

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES**

**DOCTORADO EN INGENIERIA DE MATERIALES**



**SIMULACION DEL CICLO TERMICO SUPERFICIAL  
EN UN RODILLO DE TRABAJO DE UN  
MOLINO CONTINUO DE LAMINACION EN CALIENTE**

**POR**

**LIC. ANTONINO PEREZ HERNANDEZ**

**TESIS**

**PRESENTADA PARA LA OBTENCION DEL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECANICA  
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA DE MATERIALES**

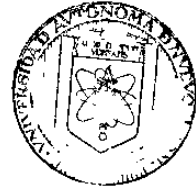
**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.**

**MAYO DE 1992**

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
1992  
P47



1020070639



RECCION GENERAL DE  
DICS DE REC G ALO

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES**

**DOCTORADO EN INGENIERIA DE MATERIALES**



**SIMULACION DEL CICLO TERMICO SUPERFICIAL  
EN UN RODILLO DE TRABAJO DE UN  
MOLINO CONTINUO DE LAMINACION EN CALIENTE**

**POR**

**LIC. ANTONINO PEREZ HERNANDEZ**

**TESIS**

**PRESENTADA PARA LA OBTENCION DEL GRADO DE  
< MAESTRO EN CIENCIAS > EN INGENIERIA MECANICA  
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA DE MATERIALES**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.**

**MAYO DE 1992**

T11  
Z58 =  
1



FONDO TESIS

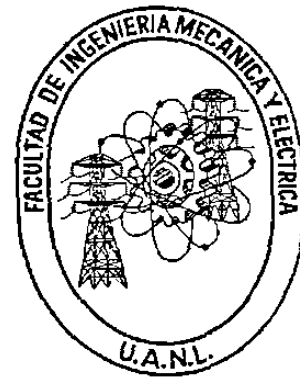
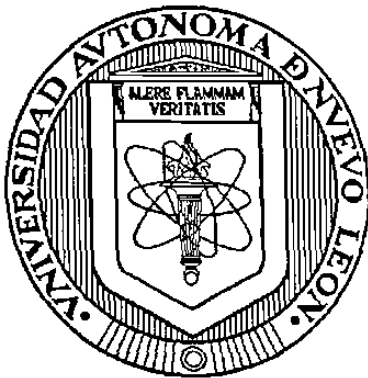
63096

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES**

**DOCTORADO EN INGENIERIA DE MATERIALES**



**SIMULACION DEL CICLO TERMICO SUPERFICIAL  
EN UN RODILLO DE TRABAJO  
DE UN MOLINO CONTINUO DE LAMINACION EN CALIENTE**

**POR**

***LIC. ANTONINO PEREZ HERNANDEZ***

**TESIS**

**PRESENTADA PARA LA OBTENCION DEL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECANICA  
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA DE MATERIALES**

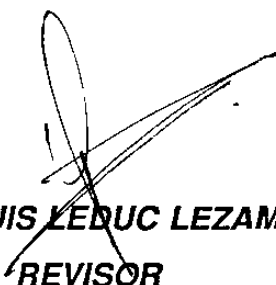
**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.      MAYO DE 1992**



**DR. RAFAEL COLAS ORTIZ**  
**ASESOR**



**DR. RAUL FUENTES SAMANIEGO**  
**ASESOR**



**DR. LUIS LEDUC LEZAMA**  
**REVISOR**



A MIS PADRES

ANTONINO Y LEONILA

Y HERMANOS

SIMON Y JUDITH

# INDICE

<b>INDICE.</b>	<i>I</i>
<b>RESUMEN.</b>	<i>IV</i>
<b>1 INTRODUCCION.</b>	1.1
<b>2 PROCESO INDUSTRIAL.</b>	2.1
<b>3 PROYECTO.</b>	3.1
<b>4 MODELACION DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR.</b>	4.1
4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	4.1
4.2 CALENTAMIENTO DEL RODILLO.	4.3
4.3 MODELACION DEL CALENTAMIENTO.	4.8
4.4 ENFRIAMIENTO DEL RODILLO.	4.13
4.5 SISTEMA DE REFRIGERACION.	4.16
4.6 MODELACION DEL ENFRIAMIENTO.	4.17
4.6.1 CONVECCION.	4.17
4.6.2 CONDUCCION.	4.20

<b>5</b>	<b>VARIABLES A CONSIDERAR EN LA ELECCION DE LAS BOQUILLAS PARA EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.</b>	<b>5.1</b>
5.1	ELECCION DEL TIPO DE BOQUILLAS.	5.1
5.2	CONDICIONES DE OPERACION.	5.6
5.2.1	PRESION.	5.7
5.2.2	DISTANCIA.	5.8
5.2.3	INCLINACION.	5.10
5.3	CABEZALES DE REFRIGERACION Y SU DISPOSICION.	5.11
5.3.1	DISPOSICION DE LAS BOQUILLAS.	5.12
5.3.2	CARACTERISTICAS DE LAS BOQUILLAS.	5.12
<b>6</b>	<b>SIMULACION DEL ESTADO TRANSITORIO.</b>	<b>6.1</b>
6.1	MODELACION.	6.1
6.1.1	CONFIGURACION I.	6.4
<b>7</b>	<b>RESULTADOS.</b>	<b>7.1</b>
7.1	INTRODUCCION.	7.1
7.2	RESULTADOS: CONFIGURACIONES I, II Y III.	7.3
7.3	RESULTADOS: PRUEBAS I A IV.	7.13
<b>8</b>	<b>DISCUSION DE RESULTADOS.</b>	<b>8.1</b>
8.1	INTRODUCCION.	8.1
8.2	DISCUSION DE RESULTADOS.	8.4
8.2.1	SIMULACION: CONFIGURACIONES I, II Y III.	8.5
8.2.2	SIMULACION: PRUEBAS I A IV.	8.7

---

<b>9 CONCLUSIONES.</b>	9.1
9.1 MODELO MATEMATICO.	9.1
9.2 SIMULADOR.	9.1
9.3 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.	9.2
9.4 BENEFICIO.	9.3
9.5 RECOMENDACIONES.	9.3
<b>REFERENCIAS.</b>	R1
<b>APENDICES.</b>	A.1
A1 LISTADO DEL SIMULADOR.	A.2
A2 PUBLICACION EN FORO NACIONAL. XIII ENCUENTRO DE INVESTIGACION METALURGICA. NOVIEMBRE 27, 28 Y 29 DE 1991 INSTITUTO TECNOLOGICO DE SALTILLO. SALTILLO, COAHUILA, MEXICO	A.17
<b>AGRADECIMIENTOS.</b>	

## RESUMEN

Este trabajo forma parte de un proyecto global de investigación que busca la simulación total del proceso de laminación en caliente. Aquí se considerara únicamente el efecto transitorio del calentamiento y enfriamiento del rodillo de trabajo, por los efectos del contacto con la cinta de acero caliente (850 a 1100 °C) y del sistema de refrigeración respectivamente, sometiendo al rodillo a severos cambios de temperatura, que observados desde un punto fijo en la superficie del rodillo, describen una serie de pulsos de forma periódica.

Se presenta un modelo matemático capaz de calcular los cambios de temperatura en la superficie del rodillo de trabajo en el estado transitorio y su relación con la disposición del sistema de refrigeración.

El modelo matemático se basa en la ecuación de transferencia de calor y sus condiciones a la frontera e inicial. La simulación o modelación se realiza por la evaluación de la solución analítica del modelo matemático y no por la solución aproximada de las mismas por métodos numéricos.

Se simulan diferentes disposiciones geométricas del sistema de refrigeración, de los resultados se establecen criterios para la disposición de los cabezales de enfriamiento, con el objetivo de disminuir la energía térmica que entra al rodillo de trabajo.

El trabajo presentado en cada capítulo es el siguiente:

- 1.- La necesidad de modernizar y optimizar de los parámetros del proceso de la planta productiva, mediante el uso de simuladores.
- 2.- La descripción general del proceso productivo de lámina de acero.
- 3.- Planteamiento el proyecto general del proceso de laminación en caliente, así como, la limitación de ésta investigación y se establece a la temperatura como el principal parámetro en la modelación del proceso.
- 4.- La descripción del fenómeno de transferencia de calor al que es sometido el rodillo laminador y se desarrolla el modelo matemático capaz de calcular el perfil de temperatura en su superficie en estado transitorio, así como el flujo de calor que ingresa al mismo.
- 5.- Se analizan variables que intervienen en la funcionalidad y elección del tipo de boquilla que constituyen el sistema de enfriamiento. Así como la disposición y características de las usadas en la planta.
- 6.- Simulación del perfil de temperatura del rodillo laminador bajo las condiciones de operación en planta.
- 7.- Se presentan los resultados de la simulación realizada para diferentes disposiciones geométricas de los cabezales.

8.- Discusión de los resultados arrojados por el simulador.

9.- Se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

Finalmente se presenta en los apedices el listado del simulador, así como el trabajo presentado y publicado en XIII ENCUENTRO DE INVESTIGACION METALURGICA, foro nacional organizado por el Instituto Tecnológico de Saltillo, Coah., Noviembre del 1991.

## 1 INTRODUCCION.

La reciente apertura de nuestro país a mercados internacionales ha puesto en evidencia carencias y limitaciones de la planta industrial. Esta situación amenaza con la pérdida de segmentos de mercado anteriormente protegidos por barreras arancelarias y trabas a la importación, no quedando más solución que la modernización y adaptación de la planta productiva a las necesidades y requerimientos internacionales.

Esta modernización ha sido concebida, en la mayoría de los casos, como sustitución de equipo obsoleto o en malas condiciones, sin antes cuestionar las prácticas de fabricación u operación. Un esquema de este tipo no garantiza la producción de bienes de alta calidad, pues no considera ni la optimización de los parámetros de proceso ni la variabilidad de los mismos.

La forma tradicional (prueba y error) de optimización y cierre de límites de control de los mencionados parámetros es una tarea costosa, pues se requiere de la elaboración de cuantiosas pruebas que, en el mejor de los casos, sólo reducen la productividad de las líneas. Una forma diferente de adecuar las variables de producción consiste en la simulación por computadora de los procesos de fabricación. En este caso, las pruebas se realizan fuera de la línea de producción, en algún tipo de computadora y se evalúa la sensibilidad de las características o propiedades requeridas por el producto en base a las variables de proceso.



Las características y propiedades requeridas en el acero laminado en caliente son múltiples (resistencia mecánica, dimensiones, planeza, etc.) y han de ser satisfechas mediante un buen número de variables (reducciones y temperaturas de proceso, análisis químico, etc.), es decir se desea una laminación controlada.

La simulación del proceso contempla parámetros tales como:

- a) Propiedades térmicas (difusividad, conductividad, capacidad calorífica y densidad), del rodillo, lámina y óxido.
- b) Radio y velocidad angular del rodillo de trabajo.
- c) Temperaturas de la cinta y medio ambiente.
- d) Geometría de la reducción (espesor de entrada y salida).
- e) Disposición geométrica de los cabezales (dirección del flujo de líquido refrigerante, altura y distancia al rodillo).
- f) Coeficientes de extracción de calor del líquido refrigerante.

Este trabajo sólo considera la simulación del flujo térmico a un rodillo de trabajo, considerando la variación de la disposición geométrica del sistema de refrigeración. La información que el simulador arroja es: perfil térmico (temperatura) en la superficie del rodillo y energía por unidad de área que entra por unidad de tiempo al rodillo de trabajo con cada giro. Lo anterior partiendo del contacto de la cinta-rodillo por vez primera.

## 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 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, los rodillos pueden ser de trabajo o de apoyo, los primeros tienen la función de deformar a la pieza, en tanto que los segundos evitan a 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. 2.1, donde se observa un bosquejo general del mismo.

- Obtención del mineral de hierro, su peletización y transporte a la planta de reducción directa (Proceso HyL).

- El proceso de reducción directa HyL, reduce (desoxida) el mineral de hierro por medio de un gas ávido de oxígeno obteniéndose el llamado hierro esponja.
- El hierro esponja se funden junto con chatarra en un horno eléctrico y es vaciado en lingoteras, dejando que el acero solidifique.
- El lingote se transporta a la fosa de recalentamiento, en la cual permanecerá hasta alcanzar la temperatura adecuada (es función del tipo de acero a laminar), momento en el que es llevado al molino de laminación en caliente.
- La laminación en caliente se inicia, con el desbaste grueso del lingote, reduciendo el lingote de aproximadamente 0.46 m (18"), a un planchón de 0.0254 m (1") de espesor, por medio del molino de desbaste, al mismo tiempo se cantea y descascarilla el planchón (controlar el ancho y retiro del óxido formado en la superficie del mismo).
- Se realiza un corte de punta y cola al planchón a la salida del desbaste y se vuelve a limpiar el óxido formado en la superficie del planchón (descascarillado), con chorros de agua antes de ingresar al molino continuo.
- El molino continuo es formado por seis castillos del tipo cuatro unidireccionales, a éste se les conoce también por molinos acabadores, por que en estos 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 laminación en frío.

Es justamente en los rodillos de trabajo del molino acabador en los que se centra el estudio de transferencia de calor en el estado transitorio desarrollado en este trabajo.

## Proceso Productivo.

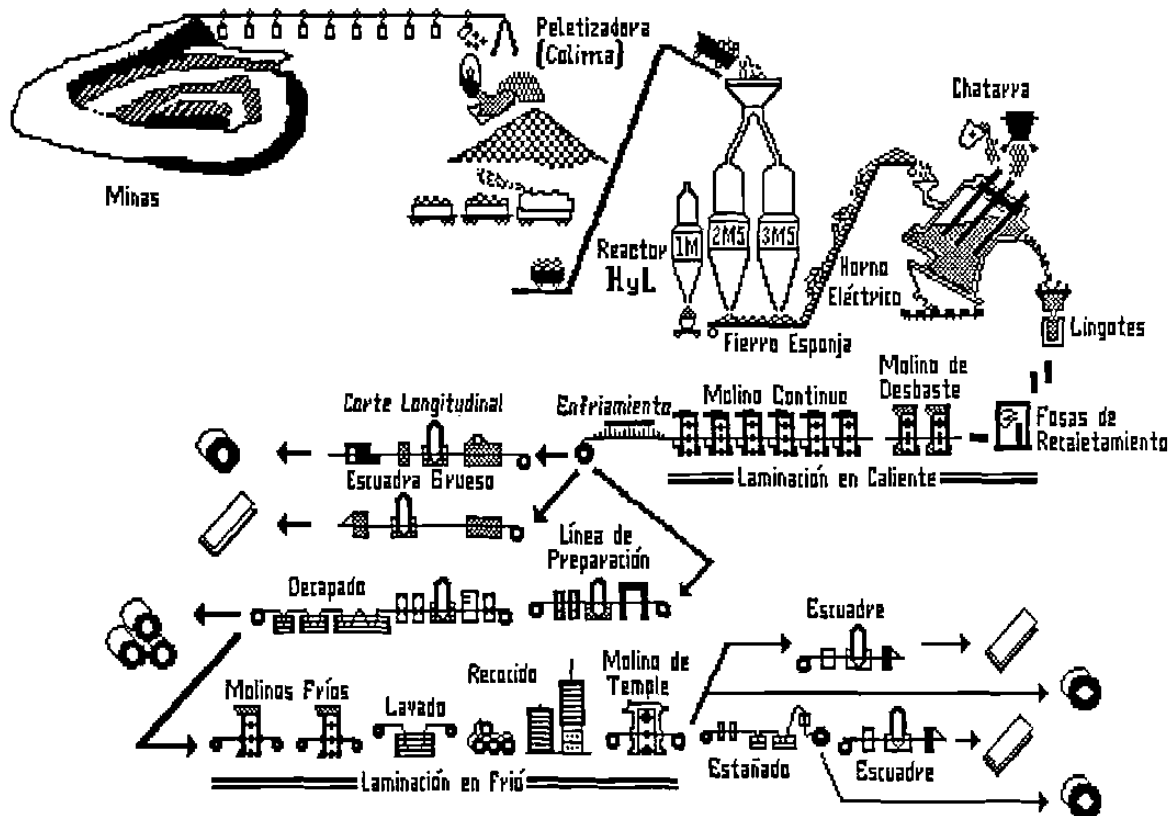


Fig. 2.1: Proceso de obtención de cinta de acero partiendo de la extracción del mineral al producto terminado.

