

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES



**SIMULACION DE LA TEMPERATURA EN
ESTADO ESTABLE-DINAMICO
PARA UN RODILLO DE TRABAJO
DE UN MOLINO CONTINUO DE LAMINACION
EN CALIENTE**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR DE INGENIERIA DE MATERIALES**

P R E S E N T A:

M. EN C. ANTONINO PEREZ HERNANDEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DE 1994

TD

Z5853

.M2

FIME

1994

P4

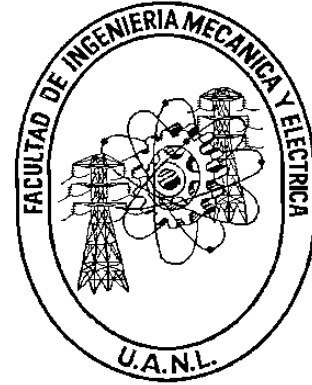
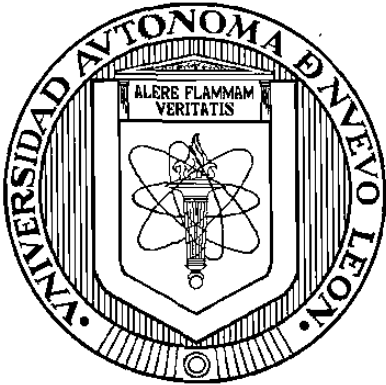


1020112253

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES



SIMULACION DE LA TEMPERATURA EN ESTADO ESTABLE-DINAMICO

PARA UN RODILLO DE TRABAJO

DE UN MOLINO CONTINUO DE LAMINACION EN CALIENTE

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES


PRESENTA

M. en C. ANTONINO PEREZ HERNANDEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L. JUNIO DE 1994

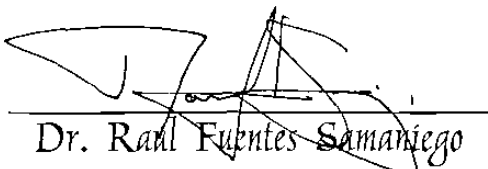
**SIMULACION DE LA TEMPERATURA EN ESTADO ESTABLE-DINAMICO
PARA UN RODILLO DE TRABAJO
DE UN MOLINO CONTINUO DE LAMINACION EN CALIENTE**

Los miembros del Comité aprueban la Tesis Doctoral de Antonino Pérez Hernández



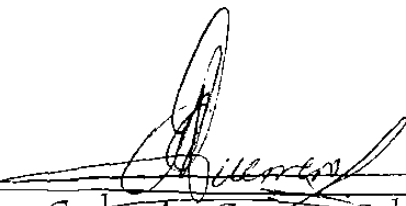
Dr. Rafael Colás Ortiz

ASESOR




Dr. Raúl Fuentes Samaniego

ASESOR



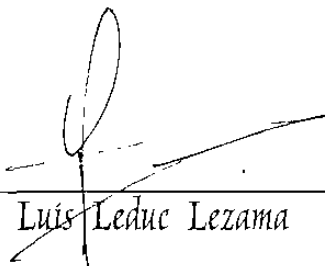
Dr. Carlos A. Guerrero Salazar

REVISOR



Dr. Juan Antonio Aguilar Garib

REVISOR



Dr. Luis Leduc Lezama

REVISOR



FONDO TESIS

A MIS PADRES

Antonino y Leonila

Y HERMANOS

Simón y Judith

INDICE

	INDICE.	<i>i</i>
	RESUMEN.	<i>iii</i>
1	INTRODUCCION.	
1.1	INTRODUCCION.	1
1.2	PROCESO INDUSTRIAL.	2
1.3	EL MOLINO CONTINUO.	4
1.4	OBJETIVO DEL TRABAJO.	5
1.5	CONTRIBUCION.	6
2	TRANSFERENCIA DE CALOR EN RODILLOS DE LAMINACION.	
2.1	INTRODUCCION.	7
2.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	8
2.3	SUPOSICIONES ACEPTADAS PARA SIMULAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN RODILLOS DE TRABAJO.	11
2.4	MODELACION PREVIA.	14
2.5	COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.	21
	2.5.1 CONVECCION LIBRE Y FORZADA.	22
	2.5.2 CONTACTO LAMINA-RODILLO.	24
	2.5.3 CONTACTO RODILLO DE TRABAJO - RODILLO DE APOYO.	25
2.6	CALENTAMIENTO DEL RODILLO DE TRABAJO.	27
2.7	ENFRIAMIENTO DEL RODILLO DE TRABAJO.	28
2.8	SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.	30
	2.8.1 ELECCION DEL TIPO DE BOQUILLA.	30
	2.8.2 CONDICIONES DE OPERACION.	33
	2.8.3 CABEZALES DE REFRIGERACION.	36
3	MODELO MATEMATICO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.	
3.1	INTRODUCCION.	40
3.2	EL MODELO.	41
3.3	DESCRIPCION DEL MODELO.	42
	3.3.1 SALTOS.	44
	3.3.2 EVOLUCION PERIODICA DE LA TEMPERATURA.	46
	3.3.3 CAMPAÑA DE LAMINACION.	47
3.4	SUPERPOSICION DE SOLUCIONES.	48
4	RESULTADOS DE LA SIMULACION.	
4.1	INTRODUCCION.	49
4.2	CONDICIONES DE OPERACION.	49
4.3	RECOLECCION DE DATOS EXPERIMENTALES.	53

4.3.1	CAPTURA AUTOMATICA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.	54
4.3.2	CAPTURA MANUAL DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.	65
4.4	SIMULACION.	72
4.5	SIMULACION DE UNO Y VARIOS GIROS.	73
4.6	SIMULACION DE UNA Y VARIAS CINTAS.	77
4.7	SIMULACION DE LA CAMPAÑA DE LAMINACION.	80
4.8	EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE GIRO DEL RODILLO.	83
4.9	EFFECTO DE LA DISPOSICION DEL CABEZAL DE ENFRIAMIENTO.	86
4.10	EFFECTO DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA.	89
4.11	RESULTADOS DE LA SIMULACION PARA OTRAS CAMPAÑAS.	91
5	DISCUSION DE RESULTADOS.	
5.1	RECOLECCION DE DATOS EXPERIMENTALES.	101
5.2	SIMULACION.	102
5.3	PERFIL DE TEMPERATURA.	103
5.3.1	PERFIL DE TEMPERATURA GIRO A GIRO.	104
5.3.2	PERFIL DE TEMPERATURA PLANCHON-DESCANSO.	106
5.3.3	PERFIL DE TEMPERATURA DURANTE LA CAMPAÑA DE LAMINACION.	108
5.3.4	ATENUACION ARMONICA DE LA TEMPERATURA.	111
5.4	PARAMETROS QUE AFECTAN EL PERFIL DE TEMPERATURA.	113
5.4.1	EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE GIRO DEL RODILLO.	114
5.4.2	EFFECTO DE LA DISPOSICION DE LOS CABEZALES DE ENFRIAMIENTO.	115
5.4.3	EFFECTO DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA.	116
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.	
6.1	CONCLUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.	120
6.2	CONCLUSIONES RELACIONADAS AL MODELO MATEMATICO.	122
6.3	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.	123
	REFERENCIAS.	124
	APENDICES.	
A1	MODELO MATEMATICO.	126
A2	LISTADO DE PROGRAMAS.	
A2.1	INTRODUCCION.	139
A2.2	A1_JPH.C	140
A2.3	A2_JPH.F	142
A2.4	A3_JPH.PAS	146
A3	DATOS DE OPERACION EN EL CASTILLO F1.	149
A4	HOJAS DE REGISTRO.	154
	AGRADECIMIENTOS.	158
	DISCO MAGNETICO: PROGRAMA Y DATOS DE OPERACION	contra pasta

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un modelo matemático que describe el fenómeno de transferencia de calor a que están sujetos los rodillos de trabajo de un molino continuo de laminación en caliente, este modelo simula el perfil de temperatura en el estado estable-dinámico que se presenta en la línea de producción. El estado estable-dinámico de temperatura en el rodillo de trabajo alcanzado en la línea de producción es una condición técnica relacionada directamente con la baja variación del comportamiento térmico y sus efectos en el rodillo y no un estado ideal de invarianza, éste se logra alcanzar en el molino continuo después de haber laminado un cierto número de piezas y constituye la principal diferencia del presente modelo con respecto a otros trabajos desarrollados con anterioridad. Aún más, la consideración de un perfil de temperatura variable en la pieza a deformar y el hecho de que este perfil sea diferente de una a otra pieza no se habían contemplado anteriormente.

Otra contribución, es la estructura del modelo matemático que permite la simulación y observación del perfil de temperatura en el rodillo en tres niveles; el primero constituye la respuesta del rodillo giro a giro y en forma detallada considerando los cambios bruscos de temperatura que acontecen en la proximidad de la superficie, el segundo contempla la respuesta del rodillo al estímulo promedio producido por el paso de una pieza completa y el período de espera de la siguiente pieza a deformar, en tanto que el último nivel de observación, y tal vez el más útil, simula la evolución de la temperatura del rodillo durante toda la campaña. El modelo además de observar para cada uno de estos niveles un dominio estratificado, permite determinar las condiciones bajo las cuales éstos alcanzan su estado estable-dinámico.

El modelo matemático presenta una metodología de solución totalmente diferente a otros trabajos que se restringen a un complejo aparato matemático limitado a condiciones constantes. El presente modelo se basa en la periodicidad del fenómeno de transferencia de calor hacia el rodillo y a la proporcionalidad del flujo de calor con respecto a la diferencia de temperatura de los medios involucrados y al gradiente de temperatura. La mecánica en que se basa el modelo matemático es realmente fácil de comprender, característica prácticamente inexistente en cualquier otro modelo con mucho menos cualidades que el

presente, presentando una real innovación en la solución del problema.

La medición y captura de información experimental utilizada para validar el modelo se realizó en una planta industrial. Se simuló explícitamente y en forma detallada una campaña típica de producción durante la cual se estudió un rodillo de trabajo localizado en el primer castillo (**F1**) del molino continuo y se verificó su comportamiento con los datos capturados en planta para dicha campaña de laminación, esto se realizó con varias campañas. Es importante señalar que la elección del primer castillo se tomó en base a que la información de la planta puede ser capturada por los sistemas automáticos instrumentados en la línea. La aplicabilidad del modelo puede ser extendida fácilmente a los rodillos de trabajo de los otros castillos.

El simulador justifica su validez como una herramienta de predicción al simular del perfil de temperaturas bajo las condiciones de operación observadas en la planta industrial local, así como a la reproducción de resultados y comportamientos sujetos a las condiciones de operación reportados por otros investigadores y experiencias operativas en la línea. Asimismo, el modelo matemático es sensible a los parámetros de operación, variación de la temperatura a lo largo de la pieza a deformar, propiedades térmicas del rodillo, rapidez de cálculo, la no discretización del rodillo, cálculo del estado estable no idealizado, etc. superando otros estudios realizados. Por lo que, este trabajo de investigación es en esencia una contribución al estado del arte de la simulación y modelación de procesos.

Antonino Pérez Hernández

U.A.N.L. Junio de 1994

1 INTRODUCCION.

1.1 INTRODUCCION.

En cualquier línea de producción de una industria, existe la necesidad de tener información clara y concisa del proceso productivo, para su control y así satisfacer los requerimientos que del producto se exige.

El desarrollo de los sistemas de cómputo y el acceso a un mayor número de investigadores a esta herramienta, ha permitido entre otras cosas el desarrollo de simuladores de procesos industriales con la finalidad de reproducir el proceso o alguna de la partes que lo componen bajo las condiciones de operación, logrando obtener una herramienta de predicción. Con esta herramienta es posible aislar el efecto de los parámetros de operación, separando las variables que actúan en forma directa de las casuales, lo que a su vez, da margen a la optimización del proceso y posibilidad de simular nuevas condiciones de operación, con el fin de obtener mejores o nuevas características en el producto (mecánicas, térmicas, eléctricas, etc.) solicitadas por el mercado.

Es decir, el simulador ofrece una función n 'paramétrica tal que, bajo una combinación de los n parámetros de operación establecidos, su resultado son las características del producto en función de dichos parámetros. La simulación también ofrece la posibilidad de obtener el mismo resultado -producto- bajo otra combinación de parámetros, lo que lleva a la optimización del proceso, misma que se sujeta a los límites operativos de la línea productiva.

Lo anterior trae consigo como beneficio adicional el conocer los límites de la planta productiva, lo que permite predecir la factibilidad de generación de nuevos productos con la maquinaria con que se cuenta, lo que, junto con un análisis del mercado a futuro, permitirá establecer el tipo de inversión más conveniente en la modernización de la planta en los sectores que realmente sean más necesarios, anticipándose a las necesidades de nuevos productos o a nuevas normas de calidad.

1.2 PROCESO INDUSTRIAL.

El proceso de fabricación de lámina de acero implica el conformado a altas y bajas temperaturas por medio de útiles de revolución, denominados rodillos, que se encuentran en contacto con la pieza siendo deformada. La mayor parte de la deformación se realiza en caliente, con el fin de aprovechar la menor resistencia mecánica y mayor ductilidad del material que se está trabajado.

Un tren de laminación en caliente está constituido por estaciones intermedias, que se denominan castillos, en las que los rodillos se encuentran alojados. Según estén en contacto o no con el acero [1], los rodillos pueden ser de trabajo o de apoyo, los primeros tienen la función de deformar a la pieza, en tanto que los segundos buscan evitar la flexión de los primeros.

La temperatura de los rodillos de trabajo tiende a incrementarse a medida que se lamina, por lo que se requiere de un sistema de enfriamiento que evite el calentamiento excesivo de los mismos. Tanto la cantidad de líquido refrigerante, como la aplicación del mismo, es crítica para el control del desgaste y dilatación de los rodillos.

El proceso de la obtención de cinta de acero en caliente se presenta en la Fig. 1.1, donde se observa un bosquejo general del mismo, a continuación se describe en el mismo en forma breve.

Primero, se parte de la obtención del mineral de hierro y su peletización para luego ser transportado a la planta de reducción directa (Proceso HyL).

El proceso de reducción directa HyL, reduce el mineral de hierro por medio de un gas reductor obteniéndose el llamado fierro esponja.

El fierro esponja se funde con chatarra en un horno eléctrico y es vaciado en lingoteras, dejando que el acero solidifique, obteniendo así los lingotes, materia prima del proceso en cuestión.

El lingote se transporta a la fosa de recalentamiento, en la cual permanecerá hasta alcanzar la temperatura adecuada (misma que es función del tipo de acero a laminar), momento en el que es llevado al molino de laminación en caliente.

La laminación en caliente inicia con los pasos de desbaste, en los que se emplean dos castillos reversibles que tienen la función de reducir el espesor del lingote de aproximadamente 0.46 m (18"), transformándolo a un planchón de 0.0279 m (1.1") de espesor, simultáneamente se controlan el ancho y se retira el óxido formado en la superficie del planchón.

Acto seguido, se realiza un corte de punta y cola al planchón a la salida de desbaste y se vuelve

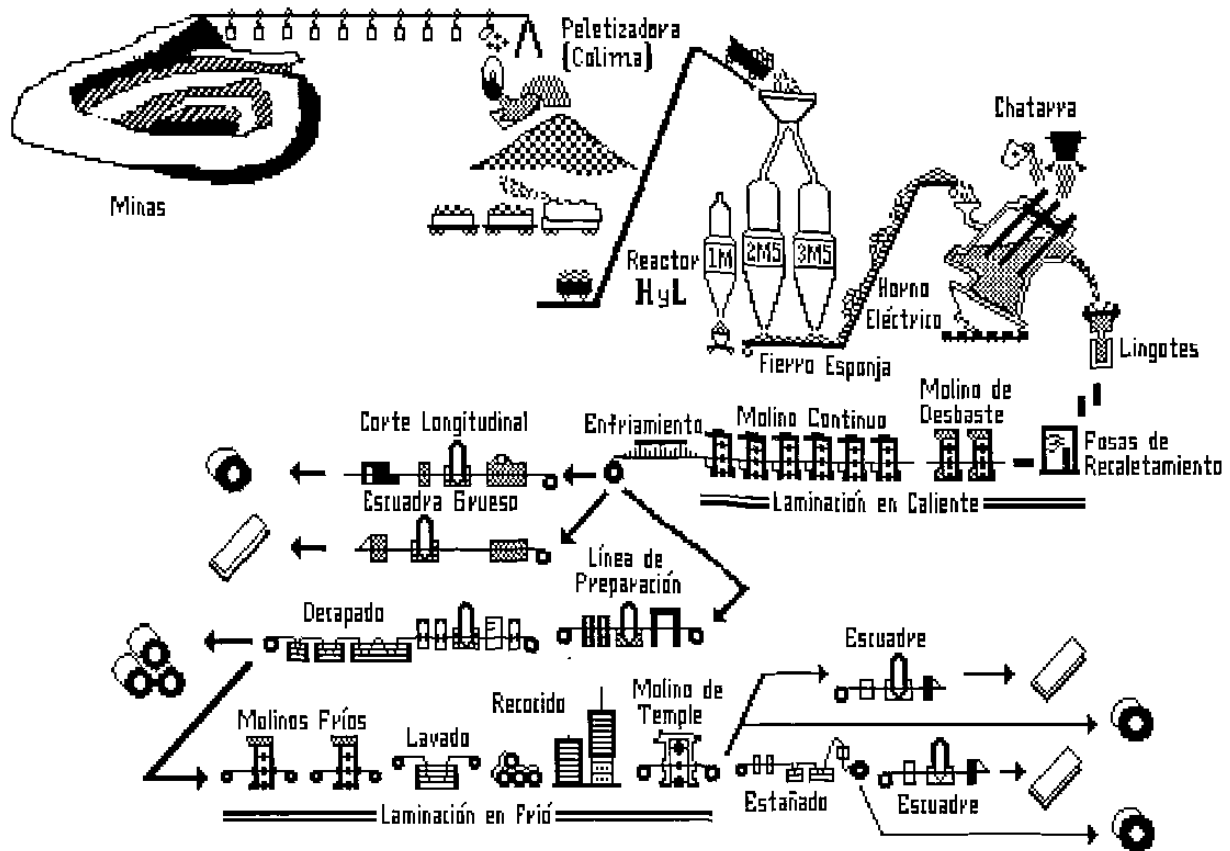


Fig. 1.1: Proceso de obtención de cinta de acero partiendo de la extracción del mineral al producto terminado.

a limpiar el óxido formado en la superficie del planchón (descascarillado), con chorros de agua antes de ingresar al molino continuo.

El molino continuo está formado por seis castillos unidireccionales del tipo cuatro, Fig. 1.2, a estos se les conoce también por molinos acabadores, porque en éstos se realiza el fin del proceso de laminación en caliente para obtener la cinta de acero.

Finalmente, la cinta de acero se transporta por la mesa de enfriamiento, para ser embobinada y transportada a un patio, en donde esperará su corte a placa o su preparación para su posterior laminación en frío.

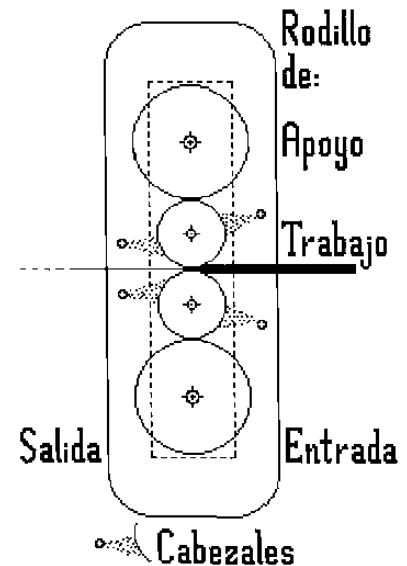


Fig. 1.2: Castillo de laminación.

1.3 EL MOLINO CONTINUO.

La línea de laminación en caliente en general, consta de hornos de recalentamiento, sistemas de descascarillado, castillos de desbaste, cortadoras de puntas, el molino continuo, mesa de enfriamiento y embobinado de la placa de acero.

El molino continuo de laminación en caliente, Fig. 1.3, produce un promedio de tres mil doscientas toneladas al día de lámina gris a partir de lingote de acero, las características geométricas del producto son las siguientes: espesores que varían de 2 a 12.7 mm. (75 a 500 milésimas de pulgada) y anchos de 0.58 a 1.10 m (23 a 43.5 pulgadas), el control del molino se realiza por medio del porcentaje de reducción, velocidad de laminación y las guías a la entrada de cada castillo, el espesor es medido en forma automática por un sistema de rayos x ubicado a la salida del molino seis (F6).

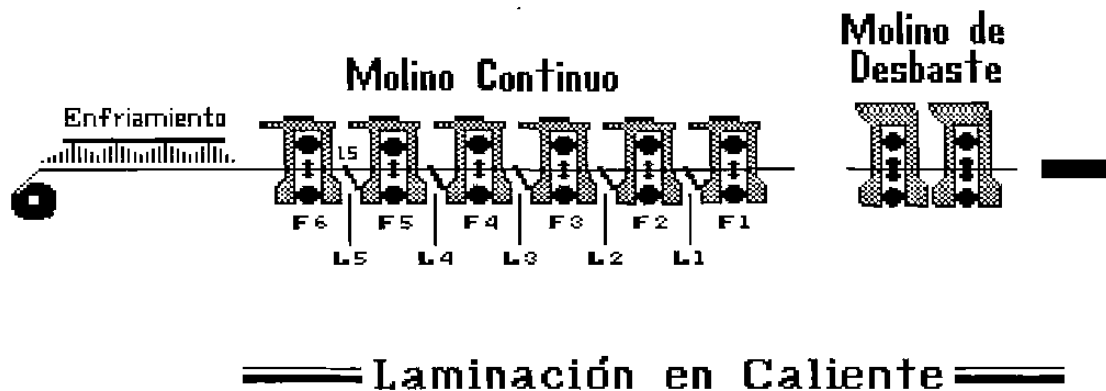


Fig. 1.3: Diagrama del molino continuo para laminación en caliente.

El factor crítico en el proceso es la temperatura de la cinta, la medición de ésta se realiza por pirometría óptica en tres puntos estratégicos: a la entrada y salida del molino y a la salida de la mesa de enfriamiento. La lectura a la entrada del molino es útil para evitar problemas por el exceso de dureza del material a deformar, mientras que a la salida del molino la lectura de la temperatura permite controlar su recristalización estableciendo la condición de enfriamiento de la mesa de que afectan las propiedades mecánicas del producto.

Durante el proceso de laminación se genera una capa de óxido en la superficie de la lámina que

es necesario retirarla; esta función es desempeñada por el sistema de descascarillado el cual posee un gasto de $136 \text{ m}^3\text{hs}^{-1}$ con una presión de 13.8 MPa (600 galones por minuto de agua y 2000 psi). La condición de operación a alta temperatura durante el proceso justifica el uso del sistema de enfriamiento para los rodillos de trabajo, mismo que posee un gasto de $1136 \text{ m}^3\text{hs}^{-1}$ a una presión de 1.03 MPa (5000 GPM de agua y 150 psi). Finalmente, existe un último sistema de enfriamiento y que forma parte de la mesa de salida, éste tiene la función de disminuir la temperatura de la lámina para su enrollado y tiene un gasto de $908 \text{ m}^3\text{hs}^{-1}$ y una presión de 0.68 MPa (4000 GPM de agua y 100 psi).

Los rodillos de trabajo y apoyo poseen diámetros de 0.48 y 0.94 m (18.75 y 37 pulgadas) respectivamente y ambos tiene una longitud de 1.22 m (48 pulgadas). El molino es movido por seis motores de corriente continua del castillo F1 al F3 son de 2983 KW (4000 HP), y para los castillos F4, F5 y F6 son de 1715 KW (2300 HP), cada uno de ellos con capacidad de 250 a 500 RPM.

1.4 OBJETIVO DEL TRABAJO.

En general se inicio una carrera en la investigación y comprensión de los factores y fenomenos involucrados alrededor del proceso industrial de laminación a altas temperaturas, iniciándose la publicación de trabajos a partir de 1970 con Holander [2], a la fecha se siguen desarrollando esfuerzos para la creación de nuevos modelos en la búsqueda de una mejor representación de la realidad. En particular, el propósito del presente trabajo es realizar una contribución en la simulación de los cambios térmicos que ocurren en el rodillo de trabajo durante la campaña; en su estado estacionario en la línea de producción, sujeto a las condiciones de operación. El presente estudio (estado estacionario) difiere evidentemente al realizado anteriormente (estado transitorio) [3] ambos atacan el problema de transferencia de calor en rodillos de trabajo, este segundo estudio presenta una mecánica de ataque al problema que lo hace claro y de fácil comprensión y lo distingue de otros trabajos [4, 5, 6] además presenta una inovación que le da la flexibilidad de presentar la solución del estado estacionario pero no en su forma estricta y rígida en la que se ha atacado el problema hasta ahora.

1.5 CONTRIBUCION.

Se han desarrollado una gran variedad de modelos matemáticos, en los cuales se basan los simuladores, que buscan describir los cambios de temperatura en el rodillo de trabajo (para el estado transitorio o estacionario), se debe puntualizar que en el fenómeno de transferencia de calor en los rodillos de trabajo, el estado estacionario no es alcanzado, las observaciones en la línea de producción verifican esta afirmación, esto claro, si se toma en forma estricta el concepto de estado estacionario en la transferencia de calor [7-10], como ocurre en algunos trabajos publicados [4, 5, 6]. Para fines prácticos y uso en la línea de producción el estado estacionario se alcanza cuando los cambios en los factores de operación no son significativas, así que, el estado estacionario en la línea de producción es un estado estable dinámico.

La contribución del modelo matemático aquí presentado es:

- (i) Presenta la solución descrita en series de Fourier y normaliza los resultados de la temperatura que permiten una gran flexibilidad. Con lo que se genera una base de datos manejable capaz de reproducir la campaña.
- (ii) Establece un modelo espacio-temporal $(r, \theta, z; t)$ capaz de calcular a detalle el complejo perfil de temperatura al que se somete el rodillo de trabajo.
- (iii) Considera el hecho de que la temperatura a lo largo de la pieza no es constante, y además que el perfil de temperatura entre una y otra pieza es diferente, como lo demuestran las lecturas en la planta.
- (iv) Permite la obtención de un simulador sensible a cambios en parámetros de operación (disposición de cabezales de enfriamiento, velocidad y porcentajes de deformación, variación de temperatura en cada pieza a deformar, etc.) y propiedades físicas del rodillo.
- (v) La forma en que se plantea y resuelve el problema matemático que presenta la modelación, es novedosa y su mecánica es sencilla de comprender y a diferencia de los trabajos anteriores no requiere de una herramienta y técnica matemática compleja.

Por todo lo anterior, este trabajo de investigación es en esencia una contribución al estado del arte en la simulación y modelación de procesos.

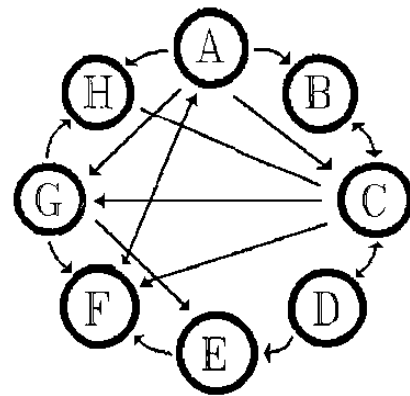
2 TRANSFERENCIA DE CALOR EN RODILLOS DE LAMINACION.

2.1 INTRODUCCION.

La mayoría de los productos metálicos tienen su origen en el vaciado del metal líquido en un molde de tamaño y forma conveniente, mas es necesario aún el realizar en éstos un trabajo posterior que afecte su apariencia o forma (forjado, laminado, extruido, maquinado, etc.), para que el producto sea de utilidad [11, 12]. La mayor parte del trabajo de deformación se realiza a altas temperaturas con la finalidad de aprovechar la baja resistencia mecánica del acero y mejorar las propiedades mecánicas del metal con un ahorro energético y económico.

En el proceso de laminación en caliente o en frío los rodillos son parte importante, pues éstos realizan la deformación del lingote o planchón de acero transformándolo a una lámina útil a posteriores procesos (estañado, embutido, etc.) o como materia prima de otros productos (refrigeradores, estufas, etc.).

La solución del problema de transferencia de calor en el rodillo de laminación en su estado estacionario busca determinar el perfil de temperaturas en los rodillos de trabajo o laminadores de un molino continuo, el problema que es de origen térmico, se vincula con otros factores involucrados con el proceso productivo y funcionalidad de la lámina de acero [13], Fig. 2.1. A partir del campo de temperaturas en el rodillo es posible conocer su dilatación y, con ello, es factible determinar la corona mecánica apropiada a un programa de laminación (tipos de acero, anchos, tiempos de interpasos, temperaturas, reducciones, etc.), con la posibilidad de controlar la planeza y perfil dimensional de la cinta de acero.



