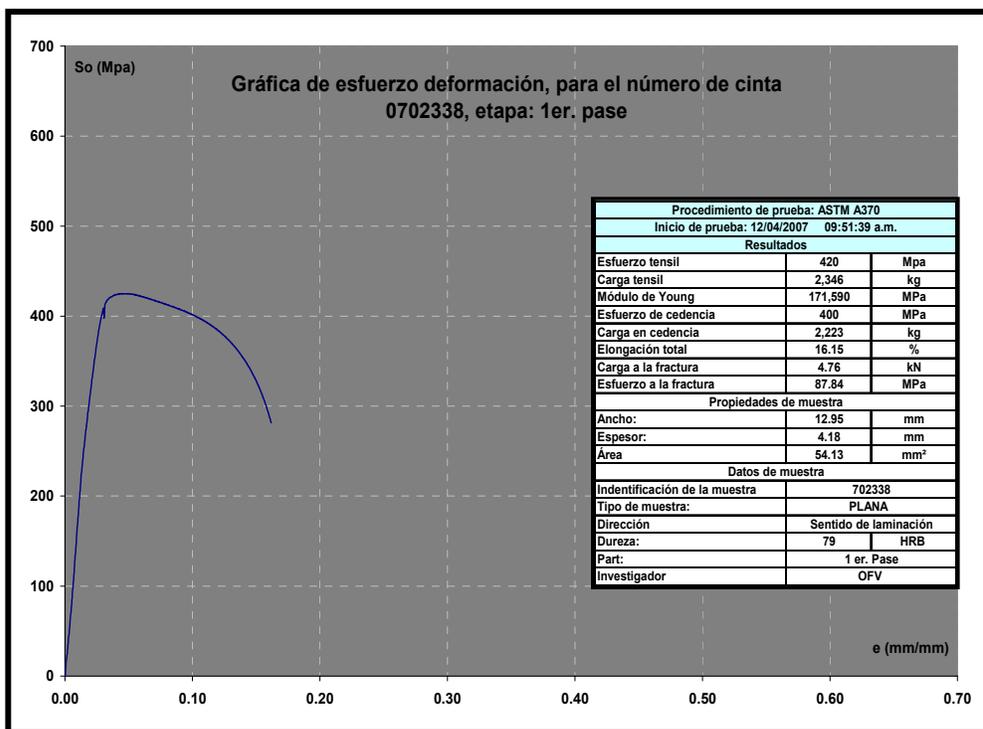


Figura A5, Resultados de los ensayos de tensión para la cinta de acero 1006, número de cinta 0702338, número de pases 7.

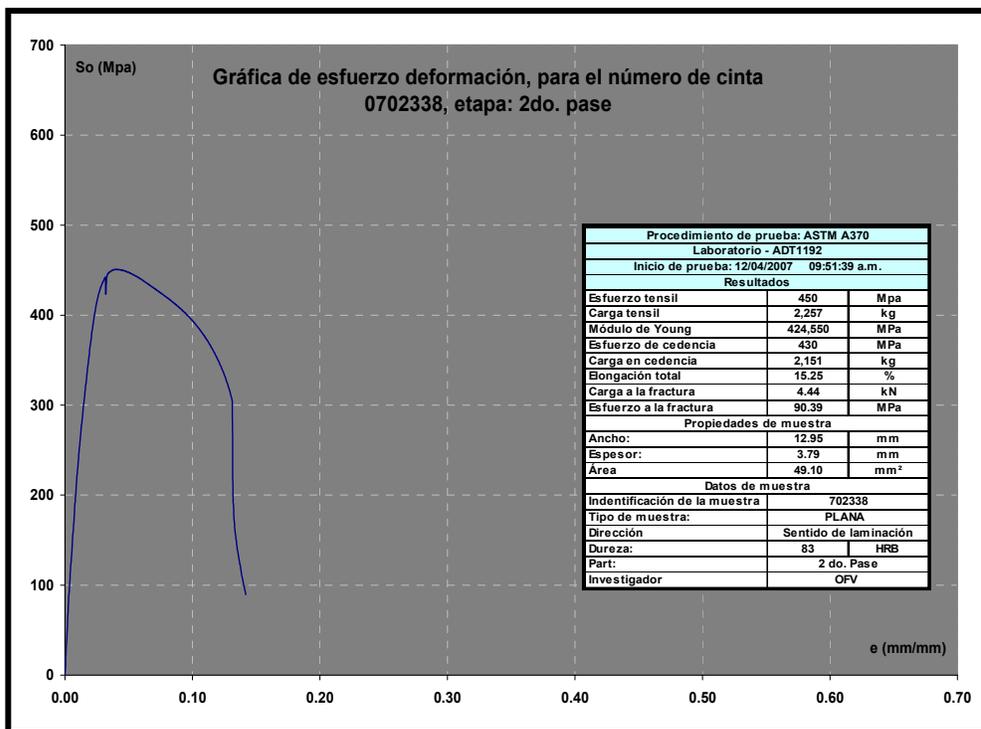
a).



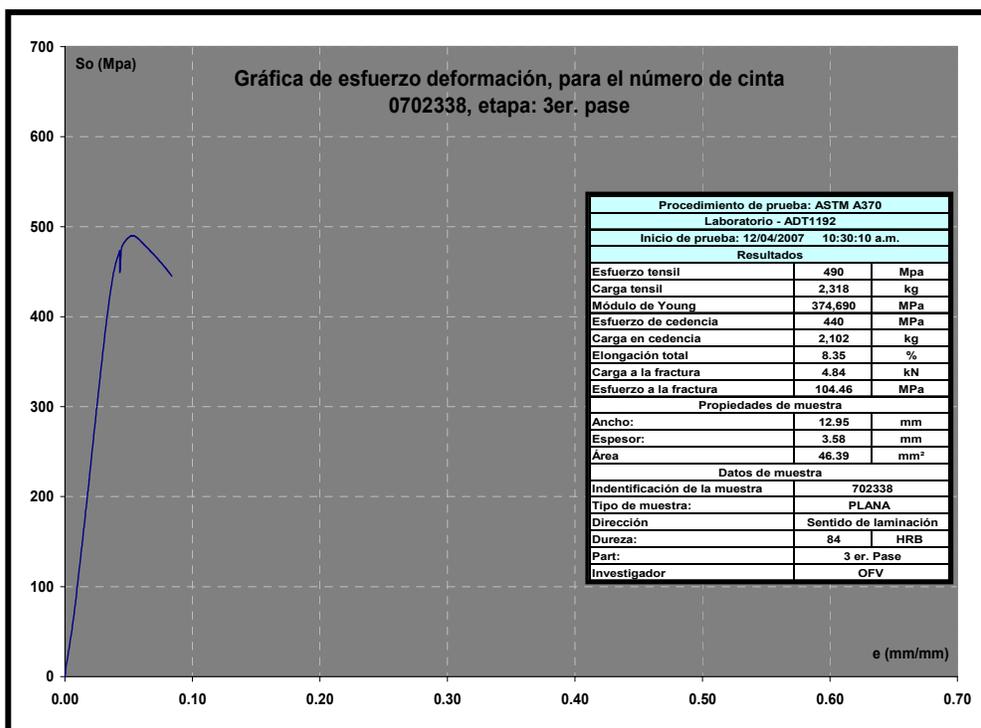
b).