### 3 PROYECTO.

Como parte del programa de control de calidad en la producción de cinta de acero en cualquier molino de laminación en caliente, es indispensable:

- Lograr la optimización de la corona térmica y mecánica del rodillo que permita el control de planeza y perfil de la cinta.
- El conocimiento de la vida útil de los rodillos de trabajo.
- El efecto del óxido de la cinta sobre el rodillo de trabajo y el acabado superficial de la cinta.
- Control de la microestructura de la cinta.

Todo lo anterior bajo las condiciones de operación de la planta. Aquí intervienen factores como; el material a laminar, tipo de rodillo, óxido, temperatura, porcentaje de deformación, sistema de refrigeración, carga axial, torsión, ancho de la cinta, velocidad angular, etc.

Para lograr esto es necesario realizar la modelación del proceso industrial en función de sus parámetros de operación y características (propiedades físicas) de los materiales involucrados, que es más ventajoso que la tradicional técnica de prueba y error, para finalmente establecer criterios para la optimización del proceso. Es decir se busca alcanzar el control total del proceso.

Es claro que el proyecto es ambicioso y que será el producto de dedicación y estudio profundo por lo que este se limitará a la modelación del perfil térmico en un rodillo de trabajo en un molino continuo de laminación en caliente en su estado transitorio.

Por lo que el simulador describe la respuesta térmica del rodillo bajo las condiciones de operación del molino continuo.

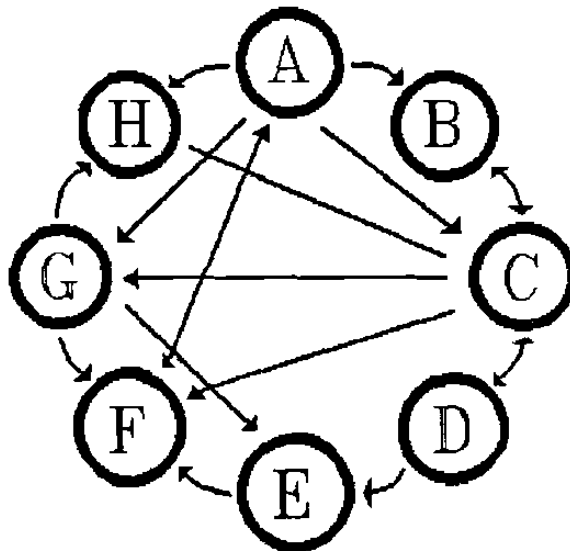
Según la experiencia de la planta[1], el principal parámetro a modelar es la temperatura. La modelación del proceso requiere la elaboración de módulos de diferente origen, siendo los principales:

- |   |                   |   |
|---|-------------------|---|
| A | CEDULA:           | Reducciones, torniquetes, velocidad y formadores de onda.                       |
| B | MICROESTRUCTURA:  | Tamaño de grano, distribución de fases y propiedades físicas y mecánicas.       |
| C | TERMICO:          | Temperatura de la pieza y temperatura de los rodillos.                          |
| D | OXIDACION:        | Formación del óxido y remoción de la cascarilla.                                |
| E | DESGASTE:         | Perfil y fatiga del rodillo, calidad superficial del rodillo.                   |
| F | FORMA:            | Perfil de la cinta, corona mecánica, corona térmica y criterio de planeza.      |
| G | ELECTROMECHANICO: | Fuerza de separación, corriente consumida, potencia requerida y par de motores. |

H PRODUCTIVIDAD: Tiempo interno, tiempo externo y velocidad de producción.

La relación de éstos se representa en la figura 3.1.

La modelación de la temperatura se enfoca a los rodillos de trabajo; con ello se realiza la base para el cálculo de la corona y esfuerzos térmicos que afectan directamente la vida útil del rodillo y el perfil, planeza y acabado superficial de la lámina.



**Fig. 3.1:** Relación de la temperatura con otros factores involucrados en el proceso de laminación en caliente<sup>[1]</sup>.



## 4 MODELACION DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR.

### 4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Se supone que durante la laminación de metales a alta temperatura, cualquier punto de la superficie del rodillo laminador (o de trabajo) sufre un perfil de temperaturas cíclico y complejo [2,3] provocado por el contacto del metal caliente y el fluido refrigerante.

El molino acabador o tren continuo de laminación en caliente, lo constituyen seis castillos de configuración cuatro (dos rodillos de trabajo y dos de apoyo), identificados por las letras F1 a F6 en la figura 4.1, sincronizados por medio de los formadores de onda, L1 a L5.

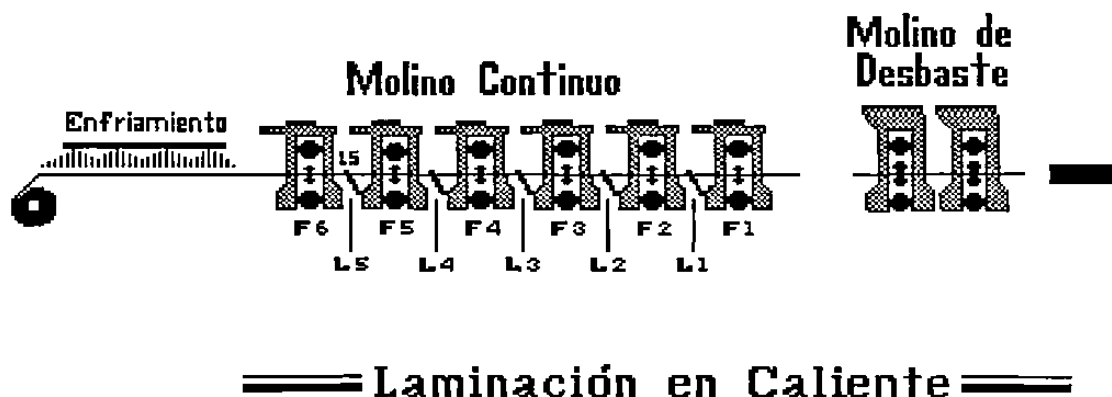


Fig. 4.1: Diagrama del molino continuo para laminación en caliente.

Es en los rodillos de trabajo (los que tienen contacto con la lámina de acero) del molino continuo en el que se centra la atención de este trabajo y se toma el castillo F6 como ejemplo para la modelación del perfil térmico.

En general, la descripción y cálculo del fenómeno de transferencia de calor que se presenta entre la cinta o lámina de acero y el rodillo de trabajo, puede ser usado para predecir:

- i.* La energía cedida por la cinta de acero al rodillo de trabajo durante la reducción en la zona de deformación.
- ii.* El esfuerzo de cedencia, que es función de la velocidad de deformación y otros factores metalúrgicos.
- iii.* La dilatación del rodillo, conocida como corona térmica.
- iv.* Los esfuerzos térmicos cíclicos generados en la superficie del rodillo.
- v.* Una estimación de la vida útil del rodillo de trabajo.

En este capítulo se realiza la descripción y modelación de los fenómenos de transferencia de calor por conducción y convección involucrados en el proceso de laminación de cinta de acero en caliente y es sólo de interés el estado transitorio del perfil superficial de temperaturas y la energía térmica que ingresa al rodillo en función de la disposición geométrica del sistema de refrigeración.

## 4.2 CALENTAMIENTO DEL RODILLO.

El incremento de la temperatura o calentamiento del rodillo de trabajo sobre la temperatura ambiente es resultado del flujo de calor por[4]:

- i. Radiación emitida por la cinta.
- ii. Conducción a través de la película de óxido.
- iii. Fricción a lo largo del arco de contacto rodillo-cinta.
- iv. Otras fuentes: fricción por el contacto entre el rodillo de trabajo y el de apoyo, fricción en el cuello del rodillo, energía liberada por la deformación plástica de la lámina durante el proceso.

Las anteriores fuentes de calor se representan en la figura 4.2, se considera que el calentamiento se realiza principalmente por la conducción de calor en la zona de contacto cinta-rodillo, despreciándose[4] las restantes formas y fuentes de calentamiento.

Es en la zona de deformación (Fig. 4.3), donde se lleva a cabo el contacto de la cinta y el rodillo, la longitud de la zona es función del radio del rodillo y la diferencia de espesor de la cinta a la entrada y salida del castillo, el arco de contacto o ángulo de mordida  $\theta_m$  se calcula por[5,6]:

$$\theta_m = \tan^{-1} \sqrt{\Delta \epsilon_c / R} \quad (4.1)$$

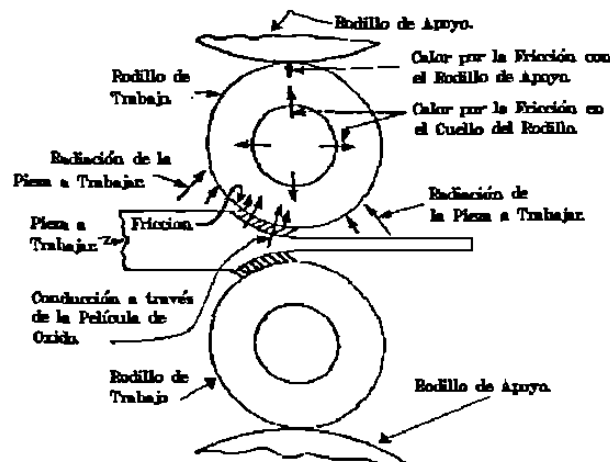
Donde  $\theta_m$  = Angulo de mordida. (°)

$R$  = Radio del rodillo. (m)

$\Delta \epsilon_c = \epsilon_{ce} - \epsilon_{cs}$  = Reducción de la cinta. (m)

$\epsilon_{ce}$  y  $\epsilon_{cs}$  = Espesor de la cinta a la entrada y salida respectivamente de la zona de deformación. (m)

La temperatura de la cinta[7] varía de 1050°C (1922°F) y 850°C (1562°F) a la entrada y salida al molino continuo de laminación en caliente respectivamente. La conducción de calor de la cintarodillo se realiza a través de una resistencia térmica de contacto (película de óxido). En la cinta o lámina de acero se forman tres tipos de óxidos[8-12] termodinámicamente estables en el rango de temperaturas que son: FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, el más abundante (92% a 95%) es la wustita o FeO, cuyas propiedades físicas (entre 1200 y 900°C) son: conductividad térmica de 2.5116 W m<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>, densidad de 5728 Kg m<sup>-3</sup> y calor específico de 113.4 J Kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>.



**Fig. 4.2:** Diversas formas y fuentes que incrementan la temperatura del rodillo de trabajo.

Las propiedades físicas de la cinta de acero con 0.1%C varía con la temperatura siendo a 900 °C de: conductividad térmica de 46.1 W m<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>, densidad de 7850 Kgm<sup>-3</sup>, calor específico de 494 J Kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. El molino continuo[7] es de 1.12 m (44") de ancho, con rodillos de trabajo de 0.46 m (18") de diámetro. En los castillos F4 a F6 del molino continuo, los rodillos de trabajo son de hierro de doble vaciado[13-15], cuyas propiedades físicas son:

conductividad térmica de  $48 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ , densidad de  $7400 \text{ Kg m}^{-3}$  y calor específico de  $520 \text{ J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ , que se considerarán independientes de la temperatura.

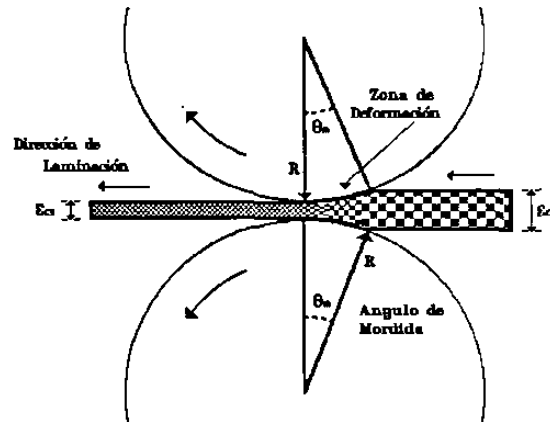


Fig. 4.3: Zona de deformación.

La penetración ( $\delta$ ) de la perturbación térmica por el efecto del gradiente de temperaturas en el rodillo de trabajo, es función de la difusividad térmica del rodillo y su período de rotación. Esta penetración puede estimarse[2,16] por la ecuación 4.2 e indica que la perturbación térmica para períodos pequeños (0.23 s para el castillo F6), se atenúa rápidamente, es decir, los cambios de temperatura se llevan a cabo en la "piel"[4,16-18] del rodillo laminador de espesor menor que el radio del mismo, lo que permite considerar al rodillo un medio semi-infinito. La cinta que actúa como la fuente de calor se desplaza a una velocidad de  $6.1 \text{ m s}^{-1}$  ( $1200 \text{ ft min}^{-1}$ .) por lo que la temperatura en la zona de deformación durante el contacto es en primera aproximación constante, sin perder su validez se simplifica el problema, como la transferencia de calor entre dos medios semiinfinitos en contacto a través de una resistencia térmica en la zona de deformación, esta resistencia térmica es la capa de óxido formada en la superficie la cinta.

$$\delta = 2 \sqrt{\kappa \cdot TT / \pi} \quad (4.2)$$

Donde: $\delta$ = Penetración.	(m)
$TT$ = Período del rodillo.	(s)
$\kappa$ = Difusividad térmica. = $K(\rho C_p)^{-1}$	( $m^2 s^{-1}$ )
$K$ = Conductividad térmica.	( $W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )
$\rho$ = Densidad del material.	( $Kg m^{-3}$ )
$C_p$ = Calor específico.	( $J Kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )

Un ejemplo de la atenuación de temperatura, en función de la penetración en estado transitorio, se presenta en la figura 4.4. En este caso se presentan las temperaturas[17] a la salida de la zona de deformación en un rodillo de trabajo de 0.30 m (12") de diámetro girando con un período de 1s. Obsérvese que la temperatura desciende exponencialmente con la profundidad de 479°C a 10°C en menos de 1cm. Este comportamiento de atenuación es también observado por otro simulador[19] que se desarrolla para el cálculo del perfil de temperaturas para el estado estacionario y se presenta en la figura 4.5 para un rodillo de trabajo de 0.46 m (18") que gira con un período de 0.23 s.