- | | |
|---------------------|--------------------|
| A) CEDULA | B) MICROESTRUCTURA |
| C) TERMICO | D) OXIDACION |
| E) DESGASTE | F) FORMA |
| G) ELECTROMECHANICO | |
| H) PRODUCTIVIDAD | |

Fig. 2.1: Relación de la temperatura con otros factores involucrados en el proceso de laminación en caliente

2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Durante la campaña de un rodillo de trabajo de laminación en caliente, éste se somete a ciclos complejos de temperatura, este perfil de temperaturas es consecuencia de la combinación del contacto con la pieza a alta temperatura y el efecto del sistema de enfriamiento [14, 15, 16].

El calentamiento se atribuye al contacto del rodillo-lámina, mientras que la pérdida de energía térmica se asocia principalmente al sistema de enfriamiento, por lo que, el fenómeno de transferencia de calor en el rodillo de trabajo es resultado del calentamiento y enfriamiento del mismo. Existen más mecanismos por los cuales el rodillo gana y cede energía térmica, Figs. 2.2 y 2.3, más se llegan a despreciar [17] debido a que su contribución en el fenómeno térmico es pequeña.

El problema que se desea resolver es el conocimiento del perfil de temperaturas en el rodillo de trabajo durante su operación en la línea de producción, bajo las condiciones que su medio ambiente establece (condiciones de operación, temperaturas del planchón, agua y atmosférica, etc.).

La modelación matemática de procesos o simulador es esencialmente un instrumento de predicción, es decir, son relaciones matemáticas implementadas en un programa de computadora que buscan predecir el efecto en las variables de salida en función de las variables de entrada a las que se sujeta el proceso.

Según la definición de Peck [18], el término: "modelo matemático", se aplica indistintamente a cualquier relación o formulación que puede ser usada para la predicción de alguna variable de salida. A este respecto el resultado arrojado por el simulador está sujeto a las variables de entrada o condiciones de operación, Fig. 2.4, es decir, la utilidad de un modelo de predicción del fenómeno o proceso reside en la posibilidad de ser reducido a una relación matemática que pueda ser utilizada en un computador, independientemente de que la relación matemática se obtenga de la solución del problema por el uso de métodos analíticos o numéricos de las ecuaciones involucradas o de la correlación fenomenológica de los eventos observados.

En cada caso, la modelación se sujeta a las propiedades físicas y limitaciones del proceso, con el objetivo de realizar el control del mismo.

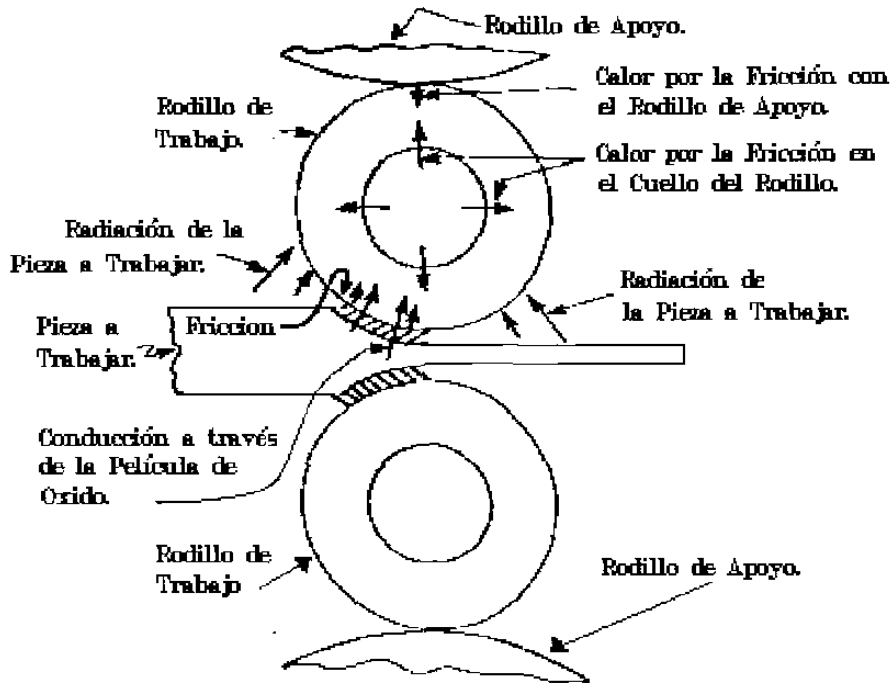


Fig. 2.2: Diversas formas y fuentes que incrementan la temperatura del rodillo de trabajo.

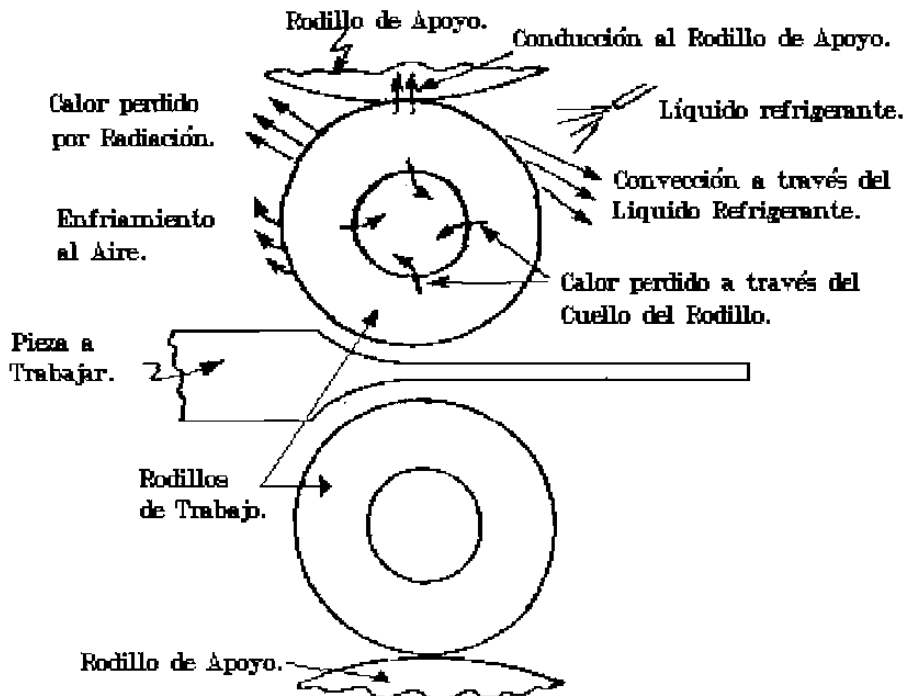


Fig. 2.3: Diferentes formas de extracción de calor del rodillo de trabajo.

	VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE SALIDA
RELACION	<ul style="list-style-type: none"> * VARIABLES) INDEPENDIENTE(S): x, y, z,... 	<ul style="list-style-type: none"> * VARIABLES) DEPENDIENTE(S): t, u, v,...
MATEMATICA	<ul style="list-style-type: none"> * DOMINIO DE LA RELACION: dominio de los números reales. 	<ul style="list-style-type: none"> * RANGO DE LA RELACION: dominio de los números reales.
SIMULADOR	<ul style="list-style-type: none"> * CONDICIONES DE OPERACION: velocidad, grado de deformación, temperatura. * PROPIEDADES DE: la lámina, el óxido y los rodillos de trabajo y apoyo. 	<ul style="list-style-type: none"> * LAMINA: propiedades y forma. * RODILLO: deterioro y forma. * EQUIPO: deterioro, consumo de energía y forma.

Fig. 2.4. Similitud entre un simulador y una relación matemática.

2.3 SUPOSICIONES ACEPTADAS PARA SIMULAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN RODILLOS DE TRABAJO.

La modelación matemática y simulación del perfil de temperatura en los rodillos laminadores, en la literatura especializada, se realiza partiendo de una serie de hipótesis con el objetivo de simplificar el estudio del problema y lograr la reproducción del fenómeno en forma funcional y útil a la línea de producción por su simulación en computadora. Por lo cual, a continuación, se enunciarán las hipótesis de las que parten los modelos desarrollados en otros estudios y se comentará al respecto de su uso, así como las referencias a los trabajos más importantes que las emplearon.

i.) Rodillo de longitud infinita [1, 3-5, 14, 15, 19-28]. Con esta suposición se elimina la dependencia de la coordenada axial (z) en el problema, siendo válida sin mayores problemas cuando se desea calcular la temperatura en el centro axial del rodillo y no en los extremos o próximo a ellos. Es importante mencionar que la forma literal de la consideración carece de realidad, pero se acepta como válida en general si la relación de la longitud axial/radial del rodillo es grande (>3), por supuesto, esta condición debe de ser cumplida también por la pieza a laminar.

ii.) Se desprecia la conducción de calor en la dirección angular (Θ) [3, 14, 15, 20, 21, 29, 28]. Esta suposición es válida si la velocidad tangencial del rodillo es mayor que la velocidad de retraso con la que se transmite la perturbación térmica, Kern [30] presenta una relación para el cálculo de esta velocidad de retraso, este fenómeno es también presentado por Schack [10] y Haubitzer [6].

iii.) La transferencia de calor se realiza principalmente en la dirección radial (r). La función que describe la temperatura en el rodillo depende sólo de su coordenada radial y temporal, $T(r;t)$ [1, 3-5, 14, 15, 19-28]. La coordenada temporal se asocia a la posición angular del rodillo. Aún así es común la simplificación por el cálculo de la temperatura sólo en la superficie del rodillo. La suposición esta asociada al estado transitorio del problema.

iv.) La transferencia de calor causada por el contacto del rodillo de trabajo con el de apoyo se desprecia en el molino tipo cuatro; la causa de esta consideración es debida a que la energía cedida por el rodillo de trabajo es muy pequeña [4, 5, 15, 20, 21, 23, 25, 26, 29, 31-33]. En el mejor de los casos se supone un coeficiente de transferencia de calor de valor arbitrario o en base a mediciones en molinos que han sido instrumentados [34, 35], considerando una resistencia de contacto, o se propone que el contacto entre los dos cuerpos, es perfecto [22], es decir no existe resistencia térmica.

v.) Se considera el estado transitorio del proceso de transferencia de calor. El problema se resuelve para el estado temporal del proceso [3, 14, 15, 23, 26, 29, 36] y se extrapola al comportamiento del rodillo a tiempos largos mediante el uso de modelos estadísticos u otros artificios [20, 22, 25, 36]; Mukerjee [21] maneja el concepto de una temperatura promedio del rodillo y utiliza la relación que describe la capacidad específica de energía de un material y su incremento de temperatura para establecer la temperatura promedio en la superficie del rodillo. Bryan y Chiu [15] dan solución al problema de una fuente de temperatura senoidal que varía en la superficie del rodillo y calculan su efecto a tiempos largos, en la superficie y al interior del rodillo por un factor dependiente de la penetración en el rodillo.

vi.) Consideración del estado estable del proceso de transferencia de calor. El problema se resuelve en el estado estacionario o independiente de la coordenada temporal [4, 5]. A. Pérez [37] consideran un caso similar de una fuente senoidal que varía en la superficie en función del coeficiente de transferencia de calor a los que se somete, pero se resuelve para conocer la función que describe el flujo de calor, cuyo comportamiento es más suave y estable que el de la temperatura, una vez conocida la función de flujo es posible establecer la de temperatura en la superficie e interior del rodillo. Es importante señalar que el trabajo de Bryan y Chiu [15] no considera el efecto de laminar piezas de longitud finita, mientras que el realizado por A. Pérez [37] si lo considera.

vii.) La lámina es de longitud infinita y de temperatura constante durante su paso en un castillo dado. Esta es la suposición más usada [3, 14, 20, 21, 23, 25, 27, 34] que se presenta en la modelación y simulación del proceso de laminación, es importante señalar que la consideración de temperatura constante es sólo válida a la entrada de cada uno de los castillos, pues, a la salida del castillo la lámina disminuye su temperatura sufriendo una caída escalonada de temperatura entre castillos que constituyen el molino, se debe de tener cuidado en su uso si se desea resolver el estado estable (estacionario-periódico) del proceso, existen también trabajos dedicados a resolver el caso contrario a esta suposición [19, 37].

viii.) El efecto de la temperatura en los bordes o extremos de contacto rodillo-lámina se maneja de forma idéntica que para el caso en el centro del rodillo. Es tal vez la consideración más criticable junto con la anterior, porque en los extremos el efecto de transferencia de calor no es simétrico como se presenta en el centro, Pallone [29] y Yuen [33] observaron este fenómeno y desarrollan un modelo considerando la coordenada axial dividida en dos regiones, una en la que existe el contacto del rodillo-lámina y otra libre de éste, en dicho trabajo se despreciaron las coordenadas angular y radial. Wusatowski [38] y Estrada [39,

40] consideran un efecto de forma parabólica en el perfil de temperaturas en la dirección axial, esta última consideración se asocia con las observaciones realizadas durante la medición de la temperatura en la superficie del rodillo al término de su campaña.

ix.) El enfriamiento es uniforme y constante por sectores angulares en la superficie del rodillo. Esta consideración tiene origen en la dificultad de medir o conocer los coeficientes de transferencia de calor en función de los parámetros de operación a los cuales están sujetos, por lo general se realizan aproximaciones de éstos coeficientes por los métodos tradicionales, como, el ajuste con las mediciones de temperatura experimentales y curvas de enfriamiento [3-5, 14, 15, 17, 19-23, 26, 27-29, 31, 32, 34, 35, 41, 42-47], algunos autores consideran la variación del flujo de calor como una función lineal de la temperatura superficial en el rodillo o variables de operación a las que se sujeta el sistema de enfriamiento [4, 37].

Steden y Tellman [48] presentan información del efecto que sobre el coeficiente de transferencia de calor ejercen los parámetros de operación -presión del líquido, ángulo de incidencia, distancia, etc.

x.) El rodillo laminador incrementa su temperatura principalmente por el contacto con la lámina en el proceso de laminación en caliente [1, 3-5, 14, 15, 17, 20-29, 31-34, 37, 41, 42, 44]. Esta consideración es aceptada sin discusión por todos los investigadores, aún cuando no es el único mecanismo, Fig. 2.2, si es el principal, por lo que, en general los restantes mecanismos se desprecian debido a que su contribución al calentamiento del rodillo de trabajo es pequeña [17, 19, 23, 42].

xi.) El rodillo laminador cede calor o disminuye su temperatura (la controla) principalmente por el sistema de enfriamiento [1, 3-5, 14, 15, 17, 19-29, 31-34, 37, 41, 42, 44]. Esta es la consideración más usada, y está de acuerdo con la finalidad del sistema de enfriamiento [3], aún cuando como en el caso anterior no es el único mecanismo por el cual el rodillo cede calor, Fig.2.3, si es el que posee la mayor intensidad, por lo que sólo ocasionalmente alguno de los restantes mecanismos se toma en consideración [3, 29, 44].

Ordinariamente más de una de estas suposiciones se toman en consideración al momento de realizar la modelación o simulación del proceso de transferencia de calor en rodillos laminadores o de trabajo.

2.4 MODELACION PREVIA.

La modelación o simulación de un proceso industrial se realiza comúnmente en forma modular, es decir, se divide el proceso global en varios simuladores por sectores específicos del proceso industrial, Fig. 2.5, para luego entrelazar los resultados arrojados por éstos. Esta modulación o fragmentación de un proceso industrial se realiza, porque si bien, el modelado de éste en su forma total no es imposible, si daría como resultado programas muy extensos, lo que limitaría el tipo de equipo computacional en el que podría ser instalado y, así mismo, su uso estaría restringido a un pequeño grupo de personas en la planta, lo que simultáneamente incrementaría las posibilidades de no permitir una mayor aplicación y evolución del simulador.

Al respecto de la simulación por módulos específicos, en el caso particular de la modelación de la transferencia de calor en los rodillos de trabajo en la laminación de acero a alta temperatura del molino continuo, existen muchos trabajos al respecto, como puede verse en la sección anterior referente a las consideraciones de las que se valen para su modelación matemática. Estos trabajos en los que se desarrollan diversos simuladores se pueden clasificar en cuanto a la técnica empleada para la solución del problema en dos tipos de modelos: matemáticos numéricos y matemáticos analíticos. Sólo se harán mención de algunos de éstos.

D.Parke y J.L.Baker [28] desarrollaron en 1972 un modelo bidimensional por diferencias finitas para estado transitorio del rodillo laminador, asociando a la coordenada angular con la coordenada temporal, en él concluyen que el sistema de refrigeración afecta fuertemente la vida útil del rodillo; a éste respecto, Stevens [27] ya había mencionado anteriormente como la vida útil del rodillo de trabajo se puede extender de entre un 26% a 100%, dependiendo de las condiciones de operación y del sistema de enfriamiento al que se somete el rodillo. Ellos proponen el cambio del sistema de enfriamiento clásico, el cual emplea una serie de espreas que aplican a presión el líquido (por lo regular agua) a la superficie del rodillo, por una caja de enfriamiento, Fig. 2.6, esta caja encierra un área definida de la superficie del rodillo, misma que se mantendrá sumergida en el líquido, la función de la caja es la de propiciar y mantener un flujo laminar en la interfase rodillo-líquido mejorando la eficiencia del sistema de enfriamiento.

S.Wilmotte y J.Mignon [44] examinan el problema del rodillo en su dirección axisimétrica, mediante un modelo numérico bidimensional transitorio, en el cual proponen condiciones de simetría

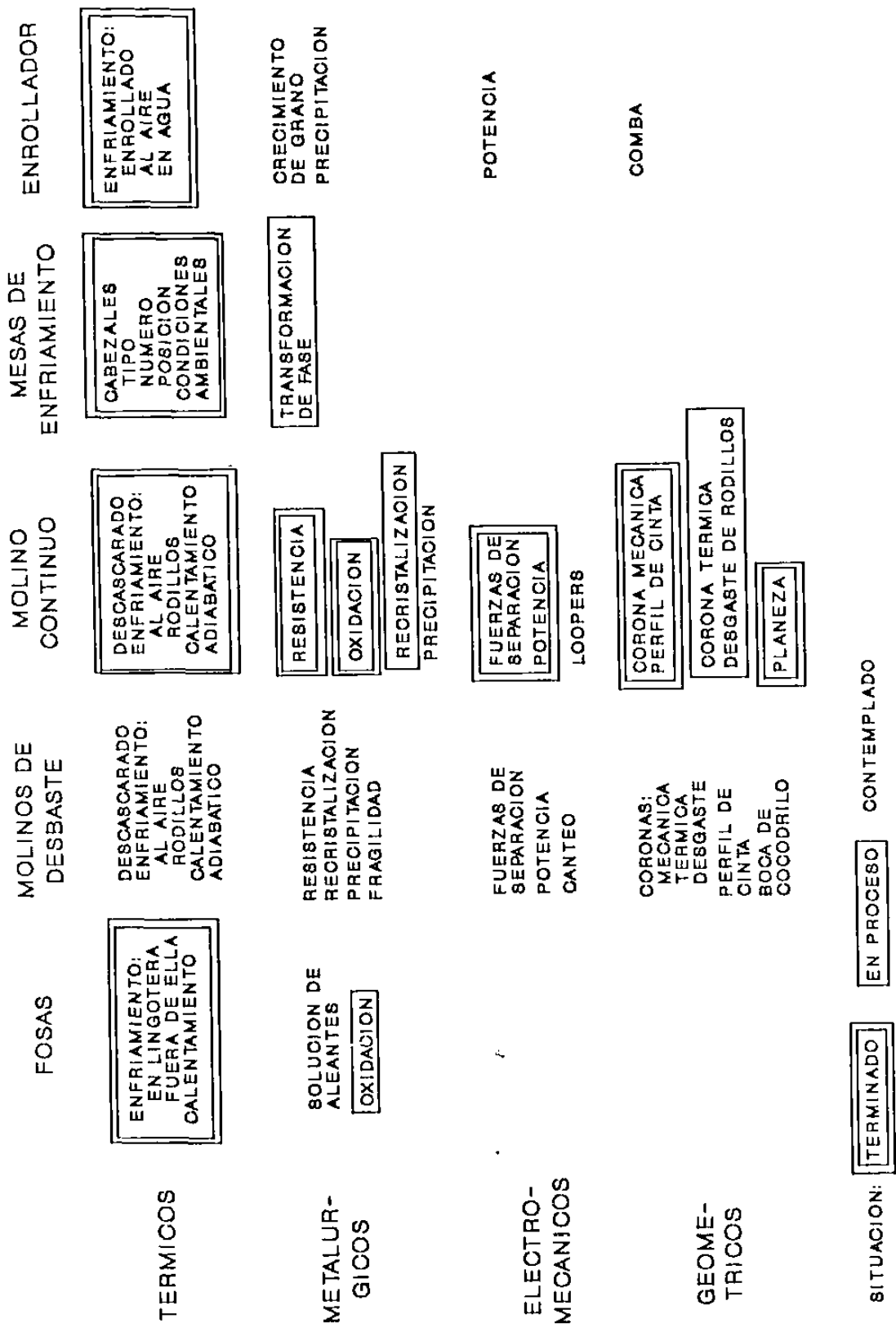


Fig. 2.5. Diseño conceptual de simuladores para laminación en caliente.

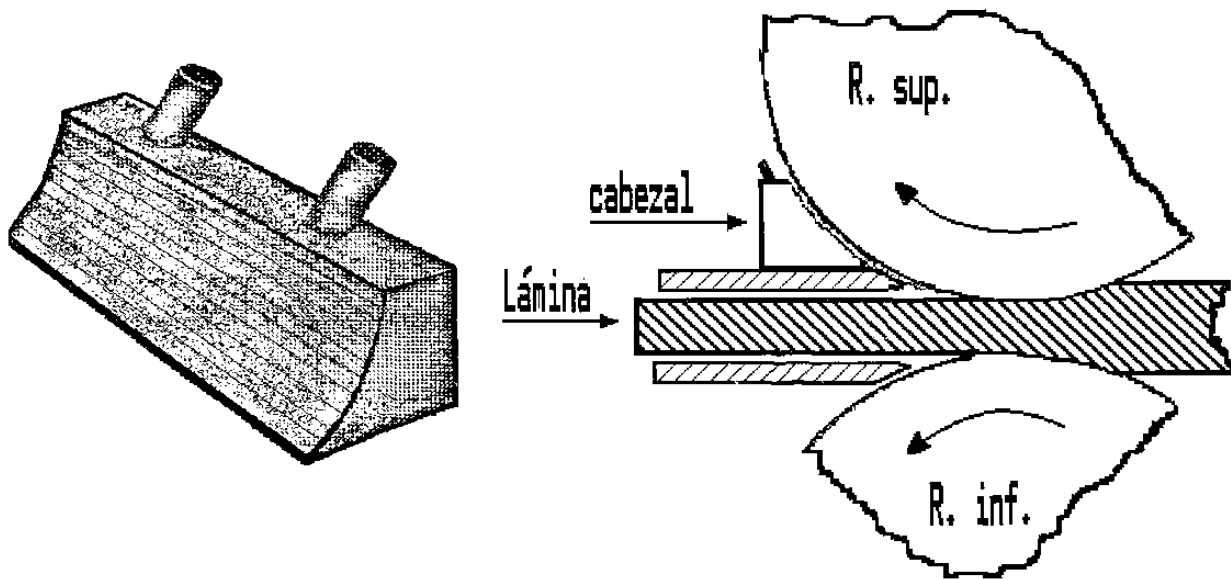


FIG. 2.6 Sistema de enfriamiento propuesto por Stevens [27].

angular, por el uso de un coeficiente de transferencia de calor equivalente que englobe las condiciones promedio existentes en la periferia del rodillo, con lo cual, justifican la eliminación de la coordenada angular del problema, puesto que el interés del trabajo es la determinación de la dilatación o corona térmica del rodillo y no la descripción del perfil de temperatura en forma detallada en su dirección angular. Ellos encuentran que el perfil del rodillo es de forma parabólica y que esta expansión deja de ser significativa con el transcurso del tiempo, Fig. 2.7a, y señala cuatro factores que afectan la corona térmica: a) los pases de reducción, b) el ángulo de mordida, c) el sistema de enfriamiento y d) el ancho de la lámina. G.T.Pallone [29] presenta diez años después un modelo analítico, basado en suposiciones similares a las Wilmotte y Mignon [44] coincide con el comportamiento parabólico de la corona térmica, así como este crecimiento deja de ser significativo conforme transcurre el tiempo de laminación o el número de piezas laminadas, Fig. 2.7b.

C.Devadas e I.V.Samarasekera [20] desarrollan posteriormente un modelo numérico unidimensional por diferencias finitas para el estado transitorio, considerando sólo la conducción de calor en dirección radial, atribuyendo el calentamiento del rodillo por su contacto con la lámina y el control del calentamiento por el sistema de enfriamiento; en forma similar, Y.Sekimoto [23] había desarrollado en 1975 un modelo semejante, ambos trabajos coinciden en la importancia que tienen las condiciones de enfriamiento

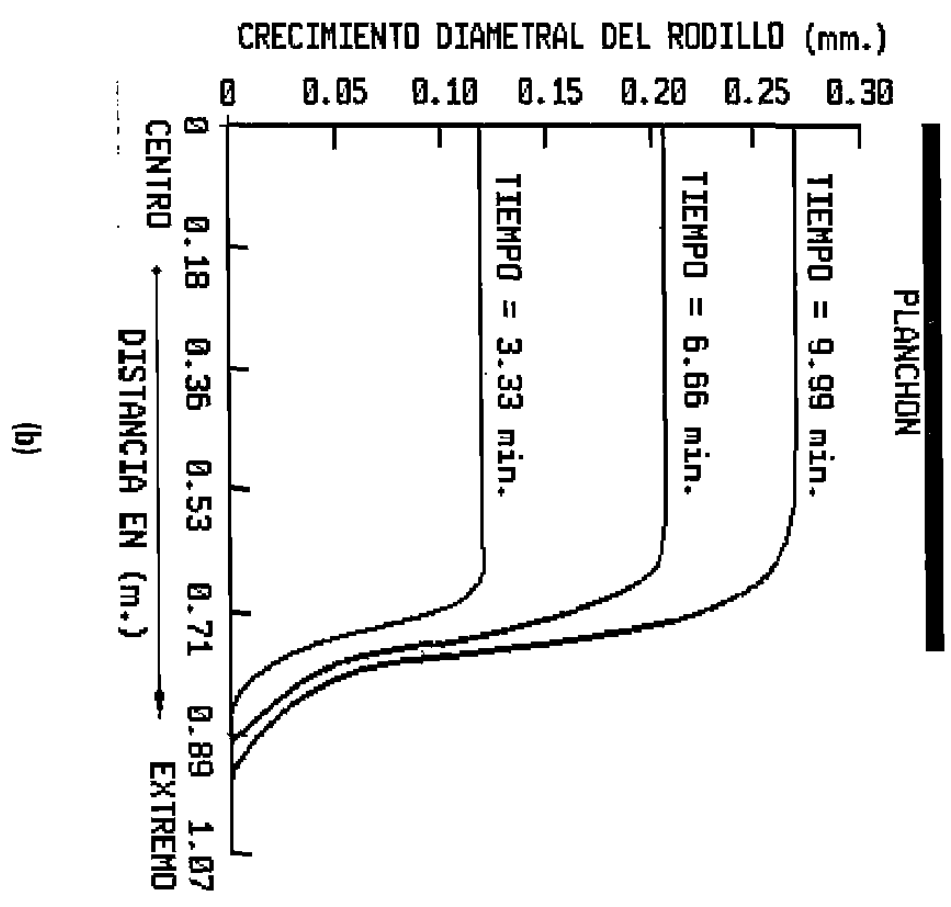
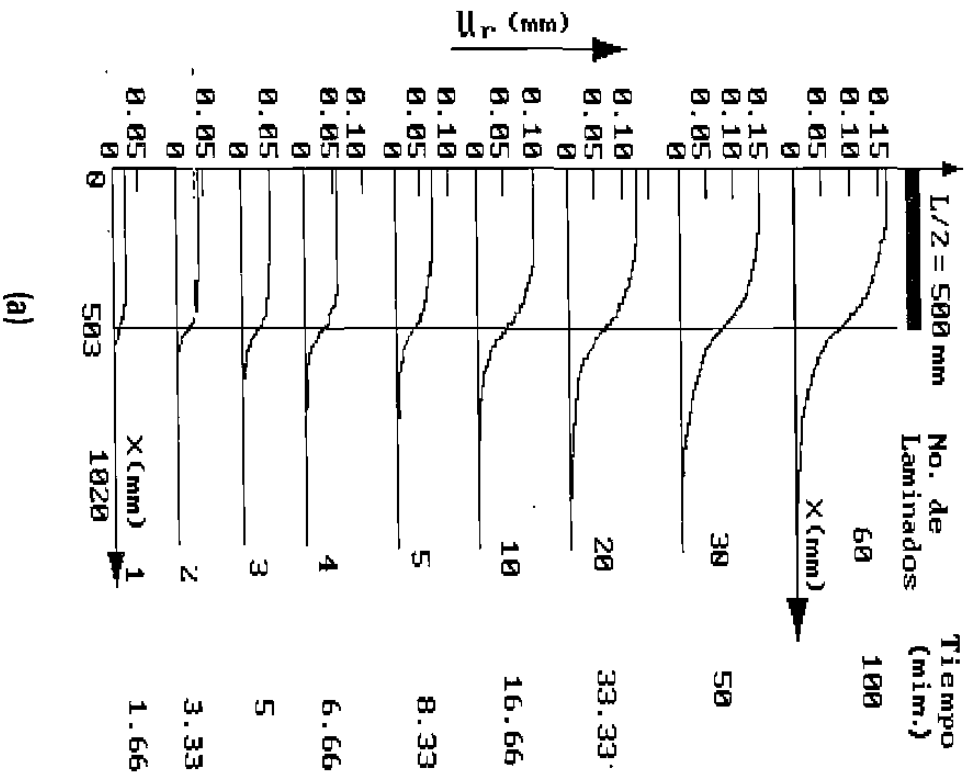


Fig. 2.7: a) Resultados obtenidos por Wilmotte y Mignon [44] que muestra que el crecimiento o dilatación del rodillo deja de ser significativo con el transcurso del tiempo; b) Pallone [29] está de acuerdo. En el primer caso se trata de una serie de lingotes laminados en tanto que en el segundo es un sólo planchón.

establecidas por los coeficientes de transferencia de calor y en el decaimiento exponencial del perfil de temperatura con respecto a la penetración, únicamente cabe agregar que el trabajo realizado por Devadas y Samarasekera [20] estudia también la evolución de la temperatura en la lámina durante su paso en los castillos.