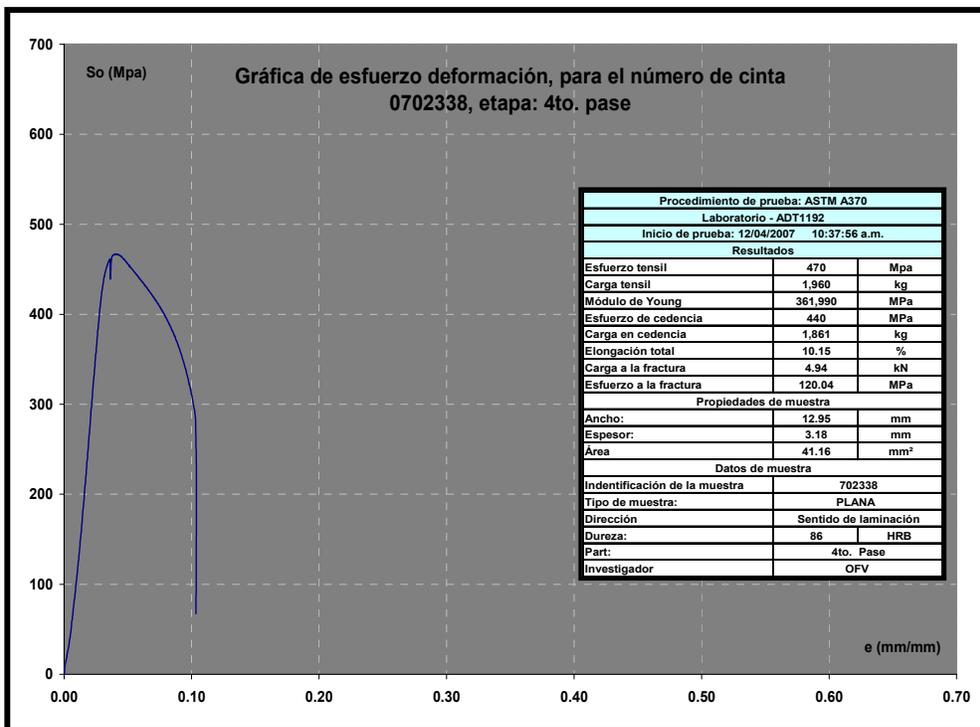
c).



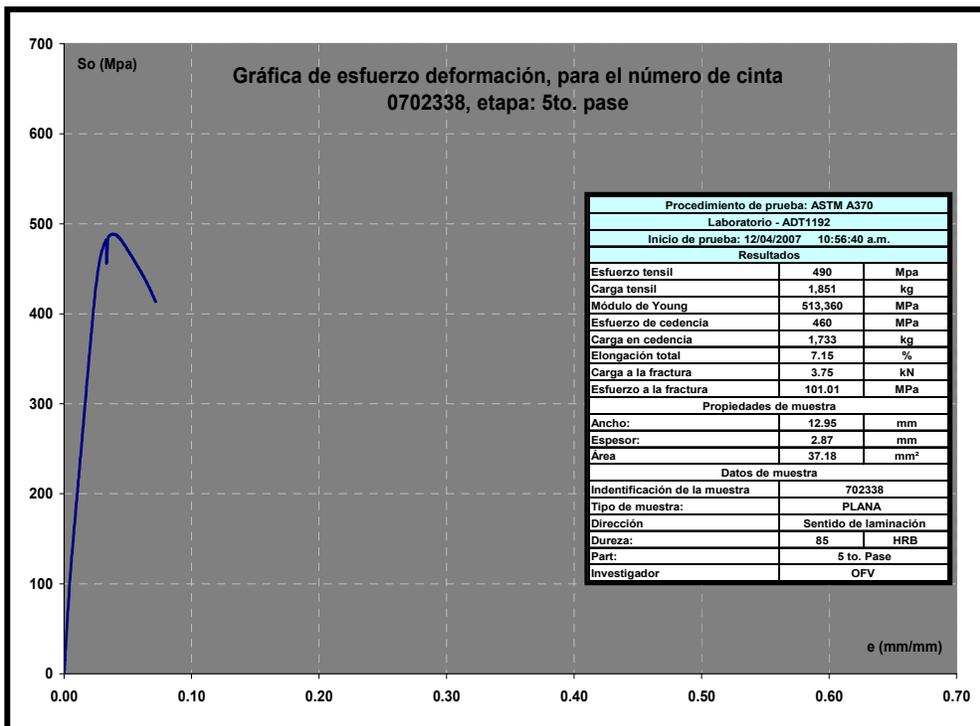
d).



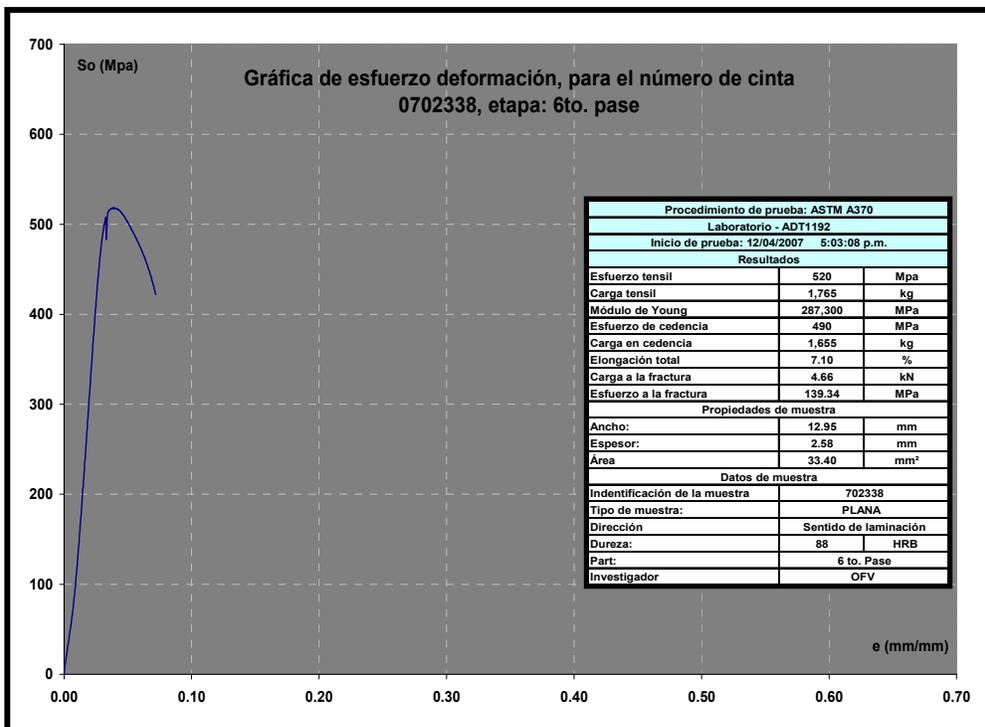
e).