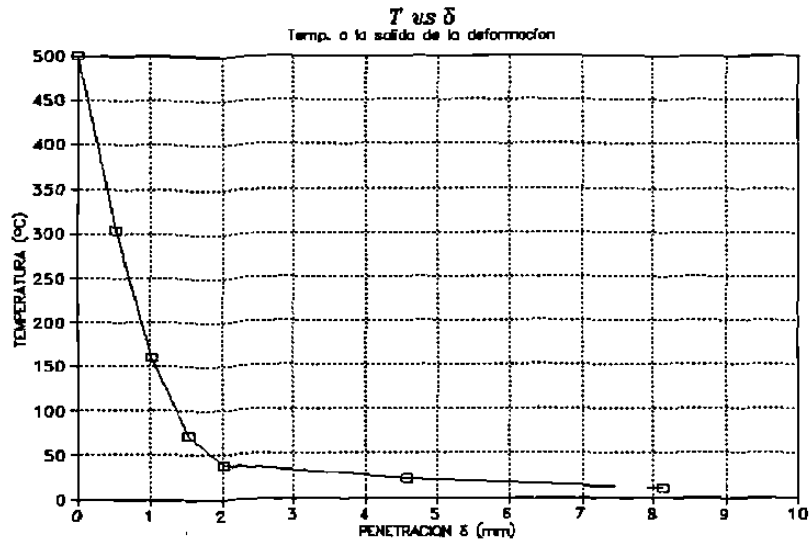


Fig. 4.4: Atenuación de la temperatura sobre la ambiente, en función de la penetración en el rodillo<sup>[17]</sup>. En estado transitorio.

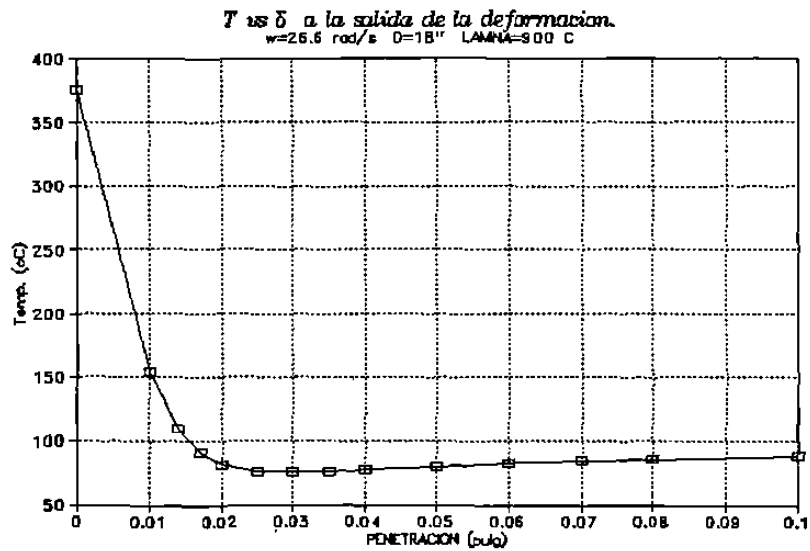


Fig. 4.5: Atenuación de la temperatura sobre la ambiente, en función de la penetración en el rodillo<sup>[19]</sup>. En estado estacionario.

### 4.3 MODELACION DEL CALENTAMIENTO.

En base a que el efecto del choque térmico se realiza en la piel del rodillo, el problema se simplifica para la simulación de la conducción de calor en el rodillo de trabajo, para el cálculo de la temperatura en el estado transitorio, requiere de las siguientes consideraciones:

- i.* La conducción de calor en la dirección axial no es de interés, el cálculo sólo se realiza al centro de la longitud del rodillo.
- ii.* El gradiente térmico en dirección circunferencial es despreciable, esto es debido a la alta velocidad angular del rodillo y el comportamiento del choque térmico.
- iii.* El flujo de calor se realiza únicamente en dirección radial y a través de una resistencia de contacto (película de óxido).
- iv.* Se parte de la condición inicial de equilibrio termodinámico del rodillo con el medio ambiente, es decir se lleva a cabo el contacto rodillo-cinta por vez primera.
- v.* Se toma la temperatura del medio ambiente como el cero, es decir los valores calculados serán leídos como temperaturas sobre la temperatura ambiente.

Se desea resolver[20-26] la ecuación de Fourier (Ec. 4.3), para el problema de transferencia de calor en el rodillo en la zona de deformación (Fig. 4.3). Al ser considerado éste como el problema de la transferencia de calor en dos sólidos semi-infinitos en



contacto a través de una resistencia térmica, el problema se simplifica. Se consideran dos regiones principales: una para  $x > 0$  para un material de propiedades físicas  $K_1$ ,  $\rho_1$  y  $\kappa_1$ , y otra para  $x < 0$  con propiedades  $K_2$ ,  $\rho_2$  y  $\kappa_2$ , (conductividad, densidad y difusividad térmica respectivamente en cada caso), por lo que el problema se reduce a la solución de la ecuación 4.4. Se toma arbitrariamente al material en  $x > 0$  (sub-índice 1) como la fuente térmica y el material en  $x < 0$  (sub-índice 2) como el material a temperatura ambiente.

La solución de la ecuación diferencial parcial (Ec. 4.4), requiere dos condiciones a la frontera y una condición inicial:

- a) Primera condición frontera: La temperatura de la cinta es constante a toda posición y tiempo durante el contacto (Ec.4.5).
- b) Segunda condición frontera: El flujo de calor es a través de la película de óxido entre los dos sólidos, actuado como una resistencia térmica de contacto en  $x=0$  (regula la el flujo de calor), con coeficiente de transferencia de calor  $\alpha_3$  (Ec. 4.6).
- c) Condición inicial: Se expresa por el equilibrio térmico del rodillo con el ambiente al tiempo cero (Ec. 4.7).

$$\nabla^2 T_1 = \frac{1}{\kappa_1} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{1}{\kappa_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad (4.4)$$

$$T_1 = T_{cte} \quad x > 0 \text{ y para todo } t \quad (4.5)$$

$$K_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + \alpha_3 (T_2 - T_1) = 0 \quad x = 0 \quad (4.6)$$

$$T_1 = T_{\infty} \quad x \leq 0 \text{ y } t = 0 \quad (4.7)$$

La temperatura en cualquiera de los materiales se obtiene de la solución general[20] y su comportamiento se grafica en la figura 4.6.

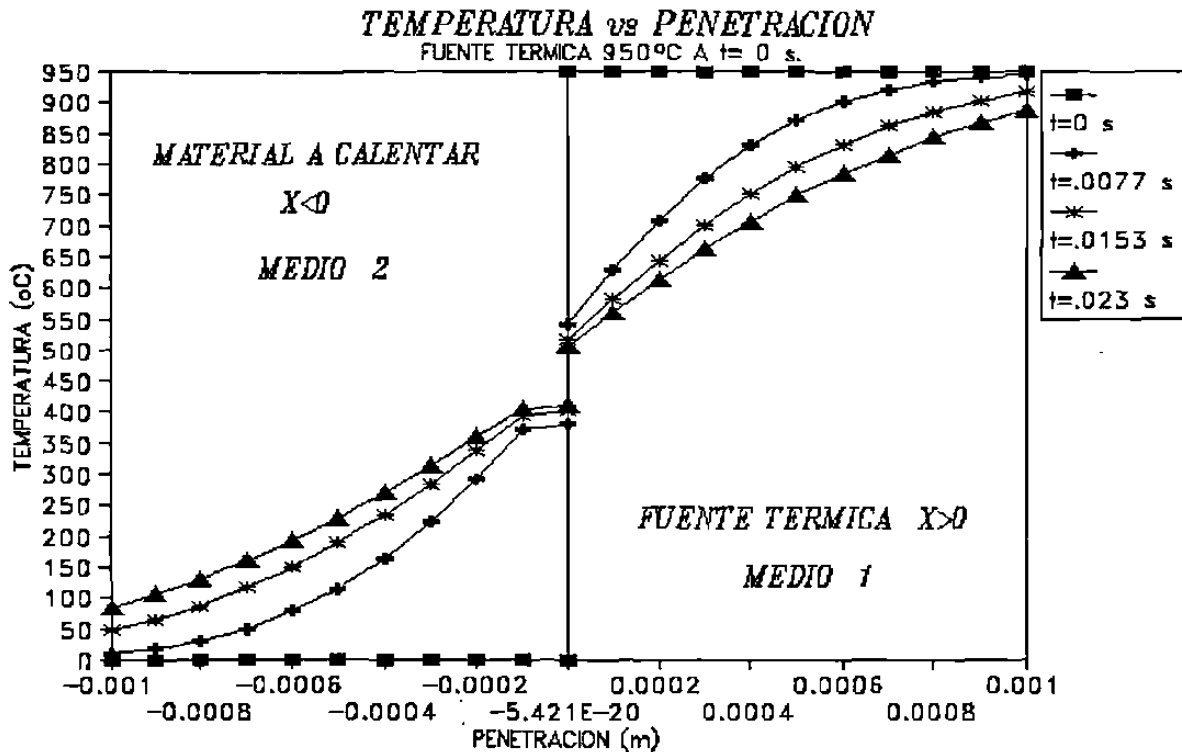
$$T_1 = \frac{T_{cte}}{1+\beta} \left\{ 1 + \beta \left[ \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\kappa_1 t}} + e^{\tilde{h}_1 x + \tilde{h}_1^2 \kappa_1 t} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\kappa_1 t}} + \tilde{h}_1 \sqrt{\kappa_1 t} \right) \right] \right\} \quad (4.8)$$

$$T_2 = \frac{T_{cte}}{1+\beta} \left\{ \operatorname{erfc} \frac{|x|}{2\sqrt{\kappa_2 t}} - e^{\tilde{h}_2 x + \tilde{h}_2^2 \kappa_2 t} \operatorname{erfc} \left( \frac{|x|}{2\sqrt{\kappa_2 t}} + \tilde{h}_2 \sqrt{\kappa_2 t} \right) \right\} \quad (4.9)$$

$$\text{Donde: } \tilde{h}_1 = \frac{\alpha_3}{K_1} \left[ \frac{1+\beta}{\beta} \right] ; \quad \tilde{h}_2 = \frac{\alpha_3}{K_2} [1+\beta] \quad \beta = \frac{K_2 \sqrt{\kappa_2}}{K_1 \sqrt{\kappa_1}}$$

Donde:  $T$  = Temperatura.  $T=T(x;t)$  (°C)  
 $x$  = Posición. (m)  
 $t$  = Tiempo. (s)  
 $\kappa$  = Difusividad térmica. ( $\text{s m}^{-2}$ )  
 $\alpha$  = Coeficiente de transferencia de calor. ( $\text{W m}^{-2}\text{C}^{-1}$ )  
 $\varepsilon$  = Espesor. (m)  
 $\eta; \beta$  = Constantes.

sub-indices: 1 = Fuente térmica.  
 2 = Material a calentar.  
 3 = Resistencia térmica.  
 $\infty$  = Ambiente.



**Fig. 4.6:** Comportamiento del perfil de temperaturas con la penetración durante el contacto de dos medios a través de una resistencia térmica a diferentes tiempos.

El valor del coeficiente de transferencia de calor de la película de óxido es el cociente de su conductividad térmica y su espesor. Se toma a la cinta de acero caliente como el material en  $x>0$  y al rodillo de trabajo al material en  $x<0$ , finalmente la resistencia térmica ( $x=0$ ) es el óxido. Se desea conocer la temperatura en la superficie del rodillo por lo tanto, para este caso particular la temperatura sobre la temperatura ambiente en la superficie del rodillo de trabajo se calcula por la ecuación 4.10 y el flujo de calor instantáneo que ingresa a través de la superficie del rodillo se determina por la ecuación 4.11, obtenida a partir de la derivada con respecto a su coordenada espacial (por definición de flujo) de la ecuación 4.9.

$$T_x(x=0; t) = \frac{T_c - T_\infty}{1 + \beta} \{ 1 - e^{-\eta_x^2 \kappa_x t} \operatorname{erfc}(\eta_x \sqrt{\kappa_x t}) \} \quad (4.10)$$

$$f_x(x=0; t) = \alpha_o (T_c - T_\infty) e^{-\eta_x^2 \kappa_x t} \operatorname{erfc}(\eta_x \sqrt{\kappa_x t}) \quad (4.11)$$

$$\text{Donde: } \eta_x = \frac{\alpha_o}{K_x} [1 + \beta] \quad \beta = \frac{K_x \sqrt{\kappa_x}}{K_c \sqrt{\kappa_c}} \quad \alpha_o = \frac{K_o}{\epsilon_o}$$

Donde:	T = Temperatura. $T=T(x;t)$ .	(°C)
	f = Flujo de calor. $f=f(x;t)$ .	(W m <sup>-2</sup> )
	x = Posición.	(m)
	t = Tiempo.	(s)
	$\kappa$ = Difusividad térmica.	(s m <sup>-2</sup> )
	$\alpha$ = Coeficiente de transferencia de calor.	(W m <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> )
	$\epsilon$ = Espesor.	(m)
	$\eta$ ; $\beta$ = Constantes.	

sub-índices: c = Cinta o lámina de acero.

r = Rodillo.

o = Oxido.

$\infty$  = Ambiente.

Por lo tanto, las ecuaciones 4.10 y 4.11 describen el comportamiento térmico de un punto en la superficie del rodillo de trabajo durante el tiempo de contacto con la lámina.

#### 4.4 ENFRIAMIENTO DEL RODILLO.

Un molino continuo de laminación en caliente posee un sistema de enfriamiento cuyo objetivo es mantener la temperatura de los rodillos lo bastante baja para retener sus propiedades mecánicas y su resistencia al desgaste, así como el control de su expansión térmica[2,16,17,27-41].

En general, la extracción de calor del rodillo de trabajo puede ocurrir por[4]:

- i.* La convección a través del líquido refrigerante.
- ii.* El enfriamiento al aire.
- iii.* La conducción al rodillo de apoyo.
- iv.* La conducción por el cuello o extremo del rodillo.
- v.* Radiación.

La figura 4.7 esquematiza lo anterior. El simulador considera únicamente la refrigeración por la convección (libre y forzada) y conducción (rodillos de trabajo y el de apoyo), se desprecian las restantes formas de refrigeración.

Se considera que la superficie del rodillo de trabajo se refrigerada por un líquido, que provoca tres mecanismos de transferencia de calor, que depende de la diferencia de temperatura entre rodillo y líquido[29,30].

- i.* Convección.
- ii.* Nucleación de ebullición.
- iii.*
  - a)* Película parcial de vapor.
  - b)* Película estable de vapor.