A.Pérez [3] desarrolló un modelo analítico bidimensional para el estado transitorio bajo las consideraciones de que el calentamiento sólo es llevado a cabo por el contacto rodillo-lámina, en tanto que su enfriamiento es realizado por dos mecanismos, convección y conducción; la convección se considera tanto libre como forzada, es decir, en las zonas de la superficie del rodillo fuera y bajo los chorros del líquido del sistema de enfriamiento en tanto que la conducción se realiza considerando la transferencia de calor del rodillo de trabajo con el de apoyo. El modelo es sensible a los cambios en la disposición geométrica de los cabezales de enfriamiento, Fig. 2.8, lo que permite una herramienta de diseño para la disposición más efectiva del sistema de enfriamiento desde el punto de vista de la energía térmica neta que ingresa al rodillo y las curvas del ascenso de temperatura, Fig. 2.9; M.P.Guerrero [36] presentó otro trabajo similar pero ataca el problema mediante un modelo numérico.

E.J.Patula [5] propone en 1981 un modelo analítico bidimensional (radial y circunferencial) para el estado estacionario considerando cuatro regiones de transferencia de calor; una para el calentamiento por conducción en la zona de mordida o de deformación, otra por convección en la zona de chorros del sistema de enfriamiento y dos regiones en las cuales propone que la superficie del rodillo está aislada (no existe transferencia de calor). Al utilizar la consideración de un planchón con temperatura constante y longitud infinita, el simulador observa el efecto de atenuación exponencial que sufre el perfil de temperatura. El método por el cual Patula desarrolla y da solución al problema es en si bastante complicado, quedando expresada en las funciones Kelvin (soluciones de la función Bessel de argumento imaginario) sujeta a los eigenvalores definidos por las condiciones a la frontera. W.Y.D.Yuen [4] extiende el trabajo realizado por Patula, para considerar el efecto de la película de óxido existente en la lámina.

A.Pérez [37] desarrolla un modelo para el estado estable, pero, a diferencia del desarrollado por Yuen [4] y Patula [5], consideran lo siguiente: a) ocho regiones de transferencia de calor, Fig. 2.10; b) la temperatura del planchón o lámina caliente puede ser constante o variable y, finalmente, c) la lámina es de longitud finita con tiempos de descanso entre lámina y lámina. Estas ocho regiones de transferencia de calor se generan en, *i*) la zona de deformación, Fig. 2.11; *ii*) el contacto rodillo de trabajo con el de apoyo;

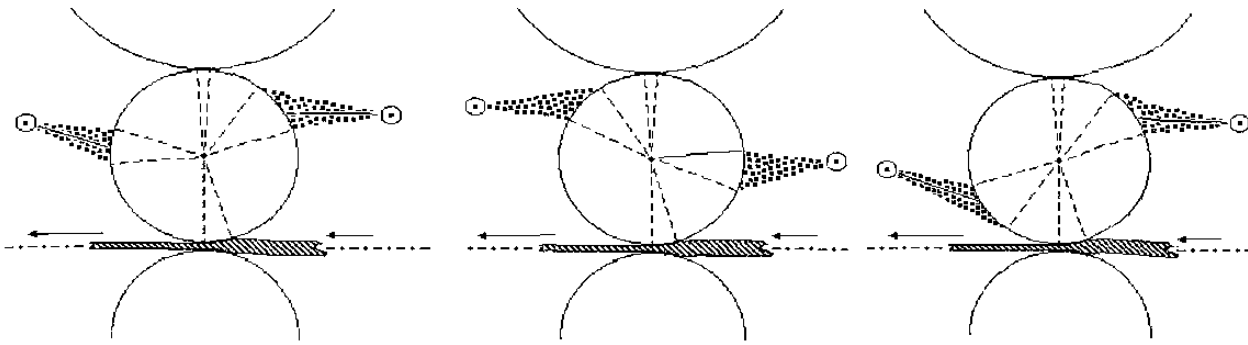


Fig. 2.8: Variaciones en la disposición geométrica de los cabezales.

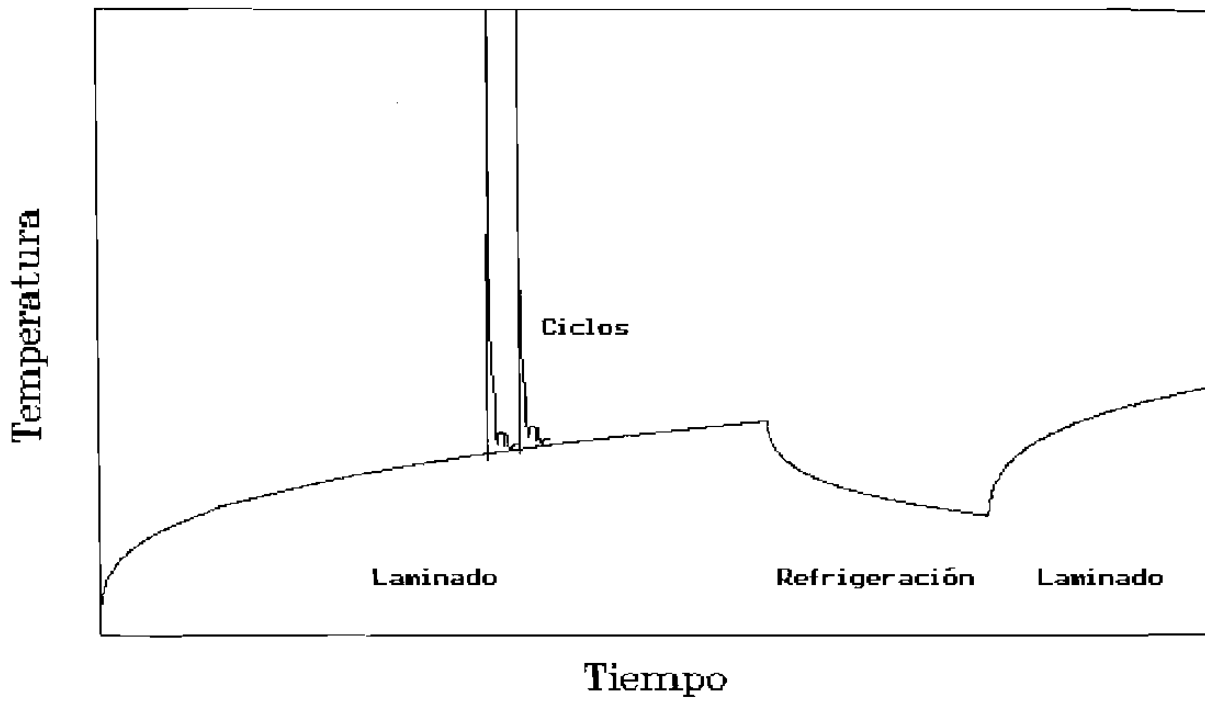


Fig. 2.9: Esquema del ascenso de la temperatura.

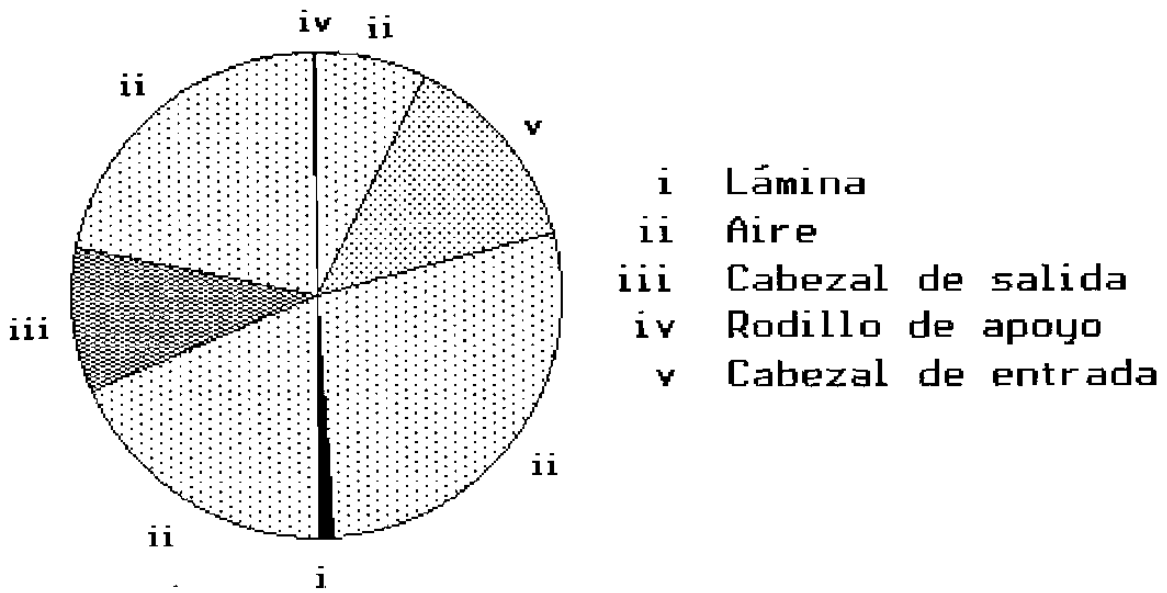


Fig. 2.10: Sectores angulares en los que se divide el rodillo.

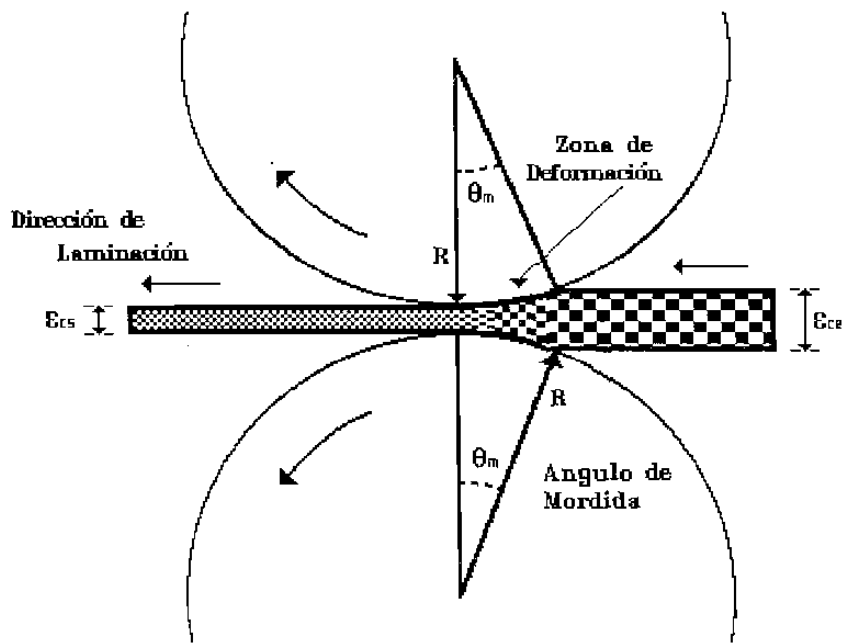


Fig. 2.11: Zona de deformación.

iii) dos zonas de chorro generadas por el cabezal de enfriamiento a la entrada y salida del castillo y iv) cuatro regiones de convección libre ubicados a la entrada y salida de cada zona de chorros. La solución al problema es obtenida en forma analítica y las expresiones son descritas en función de los coeficientes de las series de Fourier, realizando la descripción del flujo de calor, para después calcular el perfil de temperatura, el procedimiento será detallado en el siguiente capítulo.

2.5 COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

La energía térmica ingresa al rodillo por su contacto con la pieza a laminar y, por el contrario, la energía es cedida por el rodillo al medio que le rodea (zona de chorros o convección libre o por la conducción al rodillo de apoyo). Sea cual sea el mecanismo de transferencia de calor (convección o conducción), es posible, en una primera aproximación, establecer una relación de la cantidad de energía térmica transferida de un medio a otro (rodillo-lámina, rodillo-líquido, etc.) proporcional a su diferencia de temperaturas, esta constante de proporcionalidad, es definida como el coeficiente de transferencia de calor, es decir establece una condición frontera de la energía cedida.

Debido a que en los rodillos de trabajo del molino continuo las temperaturas son en promedio menores a los 100°C, el efecto de la transferencia de calor por radiación por parte del rodillo puede despreciarse [30, 49-51]; en cambio, el mecanismo de transferencia por radiación debiera ser considerado para cuantificar la pérdida de energía

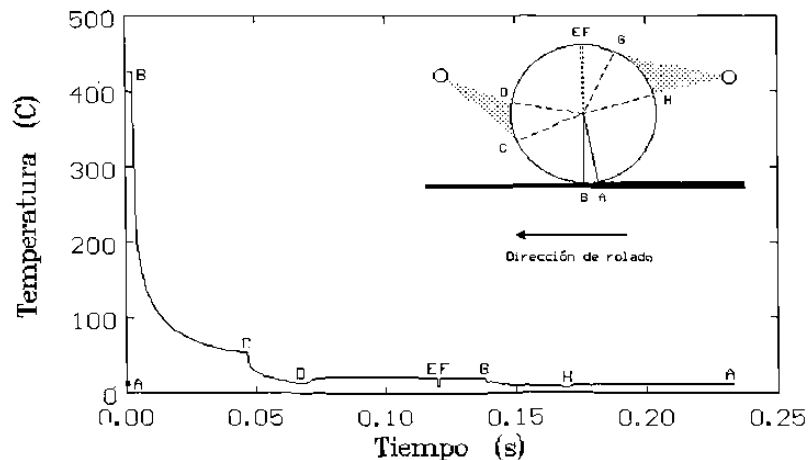


Fig. 2.12: Perfil de temperaturas en la superficie del rodillo en su primer giro, estado transitorio.

térmica y variación de la temperatura en la pieza a laminar durante su paso en la línea de producción [17, 52], pero no es común su consideración en la modelación de la transferencia de calor en los rodillos de trabajo de un molino continuo. Aunque existen sus excepciones, (Tseng [53, 54] lo incluye en el caso en

que la temperatura es mayor de 100°C), como la región del rodillo a temperaturas superiores a 100 °C es muy breve, aproximadamente alrededor del 3% de la longitud angular [3], Fig. 2.12, este término puede despreciarse. En esta sección se realiza una revisión al respecto de los valores y funciones de los coeficientes de transferencia de calor considerados en la literatura que tratan de describir el medio ambiente que rodea al rodillo.

2.5.1 CONVECCION LIBRE Y FORZADA.

El enfriamiento del rodillo de trabajo, que es necesario para retener sus propiedades mecánicas y resistencia al desgaste, así como para controlar su expansión térmica [3], es ejecutado por el sistema de enfriamiento principalmente.

Como se mencionó anteriormente, la condición frontera es establecida por el valor del coeficiente de transferencia de calor H , este coeficiente controla el mecanismo de transferencia de calor, por lo que se hace necesario tener presente el valor numérico del mismo, bajo diferentes condiciones. R.R.Carpenter y P.J.Hannan [55] consideran de importancia a los siguientes factores que afectan el enfriamiento convencional de los rodillos:

- a) La temperatura y cantidad de agua.
- b) El ángulo y posición del cabezal.
- c) La extensión de la superficie de aplicación.

El rodillo está sujeto a temperaturas excesivas y además en forma cíclica, por lo que es susceptible a las fracturas térmicas y, por lo tanto, a la posible falla del rodillo laminador en la línea de producción, es la aplicación apropiada del agua u otro líquido, lo que contribuye a extender la vida útil del rodillo [22, 27]. Esto es aún más crítico para los rodillos de hierro al alto cromo [55], por ser más susceptibles al choque térmico que los rodillos comunes, la razón de ello es su baja conductividad y alta expansión térmica.

La correcta extracción de calor al rodillo de trabajo por el sistema de enfriamiento tiene un fuerte impacto en la vida útil del mismo, como lo demuestra P.G.Stevens [27] en su trabajo, puesto que los rodillos pueden incrementar su vida desde un 26% a un 100% con la modificación del sistema de enfriamiento; al respecto de la disposición de los cabezales, Y.Sekimoto [23] al igual que D.R.Hill y

L.E.Gray [46] concluyen que el efecto es significativo, aunque en su trabajo Hill no da detalles al respecto, si asevera que el incremento del enfriamiento mejora de 20% a un 30% la vida útil del rodillo.

M.Bamberger y B.Prinz [56] propone un coeficiente de transferencia de calor constante ($H= 750 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$), para el caso en que se forme una película estable de vapor en la superficie a alta temperatura durante la aplicación del líquido y proponen [56] una relación para el cálculo de dicho coeficiente para el caso de la aplicación por chorros.

$$H_w = 0.69 \log \left(\frac{V_w}{0.0006} \right) \left[1.4 \frac{K}{\sqrt{\kappa}} \exp \left(0.32 \frac{T_s - T_{e_w}}{T_w - T_{e_w}} \right) + H_v \right] + H_{rad} \quad (2.1)$$

donde:

H : Coeficiente de transferencia de calor ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$).

V_w : Densidad de flujo de agua ($\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

T : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

K : Conductividad térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$).

κ : Difusividad térmica (m^2s^{-1}).

Subíndices.

s; rad : Lámina; Radiación.

w; e_w; v : Agua; Evaporación de agua; Vapor.

A.A.Tseng [53, 54] propone dos intervalos en los cuales el coeficiente de transferencia de calor H varía bajo la zona del chorro del líquido aplicado, el primero de 1 a 11 $\text{KW m}^{-2}\text{K}^{-1}$, si la superficie del rodillo a la que aplica posee una temperatura menor de los 100 $^{\circ}\text{C}$, y de 6 a 40 $\text{KW m}^{-2}\text{K}^{-1}$, si la temperatura es mayor de 100 $^{\circ}\text{C}$

El enfriamiento por convección libre o al aire, es parte de los mecanismos involucrados en el enfriamiento del rodillo, a este respecto Roberts [41] propone una relación, Ec. 2.2, para el cálculo del coeficiente H_a , para el enfriamiento al aire de un rodillo, los resultados experimentales realizados [57] se ajustan favorablemente.

$$H_a = 1.32 \left(\frac{T_r - T_\infty}{D} \right)^{0.25} \quad (2.2)$$

donde:

H_a : Coeficiente de transferencia de calor convección libre ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$).

T : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

D : Diámetro del rodillo (m).

Subíndices.

r : Rodillo.

∞ : Ambiente.

2.5.2 CONTACTO LAMINA-RODILLO.

Con respecto al cálculo del flujo de calor a la entrada en la zona de deformación, Fig 2.11, existen varias proposiciones del valor del coeficiente de transferencia de calor en esta zona para determinar el flujo de calor que ingresa al rodillo de trabajo en función de la diferencia de temperaturas rodillo-lámina:

$$\dot{f} = H(T_s - T_w) \quad (2.3)$$

donde:

f : Flujo de calor (W m^{-2}).

H : Coeficiente de transferencia de calor ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$).

T_s : Temperatura en la lámina de acero ($^{\circ}\text{C}$).

T_w : Temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$).

L.A.Leduc [35] propone un H igual a $1 \text{ MW m}^{-2}\text{K}^{-1}$ para el contacto perfecto rodillo-lámina cuando existe una resistencia térmica en la interfase formada por el óxido. G.F.Bryant y M.O.Heselton [19] sólo indican que el valor del coeficiente de transferencia debe ser mayor de $5 \text{ KW m}^{-2}\text{K}^{-1}$. C.Devadas e J.V.Samarasekera [20] encuentran que el coeficiente de transferencia de calor es de aproximadamente $50 \text{ KW m}^{-2}\text{K}^{-1}$, para el caso en el que se use agua como lubricante y de $200 \text{ KW m}^{-2}\text{K}^{-1}$ si se emplea aceite; posteriormente, C.Devadas [58] analiza el efecto del porcentaje de reducción de la lámina, observando que

a mayor porcentaje de reducción es mayor el coeficiente de transferencia de calor, por ejemplo, si la reducción pasa de 35% a 50%, el coeficiente se incrementa de 50 a 57 KW m²K⁻¹.

P.G.Stevens [27] estima que el coeficiente de transferencia de calor H , en la interface rodillo-lámina es 37.6 KW m²K⁻¹ durante los primeros 30 ms en el arco de contacto y decrece a 18 KW m²K⁻¹ a mayores tiempos de contacto.

Otros autores [2, 14, 37, 52, 59-62] establecen relaciones para el cálculo de la temperatura o del flujo de calor en esta zona de contacto. V.B.Ginzburg [52, 61] resumió algunas de estas relaciones, la Tabla 2.1 muestra estas y otras relaciones.

2.5.3 CONTACTO RODILLO DE TRABAJO - RODILLO DE APOYO.

La transferencia de calor por el contacto del rodillo de trabajo con el de apoyo en molinos tipo cuatro se desprecia en algunos trabajos por considerar insignificante su aportación al proceso de extracción de calor [4, 5, 15, 20, 21, 23, 25, 26, 29, 31-33].

F.Martínez [34] considera un H igual a 100 W m²K⁻¹, G.F.Bryant y T.S.L.Chiu [22] suponen la transferencia de calor por el contacto entre dos sólidos semi-infinitos. A.Pérez [3, 14] realiza una suposición similar a la anterior, pero además considera la existencia de una película de óxido en la interfase de contacto, estableciendo una resistencia térmica.

AÑO	AUTOR	ECUACIONES
1963	P.W.Lee, R.B.Sims y H.Wright	$\Delta T_C = 0.321 \left[\frac{\Delta H}{c} + 98.1 \right]$
1965	H.Ventzel	$\Delta T_C = \frac{0.606}{h_1 + h_2} [T_O - T_R] \sqrt{\frac{\sqrt{R\Delta}}{V} \frac{h_1}{h_1 + h_2}}$
1968	Y.D.Zheleznov y B.A.Tsifrinovich	$\Delta T_C = \frac{0.051}{h_1 + h_2} [T_O - 108] \sqrt{R \cos^{-1} \left(1 - \frac{\Delta}{2R} \right) \frac{1 + S_F}{V}}$
1970	F.Hollander	$q_2 = -\lambda_2 \frac{T_g - T_2}{\sqrt{\pi a_2 t}}$
1971	P.G.Stevens, K.P.Ivens y P.Harper	$T_{R_2} = T_{r_1} + (T_{S_1} - T_R) \left[\frac{H \sqrt{a_R}}{A k_R} \right] (1 - e^{tA^2} \operatorname{erfc}(A \sqrt{t}))$
1973	F.Seredynski	$\Delta T_{con} = \frac{60 a}{(1-r) \pi \rho c N} \sqrt{\frac{r}{h_1 R}} [T_O - T_R]$
1973	S.Wilmotte	$\Delta \bar{T}_f = -\alpha \frac{\bar{T}_i - \gamma}{0.5(h_i + h_s)} \frac{\sqrt{R\Delta h}}{U}$
1975	H.Wright y T.Hope	$\Delta T_C = \frac{0.163}{h_1 + h_2} [T_O - T_R] \sqrt{\frac{\sqrt{R\Delta}}{V}}$
1985	V.B.Ginzburg	$\Delta T_C = \frac{4k}{\rho c h_a} [T - T_R] \sqrt{\frac{5\sqrt{R\Delta}}{\pi a V}}$

Tabla 2.1: Relaciones para establecer la temperatura y el flujo de calor en la zona de deformación [2, 27, 52, 60-62, 75-77].

2.6 CALENTAMIENTO DEL RODILLO DE TRABAJO.

El incremento de la energía interna del rodillo de trabajo es atribuida al flujo de calor neto que ingresa al mismo principalmente por el contacto que realiza con la pieza caliente a deformar, en tanto que se desprecian las restantes formas de calentamiento por ser muy pequeña su contribución a este fenómeno en el rodillo [17], Fig. 2.2. Aún más, otra razón para no considerarlos es que sólo complican excesivamente el modelo matemático y estos efectos finalmente no se podrán medir en forma aislada sino en forma global a través del factor H . Por otro lado, los coeficientes de transferencia de calor no son exactos o completamente conocidos bajo las diferentes condiciones de operación en planta [1, 3-5, 14, 15, 17, 19-35, 37, 38, 41-48, 52-70].

La longitud de la zona de contacto rodillo-lámina o zona de deformación, Fig. 2.11, es determinada por el ángulo de mordida (Θ_m), Ec. 2.4 [71, 72].

$$\theta_m = \tan^{-1} \sqrt{\frac{\Delta h}{R_w}} \quad (2.4)$$

Θ_m : El ángulo de mordida.

Δh : Reducción de la cinta.

R_w : Radio de rodillo de trabajo.

El calentamiento del rodillo (en un castillo dado) es afectado por:

a) La diferencia de temperatura entre el rodillo y la pieza a deformar, es evidente que a mayor temperatura de la pieza mayor es el calentamiento del rodillo.

b) La velocidad de giro de los rodillos de trabajo (y su velocidad de deformación) está directamente relacionado con la eficiencia del sistema de refrigeración y la cantidad de material procesado, ya que se ha observado que los trenes de laminación que poseen una alta capacidad de producción requieren una mayor cantidad de fluido refrigerante y sistemas más eficientes para el control del calentamiento del rodillo de trabajo, es decir, la velocidad de calentamiento del rodillo crece con la velocidad de giro.

c) El sistema de refrigeración -y lubricación-, si el molino carece de éste o es ineficiente o insuficiente entonces el rodillo aumentara su temperatura peligrosamente al límite de fracturarse por completo [15, 55, 73, 74].

Durante el proceso de laminación el rodillo de trabajo gana y cede energía térmica en forma simultánea, porque mientras una pequeña área superficial del rodillo está en contacto con la lámina, el resto se encuentra sometido a condiciones de enfriamiento, originando cambios cíclicos de temperatura en el rodillo, Fig.2.13.

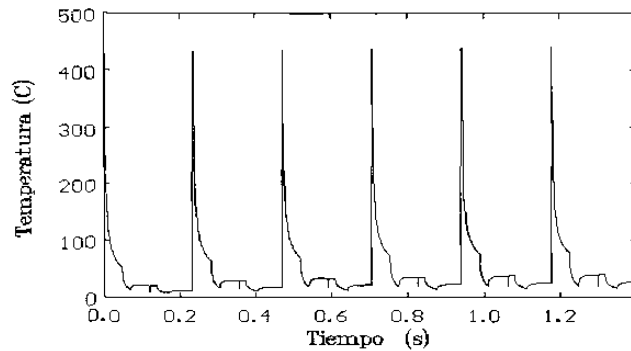


Fig. 2.13: Perfil de temperatura en la superficie del rodillo durante sus seis primeros giros, estado transitorio [14].