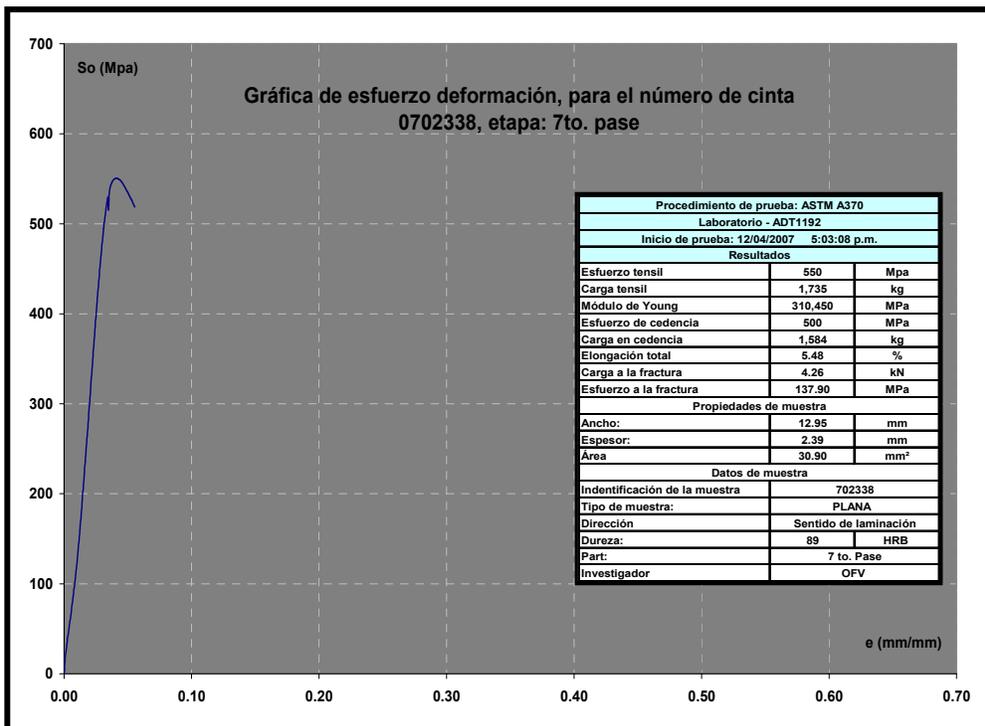
f).



g).



h).



LISTA DE FIGURAS

- Fig. 2.01.** Molino de laminación en caliente continuo del tipo cuarto, compuesto por diferentes castillos de laminación. 62
- Fig. 2.02.** Molino de laminación en frío reversible del tipo cuarto, utilizado para el proceso de laminación en frío de cintas de ancho angosto. 63
- Fig. 2.03.** Análisis geométrico para un elemento dentro de deformación planar en el proceso de laminación en frío. 63
- Fig. 2.04.** Esfuerzos actuando sobre el diferencial de un elemento en el área de contacto de laminación. 64
- Fig. 2.05.** Fuerzas actuando en la mordida de laminación. 64
- Fig. 2.06.** Dibujo esquemático que ilustra las colinas de fricción en la mordida de laminación. 65
- Fig. 2.07.** Dibujo esquemático que ilustra los componentes más importantes del proceso de laminación. 65
- Fig. 2.08.** Gráfica que representa la ecuación 2.35. 66
- Fig. 2.09.** Gráfica que representa la ecuación 2.36. 66

Fig. 2.10. Gráfica que representa la ecuación 2.37.	66
Fig. 2.11. Corte transversal a lo ancho de la cinta.	67
Fig. 2.12. Principales parámetros del perfil de espesor medidos a lo ancho de la cinta.	67
Fig. 2.13. Principales parámetros del perfil de espesor medidos a lo ancho de la cinta – coronas.	67
Fig. 2.14. Definición de picos y valles.	68
Fig. 2.15. Parámetro geométrico de desviación de rectitud.	68
Fig. 2.16. Parámetro geométrico de descuadre.	68
Fig. 2.17. Relaciones cualitativas entre elongación y planicidad.	69
Fig. 2.18. Longitud de la cinta en dirección transversal.	69
Fig. 2.19. Relación cualitativa entre el diferencial de elongación a través del ancho y planicidad.	70
Fig. 2.20. Relación entre varios parámetros de planicidad.	70
Fig. 2.21. Principales parámetros que afectan el perfil de cinta y planicidad en un molino cuarto.	71
Fig. 2.22. Variación de la corona central de la cinta con el ancho para un molino laminador en caliente de 1676 <i>mm</i> .	71

- Fig. 2.23.** Efecto de la variación de la fuerza de separación de laminación con el ancho de la cinta para un molino laminador en caliente de 1676 *mm*. 72
- Fig. 2.24.** Variación del diámetro del rodillo de trabajo con el ancho de cinta para un molino laminador en caliente de 1676 *mm*. 72
- Fig. 2.25.** Variación del efecto del diámetro del rodillo de apoyo con el ancho de la cinta para un molino laminador de 1676 *mm*. 73
- Fig. 2.26.** Cambio de corona por unidad en función de la relación del ancho-espesor en la aplicación para la laminación en un molino laminador de 6 castillos en un ancho de 1676 *mm*. 73
- Fig. 2.27.** Aproximación senoidal del defecto de forma de la cinta. 74
- Fig. 2.28.** Parámetros del perfil de cinta. 74
- Fig. 2.29.** Relación entre espesor de la película de aceite h_f y la relación de velocidad V a la fuerza de separación (P). 75
- Fig. 2.30.** Espesor de la cinta a la salida del castillo quinto en un molino en frío en función de velocidad sin compensación del efecto de velocidad. 75
- Fig. 2.31.** Variación del espesor de la cinta durante vibración en la estación quinta del molino en frío. 76
- Fig. 2.32.** Variación en la fuerza de laminación durante el castillo quinto del molino en frío. 76
- Fig. 2.33.** Fenómeno de golpeteo en un molino del tipo cuarto 77.

Fig. 2.34. Principales defectos de forma que se producen durante laminación en frío.	77
2.34a Desviación de planicidad	77
2.34b Comba	78
2.34c Torcido	78
2.34d Orilla ondulada	78
2.34e Desviación de rectitud	79
Fig. 2.35. Distribución de esfuerzos residuales en cintas laminadas en frío.	79
Fig. 2.36. Ilustra la formación del defecto de comba.	79
Fig. 2.37. Ilustra el efecto de quitar los errores del perfil de laminación en frío.	80
Fig. 3.01. Dibujo esquemático del molino reversible del tipo cuarto utilizado durante el desarrollo de la investigación.	90
a) Partes principales de la estación de trabajo del molino reversible en frío.	90
b) Principales componentes del castillo de laminación, el cual esta marcado con un círculo en la figura inciso a.	91
Fig. 3.02. Gráfica del acero de bajo carbono 1006 utilizada para el desarrollo del modelo de laminación en frío - curva constitutiva.	92
Fig. 3.03. Representación gráfica de las campañas de reducción del tipo progresiva, cédula No. 2 y del tipo de campana, cédula número 1.	92
Fig. 3.04. Comparativo de la variabilidad del espesor durante el pase para la cédula No. 1 o del tipo campana, número de rollo 0801516 y cédula No. 2, tipo progresiva, número de rollo 0801519.	93

Fig. 4.01. Fuerza de separación predicha contra lo real obtenida del molino de laminación. 115

Fig. 4.02. Variación del espesor con respecto a los cambios de velocidad efectuados durante el pase. 116

a), Variabilidad del espesor durante el pase de laminación con respecto a la velocidad de operación del molino laminador, parámetros sin modificación de cédulas, número de cinta de acero 0712342.