Estos mecanismos de transferencia se caracterizan por una diferencia significativa en la velocidad de extracción de calor, por lo que se consideran cuatro regiones que se muestran en la figura 4.8[30]

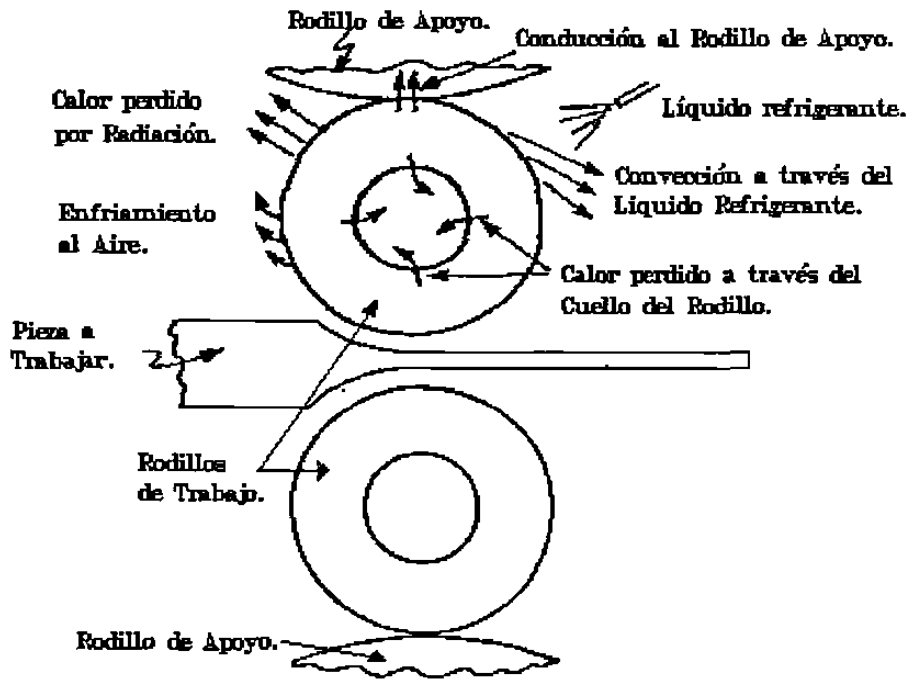


Fig. 4.7: Diferentes formas de extracción de calor del rodillo de trabajo.

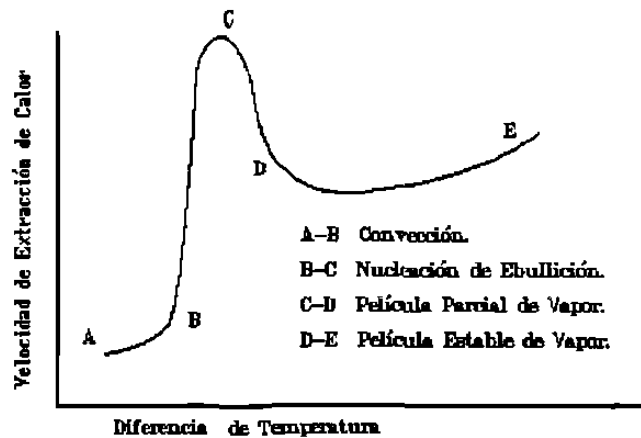


Fig. 4.8: Relación general de la velocidad de extracción de calor en función de la diferencia de temperatura de la superficie-líquido.

#### 4.5 SISTEMA DE REFRIGERACION.

El sistema de refrigeración[31,42-44] estándar para cada uno de los rodillos de trabajo del molino continuo de laminación en caliente lo constituyen dos tubos o cabezales portantes de una serie de boquillas o espreas que se encargan de aplicar el líquido refrigerante en la superficie del rodillo. Los cabezales están colocados a la entrada y salida de la zona de deformación, a una altura dada entre la cinta y el punto de contacto del rodillo de trabajo y apoyo, la figura 4.9 muestra la disposición geométrica de los cabezales para el castillo F6.

Donde:

$$x_e = 0.46 \text{ m (18")}$$

$$x_s = 0.44 \text{ m (17.5")}$$

$$y_1 = 0.35 \text{ m (13.75")}$$

$$y_2 = 0.36 \text{ m (14")}$$

$$y_3 = 0.40 \text{ m (15.5")}$$

$$y_4 = 0.33 \text{ m (13")}$$

$$\theta_1 = 5^\circ$$

$$\theta_2 = 0^\circ$$

$$\theta_3 = 30^\circ$$

$$\theta_4 = -25^\circ$$

Dh - Claro.

LP - Línea de Paso.

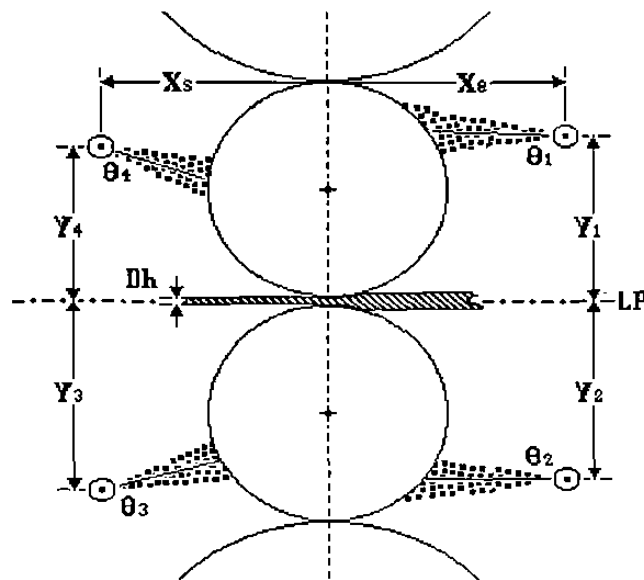


Fig. 4.9: Diagrama de la disposición del sistema de enfriamiento en el último castillo del tren continuo



## 4.6 MODELACION DEL ENFRIAMIENTO.

En la modelación del enfriamiento o extracción de calor en el rodillo de trabajo entran en juego mecanismos de:

- i. Convección: Líquido refrigerante y al aire.
- ii. Conducción: Contacto con el rodillo de apoyo.

### 4.6.1 CONVECCION.

El flujo de calor extraído en un punto de la superficie del rodillo de trabajo en la zona de incidencia del líquido refrigerante (convección forzada) o en alguna zona de convección libre, es calculado por la ecuación de enfriamiento de Newton (Ec.4.12). La temperatura alcanzada en la superficie del rodillo en la zona de enfriamiento por los chorros de líquido refrigerante y convección libre se calcula por la integral del flujo expresada por la ecuación 4.13.

$$f_x = -\alpha_L (T_x - T_m) \quad x = 0 \quad (4.12)$$

$$T_x = \frac{\kappa_x^{1/2}}{K_x \sqrt{\pi}} \int_0^t f_x \frac{dt'}{\sqrt{t-t'}} \quad x = 0 \quad (4.13)$$

Donde:

$f$	=	Flujo de calor. $f=f(x;t)$	$(W\ m^{-2})$
$T$	=	Temperatura. $T=T(x;t)$	$(^{\circ}C)$
$\alpha$	=	Coefficiente de transferencia de calor.	$(W\ m^{-2}\ ^{\circ}C^{-1})$
$\kappa$	=	Difusividad térmica.	$(s\ m^{-2})$
$K$	=	Conductividad térmica.	$(W\ m^{-1}\ ^{\circ}C^{-1})$
$t$	=	Tiempo.	$(s)$

sub-índices:

$r$	=	Rodillo.
$L$	=	Fluido refrigerante.

De la ecuación 4.13 se observa que para el cálculo de la temperatura en la superficie del rodillo se requiere conocer la función del flujo de calor, esta es a su vez función de la temperatura lo que complica la solución del problema.

Para salvar este inconveniente sin la pérdida de información se divide cada revolución en  $N$ -eventos (200) que limitan intervalos en la periferia del rodillo, para los cuales el flujo instantáneo en el  $n$ 'simo intervalo se considera constante (Ec. 4.14), lo que permite sacar de la integral a la función de flujo de calor (Ec. 4.15). Por lo tanto la temperatura en el  $n$ 'simo intervalo es dada por la ecuación 4.16, en el cálculo de la temperatura en un intervalo dado es necesario realizar la evaluación de los flujo de calor de entrada o salida (calentamiento o enfriamiento respectivamente), de los puntos anteriores al punto de interés. En otras palabras, para conocer la temperatura en un punto al tiempo " $t$ " se requiere conocer la historia térmica en los todos intervalos anteriores al que se desea evaluar. El cálculo de la temperatura será más correcto, entre mayor sea el número de puntos (intervalos de tiempo menores) en los que se divida la periferia del rodillo.

$$f_{x_n} = -\alpha_L (T_{x_n} - T_{\infty}) \quad x=0 \quad (4.14)$$

$$T_{x_n} = \frac{\kappa_x^{1/2}}{K_x \sqrt{\pi}} f_{x_n} \int_0^t \frac{dt'}{\sqrt{t-t'}} \quad x=0 \quad (4.15)$$

$$T_{x_n} = 2 \frac{\kappa_x^{1/2}}{K_x \sqrt{\pi}} f_{x_{n-1}} [ \sqrt{t-t_{n-1}} - \sqrt{t-t_n} ] \quad x=0 \quad (4.16)$$

Donde:

$f$	= Flujo de calor. $f=f(x=0;t)$	$(W m^{-2})$
$T$	= Temperatura. $T=T(x=0;t)$	$(^{\circ}C)$
$\alpha$	= Coeficiente de transferencia de calor.	$(W m^{-2}{}^{\circ}C^{-1})$
$\kappa$	= Difusividad térmica.	$(s m^2)$
$K$	= Conductividad térmica.	$(W m^{-1}{}^{\circ}C^{-1})$
$t$	= Tiempo.	$(s)$
$x$	= Penetración.	$(m)$

sub-indices:

$r$	= Rodillo de trabajo.
$L$	= Líquido refrigerante.

## 4.6.2 CONDUCCION.

El cálculo de la temperatura y flujo de calor en un punto de la superficie del rodillo de trabajo durante su contacto con el rodillo de apoyo se analiza de igual forma que en el problema de dos sólidos semi-infinitos. En este caso, la fuente de calor es el rodillo de trabajo, en tanto que el rodillo de apoyo se encuentra en equilibrio térmico con el medio ambiente. Por lo tanto, el flujo neto de calor *cedido por el rodillo de trabajo se calcula por la ecuación 4.17*, en tanto que la temperatura alcanzada en su superficie (sobre la ambiente) en la zona de enfriamiento, por el contacto entre los rodillos, es calculada por la ecuación 4.18; misma que depende de la diferencia de temperaturas de la superficie y de las propiedades físicas de los rodillos en contacto. Se desprecia la fricción existente entre éstos y se considera que las propiedades físicas de los rodillos son iguales.

$$F_x = - (T_c - T_a) \sqrt{\frac{\Delta t}{\pi \kappa_r}} \quad x=0 \quad (4.17)$$

$$T_x = \frac{T_r - T_a}{2} [1 + e^{\eta_r^2 \kappa_r t} \operatorname{erfc}(\eta_r \sqrt{\kappa_r t})] \quad x=0 \quad (4.18)$$

$$\text{Donde: } \eta_r = 2 \frac{\alpha_o}{K_r} \quad \alpha_o = \frac{K_o}{\epsilon_o}$$

Donde:

T = Temperatura.  $T=T(x=0;t)$  (°C)

F = Flujo neto durante el contacto. (W m<sup>-2</sup>)

$x$ = Penetración.	(m)
$t$ = Tiempo.	(s)
$\kappa$ = Difusividad térmica.	( $s\ m^{-2}$ )
$K$ = Conductividad térmica.	( $W\ m^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$ )
$\alpha$ = Coeficiente de transferencia de calor.	( $W\ m^{-2}\ ^{\circ}C^{-1}$ )
$\varepsilon$ = Espesor de la película de óxido.	(m)

sub-índices:

- $r$  = Rodillo de trabajo.
- $a$  = Rodillo de apoyo.
- $o$  = Oxido.

Por lo tanto, la ecuación 4.18 describe el comportamiento térmico de un punto en la superficie del rodillo de trabajo durante el contacto con el rodillo de apoyo.

## **5 VARIABLES A CONSIDERAR EN LA ELECCION DE LAS BOQUILLAS PARA EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.**

En el capítulo 4 se describen mecanismos por los cuales el rodillo de trabajo gana o cede energía térmica. En el primer caso es por el contacto del rodillo de trabajo y la cinta de acero caliente, en el segundo ocurre principalmente por el sistema de enfriamiento. En este capítulo se realiza un análisis de algunas de las variables a considerar en la elección de las boquillas del sistema de enfriamiento.

Para que el sistema de refrigeración cumpla con el objetivo de proteger los rodillos y controlar la calidad de la lámina debe existir un criterio de la cantidad esperada de calor removido por el líquido aplicado en la superficie del rodillo, por lo que es necesario el conocimiento del efecto las variables de diseño.

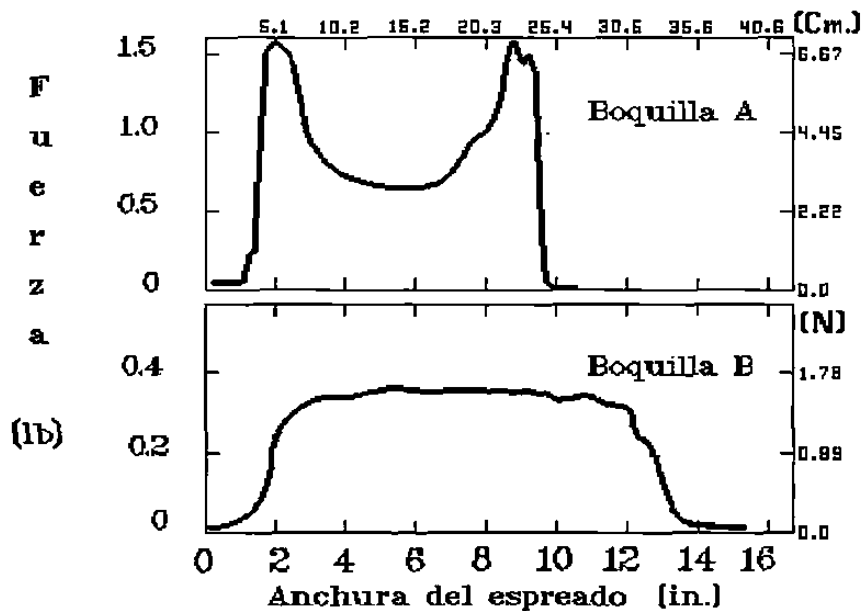
Este capítulo estará basado en resultados experimentales realizados por G. Van Steden y J.G.M. Tellman[31] y su adaptación por R. Colás[43] para el molino continuo HYLSA.

### **5.1 ELECCION DEL TIPO DE BOQUILLA.**

La elección de una boquilla de enfriamiento puede comenzar por una prueba de la distribución de la fuerza de impacto del flujo del líquido refrigerante (Fig. 5.1), que relaciona la distribución y cantidad de líquido refrigerante a través de la anchura del chorro.

63093

El coeficiente de transferencia de calor en un punto dado es función de la distancia entre el punto y la zona de impacto, en la figura 5.2 se muestra como decrece exponencialmente el coeficiente de transferencia de calor " $\alpha$ " al alejarse del área de impacto, se atribuye su rápido descenso a la disminución de velocidad en la película de agua por fricción[31].



**Fig. 5.1:** Aplicación de refrigerante para obtener una extracción uniforme de calor. La boquilla A se considera inapropiada mientras que la B se considera apropiada<sup>[29]</sup>.

Como un resultado de los experimentos[31], se encuentra una relación entre el coeficiente de transferencia de calor  $\alpha$  y el gasto normalizado por el área, se presenta en la figura 5.3, el fluido (agua) a una presión de 10 bar. Esta dependencia se aproxima por la ecuación 5.1[43].