2.7 ENFRIAMIENTO DEL RODILLO DE TRABAJO.

Como en el caso anterior, existen diversas formas por las que el rodillo de trabajo ceda parte de su energía térmica, Fig. 2.3. Aquí se considerará solamente el efecto de dos de estos mecanismos de transferencia de calor: *a)* convección y *b)* conducción. El primer mecanismo es el más importante, pues es el realizado por el sistema de refrigeración (convección forzada en la región bajo los chorros del fluido) y las zonas al aire (convección libre); los valores de estos coeficientes no son conocidos en su totalidad, por lo que las mediciones experimentales engloban a los mecanismos de transferencia de calor restantes. La conducción es comunmente despreciada, pues se realiza por el contacto del rodillo de trabajo con el rodillo de apoyo y la zona es muy pequeña.

La razón de cambio de la temperatura en un cuerpo (T) con respecto al tiempo (t) sometido a la refrigeración por un fluido es proporcional a la diferencia de la temperatura del fluido (T_L) empleado, ley de enfriamiento de Newton:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = H(T - T_L) \tag{2.5}$$

donde H es la constante de proporcionalidad, de esta relación se desprende claramente que la velocidad de extracción de calor crece conforme aumenta la diferencia de temperatura y es aún mayor si durante la

aplicación del líquido se presenta el cambio de fase a vapor, pero este crecimiento queda limitado a un máximo, pues el mecanismo es funcional mientras exista la capacidad de liberar el vapor formado y adecuada circulación del líquido en la superficie. En el caso en que no se presente el cambio de fase, es ideal tener flujo laminar en la interface líquido-sólido.

La figura 2.14, presenta un esquema de la relación entre la velocidad de extracción de calor con la diferencia de temperatura superficie-líquido, en ella se muestran cuatro regiones que pueden ser agrupadas en tres mecanismos básicos: *i*) Convección, *ii*) Nucleación de ebullición y *iii*) Película de vapor.

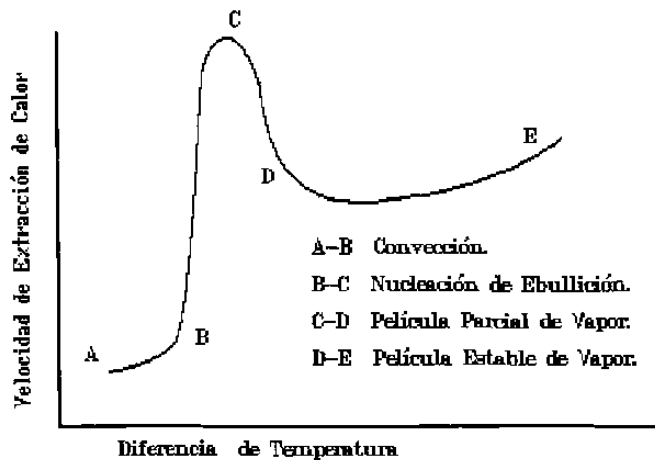


Fig. 2.14: Relación general de la velocidad de extracción de calor en función de la diferencia de temperatura de la superficie-líquido.

El primero, marcado por el segmento *AB*, describe la relación de transferencia de calor por la ley de Newton para el enfriamiento y no ocasiona cambio de fase. El

segundo mecanismo está caracterizado por un sobresaliente incremento en la capacidad de extracción de calor, este incremento se debe a el calor latente extraído por el líquido de la superficie por su cambio de fase a vapor, lo anterior se ve reflejado en la pendiente de la curva de la figura limitada por el segmento *BC*. Finalmente, el tercer mecanismo se muestra en la figura por el segmento *CE*, involucra la formación de una película de vapor, la película de vapor hace las veces de una barrera dificultando la incidencia del líquido refrigerante a la superficie, por lo que la velocidad de extracción de calor decrese, la película puede ser inestable (*CD*) o estable (*DE*), el último caso ocasiona un incremento en la velocidad de extracción de calor pero se debe a otro mecanismo que entra en acción: la transferencia de calor por radiación de la superficie a la atmósfera a través de la película de vapor.

2.8 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.

Para que el sistema de refrigeración cumpla con su objetivo debe existir un criterio de la cantidad esperada de calor extraído, por lo que es necesario el conocimiento del efecto de las variables de diseño en el sistema de enfriamiento. Parte importante de este sistema son las boquillas y son también las que finalmente establecen la condición frontera para el enfriamiento del rodillo de trabajo en el modelo de transferencia de calor que aquí se desarrolla.

2.8.1 ELECCION DEL TIPO DE BOQUILLA.

La elección puede iniciarse con una prueba de la distribución de la fuerza de impacto del líquido refrigerante, Fig. 2.15, que relaciona la distribución y cantidad de líquido refrigerante a través de la anchura del chorro [46]. Como un resultado se encuentra una relación entre el coeficiente de transferencia de calor α y el gasto normalizado por área. En la Figura 2.16 el fluido (agua) se aplicó a una presión de 10^6 Pa (10 bar). Y esta dependencia se aproxima por la Ecuación 2.6 [48].

$$\alpha_L = 1.45 \cdot 10^{+5} \exp(-.004 G_n^{-1.33}) \quad 0 < G_n < 0.2 \quad (2.6)$$

donde G_n es el gasto normalizado por el área en $l \text{ min}^{-1} \text{ mm}^{-2}$, α es el coeficiente de transferencia de calor en $W \text{ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, el subíndice L indica al líquido de enfriamiento, L_s simboliza saturación del líquido que, para el caso de agua $1.45 \cdot 10^{+5} W \text{ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ es el valor de saturación del coeficiente de transferencia.

No hay que perder de vista el hecho de que el coeficiente de transferencia de calor (α) decrece exponencialmente al alejarse del área de impacto, Fig 2.17, el decremento se atribuye a la disminución de velocidad en la película de agua por fricción. Si se observa la densidad de gasto de agua normalizado contra su área de impacto para tres diferentes tipos de boquillas, Fig. 2.18, *a*) cuadrada, *b*) rectangular de longitud/ancho grande (boquilla flat jet), *c*) oval (boquilla oval jet). De las Figuras 2.16 y 2.18 se observa lo siguiente con respecto a sus áreas de impacto:

- i*) La boquilla de área de impacto cuadrada opera en la región de α más bajo y posee una distribución no uniforme del gasto de agua en el área de impacto.
- ii*) La rectangular de razón largo/ancho grande, Flat jet (8:1), posee el intervalo más alto de los valores de α y una distribución del gasto de agua uniforme en el área de impacto.

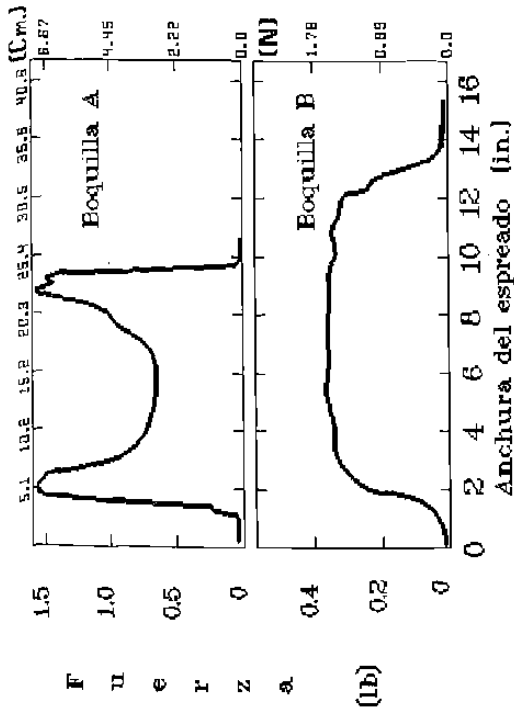


Fig. 2.15: Prueba de la distribución de la fuerza de impacto del líquido refrigerante en la superficie.

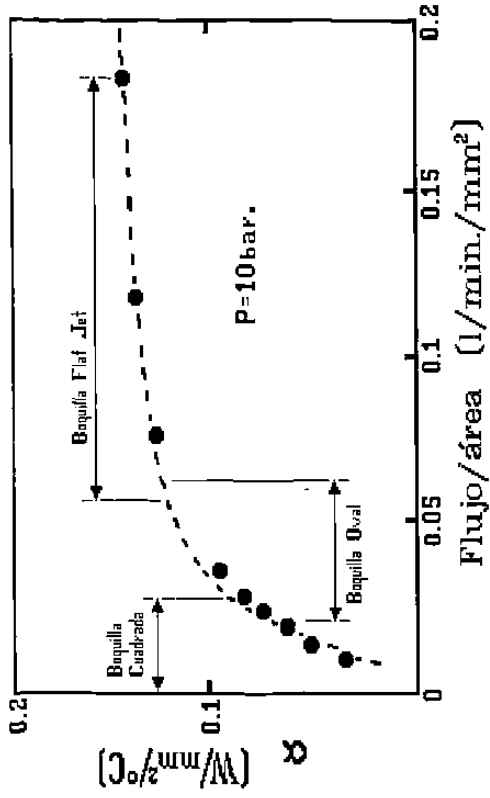


Fig. 2.16: Coeficiente de transferencia de calor en la zona de impacto como una función del gasto de agua, • dato experimental [48].

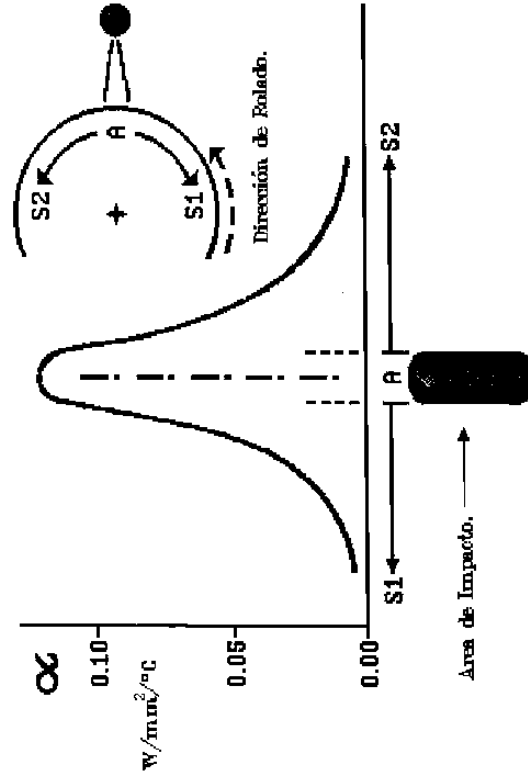


Fig. 2.17: Coeficiente de transferencia de calor (α) en función de la distancia a el área de impacto del un chorro de líquido refrigerante

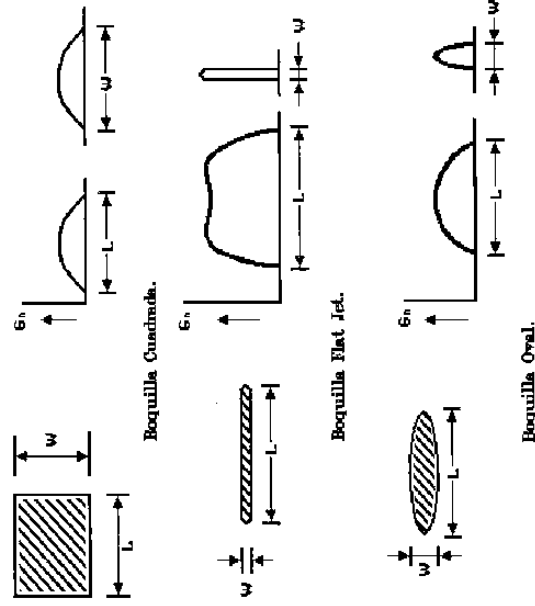


Fig. 2.18: Gasto de agua normalizado por el área para diferentes tipos de boquillas.

iii) La de área de impacto oval de razón largo/ancho $\approx 5:1$ trabaja en el intervalo intermedio de los valores de α , pero tiene aún el inconveniente de distribución no uniforme del gasto de agua en el área de impacto.

De los resultados presentados se toman dos precondiciones para la selección de las boquillas:

- I) El área de impacto debe ser rectangular de una relación largo/ancho grande.
- II) El gasto de agua por área debe ser constante y grande.

De los tres tipos de boquilla presentados, la mejor opción es la Flat Jet, que concuerda con las dos precondiciones de elección de las boquillas.

2.8.2 CONDICIONES DE OPERACION.

Después de la elección de la boquilla, se debe de conocer el efecto de las condiciones de operación, es decir el efecto de la variación de parámetros como:

- I) La presión del fluido.
- II) La distancia entre la boquilla y la superficie del rodillo.
- III) El ángulo de incidencia del fluido con respecto a la normal a la superficie del rodillo.

La Tabla 2.2 presenta las relaciones del efecto de la variación de estos parámetros en el coeficiente de transferencia de calor (α), bajo la condición de un flujo por área constante de líquido refrigerante (agua) de $0.04 \text{ l min}^{-1}\text{mm}^{-2}$.

[Ref. 47 y 48]	PRESION (bar)	DISTANCIA (m)	ANGULO DE INCIDENCIA
I	EC. 2.7 Fig. 2.19	0.125	0°
II	15	EC. 2.8 Fig. 2.20	0°
III	15	0.125	EC. 2.9 Fig. 2.21

Tabla 2.2. Variables de operación en las boquillas.

$$\alpha_L = 1.45 \cdot 10^{+5} \exp(-3.71 P_L^{-1.13}) \quad 0 < P_L < 20 \quad (2.4)$$

$$\alpha_L = \left(72 + \frac{4.257}{D} \right) \cdot 10^3 \quad 0 < D < 0.25 \quad (2.5)$$

$$\alpha_L = 1.21 \cdot 10^{+5} - 50\theta_L \quad -25^\circ < \theta_L < 25^\circ \quad (2.6)$$

donde α_L es el coeficiente de transferencia de calor en $W m^{-2}C^{-1}$, P_L es la presión del fluido (bar), D la distancia boquilla-superficie en metros (m), θ_L es el ángulo de incidencia con respecto a la normal ($^\circ$). El subíndice L es referido al fluido refrigerante, L_s se refiere a la saturación del fluido ($1.45 \cdot 10^{+5} Wm^{-2}C^{-1}$), es decir el límite superior en la Figura 2.19.

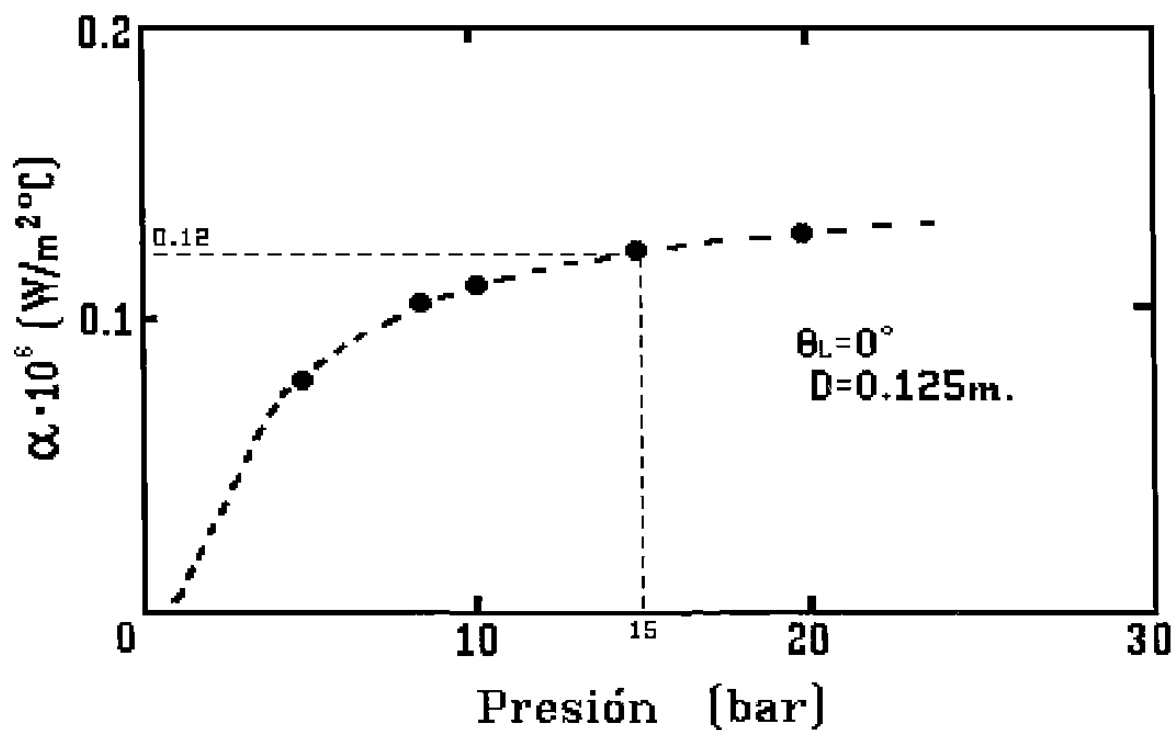


Fig. 2.19: Coeficiente de transferencia de calor como una función de la presión, • dato experimental [48].

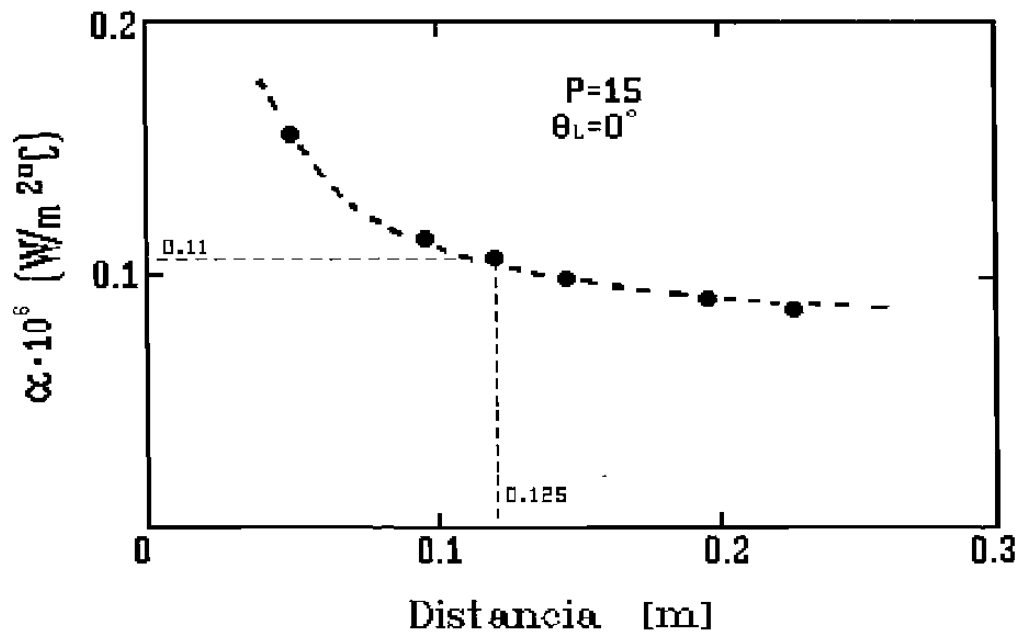


Fig. 2.20: Coeficiente de transferencia de calor como una función de la distancia, • dato experimental [48].

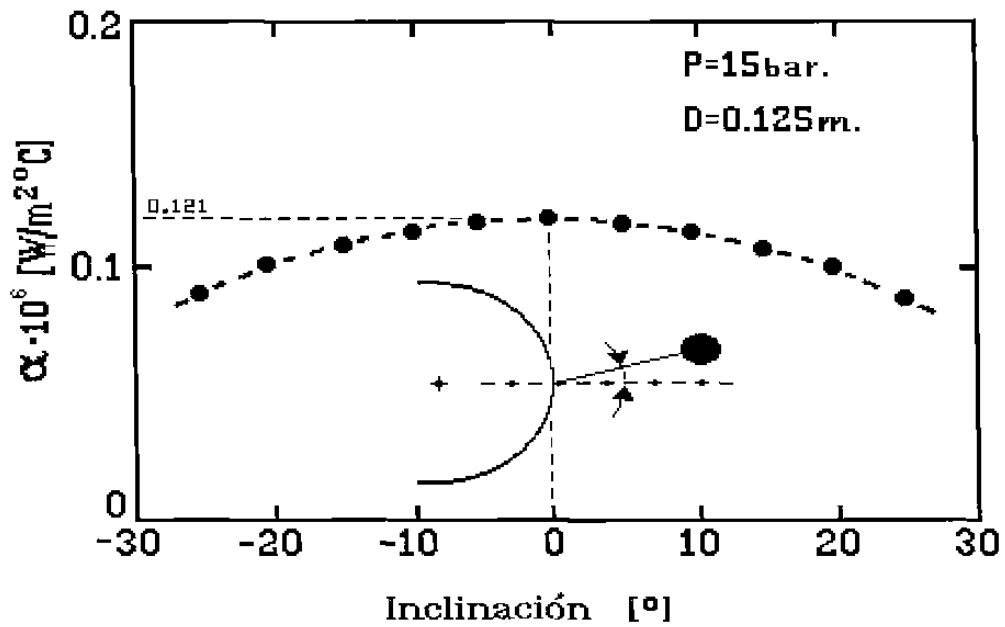


Fig. 2.21: Coeficiente de transferencia de calor en función del ángulo de incidencia, • dato experimental [48].

2.8.3 CABEZALES DE REFRIGERACION.

Se puede considerar el caso particular de un sistema de refrigeración formado por un tubo, ubicado paralelamente al eje axial del rodillo, el cual porta dieciseis espreas o boquillas dirigidas a la superficie del rodillo de trabajo. A ese conjunto se le conoce como cabezal de enfriamiento, las boquillas se encargan de aplicar el líquido refrigerante a la superficie del rodillo, en el proceso de laminación en caliente el refrigerante es agua (en frío es una solución de agua y aceite) y cada rodillo de trabajo posee dos cabezales (uno a la entrada y otro a la salida del castillo). La disposición geométrica de los cabezales de refrigeración en los castillos del molino continuo de laminación en caliente se presenta en la Figura 2.22, en tanto que en la Tabla 2.3 se dan las dimensiones correspondiente para los castillo utilizado la notación de la Figura 2.22.

La disposición de las boquillas en cada cabezal en los diferentes castillos del molino continuo industrial se muestra en la Figura 2.23, el cabezal porta dieciséis boquillas dispuestas en forma simétrica con respecto al centro del cabezal, separadas 76.2 mm (3 pulgadas) entre sí. Las boquillas se identifican por su número de serie del fabricante [43].

Las características de las boquillas empleadas (flat jet) en los cabezales de enfriamiento se presenta en la Tabla 2.4, la información sobre boquillas se tomó del manual del fabricante [43], los valores de los coeficientes de transferencia de calor (α) se determinaron a partir del gasto de agua en la línea del molino industrial y se ajustaron [47] a las condiciones de operación (α').

D I S T A N C I A S		DIRECCIONES
x: Horizontales	y: Verticales	
$x_0 = 0.46$ m (18")	$y_1 = 0.35$ m (13.75")	$\theta_1 = 5^\circ$
$x_s = 0.44$ m (17.5")	$y_2 = 0.36$ m (14")	$\theta_2 = 0^\circ$
	$y_3 = 0.40$ m (15.5")	$\theta_3 = 30^\circ$
	$y_4 = 0.33$ m (13")	$\theta_4 = -25^\circ$

Tabla 2.3: Dimensiones respecto a la disposición geonetrica de los cabezales en el castillo -ver Figura 2.22-.

Boquilla H1/2U # Serie	Díametro equivalente		Gasto		Flujo/área l min ⁻¹ mm ²	α_L	α'_L
	10 ³ m	in	l min ⁻¹	gpm		10 ³	W m ² °C ⁻¹
2520	2.78	7/64	13.2	3.5	0.010	37	27
2530	3.57	9/64	19.6	5.2	0.015	53	38
2540	3.97	5/32	26.3	7.0	0.020	65	47
2550	4.37	11/64	32.7	8.7	0.025	76	54
2560	4.76	3/16	37.2	9.9	0.030	85	61
2570	5.16	13/64	46.2	12.3	0.037	97	70
25100	6.35	1/4	65.4	17.4	0.078	127	91
25150	7.54	19/64	99.6	26.5	0.119	137	98
25200	8.73	11/32	131.6	35.0	0.183	140	100

α_L Coeficiente de Transferencia de Calor [43].

α'_L Coef. de Transferencia de Calor modificado para el molino continuo HYLSA [47].

Tabla 2.4: Características de las boquillas empleadas en los cabezales de enfriamiento de los rodillos de trabajo del molino continuo.

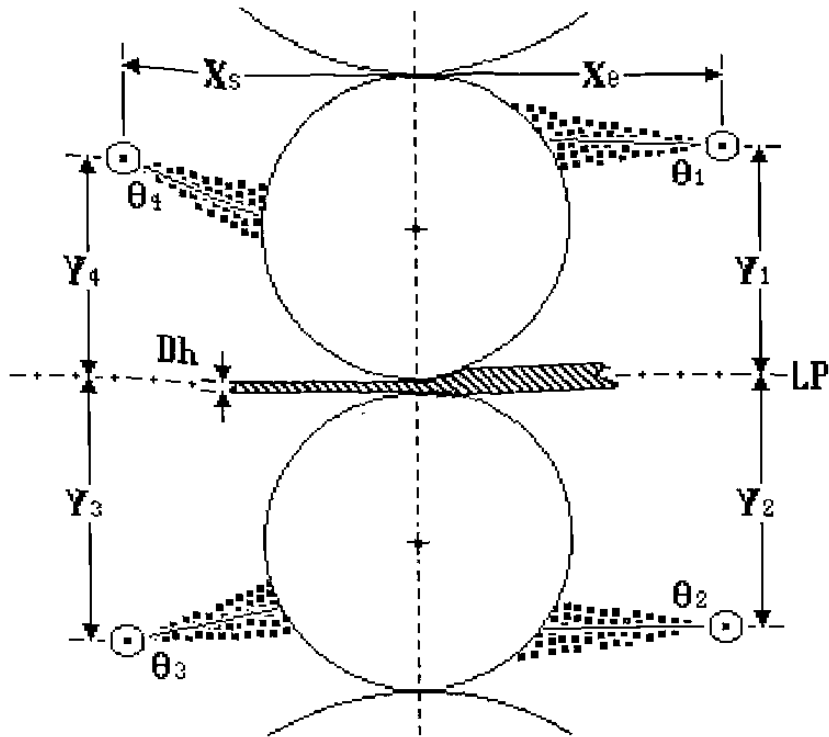
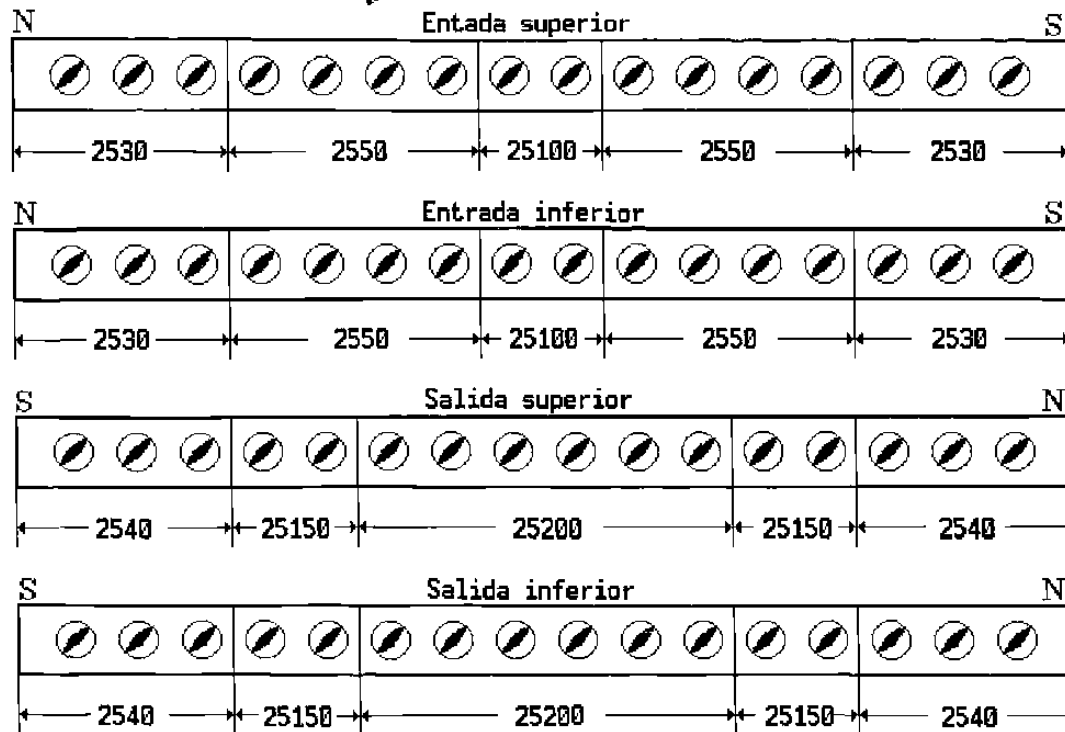


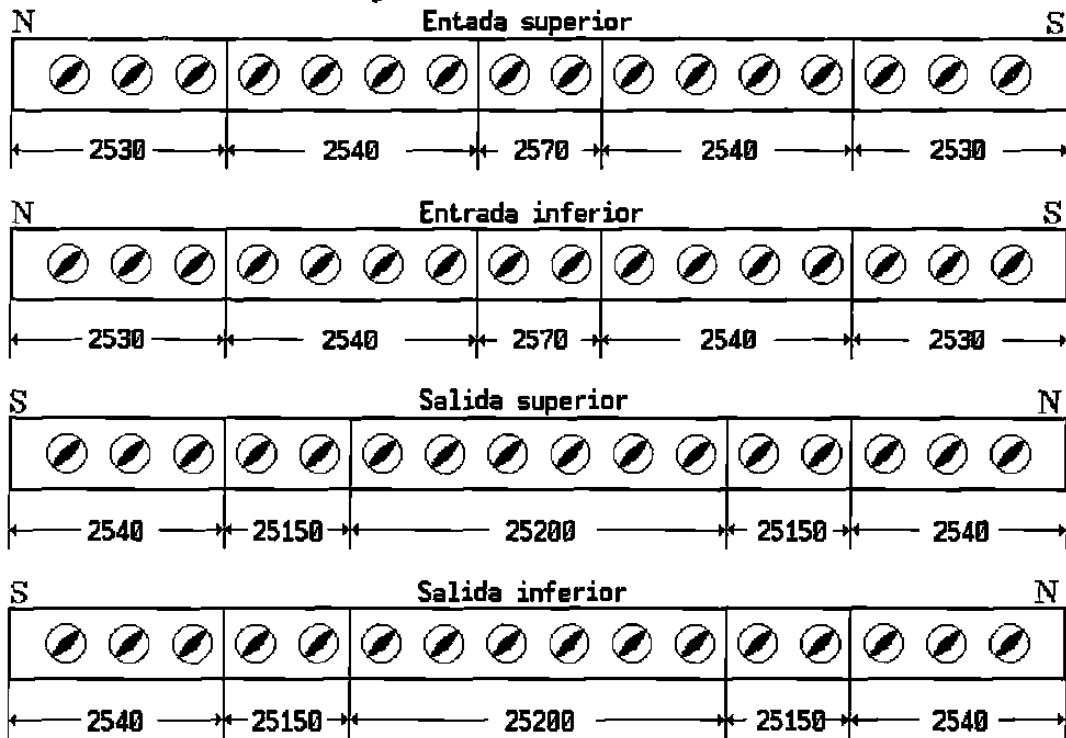
Fig. 2.22: Disposición esquemática del sistema de enfriamiento.