116

b), Variabilidad del espesor durante el pase de laminación con respecto a la velocidad de operación del molino laminador, parámetros sin modificación de cédulas, número de cinta de acero 0801017.

117

c), Variabilidad del espesor durante el pase de laminación con respecto a la velocidad de operación del molino laminador, parámetros sin modificación de cédulas, número de cinta de acero 0712330.

118

Fig. 4.03. Variables de la primera cédula de laminación para el número de rollo 0801516, las variables son porcentaje de reducción por pase, porcentaje de carga total, radio de rodillo deformado y la potencia requerida por pase junto con el diagrama de presión. 119

a) Campaña de reducción, cédula del tipo campana. 119

b) Diagrama de presión de cédula 1. 119

c) Resultados del análisis estadístico de la cédula de tipo campana.

120

Fig. 4.04. Variables de la segunda cédula de laminación, estas son porcentaje de reducción por pase, porcentaje de carga total, radio de rodillo deformado y potencia requerida por pase junto con el diagrama de presión. 121

a) Campaña de reducción 121

b) Diagrama de presión de cédula 2	121
c) Resultados del análisis estadístico de la cédula de tipo progresiva.	122
d) Resultados del análisis estadístico de la tercera y cuarta cédula de laminación con cambio en la velocidad del último pase se pasa de 2.54 <i>m/seg</i> a 3 <i>m/seg</i> .	122
e) Comparativo del análisis del diagrama de presión con respecto a la cédula de tipo 1 o de tipo de campana y la cédula de tipo 2 denominada progresiva.	123

Fig. 4.05. Comportamiento del coeficiente de fricción con respecto a la velocidad del molino laminador. a) cédula número 1, b) cédula número 2.

124

Fig. 4.06. Representación senoidal y esquemática del resultado de forma de las primeras cédulas de laminación. Incisos, a) Cédula del tipo campana y cédula del tipo progresiva.

125

Fig. 4.07. a). Comportamiento de la rugosidad en el perfil de cinta, para el último pase, aplicado a diferentes rollos, análisis realizado basándose en la norma *EN ISO 1302* y diferenciado bajo la norma *ASTM A109*, b).Comportamiento de la rugosidad para tres números de rollo durante la campaña de reducción.

126

Fig. 4.08. Comportamiento del radio del rodillo deformado del rodillo de trabajo con respecto al número de pases.

127

Fig. 4.09. Comportamiento de la potencia estimada para el desarrollo de cédulas de laminación.

128

Fig. 4.10. Cédulas de laminación en frío que experimentaron diferente pendiente de laminación durante la generación de la cédula de laminación.

129

a) Comparativo de cédula número 87 con respecto a la cédula número 88, mostrando la cédula 88. 129

b) Variabilidad del espesor durante el último pase de laminación, Cédula de laminación número 88 de 5 pases. 130

c) Comparativo de los diagramas de presión para ambas cédulas de laminación. 130

d) Comparativo de los diagramas de presión para ambas cédulas de laminación. 131

Fig. 4.11. Representación gráfica del perfil de corona para cintas de acero 1006 de las cédulas de laminación número 88. 132

Fig. 5.01. Representación gráfica de diferentes cédulas de laminación. 158

Fig. 5.02. Comparativo del análisis del diagrama de presión con respecto a la cédula del tipo 1 o de campana y la cédula de tipo 2 denominada progresiva. 159

a) Diagrama de presión, sobreponiendo la cédula del tipo campana (No. 1) sobre la cédula progresiva (No.2), comparando el comportamiento del ángulo y longitud del arco de contacto. 159

b) Diagrama de presión de la cédula de tipo progresiva (No.2) aplicada al primer lote de prueba y al número de cinta de acero 0801519. 160

c).Diagrama de presión de la cédula de tipo campana (No.1) aplicada al primer lote de prueba con número de cinta de acero 0801516. 161

Fig. 5.03. Comportamiento del parámetro de fricción de acuerdo al simulador conforme aumenta la velocidad de operación del laminador. 162

Fig. 5.04. Comportamiento de la longitud de ondulación de la cinta con respecto a la planicidad del material en relación con el número de pases. Los porcentajes descritos en la figura representan los valores dentro del rango de planicidad ideal de operación 40UI. 162

a). Cédulas de 3 pases, comparación entre cédulas desarrolladas con rampa y sin rampa. 162

b). Cédulas de 4 pases, comparación entre cédulas desarrolladas con rampa y sin rampa. 163

c). Cédulas de 5 pases, comparación entre cédulas desarrolladas con rampa y sin rampa. 163

Fig. 5.05. Resultados de los ensayos de tensión para el acero SAE 1006. número de cinta de acero 0703074, número de pases 7, a) Gráfica general del esfuerzo con respecto a la elongación del material para los 7 pases, b) Gráfica de esfuerzo deformación con respecto a la reducción acumulada por pase. 164

Fig. 5.06. Resultados de los ensayos de tensión para la cinta de acero SAE 1006, número de cinta 0702338, número de pases siete, a) Gráfica general del esfuerzo con respecto a la elongación del material para los siete pases, b) Gráfica de esfuerzo deformación con respecto a la reducción acumulada por pase. 165

Fig. 5.07. Ajuste del coeficiente de fricción para el desarrollo del modelo por medio de la velocidad de operación, comparando valores de fuerza de separación con respecto a otros conceptos. 166

Fig. 5.08. Representación gráfica del perfil de corona para cintas de acero 1006 de las cédulas de laminación número 88.

- a) Comportamiento de la cuña para los números de rollo 0807103 1P,
0807103 5P, 0807102 5P, 0807101 1P. 167
- b) Comportamiento de la cuña para los números de rollo 0806346 1P,
0806346 6P. 167
- c) Comportamiento de la cuña para los números de rollo 0806024 1P,
0806024 2P, 0806024 3P. 168

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.01 Claves para el perfil de espesor de la cinta de acero de bajo carbono 1006.	58
Tabla 2.02 Tipos de corona para la cinta de acero de bajo carbono.	59
Tabla 2.03 Claves para el perfil de espesor con respecto a su asimetría y cuña de la cinta de acero.	59
Tabla 2.04. Clasificación de zonas del perfil del espesor con respecto al ancho de la cinta de acero definidas: zona de orilla caída, orilla en extremo del espesor, y rugosidad de la cinta – picos y valles.	60
Tabla 2.05 Parámetros para la evaluación cuantitativa de la planicidad.	60
Tabla 2.06 Parámetros de laminación utilizados en un análisis de elementos finitos en 3D.	61
Tabla 3.01 Características del molino laminador en frío reversible del tipo cuarto, donde se llevo a cabo el desarrollo de la investigación.	89
Tabla 4.01 Registros de los valores de la fuerza de separación predicha contra lo registrado en el molino de laminación.	108