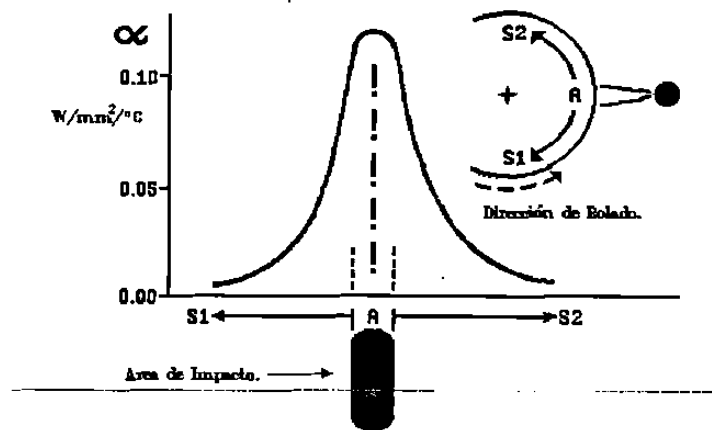


Fig. 5.2: Coeficiente de transferencia de calor " $\alpha$ " con respecto a la distancia a el área de impacto con un chorro de líquido refrigerante<sup>[31]</sup>.

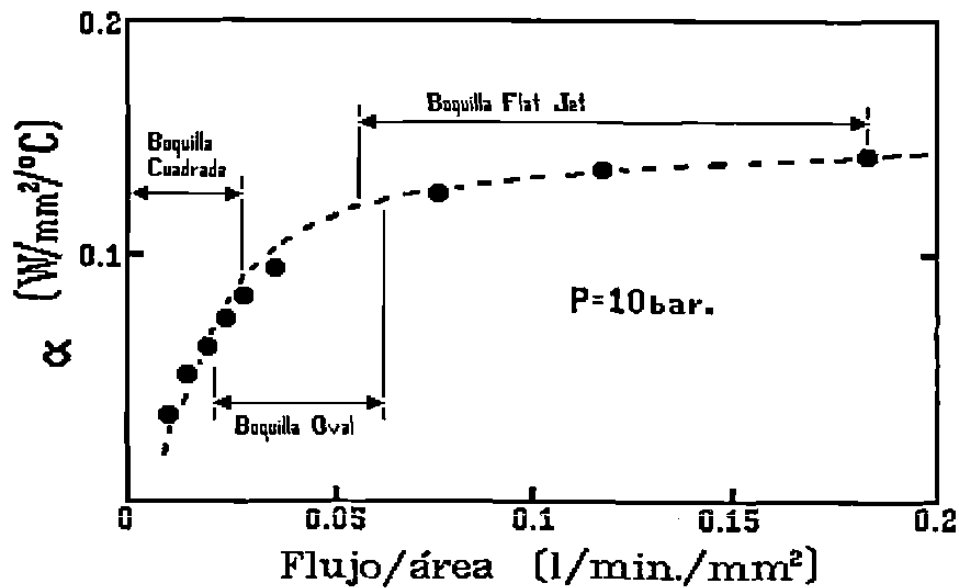


Fig.5.3: Coeficiente de transferencia de calor en la zona de impacto como una función del gasto de agua<sup>[31]</sup>.



$$\alpha_L = \alpha_{Ls} \exp(-.004 G_n^{-1.33}) \quad 0 < G_n < 0.2 \quad (l/min./mm^2) \quad (5.1)$$

Donde:

$G_n$  = Gasto normalizado por el área.  $(l \text{ min}^{-1} \text{ mm}^{-2})$

$\alpha$  = Coeficiente de transferencia de calor.  $(W \text{ mm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$

$\alpha_{Ls} = 1.45 \text{ E}+5$  (agua)  $(W \text{ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$

sub-indices:

L = Fluido refrigerante.

Ls = Saturación del fluido.

De los resultados presentados en la figura 5.3 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.

Observando el gasto de agua normalizado o densidad de flujo de agua en el área de impacto para tres diferentes tipos de boquillas con área de impacto (Fig. 5.4):

- a) Cuadrada.
- b) rectangular o una razón de longitud/ancho grande (boquilla flat jet).
- c) Oval (Boquilla oval jet).

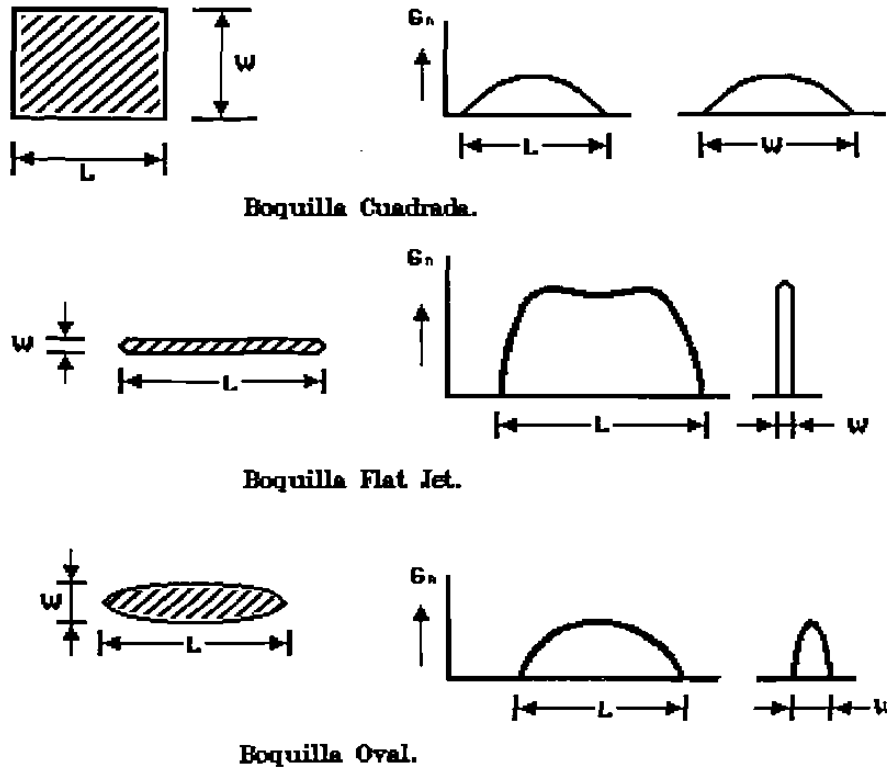


Fig. 5.4: Gasto de agua normalizado por el área para diferente tipos de boquillas.

De las figuras 5.3 y 5.4 se observa lo siguiente:

- ♦ La boquilla de área de impacto cuadrado, trabaja en la región de  $\alpha$  más bajo y posee una distribución no uniforme del gasto de agua en el área de impacto.

- ◆ La boquilla rectangular Flat jet, con razón largo/ancho grande (8:1) posee el rango más alto de los valores de  $\alpha$  y una distribución del gasto de agua uniforme en el área de impacto.
- ◆ La boquilla con área de impacto oval de razón largo/ancho  $\approx 5:1$  trabaja en el rango intermedio de los valores de  $\alpha$ , pero tiene una distribución no uniforme del gasto de agua en el área de impacto.

Se resume al momento que, de los tres tipos presentados, la mejor opción es la boquilla Flat Jet, que concuerda con las dos precondiciones de elección de las boquillas[31].

## 5.2 CONDICIONES DE OPERACION.

Después de la elección de la boquilla (la elegida por Steden y Tellman [31] en su experimento y la utilizada en planta [43] es del tipo flat jet), se debe establecer las condiciones de operación, es decir la variación de parámetros como:

- ◆ La presión del fluido.
- ◆ La distancia entre la boquilla y la superficie del rodillo.
- ◆ El ángulo de incidencia del fluido.

### 5.2.1 PRESION.

El comportamiento del coeficiente de extracción de calor en función de la presión del fluido refrigerante se estudia al considerar condiciones constantes[31] de: flujo por unidad de área de agua de  $0.04 \text{ l min}^{-1}\text{mm}^{-2}$ ; ángulo de incidencia de  $0^\circ$  en boquillas a  $0.125 \text{ m}$  de distancia a la superficie del rodillo; la presión del líquido se varía de 0 a 20 bar. La relación encontrada (Ec. 5.2), entre el coeficiente de transferencia de calor ( $\alpha_L$ ) y la presión de agua ( $P$ ) y se representa en la figura 5.5.

$$\alpha_L = \alpha_{Ls} \exp(-3.71P^{-1.13}) \quad 0 < P < 20 \quad (5.2)$$

Donde:

$P$	= Presión.	(bar)
$\alpha$	= Coeficiente de transferencia de calor.	( $\text{W m}^{-2}\text{C}^{-1}$ )
$\alpha_{Ls}$	= 1.45 E+5 (agua)	( $\text{W m}^{-2}\text{C}^{-1}$ )

sub-indices:

$L$	= Fluido refrigerante.
$Ls$	= Saturación del fluido.

### 5.2.2 DISTANCIA.

El efecto en el coeficiente de extracción de calor y su relación con la distancia entre la boquilla y la superficie del rodillo de trabajo, se estudia bajo las condiciones[31] de: presión de 15 bar y flujo por unidad de área de agua de  $0.04 \text{ l min}^{-1}\text{mm}^{-2}$ , ángulo de incidencia de  $0^\circ$ . La distancia se varía de 0 a 0.25 m, encontrándose la relación entre el coeficiente de transferencia de calor ( $\alpha_L$ ) y la distancia (D) y se representa en la figura 5.6 (Ec. 5.3).

$$\alpha_L = (72 + 4.257/D) E+3 \quad 0 < D < 0.25 \text{ (mts.)} \quad (5.3)$$

Donde:

D = Distancia. (m)

$\alpha$  = Coeficiente de transferencia de calor. ( $\text{W m}^{-2}\text{C}^{-1}$ )

sub-índice:

L = Fluido refrigerante.

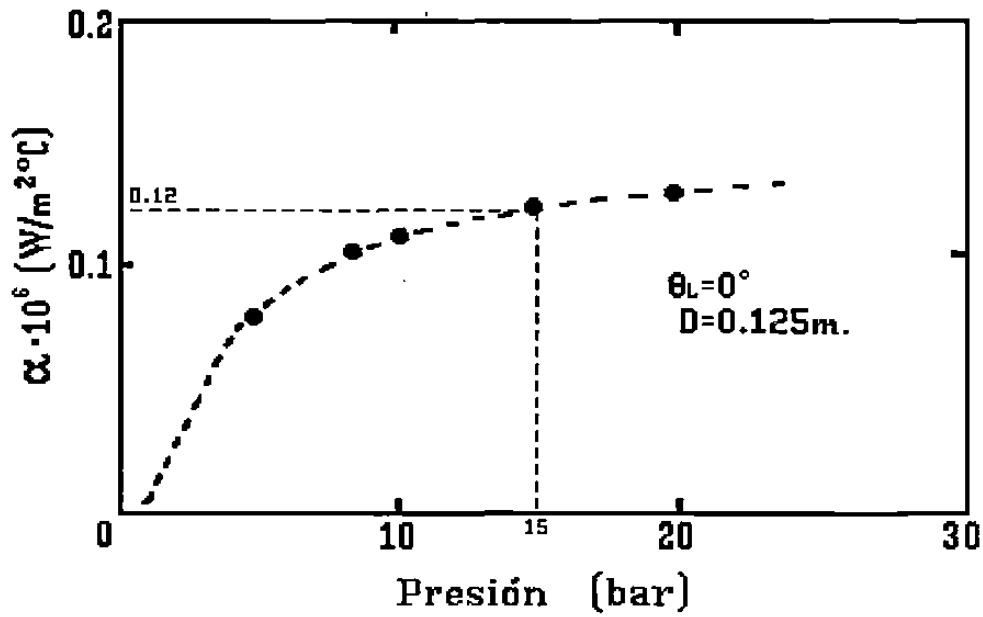


Fig. 5.5: Coeficiente de transferencia de calor como una función de la presión<sup>[31]</sup>.

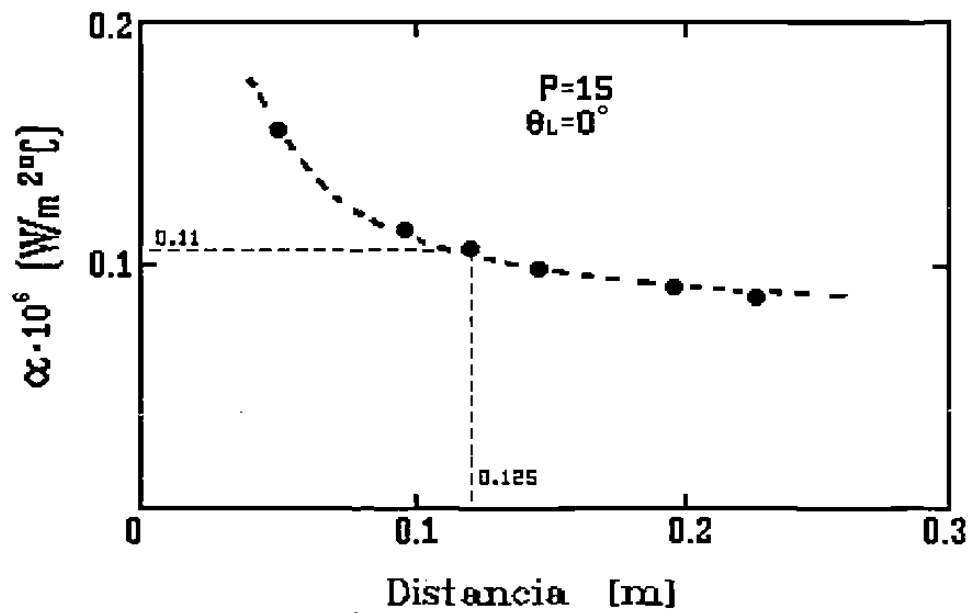


Fig. 5.6: Coeficiente de transferencia de calor como una función de la distancia<sup>[31]</sup>.

### 5.2.3 INCLINACION.

La dependencia del coeficiente  $\alpha$  con respecto a el ángulo de incidencia del fluido, con respecto a la normal de la superficie del rodillo de trabajo, se determinó al utilizar condiciones constantes[31] de: flujo por unidad de área de agua de  $0.04 \text{ l min}^{-1}\text{mm}^{-2}$ , presión de 15 bar y distancia de 0.125 m. Al variar el ángulo de incidencia del fluido, se encuentra una relación (Ec. 5.4) entre el coeficiente de transferencia de calor  $\alpha_L$  y el ángulo de incidencia  $\theta_L$  representada en la figura 5.7.

$$\alpha_L = 1.21 \cdot 10^5 - 50\theta_L \quad -25^\circ < \theta_L < 25^\circ \quad (5.4)$$

Donde:

$\theta$  = Angulo de incidencia. (°)  
 $\alpha$  = Coeficiente de transferencia de calor. ( $\text{W m}^{-2}\text{C}^{-1}$ )

sub-índice:

L = Fluido refrigerante.