Fig. 2.23: Disposición de las boquillas en cada cabezal, en los diferentes castillos.

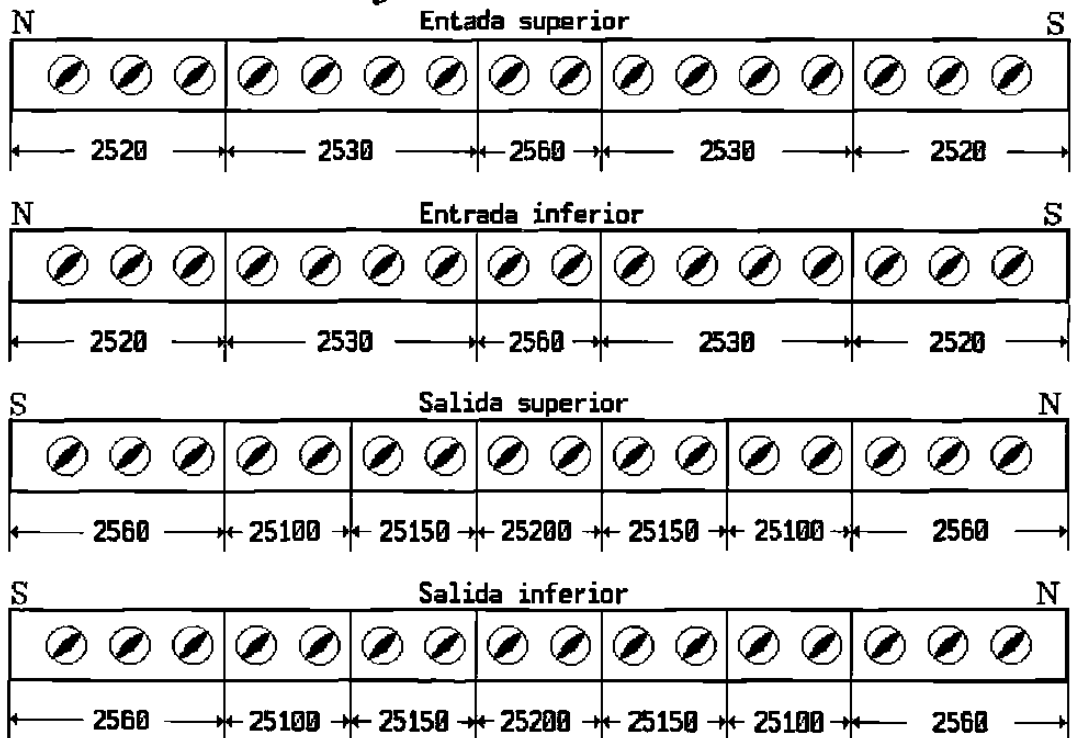
Castillos F1 y F2



Castillos F3 y F4



Castillos F5 y F6



3 MODELO MATEMATICO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

3.1 INTRODUCCION.

Como se ha mencionado insistentemente, el rodillo de trabajo del molino continuo de laminación en caliente es sometido a dos fenómenos térmicos uno de calentamiento y otro de enfriamiento durante el proceso de laminación. Estos mecanismos dividen la superficie del rodillo en ocho sectores angulares, Fig. 3.1, en los que se realiza el intercambio de energía y se caracterizan por el valor numérico de su coeficiente de transferencia de calor, ocasionando cambios de temperatura bruscos en el rodillo, un ejemplo de éstos se presenta en la Figura 2.12. Durante el proceso de deformación, la exposición de la superficie del rodillo a estos mecanismos de transferencia de calor es periódica [3], el rodillo de trabajo inicialmente a temperatura ambiente gana energía y se refleja en un incremento de su temperatura al ser expuesto al contacto con la lámina caliente, la Figura 2.13 muestra el perfil de temperaturas para seis giros consecutivos en los que es posible apreciar este ascenso en la temperatura.

La mayoría de los trabajos especializados en el área [3, 14, 17, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 28, 29, 42, 44] han realizado principalmente el análisis del estado transitorio de la temperatura del rodillo, pero existen aún preguntas que se deben responder tales como:

¿Cuál es el comportamiento térmico del rodillo en el estado estable en la superficie e interior del rodillo?.

¿Qué pasa o cómo se modelan efectos tales como la variación de la temperatura que existe de punta a cola en la lámina, la velocidad de deformación, el porcentaje de deformación, así como los retardos o paros que ocurren en la planta?.

Es importante mencionar que hay tres trabajos que atacan este problema en su estado estacionario, uno realizado por E.J.Patula [5] y extendido posteriormente por W.Y.D.Yuen [4] y finalmente el realizado por A.Pérez [37] que se expondrá a continuación. Los dos primeros son complicados en su desarrollo y comprensión y sin embargo, no contemplan la variación de la temperatura de punta a cola, así como tampoco los intervalos de descanso entre uno y otro planchón laminado, en tanto que el tercero es más

sencillo en la aplicación de la solución y su extensión. Se iniciará por plantear las base del modelo en forma simple, describiendo el mecanismo bajo el cual se resuelve el problema.

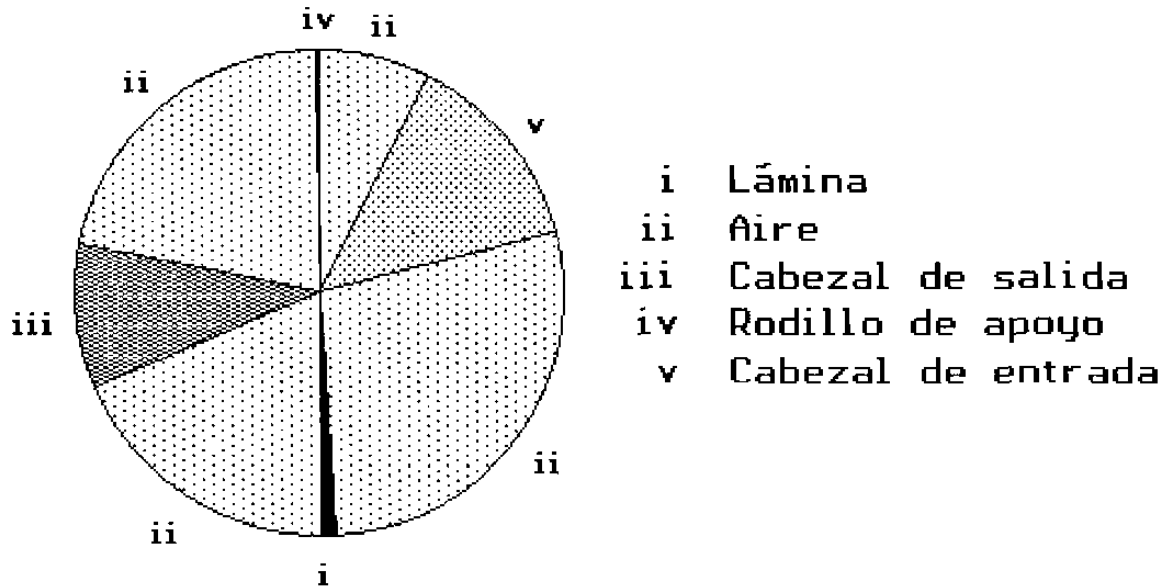


Fig. 3.1: Sectores angulares en los que se divide el rodillo.

3.2 MODELACION.

El modelo matemático de transferencia de calor para el rodillo laminador permite simular el perfil de temperatura en estado estable en la superficie e interior del rodillo de trabajo, cualesquiera de los que componen el molino continuo. La mecánica de su solución es fácil de comprender y es capaz de describir el fenómeno en tres grados de dificultad que se denominarán: *i*) Saltos, *ii*) Evolución periódica de temperatura y *iii*) Campaña de laminación.

i) Saltos: determina los cambios bruscos de temperatura (saltos) en la periferia del rodillo al detalle durante el laminado, se considera que la lámina es de longitud infinita y de temperatura constante durante su paso en cada castillo. Como la manufactura de lámina de acero produce cintas de acero de longitud finita, esto implica que haya intervalos en los que sólo se refrigera al rodillo, el comportamiento del perfil de temperaturas es esquematizado en la Figura 2.9, este comportamiento se contempla en los dos modelos

siguientes.

ii) Evolución periódica de temperatura: considera el efecto térmico promedio causado por el paso periódico de planchón en los castillos durante el laminado e intervalo de descanso entre planchones iguales, así como la variación de temperatura o rampa de temperatura entre punta y cola del planchón. Aquí se simula la laminación de lingotes bajo condiciones idénticas, sin paros o atones durante la campaña del rodillo.

iii) Campaña de laminación: se da solución al cálculo de temperatura en el rodillo durante un programa común de laminación en la línea de producción de la planta. En este último caso se considera la variación de temperatura entre planchones, así como la rampa de temperatura entre la punta y cola de los mismos, además, el intervalo de tiempo entre la salida de un planchón y la llegada del siguiente puede ser variable, por lo que es posible simular un paro de línea.

En todos los casos anteriores se contempla la variación de la temperatura de la pieza a la largo de la tabla del molino. Es importante mencionar que esta descripción sólo tiene la finalidad de mostrar las bases y mecánica para la solución del problema de transferencia, no es un desarrollo formal, puesto que éste se presenta en el Apéndice A1.

3.3 DESCRIPCION DEL MODELO.

Las premisas en la que se basa el modelo son las de que el fenómeno de transferencia de calor en el rodillo laminador es periódico [3], y la de que el flujo de energía transferido de un medio a otro es proporcional a la diferencia de sus temperaturas. La solución para el caso de la fuente de calor periódica prescrita es de la forma:

$$\lambda_{(\theta)} = \bar{\lambda} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \sqrt{n})}{\sqrt{n}} \left[A_n \cos \left(n \theta - \frac{\pi}{4} - \alpha \sqrt{n} \right) + B_n \sin \left(n \theta - \frac{\pi}{4} - \alpha \sqrt{n} \right) \right] \quad (3.1)$$

donde $\lambda_{(\theta)}$ y $\bar{\lambda}$ son la temperatura y temperatura promedio del rodillo, $\alpha = x(\omega/2\kappa)^{1/2}$, donde x es la coordenada radial medida desde la superficie del rodillo hacia dentro, κ la difusividad térmica del rodillo, ω es la velocidad angular igual a $2\pi/t_r$, t_r es el período del fenómeno, $\Theta = 2\pi t/t_r$ es la coordenada angular relativa, t la coordenada temporal en el intervalo $(0, t_r]$. A_n y B_n son los coeficientes de la serie de Fourier.

Las constantes A_n y B_n se desconocen, pero la función de temperatura debe cumplir la condición frontera del flujo de calor en la superficie del rodillo descrita por la relación:

$$f = -K \frac{\partial \lambda}{\partial x} \quad (3.2)$$

por lo que, los coeficientes para la expansión en serie de Fourier propuesta para la descripción del perfil de temperatura y el flujo de calor son los mismos. El flujo de calor es proporcional a la diferencia de las temperaturas de los medios:

$$f = h [\phi - \lambda] \quad (3.3)$$

donde f es el flujo de calor, h el coeficiente de transferencia de calor, ϕ la temperatura del medio con el cual el rodillo realiza el intercambio térmico y λ la temperatura del rodillo de trabajo.

Como se ha afirmado anteriormente, el fenómeno es periódico, por lo que es posible representar los diferentes medios a los que se somete el rodillo durante su laminación en series de Fourier.

$$f_{(\theta)} = h_{(\theta)} [\phi_{(\theta)} - \lambda_{(\theta)}] \quad (3.4)$$

$$f_{(\theta)} = \sum_{n=1} A_n \cos(n \theta) + B_n \text{sen}(n \theta) \quad (3.5)$$

$$h_{(\theta)} = P_o + \sum_{n=1} [P_n \cos(n \theta) + Q_n \text{sen}(n \theta)] \quad (3.6)$$

$$h_{(\theta)} \phi_{(\theta)} = C_o + \sum_{n=1} [C_n \cos(n \theta) + D_n \text{sen}(n \theta)] \quad (3.7)$$

$$\lambda_{(\theta)} = \bar{\lambda} + \sum_{n=1} \left[\frac{A_n - B_n}{\sqrt{2n}} \cos(n \theta) + \frac{A_n + B_n}{\sqrt{2n}} \text{sen}(n \theta) \right] \quad (3.8)$$

donde cada una de las expresiones son funciones que describen al flujo de calor ($f_{(\theta)}$), a los coeficientes de transferencia de calor en la periferia del rodillo ($h_{(\theta)}$) y a la temperaturas de los diferentes medios con los cuales el rodillo realiza el intercambio térmico ($\phi_{(\theta)}$); $h_{(\theta)}\phi_{(\theta)}$ describe el producto de los coeficientes de transferencia de calor y la temperatura del sector, finalmente la función $\lambda_{(\theta)}$ describe el perfil de temperatura en el rodillo de trabajo.

Los coeficientes C_o , C_n , D_n , P_o , P_n y Q_n se pueden determinar, puesto que es factible conocer el comportamiento de la temperatura de los diferentes medios que rodean al rodillo así como los coeficientes

de transferencia de calor y sólo se desconocen los coeficientes A_n y B_n de la serie que describen a la temperatura $\lambda_{(\theta)}$ y al flujo de calor $f_{(\theta)}$, por lo que el problema se reduce a la determinación de estos coeficientes a partir de las relaciones en series de Fourier anteriormente presentadas.

3.3.1 SALTOS.

Los cambios bruscos de temperaturas en la superficie "saltos" y su comportamiento al interior del rodillo se calculan aplicando el modelo anteriormente descrito; para ello, se inicia con la determinación de los coeficientes de la serie de Fourier (P_0 , P_n y Q_n) que describan a los coeficientes de transferencia de calor en los ocho sectores angulares en los que se divide la periferia del rodillo de trabajo (Fig. 3.1, condición a la frontera), se denomina a $h_{(\theta)}$ como la función de los coeficiente de transferencia de calor (la Fig. 3.2 es la $h_{(\theta)}$ en lo ocho sectores angulares), y se considera de valor constantes para cada sector angular regido por el mecanismo de convección o conducción.

El siguiente paso es determinar la función que describe el producto de las funciones $h_{(\theta)}\phi_{(\theta)}$, para lo cual se realiza el producto de los coeficientes de transferencia de calor ($h_{(\theta)}$), por la respectiva temperatura normalizada al medio que al que transmite ($\phi_{(\theta)}$), esta última se divide en tres zonas principales *i* zona de contacto rodillo-lámina, *ii* zona de contacto de los rodillos de trabajo y apoyo y *iii* las zonas de convección donde ϕ es nula por su definición. Una vez realizado estos productos se obtiene el perfil de $h_{(\theta)}\phi_{(\theta)}$, Fig. 3.3 y, como en el caso anterior, se determinan los coeficientes de la serie de Fourier de esta nueva función (C_0 , C_n y D_n). Realizado lo anterior, sólo resta el cálculo de los coeficientes A_n y B_n que describen la función de temperatura $\lambda_{(\theta)}$, Apéndice A1. La temperatura se calcula en forma normalizada por lo que es posible calcular el perfil de temperaturas en la dirección axial del rodillo considerando la variación de la temperatura a lo largo del ancho de la lámina de acero, bajo la combinación de coeficientes de transferencia de calor que caracteriza su posición axial.

Este modelo supone que la temperatura del planchón es constante durante el contacto, su longitud es infinita (tiempo de laminado igual a tiempo de servicio o campaña del rodillo) y la velocidad de laminación es constante, el modelo soporta la consideración de que la temperatura es variable la largo de la zona de deformación mas ésto no es significativo al fenómeno. Cabe remarcar que el comportamiento de coeficientes de transferencia de calor variable o constante en cada uno de los sectores angulares no

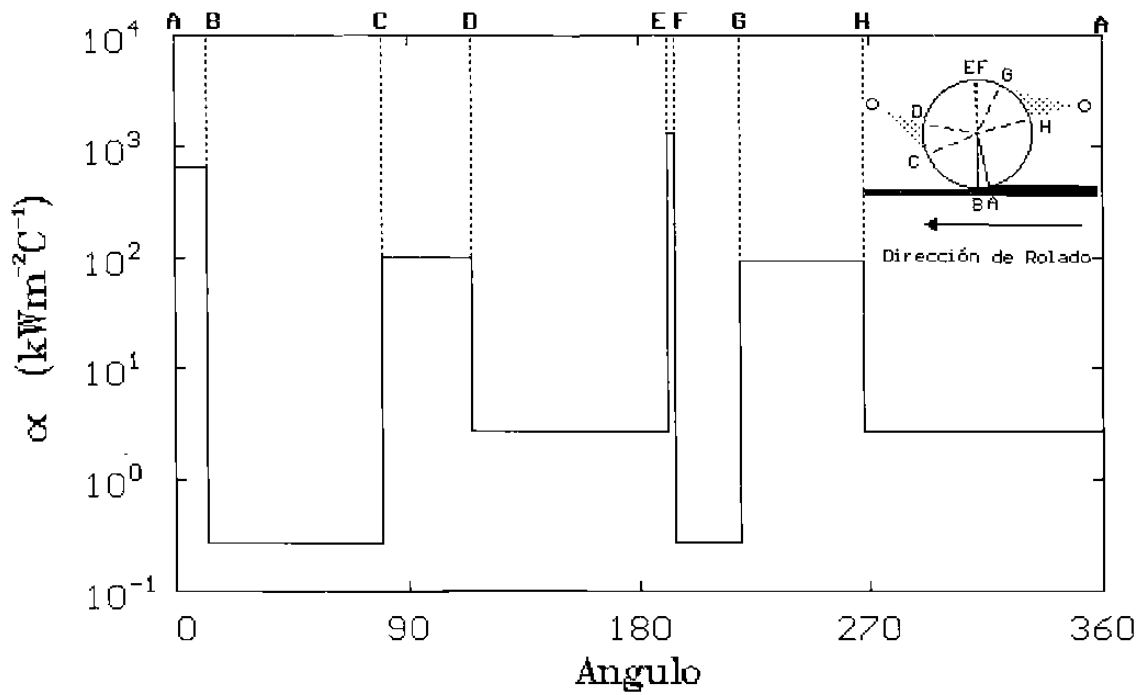


Fig. 3.2: Valor de $h_{(e)}$ en la frontera del rodillo.

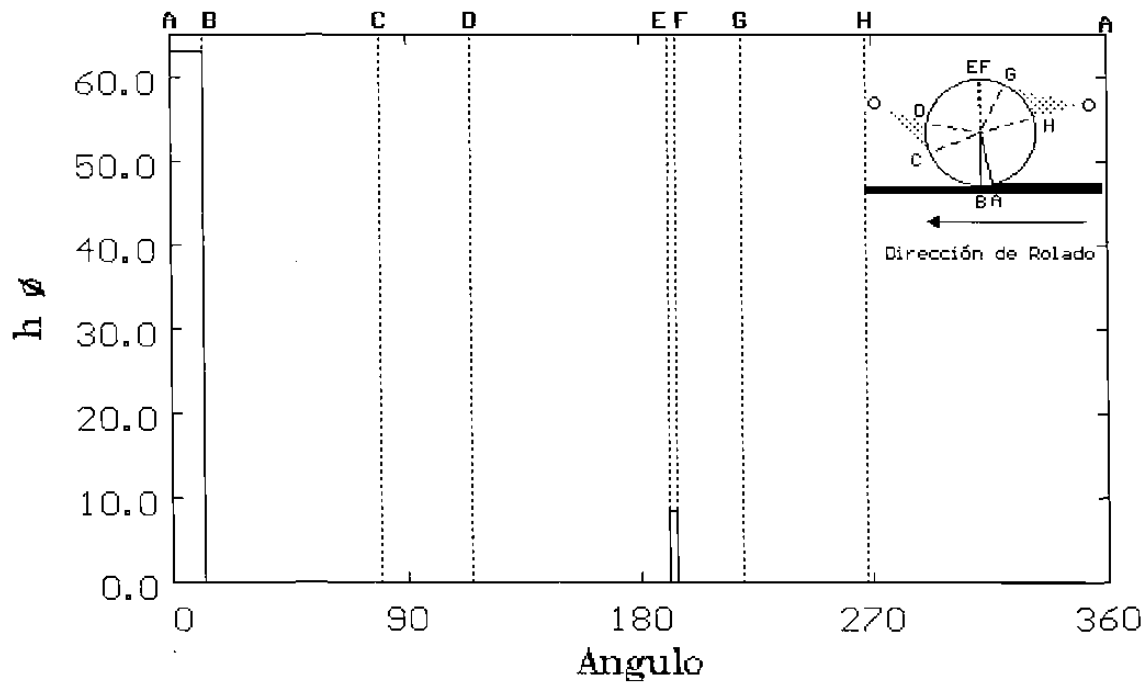


Fig. 3.3: Valor de $h_{(e)}\phi_{(e)}$ en la frontera del rodillo.

implica un problema realmente serio, puesto que quedan contemplados en la series de las funciones $h_{(\theta)}$ y $h_{(\theta)}\phi_{(\theta)}$.

3.3.2 EVOLUCION PERIODICA DE LA TEMPERATURA.

Aquí se considera el efecto térmico promedio causado por el paso periódico del planchón en los castillos durante el laminado e intervalo de descanso entre planchones iguales. La solución se obtiene siguiendo un procedimiento similar al caso anterior pero se distinguen dos estados; uno definido por la deformación del planchón y un segundo que representa la condición de espera del siguiente planchón en el cual únicamente se enfría el rodillo de trabajo.

Como en el caso anterior, el modelo inicia obteniendo la función $h_{(\theta)}$ de las dos regiones de transferencia antes mencionadas (Fig. 3.4), para ello se realiza primero el cálculo del valor medio del coeficiente de transferencia de calor en el rodillo durante el laminado y finalmente el valor medio del coeficiente de transferencia de calor durante el descanso, para obtener éstos se realiza la siguiente operación:

$$h_{(\theta_j)} = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^{i=8} h_{\theta_i} \theta_i \qquad h_{(\theta_j)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} h_{\theta_i} d\theta \qquad (3.9)$$

donde, $h_{(\theta_j)}$ con los valores numéricos de los coeficientes de transferencia de calor para cada uno de los sectores en los que se divide el rodillo ($i= 1, 2, \dots, 8$), $h_{(\theta_j)}$ son los coeficiente de transferencia de calor durante la deformación ($j=1$) y el descanso ($j=2$). Es importante señalar que aqui se utiliza la sumatoria pues se considera el coeficiente de transferencia constante, si se conose como cambia los coeficientes de transferencia de calor al paso de un mismo sector angular se recomienda utilizar la integral para el calculo de $h_{(\theta_j)}$.

Una vez definido el perfil de los coeficientes de transferencia de calor en dos regiones, se obtienen los coeficientes P_0 , P_n y Q_n de la serie para la función $h_{(\theta)}$. El siguiente paso es obtener la función del producto $h_{(\theta)}\phi_{(\theta)}$ (Fig. 3.5), a partir de la rampa de temperatura del planchón de punta a cola $\phi_{(\theta)}$ y realizando el producto de éste por el coeficiente de transferencia de calor promedio durante la deformación, $h_{(\theta_i=j)}$, en tanto que la contribución de la región sometida al enfriamiento es nula puesto que se considera a la temperatura ambiente como el cero lo que facilita la obtención los coeficientes C_0 , C_n y D_n de la serie.

Y, finalmente, se obtienen los coeficientes A_n y B_n para determinar el perfil de temperatura $\lambda_{(\theta)}$ durante el laminado de lingotes de longitud finita. La solución posee cualidades similares al caso anterior para la obtención del perfil de temperaturas bajo idénticos regímenes de enfriamiento sin la necesidad de realizar todo el cálculo para la variación axial de la temperatura del planchón.

3.3.3 CAMPAÑA DE LAMINACION.

Se da solución al cálculo de temperatura en el rodillo durante un programa común de laminación en la línea de producción de la planta, el tiempo de laminación e intervalos de descanso no poseen la uniformidad que se ha planteado en los casos anteriores, la modelación en este nivel se realiza considerando todos los intervalos de laminación y sus condiciones frontera para obtener la respuesta del rodillo a este estímulo durante su campaña. Existe la opción de simplificar el problema considerando intervalos en los que existan periodos de laminación uniformes separados por demoras mayores a las típicas.

La mecánica se realiza en forma similar a las anteriores. Se debe obtener la función $h_{(\theta)}$ (Fig. 3.6), de las diferentes regiones de transferencia de calor promedio del rodillo durante el laminado y durante el descanso para cada uno de los planchones; en realidad, estos coeficientes no cambian fuertemente, a menos que la lámina llegue fría al molino, situación que acontece alrededor del uno por ciento de las piezas a laminar durante una campaña típica. Los coeficientes P_0 , P_n y Q_n de la serie para la función $h_{(\theta)}$ durante la campaña se calculan para cada grupo de secuencias y su respectivo paro.

La función que describe el producto $h_{(\theta)}\phi_{(\theta)}$ (Fig. 3.7), se obtiene definiendo primero la rampa de temperatura de cada uno de los planchones de punta a cola o sus temperaturas promedio en cada uno de éstos y realizando el producto de cada perfil de temperatura de los planchones por su respectivo coeficiente de transferencia de calor promedio, al que se somete durante su deformación y, similarmente, la contribución de la región sometida al enfriamiento es nula. Una vez definido el comportamiento y valores numéricos de la función $h_{(\theta)}\phi_{(\theta)}$ es posible el cálculo de los coeficientes C_0 , C_n y D_n de su serie.

Se finaliza con la obtención de los coeficientes A_n y B_n para determinar el perfil de temperatura $\lambda_{(\theta)}$ durante el laminado de lingotes de longitud variable y finita con intervalos de descanso variable y finito.