Tabla 4.02 Cédulas de laminación en frío que se generaron para la realización de diferentes campañas de laminación en frío,	110
a) Cédulas con respecto a reducción, velocidad y fuerza de separación por pase,	110
b) Cédulas con respecto Potencia (<i>kJ/seg</i>) y <i>D'</i> (<i>cm</i>)	112

Tabla 4.03 Resultados obtenidos del ensayo de planicidad para el desarrollo de las cédulas de laminación, de acuerdo a norma <i>ASTM A1030/A1030-05</i> .	114
--	-----

Tabla 5.1 Resultados de los ensayos de tensión desarrollados para la construcción de las curvas constitutivas de la cinta de acero 1006, cinta de acero libre de elementos intersticiales y acero <i>SAE 1050</i> .	154
--	-----

Tabla 5.2 Tabla de resultados de los valores de planicidad con respecto a los diferentes parámetros de laminación.	155
---	-----

Tabla 5.3 Resultados de los ensayos del perfil de cuña (asimétrico) a la cinta de acero de bajo carbono 1006, en diferentes etapas del proceso de laminación.	157
--	-----

GLOSARIO

Ángulo o arco de contacto (θ) – Se define como el ángulo que abarca la zona de contacto que se forma entre el rodillo de trabajo del molino laminador y la cinta de acero durante el proceso de laminación en frío. Es un ángulo que forma parte de la mordida de laminación.

Ángulo neutro (ϕ_n) – Ángulo que se encuentra dentro de la zona del arco de contacto del proceso de laminación, el cual comprende desde el punto de salida a la zona neutra del área de contacto y es en el punto en el cual la velocidad periférica del molino es igual a la velocidad de salida siendo el lugar de la máxima fuerza de separación para el proceso de reducción.

Anisotropía (r) – Material no isotrópico, tiene diferentes propiedades en diferentes direcciones, así los cristales de un sistema isométrico son ópticamente isotrópicos, pero todos los demás cristales son anisotrópicos.

Anisotropía planar (Δr) – Es la variación de la relación de deformación en diferentes direcciones en el plano de la lámina. Es un valor diferente de cero no uniforme en extensión del material en algunas direcciones.

Calibre – Se define como el espesor de tolerancia comercial basado estándares definidos por la U.S. Standard y M.S.G.

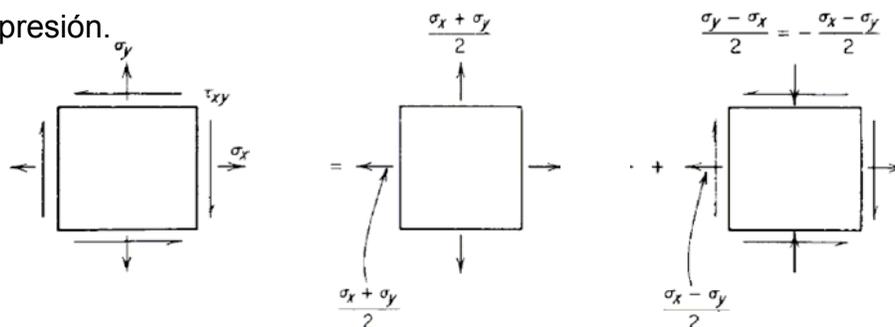
Camber - Palabra inglesa y que es sinónimo del defecto de desviación de rectitud, el cual se define como un ligero abombamiento que se manifiesta por una curva lateral de la cinta, figura 2.34e.

Campaña de laminación – Programa de laminación en frío para un lote determinado de cintas, partiendo de una cédula establecida en común para dicho lote de fabricación.

Cedencia – Propiedad mecánica del material que se presenta en un punto del ensayo de tensión, donde el material experimenta una deformación permanente y esta propiedad es caracterizada o estandarizada bajo diferentes normas internacionales. La norma más utilizada para cuantificación es la *ASTM A370-07b*⁵³.

Cédula de laminación – Programa o secuencia de operación que es utilizado como una instrucción de trabajo para el proceso de laminación en frío, el cual comprende parámetros del proceso de reducción, entre ellos se puede mencionar como reducción del pase, velocidad de operación, fuerza de separación, tensión de entrada y de salida, etc.

Componente hidrostático – Es el componente de esfuerzo que solamente produce un cambio de volumen elástico más no produce deformación plástica, y forma parte del tensor de esfuerzo total donde solamente se involucra tensión o compresión.



Tensor de esfuerzos total = Esfuerzo Hidrostático + Esfuerzo Desviador

Corona – Se define como la diferencia existente entre el diámetro que presenta el rodillo de trabajo en los extremos o orillas con respecto al diámetro que presenta el rodillo en el centro del mismo, pudiendo manifestarse como positivos y negativos, coronas cóncavas y convexas o definidas con el sinónimo de coronas positivas y negativas.

Criterio de Cedencia de Von Mises – Criterio que establece que la cedencia en los materiales inicia cuando el segundo esfuerzo del invariante reducido J_2 alcanza un valor crítico k , y que por esta razón algunas veces se le llama a este criterio teoría de plasticidad J_2 o Criterio de distorsión de energía, para materiales que presentan un comportamiento elástico y exhiben cedencia.

Curva Constitutiva – Curva que se compone principalmente de dos parámetros principales del esfuerzo y deformación, realizada para la construcción de la ecuación polinomial que forma parte del modelo de laminación.

Densidad (ρ) – La densidad del material es definida como la masa del material por unidad de volumen. El agua tiene una densidad de $1.0 \times 10^3 \text{ kg/mm}^3$, donde el acero tiene una densidad de acuerdo a norma *ASTM* de $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Ductilidad – Es una propiedad mecánica que exhibe el material después de que ha sido deformado y que será el punto máximo de deformación antes de realizarse la ruptura del material y que es estandarizado por medio del ensayo de tensión bajo diferentes normas internacionales, donde la norma más aplicable para cuantificar esta propiedad es la *ASTM A370-07b*⁵³.

Dureza Knoop – Unidad de dureza del metal introducida en 1939. La prueba Knoop es similar a la prueba Vickers en la que un penetrador de diamante es utilizado para indentar la muestra a ser probada, aquí se utiliza un diamante romboédrico mas que un diamante piramidal. Es similar a la prueba Rockwell en

la que la unidad de dureza es la profundidad de la penetración más que su área. El resultado es medido en kilogramos fuerza por milímetros cuadrados pero es una medida empírica, sin unidades.

Dureza Rockwell – Unidad de medida de dureza introducida por Rockwell en 1922. En una prueba Rockwell, un penetrador marca una indentación en el metal dentro de dos cargas constantes, una carga menor (generalmente de 10 *kgs*) y después una carga mayor. La diferencia en la profundidad de penetración entre las cargas provee la medida de dureza, usualmente leída de un calibrador de la máquina de prueba. Existen varias escalas Rockwell para diferentes rangos de dureza. La más común es la escala **B (HRB)**, para lo cual un balón de acero es usado como penetrador, y la escala **C (HRC)**, en la cual un diamante cónico se utiliza. La escala **B** es apropiada para materiales suaves, la escala **C** para materiales duros. Los números de dureza Rockwell no son proporcionales a la dureza Vickers.