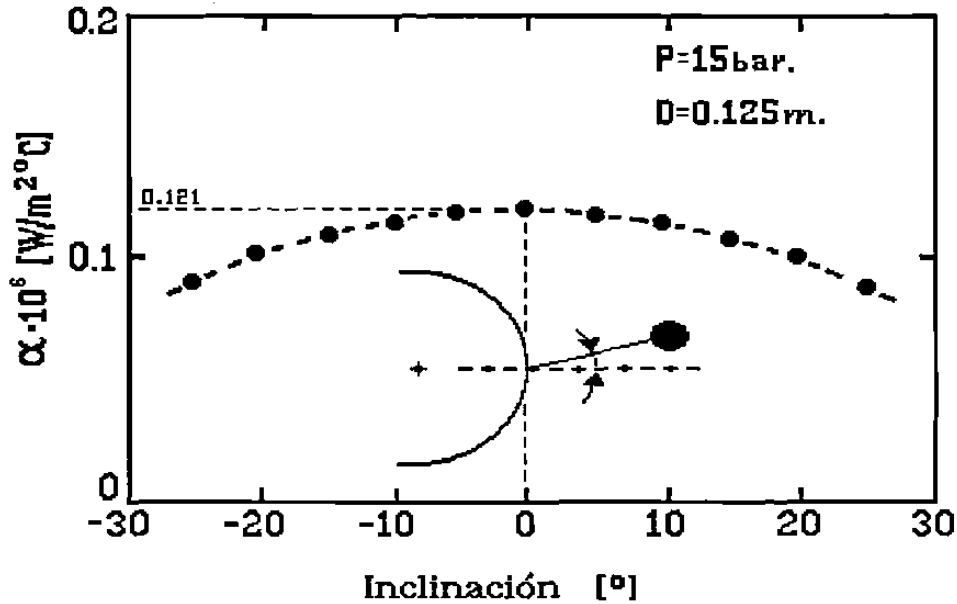


Fig. 5.7: Coeficiente de transferencia de calor como una función de la inclinación<sup>[31]</sup>.

### 5.3 CABEZALES DE REFRIGERACION.

En la sección 4.5 se describió la disposición geométrica de los cabezales de refrigeración en los castillos del molino continuo de laminación en caliente (F1...F6). En esta sección se presenta información general sobre la disposición de las boquillas en cada cabezal en los diferentes castillos y las características del coeficiente de extracción de calor " $\alpha$ " de las boquillas identificadas por su número de serie[44].

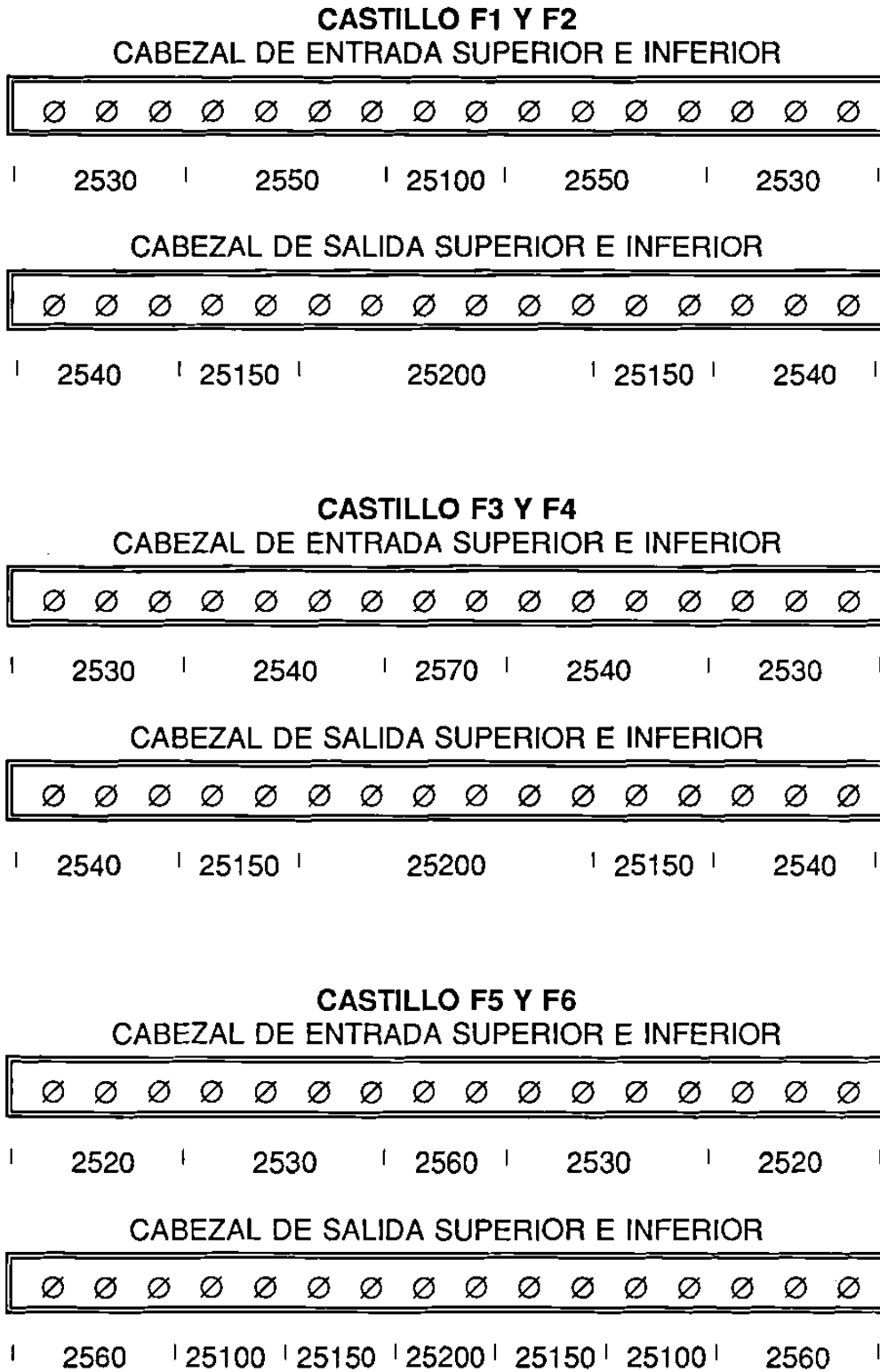


### 5.3.1 DISPOSICION DE LAS BOQUILLAS.

La disposición de las boquillas en el molino continuo de HYLSA se muestra en la figura 5.8, el cabezal porta dieciséis boquillas dispuestas en forma simétrica con respecto al centro del cabezal y separadas 3 pulgadas entre sí. Las boquillas se identifican con el número de serie del fabricante, que en este caso son del tipo flat jet.

### 5.3.2 CARACTERISTICAS DE LAS BOQUILLAS.

Las características de las boquillas empleadas (flat jet) en los cabezales de enfriamiento de los rodillos de trabajo del molino continuo se presenta en la tabla 5.1, la información sobre boquillas se tomaron del manual del fabricante[44], los valores de los coeficientes de transferencia de calor ( $\alpha$ ) se determinaron a partir del gasto de agua en la línea del molino de HYLSA y las condiciones de operación ( $\alpha'$ )[43].



**Fig. 5.8:** Disposición de las boquillas en los cabezales para los castillos del molino continuo.

**Tabla 5.1:** Características de las boquillas empleadas en los cabezales de enfriamiento de los rodillos de trabajo del molino continuo.

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

$\alpha_L$  = Coeficiente de Transferencia de Calor.

$\alpha'_L$  = Coeficiente de Transferencia de Calor modificado para el molino continuo  
HYLSA[31,43].

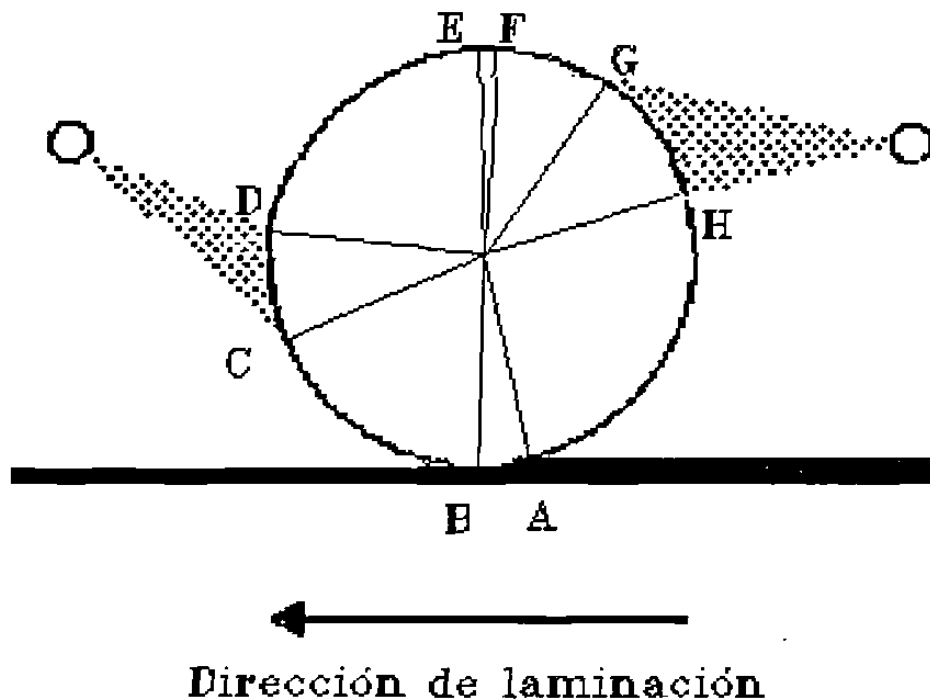
En el capítulo cuatro, en las secciones 4.3 y 4.6 se realizó la descripción de la modelación matemática de los principales mecanismos de transferencia de calor en la laminación en caliente, mismos en los que se basa en el programa computacional (apéndice A) para realizar la simulación del perfil térmico en la superficie del rodillo.

El cálculo del perfil térmico en la superficie del rodillo de trabajo superior del último castillo en el molino de laminación en caliente de la planta se realiza respetando las condiciones de operación.

Los perfiles de temperatura (gráficas: T vs t), se obtuvieron a partir de la evaluación de la solución del problema de transferencia de calor para el calentamiento y enfriamiento del modelo matemático del capítulo 4, se realiza el seguimiento o historia térmica de un punto fijo en la superficie del rodillo. El cálculo del perfil de temperatura se realiza en un rodillo de radio y velocidad tangencial de 0.23 m y  $6.1 \text{ m s}^{-1}$  (9 pulg. y  $1200 \text{ ft min}^{-1}$  castillo F6), con un comportamiento cuasi periódico, con período de 0.23 s.

La periferia del rodillo se divide en ocho regiones de transferencia de calor que se muestran en la figura 6.1, estas son:

- AB: Calentamiento, conducción lámina-rodillo.
- BC, DE, FG y HA: Enfriamiento, convección libre y conducción al interior del rodillo de trabajo.
- CD y GH: Enfriamiento, convección forzada y conducción al interior del rodillo de trabajo.
- EF: Enfriamiento, conducción rodillo de trabajo y de apoyo.



**Fig. 6.1:** Regiones de transferencia de calor en las que se divide la superficie del rodillo de trabajo.

Los números de serie de las boquillas[43, 44] a la entrada y salida de la zona de deformación son H1/2U2560 y H1/2U25200 (ver sección 5.3) respectivamente. En las tablas 6.1 y 6.2 se presenta de las propiedades térmicas y condiciones de operación.

**Tabla 6.1:** Propiedades físicas de la película de óxido, el rodillo de trabajo y la cinta de acero (0.1%C).

Propiedades	Oxido	Rodillo	Cinta	Unidades
Conductividad K	2.51	48.00	46.10	$W m^{-1}C^{-1}$
Densidad $\rho$	5728.00	7400.00	7850.00	$Kg m^{-3}$
Calor Específico Cp	113.40	520.00	494.00	$J Kg^{-1}K^{-1}$
Difusividad $\kappa$	3.86	12.47	11.87	$10^{-6}m^2s^{-1}$

**Tabla 6.2:** Datos de operación.

Líquido refrigerante temp. ambiente	agua	
Velocidad tangencial.	6.1 $m s^{-1}$	1200 $ft min^{-1}$
Radio del rodillo de trabajo.	0.4716 m	0.75 ft
Temperatura de la cinta de acero.	900 $^{\circ}C$	1652 $^{\circ}F$
Angulo de contacto rodillo-rodillo.	1 $^{\circ}$	0.017 rad
Angulo de mordida.	3.74 $^{\circ}$	0.064 rad
Boquilla H1/2U 25200 (salida de la zona de deformación).	100 000 $W m^{-2}C^{-1}$	
Boquilla H1/2U 2560 (entrada de la zona de deformación).	61 000 $W m^{-2}C^{-1}$	

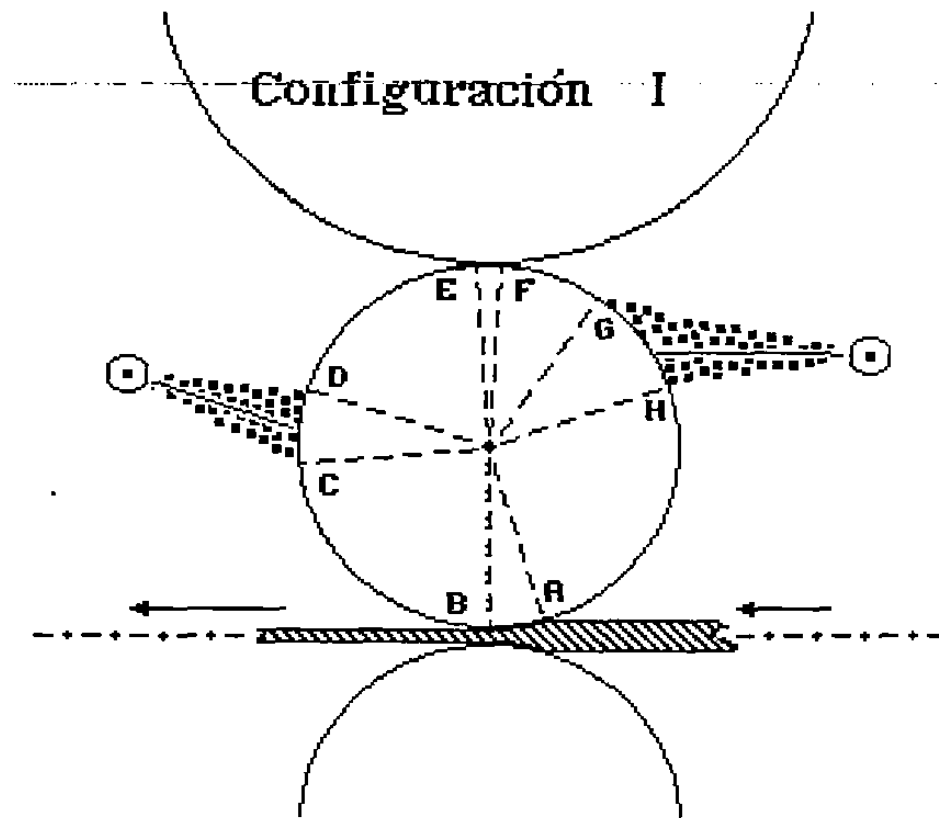
A continuación se presentan los perfiles de temperatura superficial en el estado transitorio del rodillo de trabajo superior (castillo F6) y la denominaremos como la configuración I.

Es conveniente mencionar que la temperatura ambiente se toma como marco de referencia para todas las configuraciones, por lo tanto, en cada una de las gráficas la lectura de temperatura es sobre la temperatura ambiente.

#### 6.1.1 CONFIGURACION I.

La configuración geométrica fue la siguiente: el cabezal a la salida de la zona de deformación esta colocado a una altura de 0.33 m (13"), medida desde la línea de paso y el chorro esta dirigido  $-25^\circ$ , el cabezal a la entrada de la zona de deformación esta colocado a una altura de 0.35 m (13.75"), medida desde la línea de paso y el chorro esta dirigido  $0^\circ$  (Fig. 6.2). Las distancias horizontales con respecto al centro del rodillo son de 0.46 m y 0.44 m (18.1" y 17.3") respectivamente para el cabezal de entrada y de salida, Fig. 4.8.