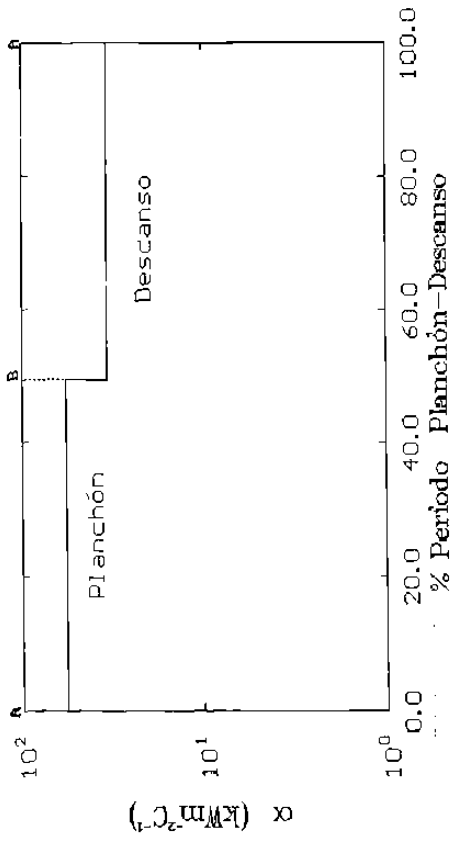


Fig. 3.4: $h_{(e)}$ durante y después de la deformación.

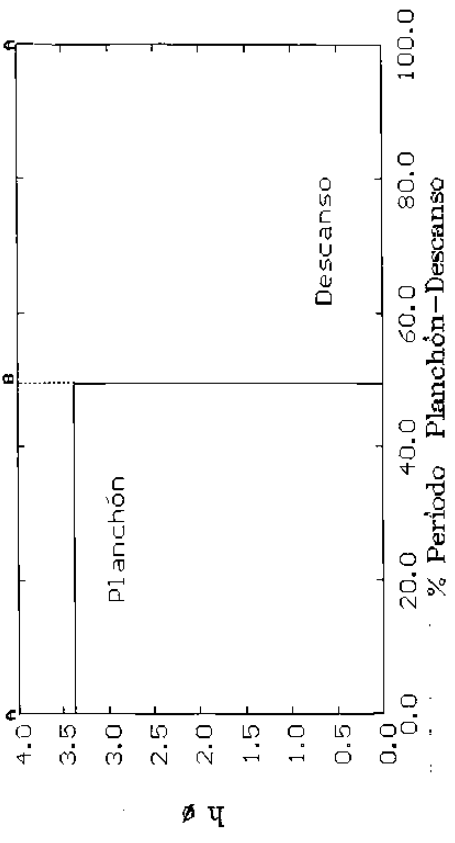


Fig. 3.5: $h_{(e)} \phi_{(e)}$ durante y después de la deformación.

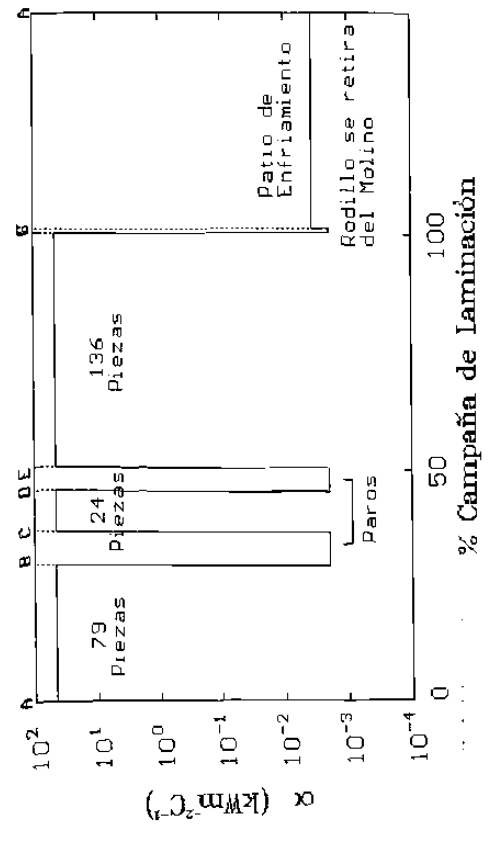


Fig. 3.6: $h_{(e)}$ durante y después de su campaña.

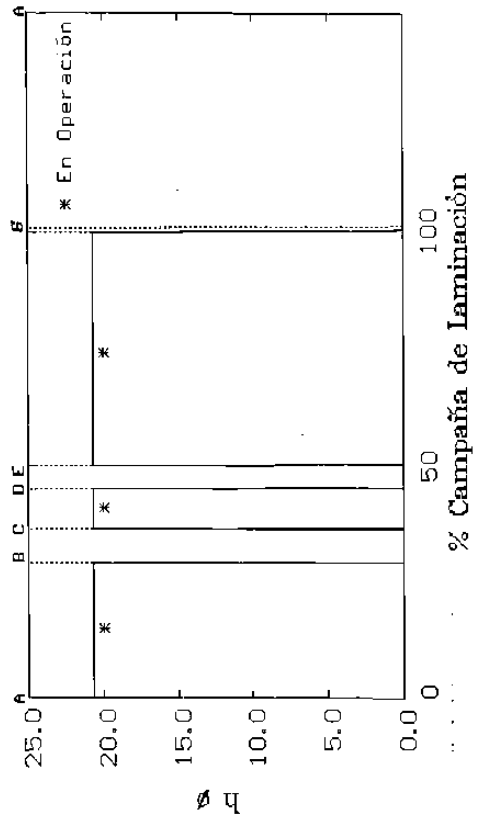


Fig. 3.7: $h_{(e)} \phi_{(e)}$ durante y después de su campaña.

3.4 SUPERPOSICION.

En cada uno de los tres niveles anteriores (salto, evolución periódica de la temperatura y campaña de laminación) se establece una serie de Fourier que describe la temperatura normalizada del rodillo de trabajo, sujeta a las condiciones de enfriamiento caracterizado por las boquillas (tipo, disposición y condiciones de operación).

De las tres series de Fourier obtenidas únicamente la serie que describe a la campaña de laminación conserva el término A_0 ó $\bar{\lambda}$ (Ec. 3.1) y es la portadora sobre la que se realizara la superposición de las series de Fourier requeridas para el calculo de la temperatura. Si se desea conocer el comportamiento de la temperatura en el rodillo durante toda la campaña se utiliza solo la serie portadora, pero si se desea conocer el efecto planchón descanso se hace uso de la serie portadora y la serie que describe a la evolución periódica de la temperatura y se superponen, finalmente si se desea el calculo de la temperatura a detalle giro a giro la superposición de las tres es necesaria.

4 RESULTADOS DE LA SIMULACION.

4.1 INTRODUCCION.

En los dos capítulos anteriores se dan las bases del simulador. En el capítulo dos, se planteó el problema a resolver y se realizó el análisis de los mecanismos de transferencia de calor involucrados en el calentamiento del rodillo de trabajo y, finalmente, en el capítulo tres se hizo la descripción del modelo matemático de transferencia de calor del simulador.

Es conveniente volver a señalar que, la simulación del perfil de temperatura en el rodillo de trabajo en cualquiera de los castillos del molino continuo de laminación en caliente se ejecutó respetando las condiciones de operación existentes en la línea de producción, así como el hecho que la experimentación se efectuó sin modificar en forma alguna el programa de producción de la línea en la planta.

En este capítulo se presentan las condiciones de operación en la línea de producción del molino de laminación así como los resultados arrojados por el simulador e información experimental recabada en forma automatizada y manual del molino.

4.2 CONDICION DE OPERACION.

Las condiciones de operación involucran el conocimiento de el sistema de enfriamiento, la velocidad de laminación, los porcentajes de reducción, la temperatura de la lámina de acero, las propiedades físicas de los rodillos de trabajo, así como de la lámina en turno, entre otros factores, para cada uno de los castillos del molino continuo.

Como se señaló en el capítulo dos (sección 2.8), el sistema de enfriamiento involucra desde la correcta elección y operación de las boquillas, mismas que tienen la función de aplicar el líquido refrigerante a la superficie del rodillo, así como su disposición geométrica de los cabezales que las portan, la Figura 2.22 y Tabla 2.3 presenta la disposición geométrica de los cabezales. En la planta se utilizan las boquillas del tipo Flat-Jet sus características se muestran en la Tabla 2.4 y su disposición en los cabezales

del molino continuo se muestra en la Figura 2.23.

La velocidad de laminación es en general variable durante el proceso de conformado. A este respecto la Figura 4.1 muestra el cambio de la velocidad en un mismo castillo al paso de un planchón, así como, el incremento de la velocidad de laminación de castillo a castillo conforme la pieza avanza por el molino (del castillo F1 al F6). Este cambio en la velocidad puede ser causa del ajuste del calibre de la lámina a su paso por el castillo en turno, más es posible considerar una velocidad media de laminación para cada castillo, puesto que la variación es pequeña. La segunda es monótonamente creciente y en relación directa con el porcentaje de deformación o reducción que la lámina sufre a su paso por el molino con la finalidad de obtener el calibre deseado.

La Figura 4.1, es una observación directa de la velocidad de una pieza a su paso por el molino, se efectúan cuatro lecturas a cada castillo del molino en operación por el sistema automático de la línea, la lectura se realiza en todas las piezas que transitan por el molino.

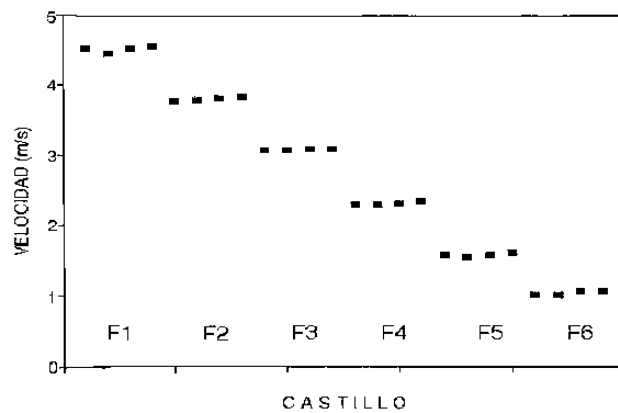


Fig. 4.1: Velocidad tangencial del rodillo de trabajo en ms^{-1} para cada castillo.

La temperatura del planchón es otro factor variable durante la laminación, estos cambios son tanto a lo largo y ancho del

mismo, situación que es confirmada por la Figura 4.2, que muestra el perfil de temperatura a lo largo del planchón, la lectura fue realizada en la línea de laminación por los pirómetros instalados a la entrada y salida del molino continuo, así como a la entrada del enrollador, la lectura de esta información se realiza en forma automática para cada uno de los planchones que se laminan en el molino. Las Figuras 4.1 y 4.2 muestran información para un planchón identificado por su número de secuencia. El simulador **A2_JPH.F** (Apéndice **A2**) hace uso de esta y otra información para reproducir el fenómeno de transferencia de calor al que se somete el rodillo durante su campaña.

La verificación de los resultados arrojados por el simulador en forma directa y a tiempo real durante su campaña quedan fuera de los alcances de los sistemas automáticos en planta, así como de los sistemas de instrumentación conocidos, tanto por las condiciones de operación existentes como por el tipo



TEMPERATURAS

SECUENCIA: 24744

ACERO: 1081

ANCHO: 37.5"

CALIBRE: 100

Proceso: 9

Cabezales: 1 3 4 5 6 7 8 9

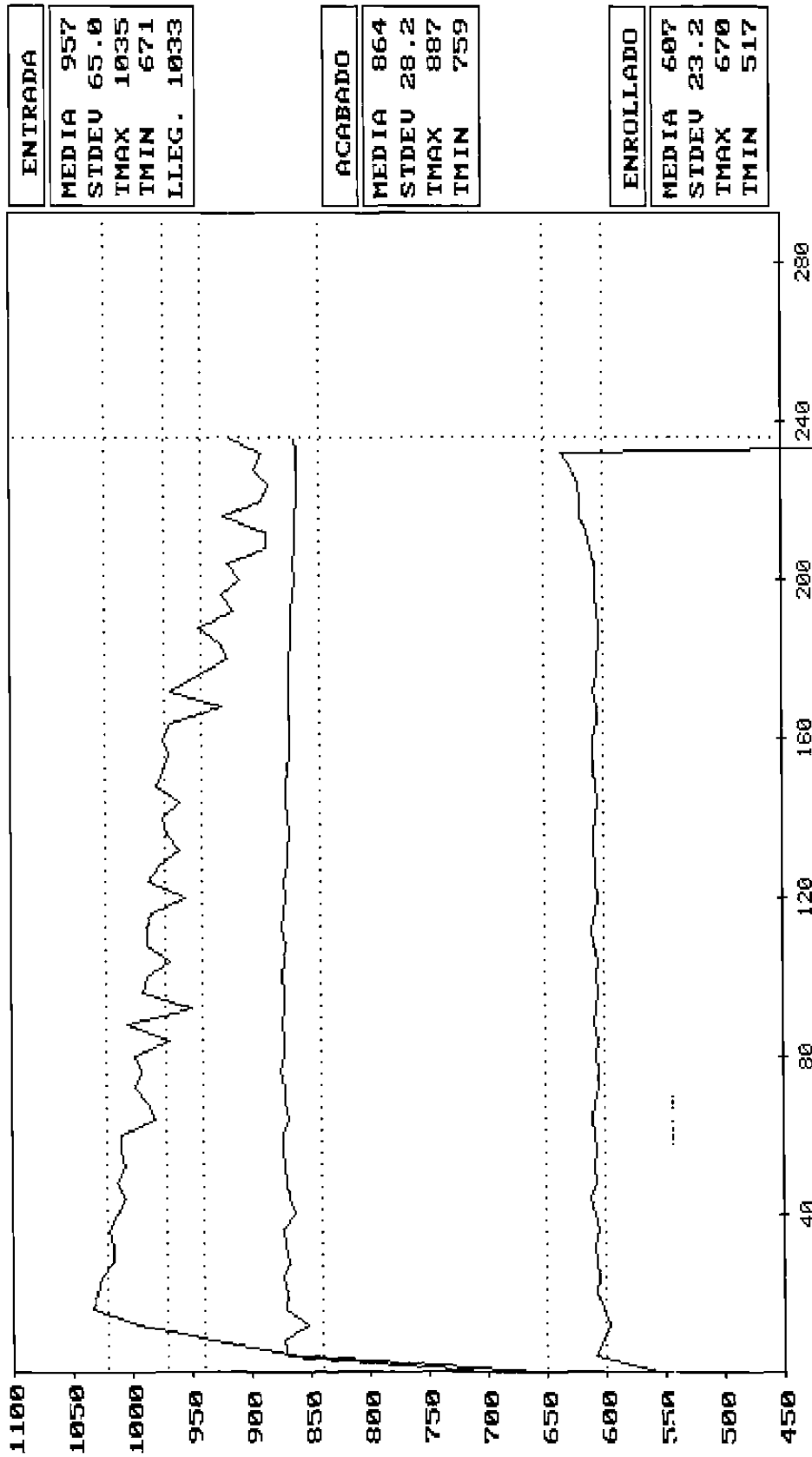


Fig. 4.2: Perfil de temperaturas de la pieza a su entrada y salida del molino y a su salida de la mesa de enfriamiento (de mayor a menor respectivamente).

de información que se desea (temperatura del rodillo de trabajo en operación). Esto implica el desarrollo de nuevos instrumentos y técnicas alternativas. Stevens y coautores [27] realizaron un esfuerzo respecto a la verificación del perfil de temperatura en el rodillo de trabajo de un molino de pruebas instrumentado, mas sólo lograron obtener información del primer giro y a una velocidad muy baja (0.1 ms^{-1}), puesto que el rodillo no continuó operando. Sin embargo, es posible realizar la verificación del perfil por la medición de la evolución térmica del rodillo al término de su campaña, así como, por el comportamiento esperado a las condiciones de operación conocidas por experiencia en planta y a su comparación con otros estudios.

La Tabla 4.1 presenta información de los valores numéricos promedio de las propiedades física de la película de óxido, rodillo de trabajo [78], rodillo de apoyo [79] (castillos **F1** a **F6**) y de un acero con 0.1 %C, que están directamente vinculados con los parámetros de operación del molino bajo los cuales se realiza la simulación.

Propiedades	Oxido (FeO)	Rodillo de Trabajo			Rodillo de Apoyo	Cinta	Unidades
		C A M I S A F1...F3	NODULO F4...F6	F1...F6			
Conductividad K	2.51	17.96	18.46	24.20	33.70	46.10	$\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$
Densidad ρ	5728.00	7581.00	7400.00	7028.00	7137.00	7850.00	Kg m^{-3}
Calor Específico C_p	113.40	463.00	470.00	520.00	476.00	494.00	$\text{J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Difusividad κ	3.86	5.19	5.31	6.62	9.90	11.87	$10^{-6}\text{m}^2\text{s}^{-1}$

Tabla 4.1: Propiedades físicas de la película de óxido, cinta de acero (0.1%C), el rodillo de trabajo y de apoyo.

La capa de óxido formada en la superficie del planchón es de tres tipos [62, 80] FeO, Fe₃O₄ y Fe₂O₃ (wustita, magnetita y hematita), es de interés particular la resistencia térmica que esta película de óxido ofrece, por lo que se considera sólo el efecto causado por la Wustita por ser la más abundante (constituye del 92% a 95% del óxido formado) y termodinámicamente el más estable durante la laminación. Si se desea en forma rigurosa las propiedades físicas del óxido compuesto, es posible aplicar la regla de mezclas [81] para materiales compuestos, dado que la morfología en la que se distribuye los óxidos es estratificada o capas laminares, tal y como lo muestra la Figura 4.3. La magnetita y la hematita sólo

constituyen del 2% al 8% del espesor de óxido, una mayor información al respecto se presenta en la literatura especializada [2, 62, 80, 82-85, 86].

La velocidad con la que pasa la pieza por el castillo, temperatura de la pieza a laminar y ángulo de mordida en el rodillo, como se mencionó anteriormente, varían de castillo a castillo y de una pieza a deformar a otra, esta información es recabada en forma directa o indirecta por los sensores en instrumentados en el molino y almacenada en archivos que contienen toda la información de lo realizado durante un día completo, además existe información recabada en forma manual, pero realizada como parte del proceso referente a desviaciones, paros o demoras en la línea.

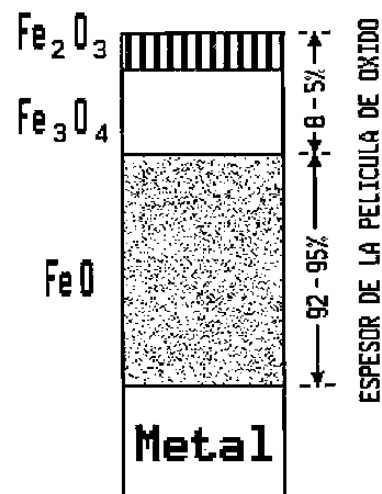


Fig. 4.3: Disposición del óxido formado.

4.3 RECOLECCION DE DATOS EXPERIMENTALES.

De lo anterior se advierte que el proceso de laminación en caliente es un proceso dinámico, esto complica aun más el describir y simular el fenómeno y hace necesario el seguimiento de las variaciones en la operación, por lo que se debe realizar una recolección de datos experimentales recabados en forma automática y manual en la planta industrial, para conformar una base de datos de la línea de molinos calientes, con el objetivo de cuantificar estos cambios y realizar la simulación del perfil de temperatura del rodillo de trabajo, sujeta a las condiciones de operación existentes durante una campaña típica.

El simulador involucra básicamente dos partes, la primera corresponde al ingreso de la información requerida y es supeeditada a las condiciones de operación (misma que es presentada y utilizada en la siguiente sección), la segunda presenta la salida de los resultados o respuesta del simulador sujeta a la naturaleza del fenómeno, la Figura 4.4 muestra un esquema de éstas dos partes siendo en esencia el simulador transparente al usuario. La respuesta del simulador bajo las condiciones de operación deben de ser corroborada mediante la observaciones y medición específicas al ente de particular interés (rodillo de trabajo).

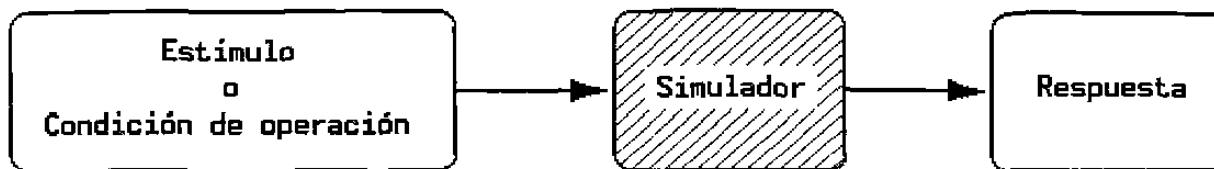


Fig. 4.4 Esquema estímulo respuesta a través del simulador.

4.3.1 CAPTURA AUTOMÁTICA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

A continuación se describe la obtención y uso de la información experimental del molino continuo de laminación en caliente. La información se recaba en forma automática y es recogida mediante pirómetros ópticos colocados a la entrada y salida del molino (Fig. 4.2), celdas de carga, amperímetros, rayos x, que permiten la toma de datos o información tales como las presentadas en las Figuras 4.1 y 4.2. Más esta es sólo parte de la información que conforma a la base de datos del molino, que se detalla en la Tabla 4.2, como parte de la información que el sistema automático recoge. De todos estos datos, son de gran importancia para el objetivo del presente trabajo las lecturas de la temperatura en el planchón a la entrada del molino, la velocidad de laminación, la carga que se aplican en cada castillo, la hora de ingreso al molino, el tipo de acero, la longitud, ancho y calibre de salida de la lámina, con los cuales es posible obtener información no contenida en el molino como el tiempo de contacto de un punto en la superficie del rodillo de trabajo con la lámina, el ángulo de mordida en cada castillo, el tiempo empleado por la pieza para pasar por un castillo y el tiempo de espera para el ingreso de la siguiente.

La información recogida por el sistema automático del molino es almacenada en archivos etiquetados por el año, mes y día con extensión "sec" (ejemplo: 930130.SEC), este archivo es traducido a un archivo en modo texto por programa A1_JPH.C (Apéndice A2.2), o utilizado por el programa GRC.C. Este último, desarrollado en la planta industrial, presenta la información en forma gráfica en tres pantallas (una de ellas se mostró en la Figura 4.2 las dos restantes se muestran en las Figuras 4.5 y 4.6). Es importante señalar que las figuras se exponen tal y como se usan en la planta, y no se encuentran sujetas a un sistema específico de unidades (SI, CGS o INGLES).

La Figura 4.2, muestra el perfil de temperatura de la pieza en tres puntos estratégicos del molino: la temperatura a la entrada del molino o ingreso de la pieza al castillo **F1**, la temperatura a la salida de molino (castillo **F6**) y, finalmente, a la entrada del enrollador después de haber pasado por la mesa de enfriamiento. En todos los casos la figura, muestra a la derecha tres celdas con la información estadística (temperatura media, desviación estándar, máxima y mínima) y la temperatura de llegada. El perfil de temperatura es conformado por un máximo de ochenta lecturas realizadas a lo largo de la pieza, además da información del tipo de acero, ancho, calibre final y el número de secuencia (de control en planta). Como se señaló anteriormente, aun cuando el perfil de temperatura es variable es posible realizar la modelación con el uso de una temperatura promedio o el ajuste a una rampa de temperatura lineal si así se desea. El modelo matemático contempla la condición de temperatura variable y soluciona el problema con la normalización del perfil de temperaturas, con lo cual es posible obtener el perfil con todos sus cambios en la superficie de la pieza o con el ajuste promedio de su comportamiento a una rampa de temperatura. Por lo que ofrece una ventaja si se desea contemplar el efecto directo de una temperatura variable en la pieza a deformar, como ocurre y lo demuestran las lecturas en planta y presentadas en las Figuras 4.7 a 4.10 para cuatro diferentes piezas deformadas.

La Figura 4.5 muestra las desviaciones del calibre y ancho de la lámina a la salida del molino con respecto a los valores nominales, en la parte inferior de la figura se muestra la fecha y hora de ingreso, longitud final del rollo y número y separación entre las de lecturas realizadas, en tanto que en su parte superior se muestra el ancho y calibre objetivo y el tipo de acero según la nomenclatura de la planta, declarándose la aceptación o rechazo de la pieza final.

Finalmente, la Figura 4.6 muestra cuatro gráficas referentes a las fuerzas aplicadas (Ton.), posición de torniquetes (milesimas), corriente (porcentaje referido al nominal del motor) y velocidad de giro de los rodillos de trabajo (ft min^{-1}). En cada una de éstas se muestran las cuatro lecturas realizadas por castillo (**F1 ... F6**).

Para la obtención de los resultados del simulador (perfil de temperatura del rodillo de trabajo), se hace uso de tres programas; el primero recopila la información de las condiciones de operación, el segundo realiza el postproceso matemático (propriadamente es el simulador) y el último el postproceso gráfico. Dichos programas se denominan: **A1_JPH.C**, **A2_JPH.F** y **A3_JPH.PAS** (Apéndice A2), y se encuentran escritos en lenguaje C++, Fortran y Turbo Pascal respectivamente.

DATO INFORMACION QUE ALMACENA

DATO INFORMACION QUE ALMACENA

fecha	Indica el año/mes/día.	temp_ent_nm	Lectura de temperatura (°C) mínima registrada a la entrada al castillo F1.
hora	Hora a la que el planchón ingresa al molino.	temp_acabado(80)	Vector de temperatura (°C) a lo largo de la lámina a la salida del castillo F6.
acero	Tipo de acero, bajo la nomenclatura de la planta.	temp_aca_pr	Temperatura (°C) promedio de la lámina a su salida del castillo F6.
temp_agua	Temperatura del agua (°C).	temp_aca_stdv	Desviación estándar de la temperatura de la lámina (°C) a su salida del castillo F6.
muestras	Número de lecturas realizadas al planchón.	temp_aca_mx	Lectura de temperatura (°C) máxima registrada a la salida del castillo F6.
distancia_muestras	Longitud de espaciamiento longitudinal entre una lectura y otra (m.).	temp_aca_nm	Lectura de temperatura (°C) mínima registrada a la salida del castillo F6.
ancho	Ancho de salida que se desea en la lámina (pulg.).	temp_enrollado(80)	Vector de temperatura (°C) a lo largo de la lámina a la entrada al enrollador.
g_ancho(80)	Datos de un número de lecturas (max. 80) del ancho de la lámina, permite conocer la variación del ancho a lo largo de la lámina (pulg.).	temp_ent_pr	Temperatura (°C) promedio de la lámina a la entrada al enrollador.
calibre	Calibre de la lámina que se desea (milésimas de pulg.).	temp_ent_stdv	Desviación estándar de la temperatura (°C) a la entrada al enrollador.
promedio_calibre	Calibre promedio (milésimas de pulg.).	temp_ent_mx	Lectura de temperatura (°C) máxima registrada a la entrada al enrollador.
stdev_calibre	Desviación estándar del calibre (milésimas de pulg.).	temp_ent_nm	Lectura de temperatura (°C) mínima registrada a la entrada al enrollador.
calibre_punta(10)	Vector de la lectura de las primeras 10 lecturas del calibre.	fuerza(4)(6)	Vector de las fuerzas (Ton.) aplicada en cada uno de los castillos -F1 a F6-, realizando cuatro lecturas en cada castillo durante el paso de la cinta.
calibre_cola(10)	Vector de la lectura de las últimas 10 lecturas del calibre.	velocid(4)(6)	Vector de las velocidades tangencial de rodillo (ft. min ⁻¹) en cada uno de los castillos, almacenado cuatro lecturas para cada castillo al paso de la cinta.
porcentaje_en_calibre	Porcentaje alcanzado a lo largo de la lámina con respecto del calibre deseado.	Diámetro 1	Diámetro (pulg.) de los rodillos de tabajo en el castillo F1.
temp_llegada	Primera lectura de temperatura (°C) de la lámina a su llegada al molino, ingrese inmediatamente o no.	Diámetro 2	Diámetro (pulg.) de los rodillos de tabajo en el castillo F2.
temp_mordida	Temperatura (°C) registrada al momento que el planchón es mordido por los rodillos de tabajo del castillo F1.	Diámetro 3	Diámetro (pulg.) de los rodillos de tabajo en el castillo F3.
temp_entrada(80)	Vector de temperatura (°C) a lo largo del planchón a la entrada al castillo F1.	Diámetro 4	Diámetro (pulg.) de los rodillos de tabajo en el castillo F4.
temp_ent_pr	Temperatura (°C) promedio del planchón a su entrada al castillo F1.	Diámetro 5	Diámetro (pulg.) de los rodillos de tabajo en el castillo F5.
temp_ent_stdv	Desviación estándar de la temperatura del planchón (°C) a la entrada al castillo F1.	Diámetro 6	Diámetro (pulg.) de los rodillos de tabajo en el castillo F6.
temp_ent_mx	Lectura de temperatura (°C) máxima registrada a la entrada al castillo F1.		