Dureza Vickers – Unidad de medición de dureza introducida por Vickers en 1922. En la prueba Vickers un diamante piramidal es presionado en el material a ser probado. La dureza Vickers es la cantidad de fuerza aplicada por el diamante dividido por el área de la indentación del diamante hecha en el material; en la práctica el diagonal de la indentación piramidal es medida y el resultado, se calcula en kilogramos fuerza por milímetro cuadrado, y es leído en una tabla. (Las lecturas son unidades empíricas, sin unidades).

Elongación (% e)– Es la relación del cambio en la longitud con respecto a la longitud original.

Envejecimiento, - Es un término aplicado al cambio en las propiedades de un acero al carbono que puede ocurrir con el tiempo. Estos cambios incluyen un incremento en la resistencia tensil y un decremento en la elongación total, Aun más, la elongación en el punto de cedencia puede incrementarse en el temple,

puede manifestarse irregularidades en la superficie, (como líneas de Luder ó líneas de fluencia) durante el formado que pueden restar capacidad de usos en partes expuestas. El envejecimiento resulta de la presencia de nitrógeno y carbono intersticial.

Esfuerzo de constricción. Para todo proceso de deformación, la fricción es importante y necesaria debido a que transmite la energía de deformación de los rodillos de laminación a la cinta y previene la expansión lateral de la cinta siendo deformada. Así que es de importancia determinar el último esfuerzo que esta ejerciendo el rodillo de trabajo en la cinta para deformarla plásticamente sin la presencia de fuerzas friccionales que actúen paralelamente en la dirección de laminación. Dentro de estas condiciones, la constricción friccional en la dirección transversal alcanza al esfuerzo de compresión principal (σ_2) que no permite el cambio de ancho de la cinta en el área de contacto de reducción cuando la cinta esta sujeta a los otros dos esfuerzos principales (σ_1 y σ_3). La deformación ε_2 de un cuerpo elástico en una dirección coincidente con el esfuerzo principal σ_2 esta dado por

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} \{ \sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3) \}$$

En donde E es el modulo de Young y ν es la relación de Poisson. Así que ε_2 es cero debido a la constricción friccional transversal externada en la cinta por los rodillos de trabajo, donde la ecuación para la cedencia sería

$$\sigma_2 = \nu(\sigma_1 + \sigma_3)$$

En deformaciones plásticas, la relación de Poisson se designa usualmente a un valor de 0.5 así que

$$\sigma_2 = 0.5(\sigma_1 + \sigma_3)$$

Cuando este valor para σ_2 es sustituido en la expresión representada de Von Mises, se vería así:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = 1.15 \sigma_0 = \sigma_c$$

En donde σ_c fue definido por Nadia¹², como el esfuerzo de constricción.

Dentro de estas condiciones fricciónales en la dirección de laminación, la cinta con un esfuerzo de cedencia, σ_0 , y con un esfuerzo tensil de entrada y de salida iguales, σ_3 , requerirá de un esfuerzo de compresión σ_1 , a para deformar y estará dado por

$$-\sigma_1 = -1.155 \sigma_0 + \sigma_3$$

o

$$\sigma_1 = 1.155 \sigma_0 - \sigma_3$$

Así que el máximo esfuerzo de tensión en la cinta, representado por σ_3 , y el esfuerzo de menor valor σ_1 , podría externarse por los rodillos para deformar la cinta.

Espesor de entrada – Espesor que tiene la cinta de acero antes de iniciar la laminación en frío.

Espesor de salida – Espesor que presenta la cinta después de efectuarse la laminación en frío.

Fuerza de Separación – Es la fuerza contraria e igual en magnitud a la aplicada por el molino durante el proceso de reducción que se opone al contacto de la cinta con respecto al rodillo de trabajo.

Índice de inclinación de la ondulación (*S - Stepness*) – Método alternativo que se utiliza para expresar planicidad. La lámina se coloca sobre una superficie plana midiendo horizontalmente altura y longitud de onda. Este índice se expresa en porcentaje y es utilizado para determinar la máxima distancia que

Isotropía – Material que tiene las mismas propiedades en todas direcciones, específicamente, elásticas en todas direcciones.

Líneas de Luder - Llamadas bandas de Luder por deformaciones de estiramiento, las cuales se encuentran comúnmente en láminas de acero de troquelado extraprofundo. Son visibles como marcas de superficie, o superficie rugosa, causada por cedencia homogénea (discontinuidad) durante el formado del metal. La cedencia plástica ocurre dentro de líneas de Luder pero no afuera de ellos.

Mordida de laminación – Se puede definir como el área a la que tiene contacto el rodillo con la cinta de acero.

Parámetros geométricos de laminación – Hablamos de parámetros fijos del proceso de laminación en frío como son: diámetro de entrada del rodillo de trabajo, corona del rodillo, radio de los rodillos de apoyo, tensiones de los mandriles del desenrollador y enrollador, etc.

Perfil de espesor – Variabilidad del espesor con respecto a longitud de la cinta.

Planicidad – Parámetro que cuantifica la forma del material en cuanto lo plano de la cinta medida. Distancia que existe de la superficie de la lámina con respecto a la mesa de medición. El parámetro está estandarizado bajo la norma internacional ASTM A1030/A1030M-05⁵⁵

Plano neutro – Área que abarca el punto de salida de la cinta al punto donde se lleva a cabo la aplicación de la máxima fuerza de separación.

Porcentaje de Reducción en frío (% *r*) – Porcentaje de reducción de área para una cinta o lámina y que está en función de la diferencia del espesor inicial con respecto al espesor final requerido.

Presión Hidrostática – Considerando un cubo pequeño el cual puede ser un líquido cualquiera y se encuentre en reposo sobre una superficie o área definida. La presión causada por la altura del cubo que contiene el líquido deberá de estar en balance por una fuerza contraria que se oponga a esta presión del cubo pequeño en el área definida. Al suponer un cubo infinitamente pequeño en donde el esfuerzo aplicado es el mismo en todas las direcciones y que puede estar en función del peso del líquido a una presión equivalente se podría expresar de esta manera:

$$P = \rho gh + P_a$$

Donde,

- P - Es la presión hidrostática (en Pascal- Pa);
- ρ - Es la densidad del líquido (kg/m^3);
- g - Es la aceleración gravitacional (m/s^2);
- h - Es la altura del cubo de líquido (m);
- P_a - Es la presión atmosférica (Pa).

Presión radial – Fuerza aplicada por unidad de área directamente a la cinta laminada en frío con respecto al ángulo de contacto.

Propiedades del material – Se definen como los parámetros que son cuantificables y que son obtenidos durante el ensayo de tensión, como por ejemplo: esfuerzo de tensión, esfuerzo de cedencia, elongación, etc.

Sensor - Es un dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas. Las variables de instrumentación dependen del tipo de sensor y pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad luminosa, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, etc. Una magnitud eléctrica obtenida puede ser una resistencia eléctrica (como en una RTD), una

capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como un fototransistor), etc.