El perfil térmico de un punto fijo en la superficie del rodillo en su primer giro ( $t=0$  a  $t=0.23$  s), se muestra en la figura 6.3, el rodillo de trabajo se encuentra a temperatura ambiente, y se marcan los siguientes puntos a intervalos que corresponden a las regiones de transferencia de calor de la figura 6.1:



**Fig. 6.2:** Esquema de la disposición geométrica de los cabezales para la configuración I.

- A: Temperatura inicial (temp. ambiente al tiempo  $t=0$  s antes del contacto rodillo-lámina).
- AB: Brusco ascenso de temperatura por el contacto rodillo lámina en la zona de deformación.
- B: Temperatura a la salida de la zona de deformación.
- BC: Convección libre y difusión de calor al interior del rodillo, ocasionando el descenso de la temperatura superficial.
- C: Temperatura a la entrada de la zona refrigerada por el flujo de agua (boquilla a la salida de la zona de deformación).
- CD: Convección forzada por el efecto de el flujo de líquido refrigerante que incide en la superficie.

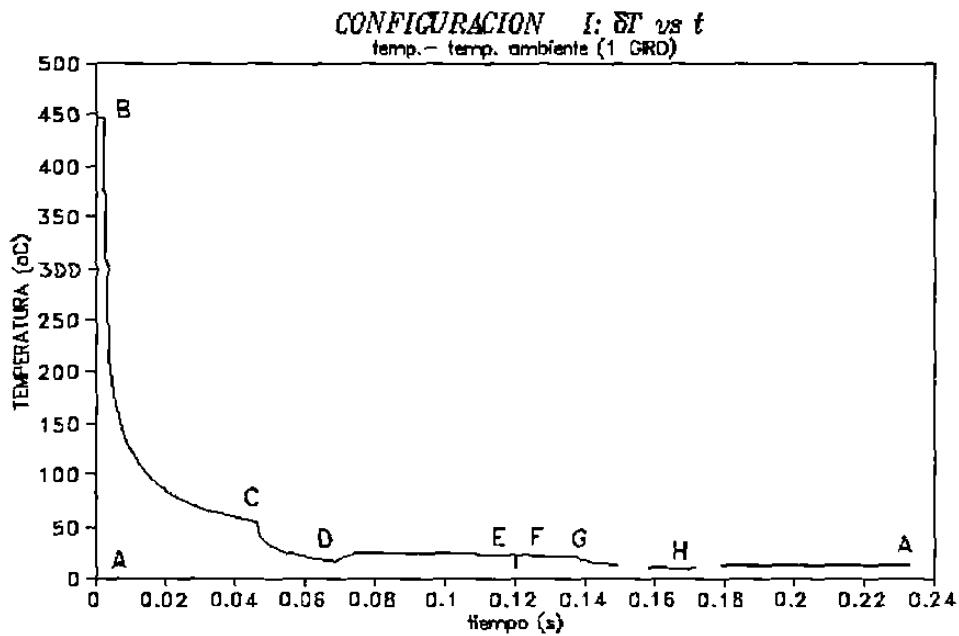


- D: Temperatura a la salida de la zona de refrigeración.
- DE: Convección libre y difusión de calor, un incremento en la temperatura y un posterior descenso, el ascenso es por el calor que difundió en las regiones AB y BC al tratar de alcanzar el estado de equilibrio térmico difundiendo ahora hacia la superficie, finalmente el descenso de temperatura poco apreciable por la convección libre.
- E: Temperatura antes del contacto con el rodillo de apoyo.
- EF: Conducción, brusco descenso de temperatura en la zona de contacto de los rodillos de trabajo y apoyo.
- F: Temperatura a la salida de la zona de contacto.
- FG: Convección libre y difusión de calor, zona con características semejante al intervalo DE.
- G: Temperatura a la entrada de la zona refrigerada por el flujo de agua.
- GH: Convección forzada por el efecto de el flujo de líquido refrigerante que incide en la superficie.
- H: Temperatura a la salida de la zona de refrigeración.
- HA: Convección libre y difusión de calor, zona con características semejante al intervalo DE.
- A: Temperatura al final e inicio de un giro.

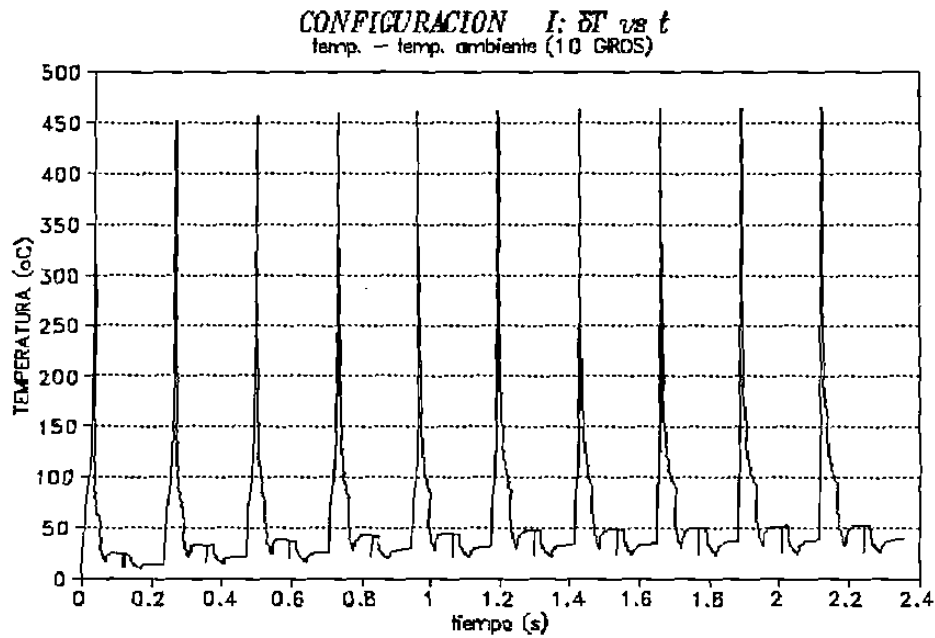
Esta descripción es válida para todas las zonas análogas a la configuración I.

Las figuras: 6.4, 6.5 y 6.6, muestran el perfil térmico del rodillo de trabajo para 10, 20 y 30 giros respectivamente. En la gráfica de 10 giros (Fig. 6.4) se observa fácilmente que el perfil de fig. 6.3 es cuasi periódico. Las figuras 6.5 y 6.6 se observa un ascenso gradual en la temperatura al término de cada giro, por lo que puede interpretarse como una onda periódica que es modulada por una envolvente inferior y otra superior.

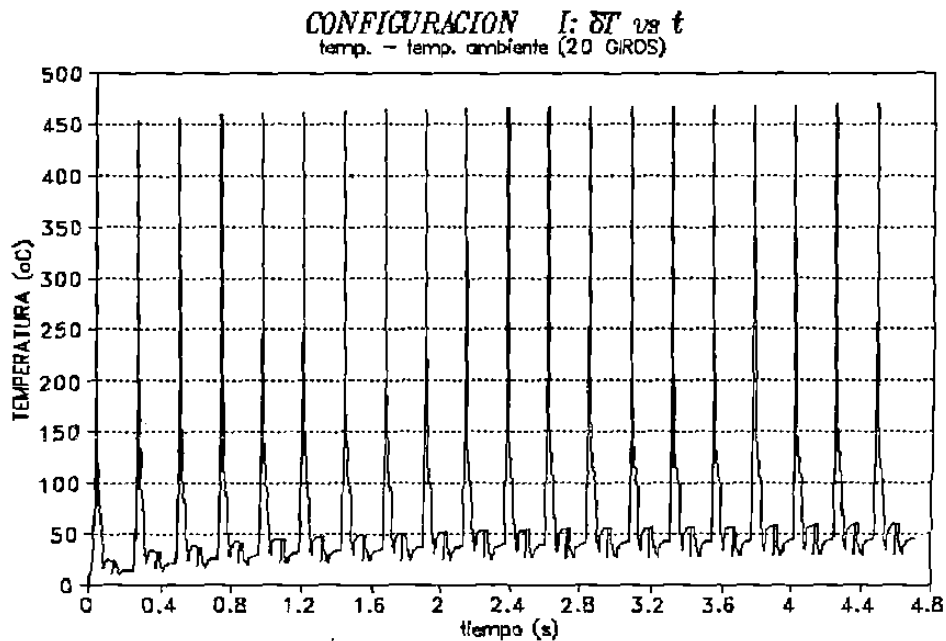
En figuras 6.7 y 6.8, se gráficas las temperaturas a la entrada y salida de la zona de deformación respectivamente al término de cada giro, donde es claro el incremento de temperatura con cada giro.



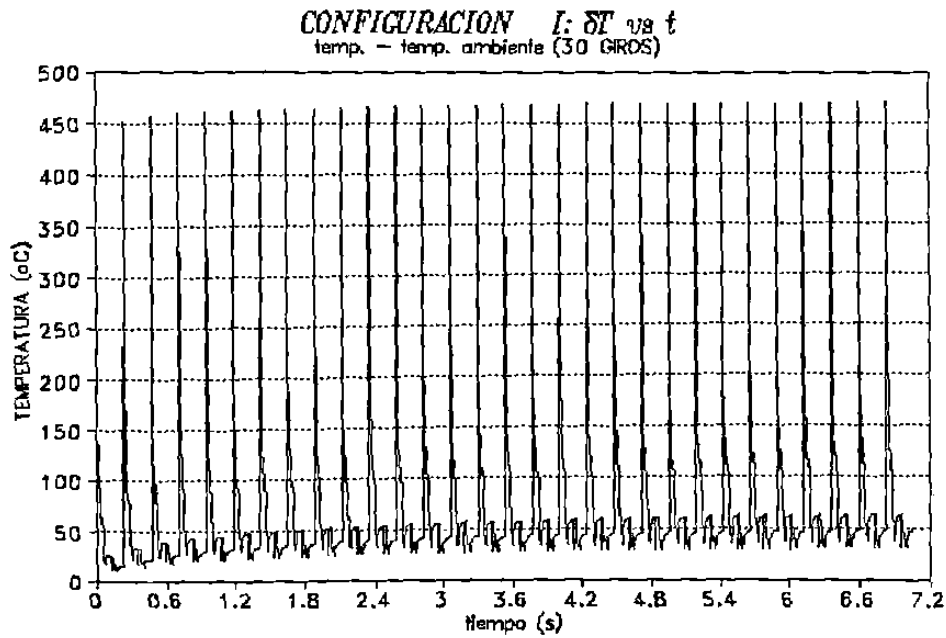
**Fig. 6.3:** Perfil térmico del primer giro, las regiones de transferencia corresponden a las marcadas en la figura 6.1.



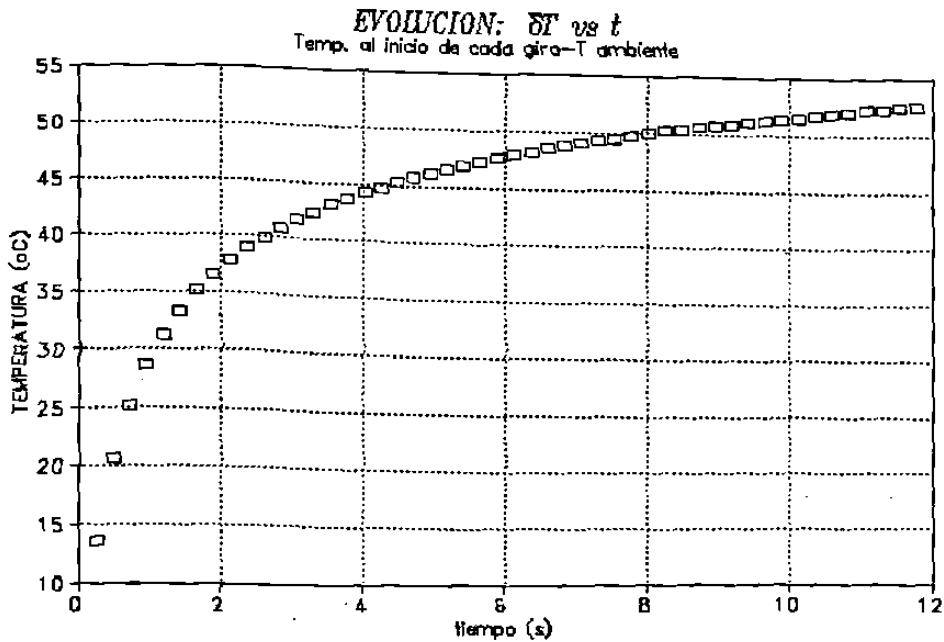
**Fig. 6.4:** Perfil térmico para los primeros 10 giros, es claro que el comportamiento térmico observado en la figura 6.3 es cuasi periódico.



**Fig. 6.5:** Perfil térmico para los primeros 20 giros, es claro el comportamiento periódico del perfil de temperaturas, observándose una envolvente interior y una superior.



**Fig. 6.6:** Perfil térmico para los primeros 30 giros, es claro el comportamiento periódico del perfil de temperaturas, observándose una envolvente inferior y una superior.



**Fig.6.7:** Temperaturas correspondientes a la envolvente inferior; registradas a la entrada de la zona de deformación, para los primeros 50 giros.

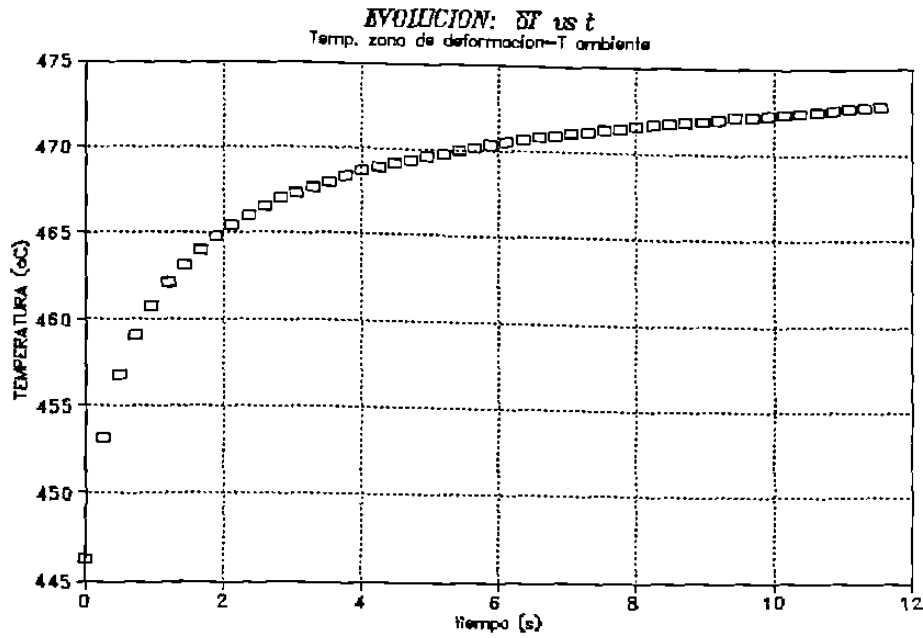


Fig.6.8: Temperaturas correspondientes a la envoltura superior; registradas a la salida de la zona de deformación para los primeros 50 giros.

## **7 RESULTADOS.**

### **7.1 INTRODUCCION.**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la simulación del perfil térmico superficial en estado transitorio de un rodillo de trabajo para laminación en caliente.