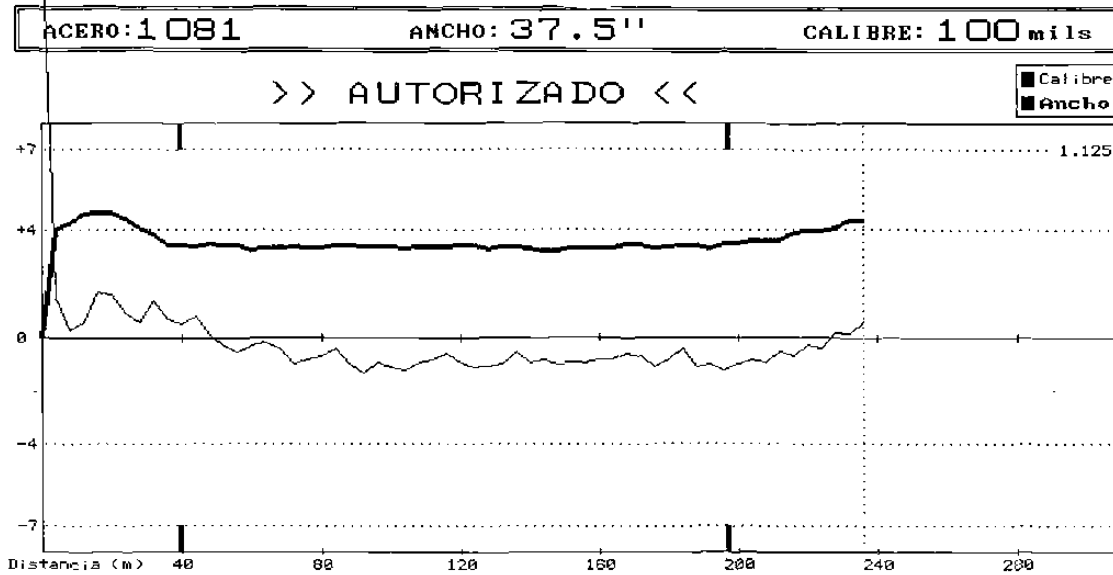
NOTA: Esta es sólo parte de la información que es manejada por los R6C-C y A1_JPH.C programas en lenguaje C++ contenidos en el Apéndice A2.2 y A2.3

Tabla. 4.2: Nomenclatura utilizada para la información recogida y almacenada en forma automatizada en el molino de laminación en caliente.



DIMENSIONES DEL PRODUCTO

SECUENCIA: 24744



Fecha: 30/01/93 Hora: 07:56:42 Proceso: 9

Xprom = 99.557 Rollo en Calibre = 98% Longitud del Rollo = 236 m

STDEV = 2.3841 Dist. entre Muestras = 4 m N#mero de Muestras = 60

Fig. 4.5: Perfil del calibre (línea fina) y ancho (línea gruesa) de la lamina a la salida del molino.



CARGAS

SECUENCIA: 24744

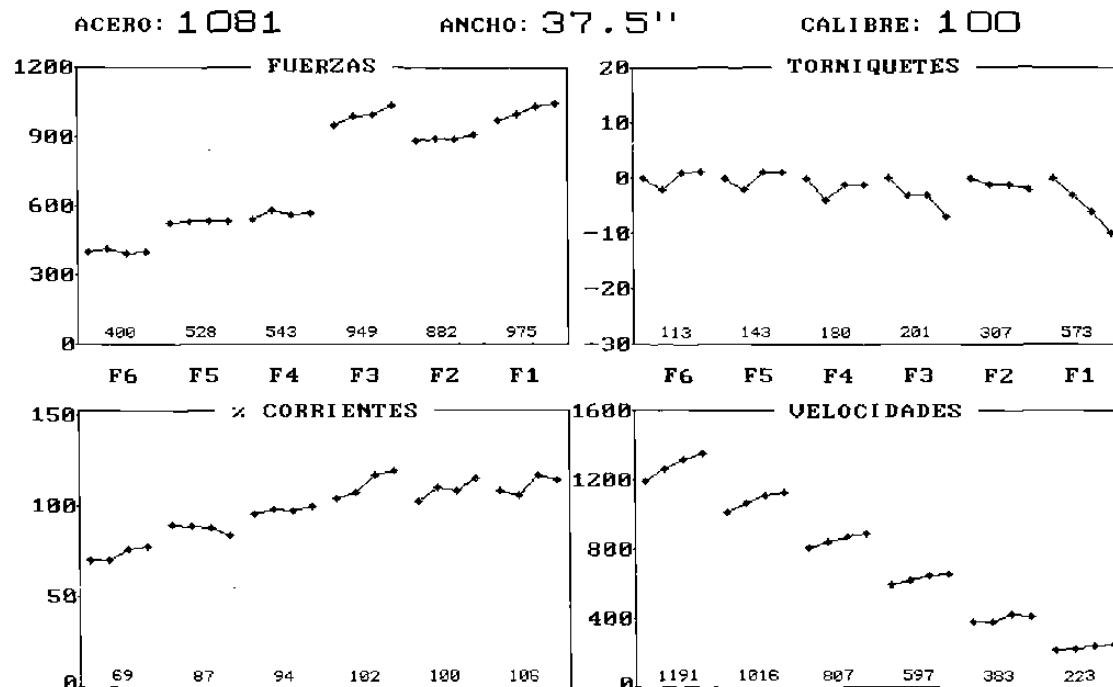


Fig. 4.6: Gráficas de control para los seis castillos del molino continuo.

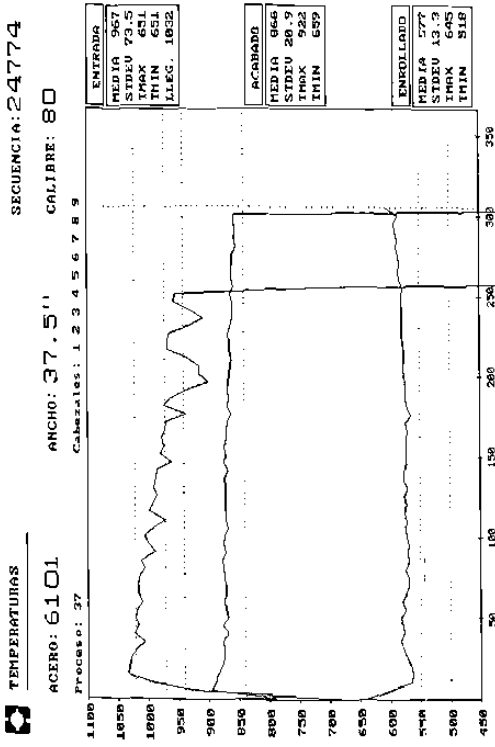


Fig. 4.7: Perfil de temperatura de la pieza No. 55 -tren I.

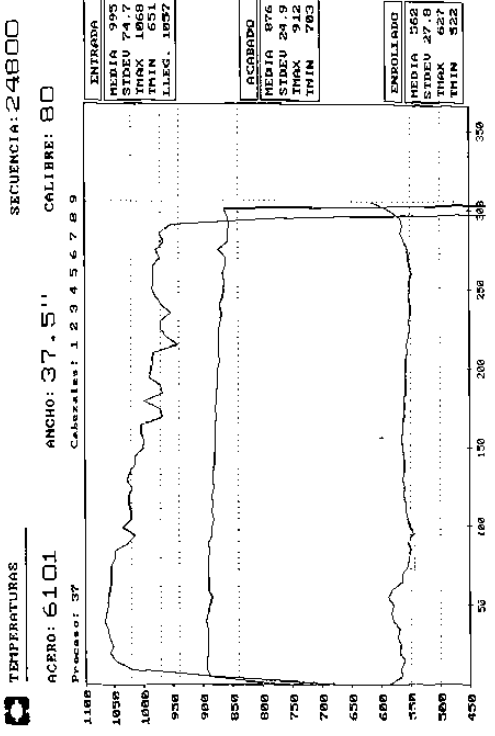


Fig. 4.8: Perfil de temperatura de la pieza No. 81 -tren II.

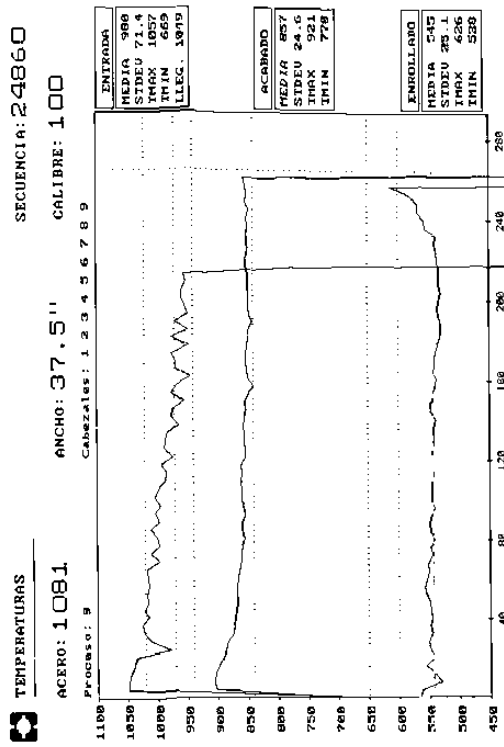


Fig. 4.9: Perfil de temperatura de la pieza No. 141 -tren III.

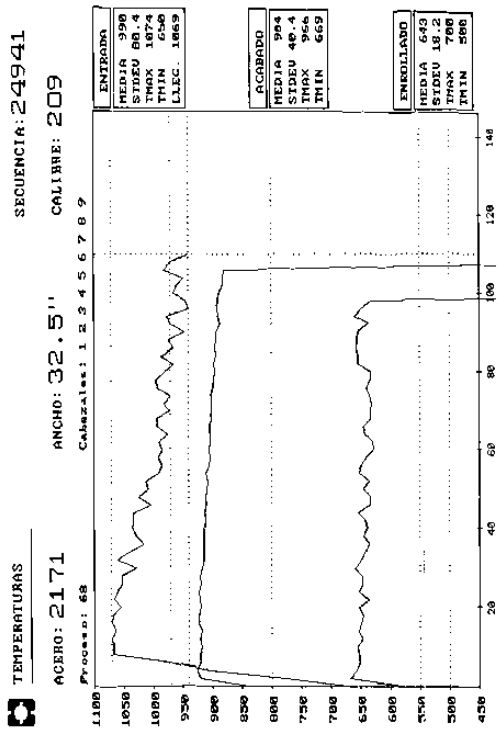


Fig. 4.10: Perfil de temperatura de la pieza No. 222 -tren III.

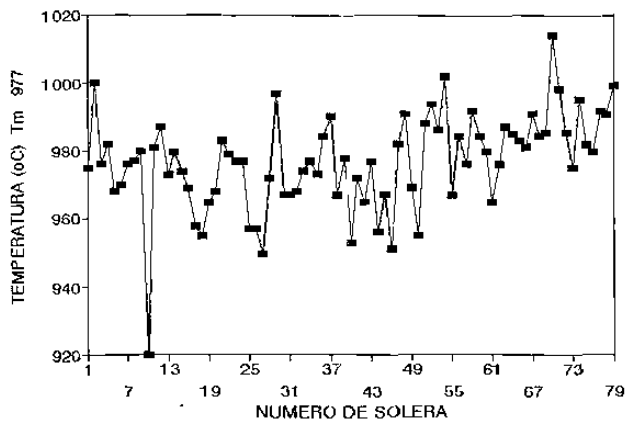
El programa **A1_JPH.C** (Apéndice **A2.2**), traduce información contenida en los archivos "*.SEC", ver Tabla 4.2, a un archivo "*.TXT" o modo texto, el cual contiene la información de las condiciones de operación en el tren continuo de laminación de interés, ver Tabla 4.3 (realizando algunas operaciones para conocer información que no está en forma explícita). En el Apéndice **A3** se muestra parte de la información anteriormente mencionada para cada una de docientos treinta y nueve piezas que constituyeron la campaña de laminación del día 30 de Enero de 1993, mismas que fueron registradas en la planta por los números secuenciales 24720 al 24958, dicha campaña se inició iniciada a las 7:25:04 hs. y terminó a las 13:57:44 hs. Durante esta campaña sólo se realizaron dos paros, uno por una demora debida al cambio de rodillos de trabajo en el castillo **F3** a las 9:18:16 hs, con una duración de aproximadamente veintiocho minutos, y un segundo paro programado para el cambio rutinario de los rodillos de trabajo en los tres últimos castillos (**F4** a **F6**), con una duración de veinte minutos aproximadamente. La Tabla 4.3, presenta un resumen de los valores promedios de las condiciones de operación en el molino continuo de laminación y se realiza una separación de dichas condiciones en tres series (secuencias periódicas) de laminación que se caracterizan por tener tiempos de descanso de alrededor de cuarenta y cinco segundos; también se realiza el ajuste de los datos bajo la consideración de que no existiese paro o demora alguna, se indican los números de secuencia que limitan a cada serie en relación directa con el Apéndice **A3**, en este último se dan los valores numéricos de cada pieza durante la campaña antes mencionada.

El resumen los datos experimentales presentados en la Tabla 4.3 se relaciona directamente con las Figuras 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14, en las que se vacía la información del Apéndice **A3** en forma gráfica.

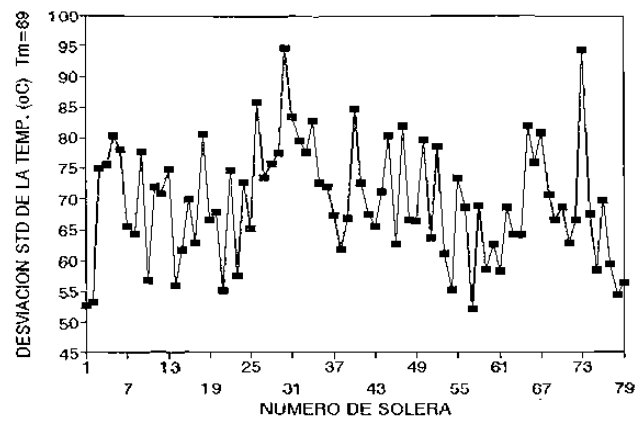
El programa **A2_JPH.F** (Apéndice **A2.3**), es propiamente el simulador, que alimentado por la información de las condiciones de operación y la naturaleza del fenómeno que se desea simular, realiza los cálculos, el resultado se graba en archivo "*.COF", que es posteriormente utilizado por el programa **A3_JPH.PAS** (Apéndice **A2.4**), el cual realiza el postproceso gráfico de los perfiles de temperatura en el rodillo de trabajo, como oportunamente se mostrará en las secciones 4.4, 4.5 y 4.6.

TREN/ piezas/ secuencias	VALORES ESTADISTICOS	TEMPERATURA PIEZA (°C)	STD TEMPERATURA (°C)	ANGULO MORDIDA F1 (°)	ANGULO APOYO F1 (°)	TIEMPO LAMINADO (s)	TIEMPO DESCANSO (s)	LONG. DE F1 (m)	VELOCIDAD F1 (ms ⁻¹)	ANCHO (m)
I 79 24720 a 24798	V. MINIMO	920	52	11.6	2.7	33	14	38.4	1.02	0.95
	V. MAXIMO	1014	95	13.4	2.9	50	283	53.1	1.22	0.95
	V. MEDIO	977	69	12.8	2.8	41	46	46.1	1.14	0.95
	DESVIACION STD	14	9	0.5	0.0	4	33	3.9	0.05	0.00
	VER LA FIGURA	4.11a	4.11a'	4.12a	4.12a'	4.13a	4.13a'	4.14a	4.14a'	
II 24 24799 a 24822	V. MINIMO	961	55	13.1	2.7	35	15	37.6	1.09	0.95
	V. MAXIMO	1017	94	13.4	2.9	50	138	55.4	1.15	0.95
	V. MEDIO	989	70	13.3	2.8	44	42	49.1	1.10	0.95
	DESVIACION STD	15	11	0.1	0.0	4	25	4.9	0.01	0.00
	VER LA FIGURA	4.11b	4.11b'	4.12b	4.12b'	4.13b	4.13b'	4.14b	4.14b'	
III 136 24823 a 24958	V. MINIMO	940	47	10.7	2.3	33	20	34.5	0.79	0.83
	V. MAXIMO	1019	97	12.9	3.2	51	289	50.5	1.13	0.95
	V. MEDIO	981	70	12.3	2.8	44	43	43.6	0.99	0.93
	DESVIACION STD	17	10	0.5	0.1	3	30	3.5	0.06	0.04
	VER LA FIGURA	4.11c	4.11c'	4.12c	4.12c'	4.13c	4.13c'	4.14c	4.14c'	
TOTAL 239 24720 a 24958	V. MINIMO	920	47	10.7	2.3	33	14	34.5	0.79	0.83
V. MAXIMO	1019	97	13.4	3.1	51	289	55.4	1.21	0.95	
V. MEDIO	980	70	12.6	2.8	43	44	45.0	1.05	0.94	
DESVIACION STD	16	10	0.5	0.1	4	30	4.2	0.09	0.03	

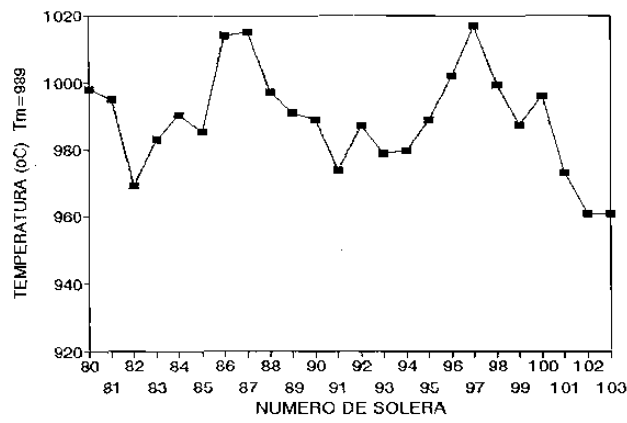
Tabla 4.3: Datos de operación promedio durante la campaña realizada para las secuencias 24720 a 24958 para el castillo F1.



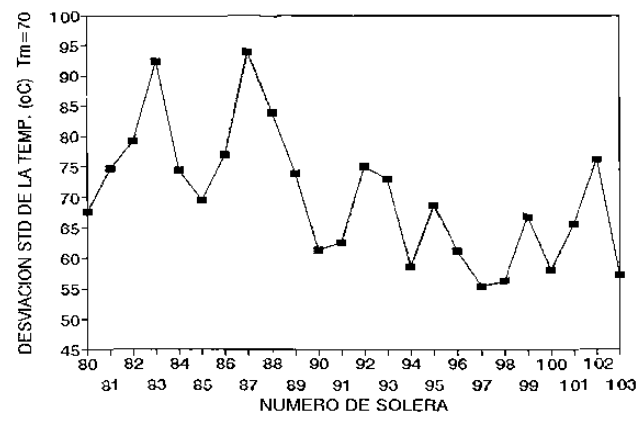
a)



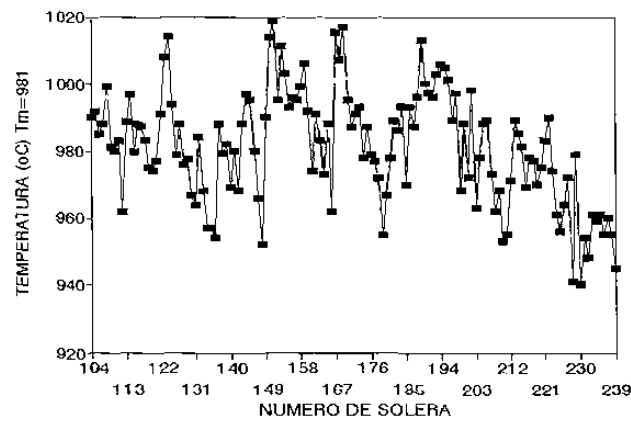
a')



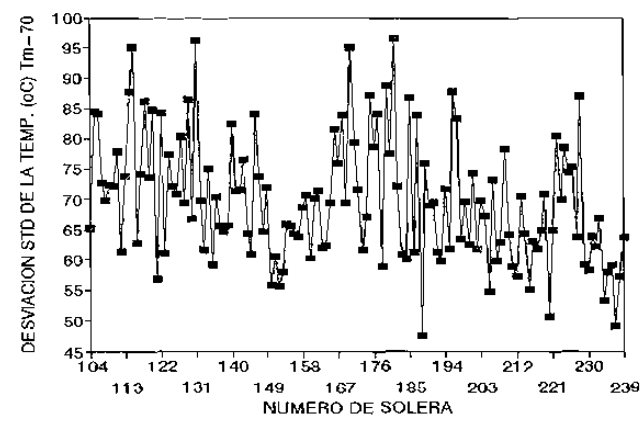
b)



b')

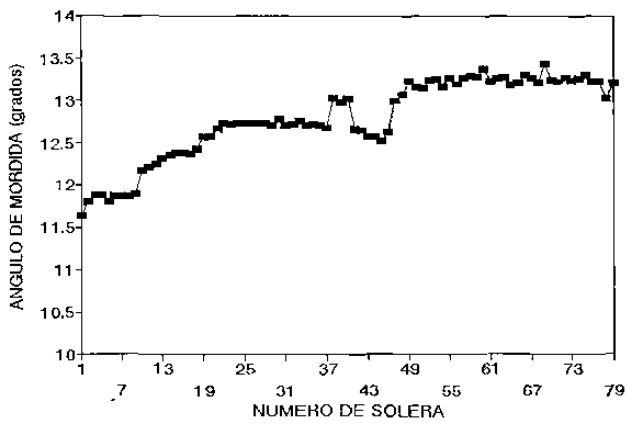


c)

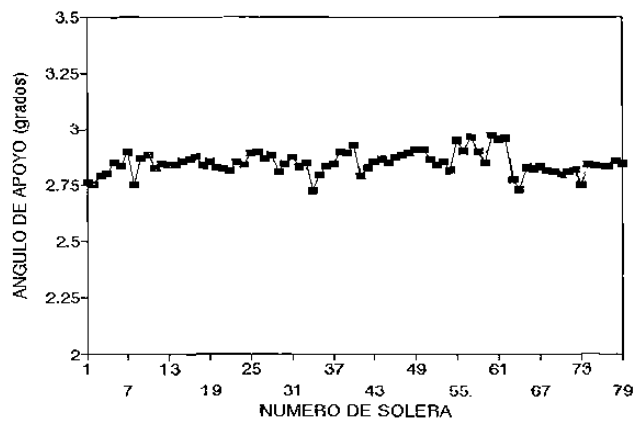


c')

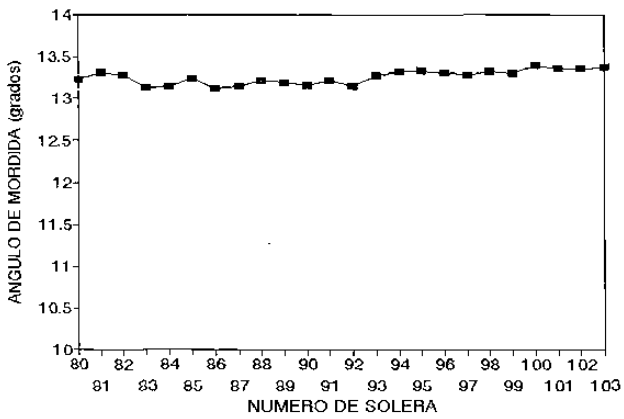
Fig. 4.11: Temperatura media (a, b y c) y desviación estandar de la temperatura (a', b' y c') para cada una de las solera (secuencias 24720 a 24958) a la entrada de castillo F1 separado en tres trenes



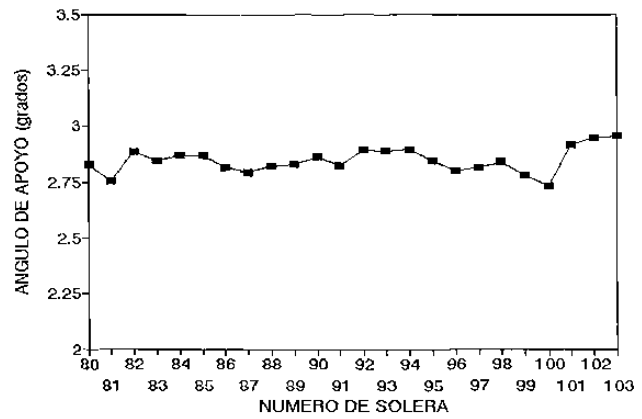
a)



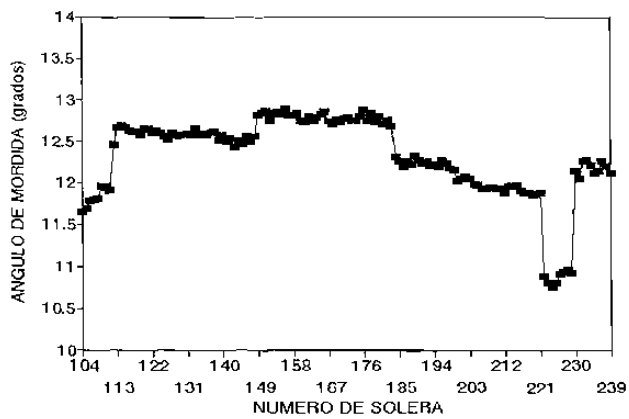
a')



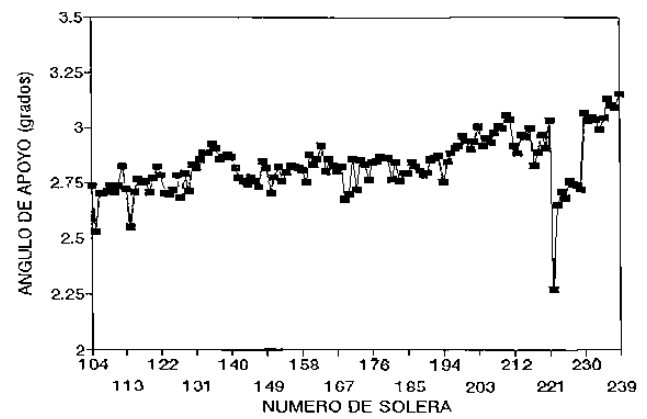
b)



b')

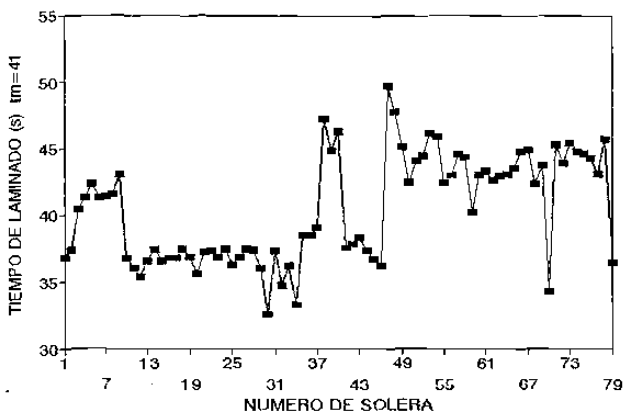


c)

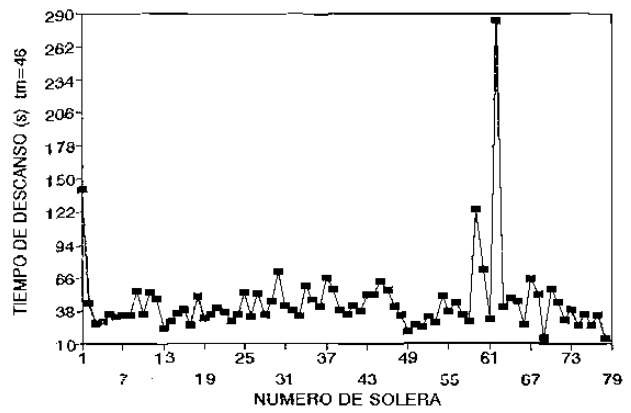


c')

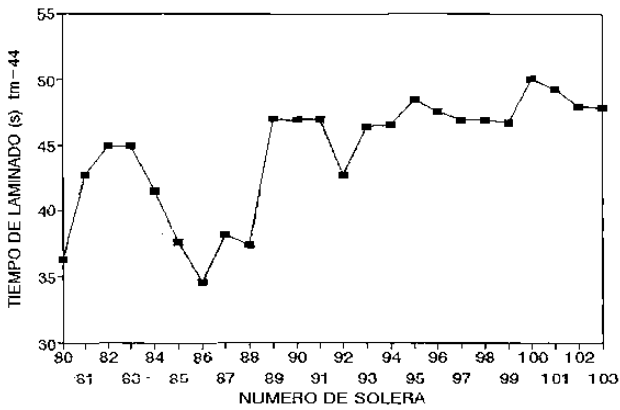
Fig. 4.12: Valores medios de los ángulos de mordida -zona de deformación- (a, b y c) y de apoyo -contacto rodillo de trabajo y de apoyo- (a', b' y c') para cada una de las solera (secuencias 24720 a 24958) a la entrada de castillo F1 separado en tres trenes