Tabla de rodillo – Se define como el ancho del rodillo de trabajo o del apoyo y es la capacidad máxima de reducción en cuanto ancho para un molino de laminación en frío.

SIMBOLOGÍA

CAPÍTULO 2

INTRODUCCIÓN

r	Reducción unitaria.
$\%r$	Porcentaje de reducción unitaria.
Δh	Reducción absoluta (Draft).
ε	Deformación natural unitaria científica.

2.1.2 CRITERIO DE DISTORSIÓN DE ENERGÍA

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Esfuerzos principales actuando en un cubo a compresión en los tres ejes principales.
J_2	Esfuerzo desviador o reducido.
σ_0	Esfuerzo de cedencia.
k	Esfuerzo de cedencia en corte puro (torsión).

2.1.3 CRITERIO DE ESFUERZO MÁXIMO DE CORTE

τ_{max}	Esfuerzo de corte máximo.
--------------	---------------------------

2.2 TEORÍAS DE LAMINACIÓN EN FRÍO

θ	Ángulo de contacto es circular.
μ	Coefficiente de fricción.
p_r	Presión radial.
σ_x	Esfuerzo uniformemente distribuido sobre las caras verticales del elemento.
ϕ	Ángulo en cualquier punto de contacto entre la cinta y la superficie del rodillo.
p	Presión específica del rodillo de laminación.
R	Radio del rodillo de trabajo sin deformar

2.3 CÁLCULO DE LA FUERZA DE SEPARACIÓN Y PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA MORDIDA DE LAMINACIÓN EN FRÍO.

A	Punto al plano de entrada del análisis de la sección analizada para sumatoria de fuerzas, figura 2.05.
B	Punto al plano de salida del análisis de la sección analizada para la sumatoria de fuerzas, figura 2.05.
C	Punto de salida del área de laminación o área de contacto, figura 2.05.
L	Fuerza normal actuando en plano AB de la figura 2.05.
N	Fuerza friccional.
L_h	Componente horizontal de la fuerza normal.
f, q, w	Esfuerzos principales actuando en un cubo sometido a compresión.
K	Es la resistencia bajo compresión homogénea.
k	Representa la resistencia planar de deformación homogénea.
f	esfuerzo horizontal aplicado a un diferencial analizado (tensión).
F	fuerza horizontal (tensión).
h	Espesor del diferencial analizado.

h_1	Espesor de entrada (<i>mm</i>).
h_2	Espesor de salida (<i>mm</i>).
γ	Relación de Poisson.
H_n	Espesor en el ángulo neutro.
ϕ_n	Ángulo en el punto neutro.
A	Área de la zona de contacto de la mordida de laminación.

2.3.1 MÉTODO EMPLEADO PARA EL CÁLCULO DEL RADIO DEFORMADO.

P	Es la carga de laminación basada en R
w	Ancho del material
h_0	Espesor de entrada
h_1	Espesor de salida
C	Constante basada en el módulo de elasticidad
R'	Radio rodillo de trabajo deformado.
R	Radio rodillo de trabajo sin deformar.

2.3.2 VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

$\dot{\varepsilon}$	Velocidad de deformación
σ_y	Esfuerzo de cedencia
V	Velocidad de laminación
h_ϕ	Espesor de la pieza en el plano neutral
ϕ	Ángulo sustentado en el centro del rodillo de trabajo por el segmento del arco de contacto dejándolo entre el plano neutral y de salida.
h_0	Espesor de entrada de la cinta laminada.
h_1	Espesor de salida de la cinta laminada.
D	Diámetro del rodillo de trabajo.

2.3.3 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN DESDE LA FUERZA DE SEPARACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA CINTA.

σ_c	Esfuerzo de constricción
σ_{yt}	Esfuerzo de cedencia en tensión
a	Parámetro con un valor alrededor de 36.20 <i>MPa</i>
E	Módulo elástico del material laminado.
σ_1	Es el promedio de la resistencia tensil en la entrada y salida de la mordida de laminación.

2.4.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE MEDICIÓN DEL PERFIL ESPESOR A LO ANCHO DE CINTA.

hc	calibre central es el espesor medido en el centro o a mitad del ancho de la cinta.
hj	Es el espesor usualmente medido en una distancia J , de 50 a 75 mm de la orilla de la cinta.
hI	Es el espesor de la cinta a una distancia I desde 9.25 a 25 mm desde la orilla de la cinta.
he	Es el espesor medido en una distancia e que va desde 2 a 3 <i>mm</i> de la orilla de la cinta.
chJ	Corona parcial.
chI	Corona central.
chI'	corona de perfil asimétrico
hI'	Espesor de caída de orilla al lado del motor principal
hI''	Espesor de caída de orilla al lado del operador
chI''	Corona del lado del operador del perfil asimétrico.
crI	Relación de corona central total.

2.5.2 PLANICIDAD CONTRA ELONGACIÓN

$\Delta\epsilon_e$	Elongación diferencial de orilla ondulada.
$\Delta\epsilon_q$	Elongación diferencial de $\frac{1}{4}$ de orilla ondulada.
ϵ'_e	Elongación de onda a un lado del motor.
ϵ''_e	Elongación de onda a un lado del operador.
ϵ'_q	Elongación de $\frac{1}{4}$ de onda a un lado del motor.
ϵ''_q	Elongación de $\frac{1}{4}$ de onda a un lado del operador.
ϵ_c	Elongación en centro de la cinta.

2.5.3 FÓRMULAS PARA PLANICIDAD

$\Delta L/L$	Cambio de longitud de Onda
L	Longitud de onda
k	Factor de ondulación
H	Altura de la onda
e	Porcentaje de elongación
f	Porcentaje de planicidad
I	Unidad de medición de la Planicidad
S	Porcentaje de inclinación.

2.6 PRINCIPALES PARÁMETROS QUE AFECTAN EL PERFIL DE LA CINTA Y LA PLANICIDAD

P	Fuerza de separación del rodillo
w	Ancho de cinta.
Δ	Reducción de altura

2.6.1 EFECTO DEL ANCHO DE LA CINTA EN LA CORONA DE LA CINTA

Δc	Cambio en la corona de la cinta
Δw	Cambio en el ancho de la cinta que produce cambio en la corona de la cinta Δc .
c, c_0	Corona de la cinta correspondiente para el ancho de la cinta w y w_0 respectivamente.

2.6.2 EL EFECTO DE LA FUERZA DE SEPARACIÓN EN LA CORONA DE LA CINTA.

k_p	Efecto de la fuerza de separación en la corona de la cinta.
-------	---

2.6.3 EFECTO DEL DIÁMETRO DEL RODILLO DE TRABAJO EN LA CORONA DE LA CINTA

k_{dw}	Efecto del diámetro del rodillo de trabajo en el centro de la corona.
ΔD_w	Cambio en el diámetro del rodillo de trabajo (superior y inferior) que produce cambio en la corona en la cinta Δc
c, c_0	Corona de la cinta correspondiente al diámetro de los rodillos de trabajo D_w y D_{w0} respectivamente.