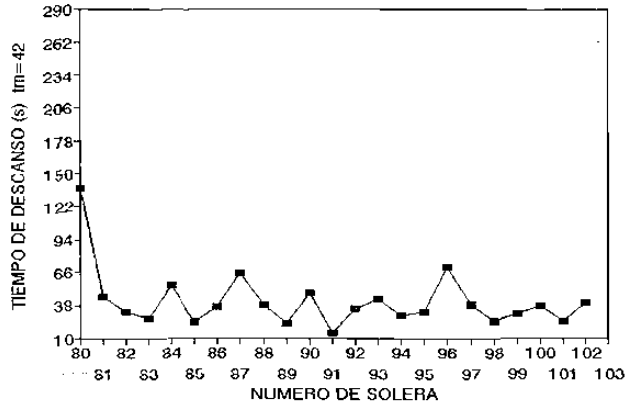
a)



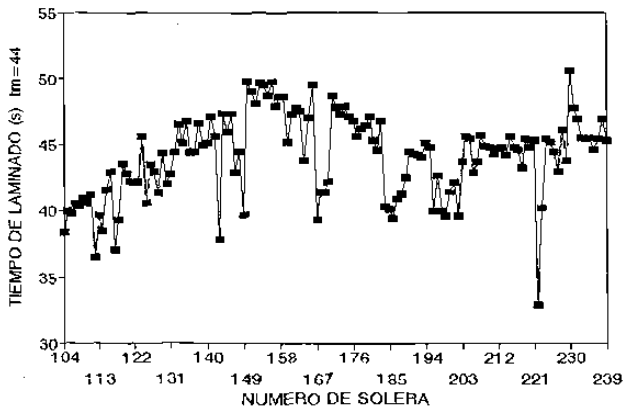
a')



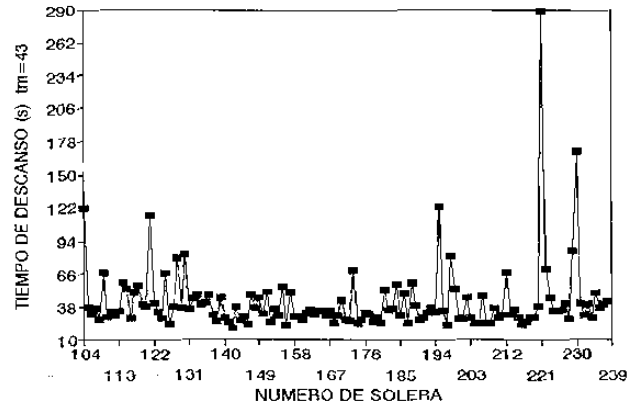
b)



b')

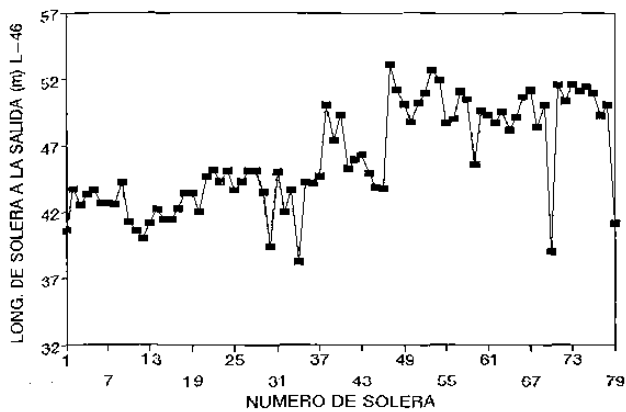


c)

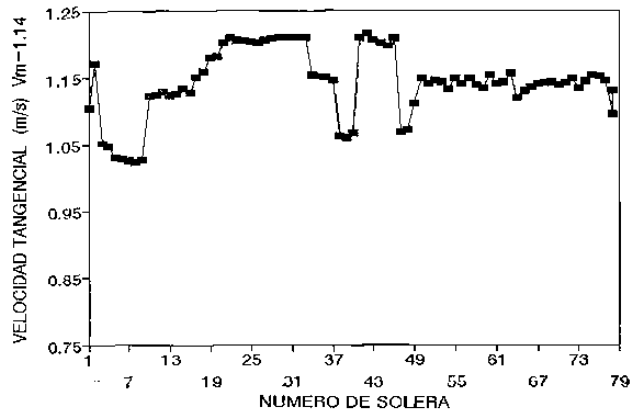


c')

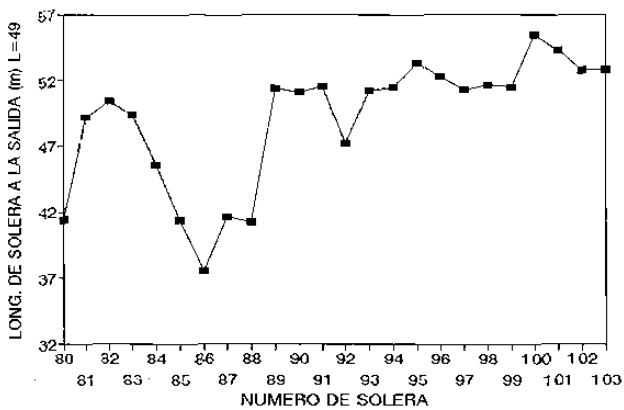
Fig. 4.13: Valores medios de los tiempos empleados para la laminación (a, b y c) e intervalo de espera entre soleras consecutivas (a', b' y c'), durante las secuencias 24720 a 24958 en el castillo F1.



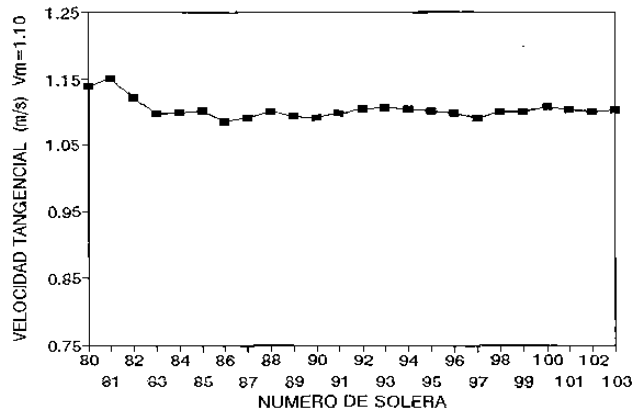
a)



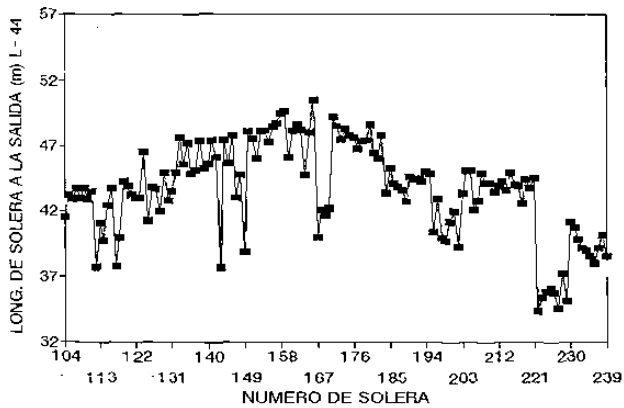
a')



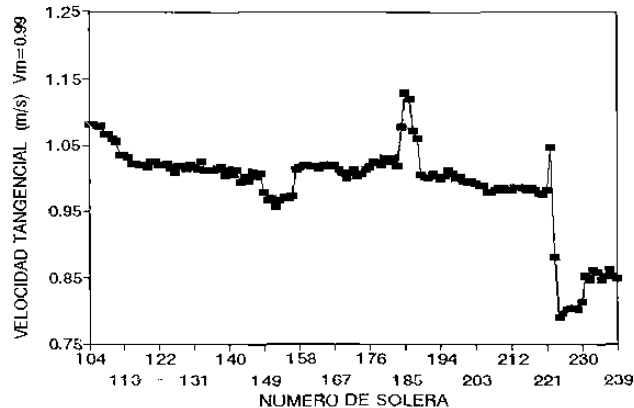
b)



b')



c)



c')

Fig. 4.14: Longitud de la solera después de su paso por el castillo F1 (a, b y c) y velocidad tangencial promedio de los rodillos de trabajo (a', b' y c'), durante las secuencias 24720 a 24958.

4.3.2 CAPTURA MANUAL DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

La información recabada en forma automática en la línea de molinos calientes tiene como común denominador el ser respuestas de estímulos directos, por ejemplo la alta temperatura del planchón sensibiliza el registro de la llegada de la pieza al molino y su resistencia a la deformación a las celdas de carga. La ventaja del sistema automático es la de permitir con precisión la lectura y registro de la información en forma expedita y segura, maximizando la utilización de los sensores bajo su óptimo tiempo de respuesta. Pero hay eventos en la línea que no están contemplados para ser registrados y almacenados directamente en la base de datos del molino, puesto que un mismo evento puede tener diferentes causas, situación que debe ser decidida por el operario de la línea y registrada en forma manual.

Eventos tales como demoras y atorones, requieren de la toma de decisión por parte del operador. Los primeros pueden ser causadas por fallas mecánicas, eléctricas, rodillos, acero frío o de operación, en tanto que los segundos se presentan en la línea a causa de reventones, mala forma o adherencia de la pieza a laminar con el rodillo de trabajo.

El reporte de conos es otro registro que se realiza en forma manual y es el registro del ancho y calibre objetivo, también se especifica el tipo de acero y el número de fosa de recalentamiento de la que se extrajo el lingote. En el Apéndice A4, se presentan los registros para las demoras, atorones y conos, mismos que se realizan en cada uno de los tres turnos de la planta.

Los rodillos de trabajo son removidos de los castillos del molino de laminación en forma periódica, los castillos F1 a F3 se cambian después de cinco o seis horas en operación en promedio, en tanto que, los rodillos de trabajo en los últimos castillos (F4 a F6) son removidos en intervalos de uso menores, de hecho, se realizan dos cambios en los tres últimos castillo por cada cambio realizado en los primeros, la razón es que estos últimos influyen en forma directa en la apariencia superficial y perfil de la lamina a la salida del molino. Pero también puede acontecer el cambio imprevisto o involuntario de rodillos en el molino, como el realizado en el castillo F3, que aconteció a las 9:15 hs. y clasificado en el registro de demoras y señalado en el registro de conos, ver Apéndice A4.

Una vez concluida la campaña de trabajo del rodillo de trabajo, éste se desmonta del castillo para ser rectificado a la corona requerida, Fig. 4.15, pero no es posible este proceso inmediatamente después de su campaña, porque el rodillo se encuentra en un estado de no equilibrio térmico manifestado por un perfil de temperaturas no uniforme como resultado de las condiciones de operación a las que se somete,

ocasionando la dilatación no uniforme del mismo, Fig. 4.15 -corona térmica-, por lo que se deja enfriar al aire hasta que este perfil de temperatura sea constante y próximo a la temperatura ambiente.

El perfil de temperaturas en la superficie del rodillo de trabajo al término de su campaña se muestra en la Figura 4.16, verificando el estado anisotérmico existente, esta información es capturada en forma manual y se continúa durante el enfriamiento del rodillo para establecer las curvas de enfriamiento y los coeficientes de transferencia de calor a los que se somete el rodillo durante su estancia antes del rectificado.

Las cinco isócronas de temperatura de la Figura 4.16 se obtuvieron de la información capturada en forma manual y vaciada en la Tabla 4.4. La posición hace referencia al centro axial del rodillo y su sentido sur o norte a la nomenclatura usada en la planta por la orientación del molino de laminación con respecto a los dos puntos geográficos.

Durante el enfriamiento el rodillo se somete a un nuevo estado de transferencia de calor, caracterizado por el mecanismo de convección libre. Como se describió en el capítulo anterior, el modelo matemático del simulador se basa en el estado de los coeficientes de transferencia de calor a los que se somete el rodillo durante su campaña y al terminó de ésta, por lo que es necesario conocer el valor de los coeficientes de transferencia de calor a los que se somete el rodillo después de su campaña. Roberts [41] presenta una relación para el cálculo de estos coeficientes, Ec. 4.1, misma que fue verificada en la planta, los valores de los coeficientes de transferencia de calor calculados se presentan en la Tabla 4.5, siguiendo un arreglo con relación directa a la Tabla 4.4.

$$h = 1.32 \left(\frac{T_{Rodillo} - T_{ambiente}}{D_{diametro\ del\ rodillo}} \right)^{0.25} \quad (4.1)$$

Donde: $T_{Rodillo}$, $T_{ambiente}$ es la temperatura en grados Celsius del rodillo y medio ambiente, $D_{diametro\ del\ rodillo}$ diametro en metros y finalmente h es el coeficiente de transferencia de calor en $Wm^{-2}C^{-1}$.

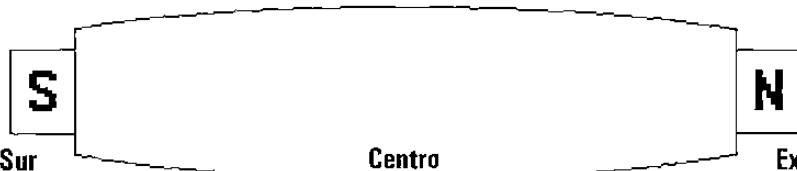
Las representación gráfica de las dos tablas anteriores de muestra en las Figuras 4.17 y 4.18, mostrando el comportamiento la evolución de las temperaturas y los coeficientes de transferencia de calor en diferentes posiciones axiales con dirección a los extremos sur y norte respectivamente.

TIEMPO (hs:min)	TEMPERATURA EN GRADOS CENTIGRADOS (°C)																	
	T _a	T _{extrS}	T _g	T _f	T _e	T _d	T _c	T _b	T _a	T _c	T _{a'}	T _{b'}	T _{c'}	T _{d'}	T _{e'}	T _{f'}	T _{g'}	T _{extrN}
	← Extremo Sur				Centro					Extremo Norte →								
14:00	19	32	39	52	61	66	70	73	75	77	77	77	75	73	66	58	45	35
14:04	20	34	41	53	62	68	71	74	75	75	76	76	76	74	68	59	48	36
14:10	19	36	42	54	61	68	71	74	77	77	77	77	76	72	66	59	50	39
14:15	19	37	43	54	60	65	69	74	76	76	76	76	75	71	65	58	50	40
14:20	17	38	44	54	59	64	68	72	75	76	76	75	74	69	64	58	53	40
14:25	17	39	45	54	59	64	67	71	75	75	75	74	73	68	63	58	51	41
14:30	17	39	45	54	58	63	66	70	73	74	74	72	71	67	63	58	51	41
14:35	18	40	45	54	57	61	65	69	72	73	73	71	70	65	62	57	51	41
14:40	18	40	45	53	57	61	64	68	70	71	71	70	69	65	61	57	52	42
14:45	18	40	45	53	56	60	63	67	70	71	70	69	68	64	60	56	52	42
14:50	18	40	45	53	57	60	63	66	69	69	69	68	66	63	60	56	53	42
14:55	18	40	45	53	56	59	62	65	68	68	68	67	66	62	59	56	53	42
15:00	19	40	45	53	56	59	61	64	67	67	67	66	65	62	59	55	51	42
15:05	18	41	45	53	56	58	61	64	66	67	66	66	64	61	59	55	51	42
15:10	18	41	45	53	55	58	60	63	65	65	65	64	64	61	58	55	50	43
15:15	18	41	45	52	55	57	60	62	64	64	65	64	63	60	58	55	51	43
15:20	19	41	45	52	55	57	59	62	63	64	64	63	62	59	57	55	52	42
15:25	19	41	45	52	54	56	58	61	63	63	63	62	62	59	57	54	51	43
15:30	19	41	45	52	54	56	58	60	62	62	62	61	60	58	56	54	52	43
15:35	19	41	45	52	54	56	57	59	61	61	61	61	60	58	56	56	49	43
15:45	19	40	44	51	53	55	56	58	59	59	60	59	59	57	55	53	47	42
15:55	19	39	44	50	52	53	55	56	58	58	58	57	57	55	54	52	48	40
16:00	19	39	44	50	51	53	55	56	58	58	58	57	57	55	54	52	49	42
16:17	16	39	43	49	50	52	53	55	56	56	56	55	55	54	52	51	49	41
16:25	16	39	43	49	50	51	52	54	54	55	55	54	54	53	51	50	48	40
16:30	16	39	43	49	50	51	52	54	55	55	55	54	54	53	51	50	48	41
16:35	16	40	43	49	50	51	52	53	54	54	54	54	54	52	51	50	48	40
16:40	16	39	43	48	49	50	51	53	54	54	54	53	53	52	51	49	48	40
16:45	16	39	42	48	49	50	51	52	53	53	54	53	53	51	50	49	46	40
17:00	16	39	42	47	48	49	50	51	52	53	53	52	52	50	49	48	45	40

0.572	0.419	0.267	0.114	0.0	0.114	0.267	0.419	0.572
0.495	0.343	0.191	0.038	0.038	0.191	0.343	0.495	
POSICION AXIAL DEL CENTRO A LOS EXTREMOS NORTE Y SUR DEL MOLINO CONTINUO (m)								

Tabla 4.4: Temperaturas del rodillo después de ser desmontado del castillo F1, generan las curvas de enfriamiento y permiten el calculo del coeficiente de transferencia de calor en convección libre.

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR ($Wm^{-2}C^{-1}$)



TIEMPO (hs:min)	← Extremo Sur								Centro								Extremo Norte →
	h_{extrS}	h_g	h_f	h_e	h_d	h_c	h_b	h_a	h_o	h_a'	h_b'	h_c'	h_d'	h_e'	h_f'	h_g'	h_{extrN}
14:00	3.054	3.385	3.835	4.080	4.200	4.300	4.360	4.400	4.43	4.430	4.430	4.400	4.360	4.200	4.000	3.630	3.190
14:04	3.105	3.436	3.848	4.087	4.225	4.290	4.352	4.372	4.37	4.391	4.391	4.391	4.352	4.225	4.012	3.693	3.211
14:10	3.260	3.515	3.905	4.087	4.247	4.311	4.372	4.430	4.43	4.430	4.430	4.411	4.331	4.203	4.037	3.788	3.395
14:15	3.307	3.553	3.905	4.062	4.181	4.269	4.372	4.411	4.41	4.411	4.411	4.391	4.311	4.181	4.012	3.788	3.436
14:20	3.436	3.659	3.959	4.087	4.203	4.290	4.372	4.430	4.45	4.449	4.430	4.411	4.311	4.203	4.062	3.932	3.515
14:25	3.477	3.693	3.959	4.087	4.203	4.269	4.352	4.430	4.43	4.430	4.411	4.391	4.290	4.181	4.062	3.876	3.553
14:30	3.477	3.693	3.959	4.062	4.181	4.247	4.331	4.391	4.41	4.411	4.372	4.352	4.269	4.181	4.062	3.876	3.553
14:35	3.477	3.659	3.932	4.012	4.111	4.203	4.290	4.352	4.37	4.372	4.331	4.311	4.203	4.134	4.012	3.848	3.515
14:40	3.477	3.659	3.905	4.012	4.111	4.181	4.269	4.311	4.33	4.331	4.311	4.290	4.203	4.111	4.012	3.876	3.553
14:45	3.477	3.659	3.905	3.986	4.087	4.158	4.247	4.311	4.33	4.311	4.290	4.269	4.181	4.087	3.986	3.876	3.553
14:50	3.477	3.659	3.905	4.012	4.087	4.158	4.225	4.290	4.29	4.290	4.269	4.225	4.158	4.087	3.986	3.905	3.553
14:55	3.477	3.659	3.905	3.986	4.062	4.134	4.203	4.269	4.27	4.269	4.247	4.225	4.134	4.062	3.986	3.905	3.553
15:00	3.436	3.625	3.876	3.959	4.037	4.087	4.158	4.225	4.23	4.225	4.203	4.181	4.111	4.037	3.932	3.818	3.515
15:05	3.515	3.659	3.905	3.986	4.037	4.111	4.181	4.225	4.25	4.225	4.225	4.181	4.111	4.062	3.959	3.848	3.553
15:10	3.515	3.659	3.905	3.959	4.037	4.087	4.158	4.203	4.20	4.203	4.181	4.161	4.111	4.037	3.959	3.818	3.589
15:15	3.515	3.659	3.876	3.959	4.012	4.087	4.134	4.181	4.18	4.203	4.181	4.158	4.087	4.037	3.959	3.848	3.589
15:20	3.477	3.625	3.848	3.932	3.986	4.037	4.111	4.134	4.16	4.158	4.134	4.111	4.037	3.986	3.932	3.848	3.515
15:25	3.477	3.625	3.848	3.905	3.959	4.012	4.087	4.134	4.13	4.134	4.111	4.111	4.037	3.986	3.905	3.818	3.553
15:30	3.477	3.625	3.848	3.905	3.959	4.012	4.062	4.111	4.11	4.111	4.087	4.062	4.012	3.959	3.905	3.847	3.553
15:35	3.477	3.625	3.848	3.905	3.959	3.986	4.037	4.087	4.09	4.087	4.087	4.062	4.012	3.959	3.959	3.757	3.553
15:45	3.436	3.590	3.818	3.876	3.932	3.959	4.012	4.037	4.04	4.062	4.037	4.037	3.986	3.932	3.876	3.693	3.515
15:55	3.395	3.590	3.788	3.848	3.876	3.932	3.959	4.012	4.01	4.012	3.986	3.986	3.932	3.905	3.848	3.725	3.436
16:00	3.395	3.590	3.788	3.818	3.876	3.932	3.959	4.012	4.01	4.012	3.986	3.986	3.932	3.905	3.848	3.757	3.515
16:17	3.515	3.659	3.848	3.876	3.932	3.959	4.012	4.037	4.04	4.037	4.012	4.012	3.986	3.932	3.905	3.848	3.589
16:25	3.515	3.659	3.848	3.876	3.905	3.932	3.986	3.986	4.01	4.012	3.986	3.986	3.959	3.905	3.876	3.818	3.553
16:30	3.515	3.659	3.848	3.876	3.905	3.932	3.986	4.012	4.01	4.012	3.986	3.986	3.959	3.905	3.876	3.818	3.589
16:35	3.553	3.659	3.848	3.876	3.905	3.932	3.959	3.986	3.99	3.986	3.986	3.986	3.932	3.905	3.876	3.818	3.553
16:40	3.515	3.659	3.818	3.848	3.876	3.904	3.959	3.986	3.99	3.986	3.959	3.959	3.932	3.905	3.848	3.818	3.553
16:45	3.515	3.625	3.818	3.848	3.876	3.904	3.932	3.959	3.96	3.986	3.959	3.959	3.905	3.876	3.848	3.757	3.553
17:00	3.515	3.625	3.788	3.818	3.848	3.876	3.904	3.932	3.96	3.959	3.932	3.932	3.876	3.848	3.818	3.725	3.553

0.572	0.419	0.267	0.114	0.0	0.114	0.267	0.419	0.572
0.495	0.343	0.191	0.038	0.038	0.191	0.343	0.495	
POSICION AXIAL DEL CENTRO A LOS EXTREMOS NORTE Y SUR DEL MOLINO CONTINUO (m)								

Tabla 4.5: Coeficiente de transferencia de calor calculado a partir de las curvas de enfriamiento (Ec.4.1), para el rodillo después de ser desmontado del castillo F1,

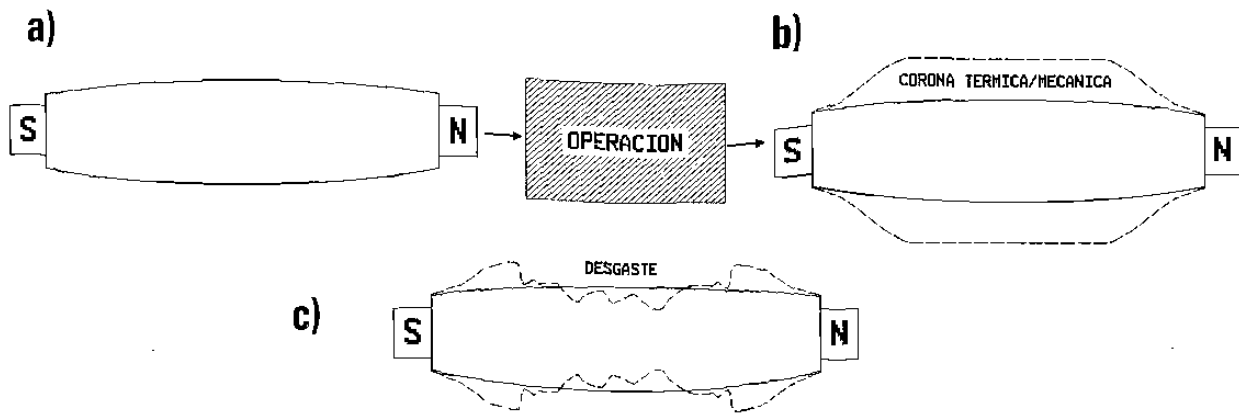


Fig. 4.15: Esquema de las formas del rodillo antes de iniciar su campaña -a) CORONA MECANICA-; durante el transcurso del proceso sin considerar el desgaste -b) CORONA TERMICA- y el efecto del deterioro por su uso -c) DESGASTE-.

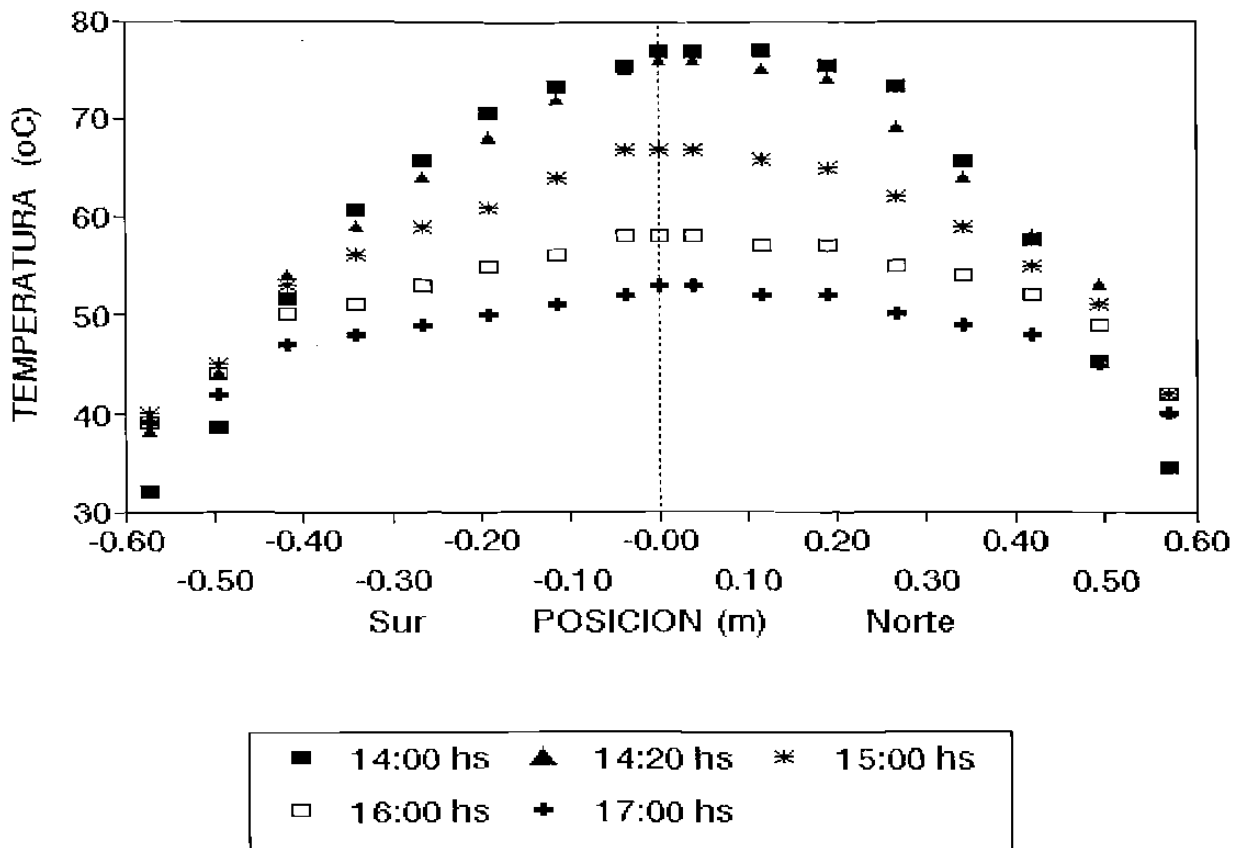


Fig. 4.16: Perfil axial de temperaturas en la superficie del rodillo, durante su enfriamiento ver Tabla 4.4.