2.6.4 EL EFECTO DEL DIÁMETRO DEL RODILLO DE APOYO EN LA CORONA DE LA CINTA

k_{db}	Contribución del diámetro del rodillo de apoyo en la corona central.
ΔD_b	Cambio en el diámetro de ambos rodillos de apoyo superior y inferior que produce cambio en la corona de la cinta Δc .
c, c_0	Corona de la cinta correspondiente al diámetro del rodillo de apoyo D_b y D_{b0} respectivamente.

2.6.5 EFECTO DE LA CORONA DE LA CINTA EN LA PLANICIDAD

δ	Cambio de corona en la cinta por unidad
c_1, c_2	Corona de entrada y salida de la cinta respectivamente
h_1, h_2	Espesor de entrada y salida respectivamente.

2.7.2 MÉTODO DE ÍNDICE DE FORMA

ρ	Índice de forma
H	Altura de la longitud de onda
L	Longitud de onda

2.8 VARIACIÓN DE CALIBRE.

V	Velocidad del rodillo
P	Fuerza de laminación
α, b	Parámetros de ajustes

2.8.1 EFECTO DE VIBRACIÓN EN EL CALIBRE

θ_m	Desplazamiento angular máximo del rodillo de trabajo asociado con la vibración
f_t	Frecuencia de vibración torsional, Hz
D_w	Diámetro del rodillo de trabajo
V	Velocidad de la cinta
k	Constante torsional de la cinta
J	Inercia rotacional total
J_w, J_b	Inercia rotacional de un rodillo de trabajo y un rodillo de apoyo respectivamente.
D_w, D_b	Diámetros de los rodillos de trabajo y de apoyo respectivamente.

2.8.2 MODO VERTICAL 3^{er}. OCTAVO.

D_b Diámetro del rodillo de apoyo

2.8.3 MODO VERTICAL 5^{to} OCTAVO

D_w Diámetro del rodillo de trabajo

2.8.4 DEFINICIÓN Y CAUSAS DE LA EXCENTRICIDAD DEL RODILLO

D_1, D_2 Diámetros mayor y menor de los rodillos de apoyo.

V Velocidad del molino, *mm/seg*

CAPÍTULO 5

5.1.1. CURVA CONSTITUTIVA

r Reducción durante el proceso de deformación dentro del ángulo de contacto.

σ_0 Esfuerzo de cedencia del material durante la deformación del material dentro del ángulo de contacto en *N/mm²*.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

OSCAR FRANCISCO VILLARREAL VERA

Fecha Nacimiento : 4 de Octubre de 1965
Lugar de nacimiento : Monterrey, N.L. México
Estado Civil : Casado
Cédula Profesional : 1336537

ESTUDIOS PROFESIONALES

Fecha	Estudios
Sep/06-	Programa Doctoral: Ingeniería de Materiales. U.A.N.L; Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. <u>Tesis:</u> Optimización e innovación de cédulas del proceso de laminación en frío para un molino reversible del tipo de cuarto aplicado a un grado de acero 1006.
Sep/99-Dic/2002	Postgrado: Maestría en Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales

U.A.N.L; Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Tesis: Recristalización de cinta de acero laminada en frío grado 1006 y la influencia de la zona de precalentamiento en la recristalización del acero.

1983 – 1987 Ingeniería, Ingeniero Mecánico Metalúrgico, *U. A. N. L*;
 Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
 Examen Honorífico con Práctico.

PARTICIPACIONES EN CONGRESOS:

- Ponencia para el 1^{er} congreso de la Sociedad del Hierro y Acero división México (*ISS -IRON & STEEL SOCIETY MÉXICO - AIST*)
 Documento de Recristalización de cinta de acero 1006. Nov. 2003
- Expositor en reunión de laminadores del acero (*AIST*)
 Documento del Análisis del defecto por Pegado Junio 2004
- Expositor en el Instituto Mexicano del Petróleo (*IMP*)
 Tema: Tratamientos Térmicos del Acero Nov. 2004
- Ponencia para el 2^{do.} congreso de la *AIST*
 Documento de Microagrietamiento en cinta de acero laminado en frío de alta resistencia baja aleación grado 050. Nov. 2005
- Ponencia para el Colegio Civil de Ingenieros de la ciudad de Toluca, Edo. de México.
 Documento de Aceros estructurales, aplicación, usos y desarrollo. Para el diseño estructural. Nov. 2006

EXPERIENCIA LABORAL

Fecha	Compañía y Descripción del puesto
-------	-----------------------------------

Mayo/1996-	GRUPO VILLACERO DIVISIÓN ACERO
------------	--------------------------------

INGENIERÍA DE SERVICIO (CINTACERO – ZINCACERO)

División lámina galvanizada (Zincacero) y cinta de acero laminada en frío de tolerancia estricta (Cintacero).

- Atención y resolución a las inconformidades presentadas por el cliente, desarrollando el dictamen técnico correspondiente, y apoyando técnicamente a las áreas involucradas en la solución de reclamaciones.
- Soporte técnico en el desarrollo de clientes, factibilidad de productos y normas internacionales, promoviendo principalmente, productos hacia diferentes sectores como el sector de construcción, sector automotriz, línea blanca y asesoría técnica a las diferentes áreas tanto comercial como de producción.

INGENIERÍA DE DESARROLLO DE NUEVOS PRODUCTOS (CINTACERO)

División Cintacero,

Desarrollo de productos de cintas de acero basándose en los requerimientos del cliente, bajo normas internacionales *ASTM, DIN, JIS, SAE, EN, BS, TL, NES*.

Desarrollo, factibilidad de productos o tipos de acero para las diferentes áreas de producción llevando a cabo la coordinación del proceso de laminación en frío, recocido y temple. Aplicando acero

del tipo *HSLA*, tipo *050XLF* y *060XLF*, *IF*, al Boro, desarrollo del fleje de alta resistencia, desarrollo de grados de acero de bajo carbono de alta embutibilidad

- Coordinación y desarrollo del proceso de aprobación de partes para producción (*PPAP*) para el sector automotriz , desarrollando el control estadístico del proceso (*SPC*) para las áreas de producción, en conjunto con el análisis del modo y efecto de la falla potencial (*AMEF*), procedimientos de empaque y el proceso del APQP para planta Cintacero.

Fecha	Compañía y Descripción del puesto
-------	-----------------------------------

Sep./88 - May/96	DIRONA, S.A. (SISAMEX)
------------------	------------------------

INGENIERO DE PROCESOS

Área tratamientos térmicos de engranes (productos: componentes del eje diferencial para trailer y camiones).

- Coordinación del proceso de tratamientos térmicos para la fabricación de piezas de uso del eje del tractocamión comprendiendo procesos de carburizado en hornos de atmósfera controlada del tipo *RX*, base CH_4-CO_2 , procesos de temple por medio de por prensas de tipo hidráulicas, procesos de temple por inducción, procesos de revenido, recocido cíclico, recocido por inducción y normalizado, control del proceso de protección o recubrimiento del tipo fosfatizado.
- Desarrollo del análisis metalográfico y químico de diferentes piezas de componentes del diferencial para su aprobación a producción de las diferentes piezas que componen el eje

diferencial como son: coronas, piñones, flechas de entrada, flechas de salida, muñón, crucetas, flecha de semieje, etc.