El modelo tiene la finalidad de simular el comportamiento del perfil térmico en la superficie del rodillo de trabajo y el efecto que en él causa la disposición del sistema de refrigeración.

El simulador al ser capaz de calcular el flujo de calor y la temperatura en la superficie, da información sobre el efecto que la disposición geométrica del sistema de enfriamiento sobre el proceso. En principio, esta información es útil para la optimización del sistema de refrigeración; iniciando por la reubicación geométrica de los cabezales y permitiendo la simulación de nuevos sistemas de refrigeración sin tener que realizar las pruebas en la línea de laminación ni la compra del equipo. Al conocer la evolución de la temperatura en el rodillo de trabajo es posible calcular la dilatación que este sufre y, por lo tanto su corona térmica, que junto con la corona mecánica son importantes para el control del perfil y planeza de la lámina.

La simulación se realizó a partir de información sobre las condiciones de operación del molino F6 de laminación en caliente. Las disposición geométrica de los cabezales que constituyen el sistema de enfriamiento (configuración I) se resumen en la figura 7.1. Las propiedades físicas del rodillo, óxido y lámina de acero, así como las condiciones generales de operación se presentan en las tablas 7.1 y 7.2 respectivamente.

**Tabla 7.1:** Propiedades físicas de la película de óxido, el rodillo de trabajo y la cinta de acero (0.1%C).

Propiedades	Oxido	Rodillo	Cinta	Unidades
Conductividad K	2.51	48.00	46.10	$W m^{-1} \circ C^{-1}$
Densidad $\rho$	5728.00	7400.00	7850.00	$Kg m^{-3}$
Calor Especifico $C_p$	113.40	520.00	494.00	$J Kg^{-1} K^{-1}$
Difusividad $\kappa$	3.86	12.47	11.87	$10^{-6} m^2 s^{-1}$

Donde:

$$x_e = 0.46 \text{ m (18")}$$

$$x_s = 0.44 \text{ m (17.5")}$$

$$y_1 = 0.35 \text{ m (13.75")}$$

$$y_2 = 0.36 \text{ m (14")}$$

$$y_3 = 0.40 \text{ m (15.5")}$$

$$y_4 = 0.33 \text{ m (13")}$$

$$\theta_1 = 5^\circ$$

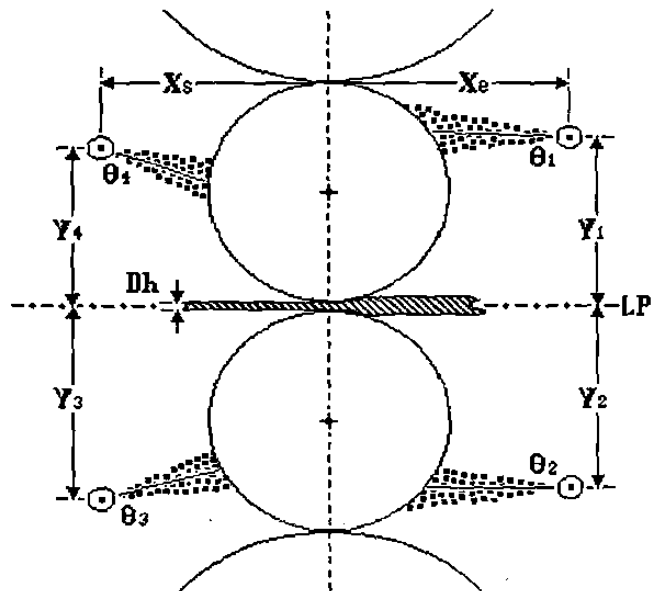
$$\theta_2 = 0^\circ$$

$$\theta_3 = 30^\circ$$

$$\theta_4 = -25^\circ$$

Dh - Claro.

LP - Línea de Paso.



**Fig. 7.1:** Diagrama de la disposición del sistema de enfriamiento en el último castillo del tren continuo.

Tabla 7.2: Datos de operación.

Líquido refrigerante temp. ambiente	agua	
Velocidad tangencial.	6.1 m s <sup>-1</sup>	1200 ft min <sup>-1</sup>
Radio del rodillo de trabajo.	0.4716 m	0.75 ft
Temperatura de la cinta de acero.	900 °C	1652 °F
Angulo de contacto rodillo-rodillo.	1°	0.017 rad
Angulo de mordida.	3.74°	0.064 rad
Boquilla H1/2U 25200 (salida de la zona de deformación).	100 000 W m <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup>	
Boquilla H1/2U 2560 (entrada de la zona de deformación).	61 000 W m <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup>	

## 7.2 RESULTADOS: CONFIGURACIONES I, II Y III.

En el capítulo seis se realizó la simulación del perfil de temperaturas en la superficie del rodillo de trabajo para las condiciones de operación en planta, simulándose el estado transitorio para los primeros cincuenta giros. Se partió de la condición de equilibrio de rodillo con el medio ambiente, es decir, desde el primer contacto entre el rodillo laminador y la pieza a laminar.

En la figura 7.2, se resume el esquema de tres disposiciones geométricas a simular de los cabezales de enfriamiento, se remarca que éste es el único parámetro de operación del castillo que se modifica en cada una de las configuraciones, mientras que los restantes



parámetros del proceso tales como: características físicas de los materiales en contacto (rodillo, cinta de acero y película de óxido), radio y velocidad de giro del rodillo y tipo de boquilla son constantes.

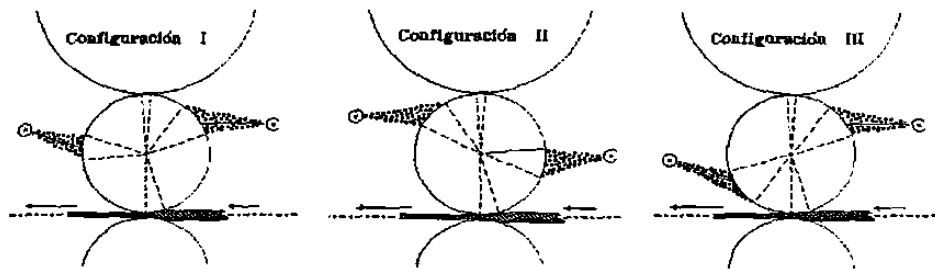


Fig. 7.2:  
Configuraciones.

Las configuraciones son las siguientes:

I) Se centró la aplicación del sistema de enfriamiento en una zona intermedia de la superficie del rodillo de trabajo entre la lámina y el rodillo de apoyo en la regiones de entrada y salida de la lámina de acero (caso actualmente empleado en la planta, simulación realizada en el capítulo anterior).

II) Se simuló la dirección del sistema de enfriamiento hacia la región de entrada de la lámina.

III) Se simuló el sistema de enfriamiento con tendencia a la región de salida de la lámina.

El rodillo de trabajo se dividió en ocho sectores angulares, que se muestran en la figura 7.3, asociados a diferentes regímenes de transferencia de calor.

i. Región **AB**. contacto entre lámina y rodillo de trabajo, en la que se encuentra el máximo ascenso de temperatura en la superficie del rodillo.

ii. Regiones **BC**, **DE**, **FG** y **HA**. enfriamiento de la superficie por convección al aire y conducción al centro del rodillo.

iii. Regiones **CD** y **GH**. enfriamiento por el contacto con el líquido arrojado por las boquillas y conducción al centro del rodillo.

iv. Región **EF**. conducción de calor al rodillo de apoyo.

En la tabla 7.3 se presentan los valores de los arcos sometidos a estos mecanismos de transferencia de calor.

En la Fig. 7.4 se muestra el perfil térmico a que está sometido un punto en la periferia del rodillo, sujeto este último a las condiciones de enfriamiento producidas por el sistema actual (I). Las letras **A** a la **H** del diagrama corresponden

a las posiciones angulares de la Fig. 7.3. Las Figs. 7.5 y 7.6 muestran los perfiles obtenidos al simular las configuraciones II y III.

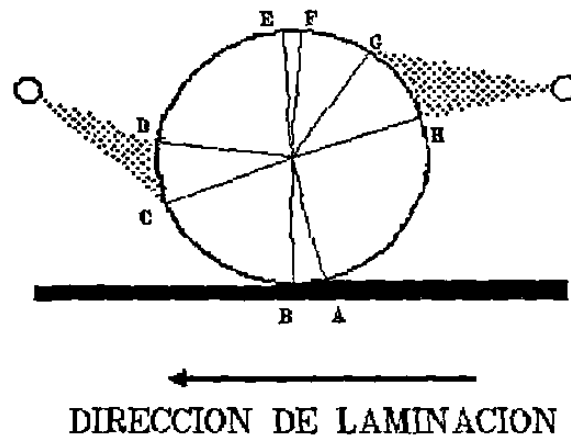


Fig. 7.3: Sectores angulares en los que se divide el rodillo de trabajo.

El efecto de la disposición del sistema de enfriamiento para las tres configuraciones anteriores no es apreciable en los perfiles de temperaturas en su primer giro. Solo es apreciable el corrimiento de las regiones de enfriamiento por el contacto con el líquido arrojado por las boquillas.

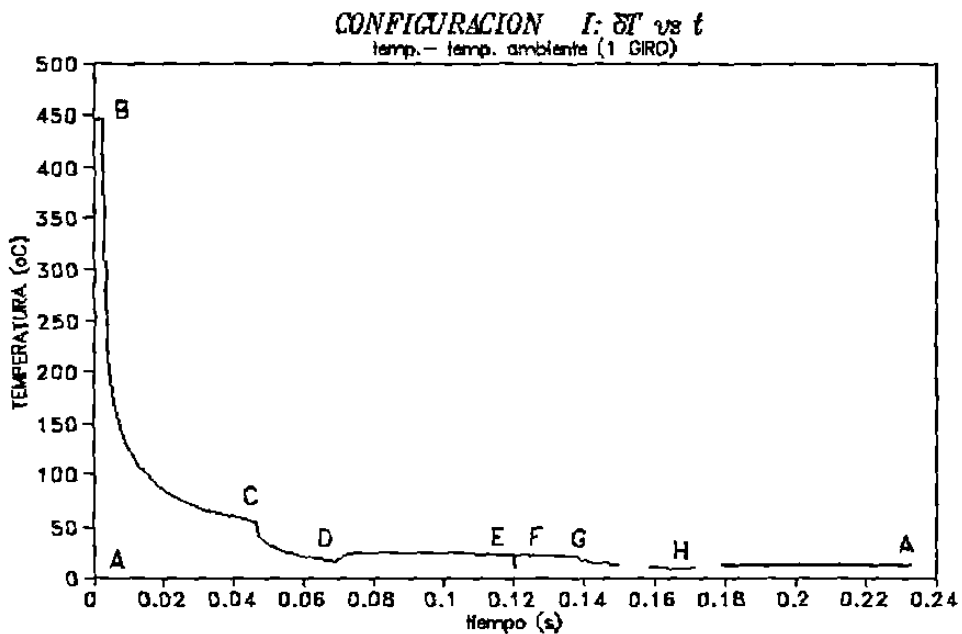


Fig. 7.4: Simulación del primer giro del rodillo de trabajo. Las letras A a al H corresponden a los sectores angulares mostrados en la figura 7.3.

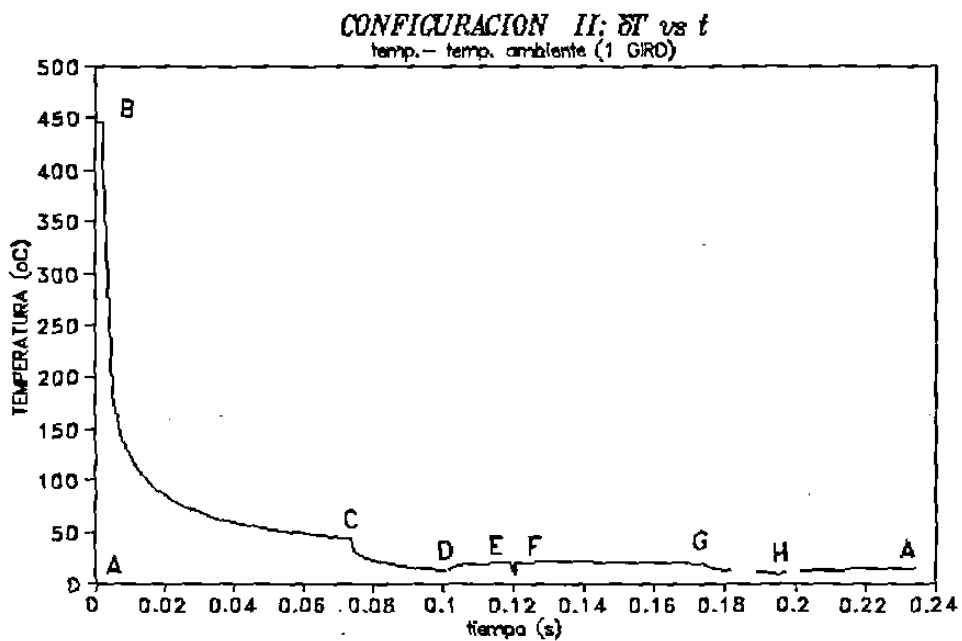


Fig. 7.5: Simulación del primer giro térmico para un rodillo de trabajo, según la disposición geométrica de los cabezales del sistema refrigerante de la configuración II.

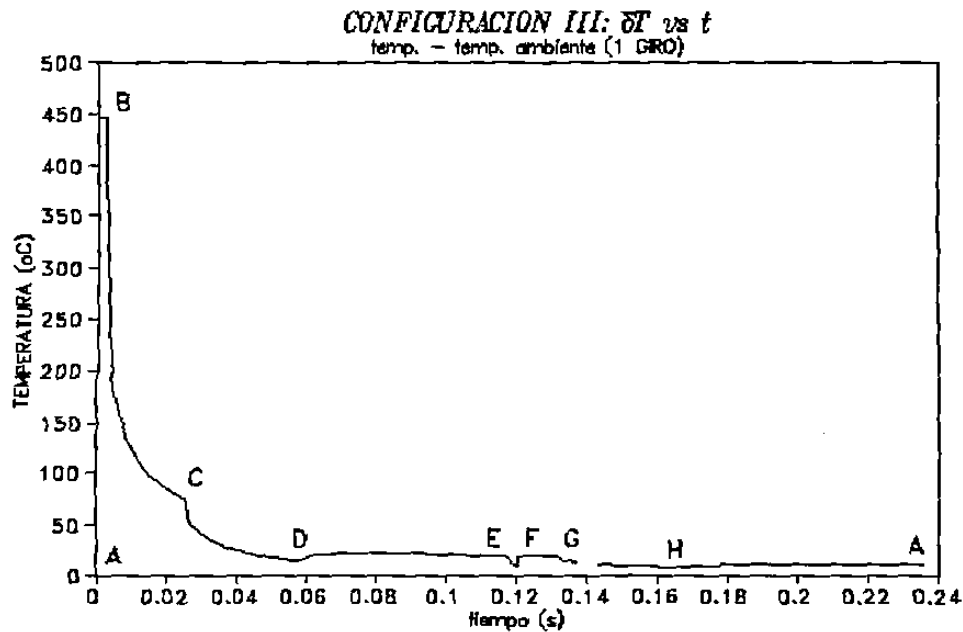


Fig. 7.6: Simulación del primer giro térmico para un rodillo de trabajo con el sistema de refrigeración en la configuración III.

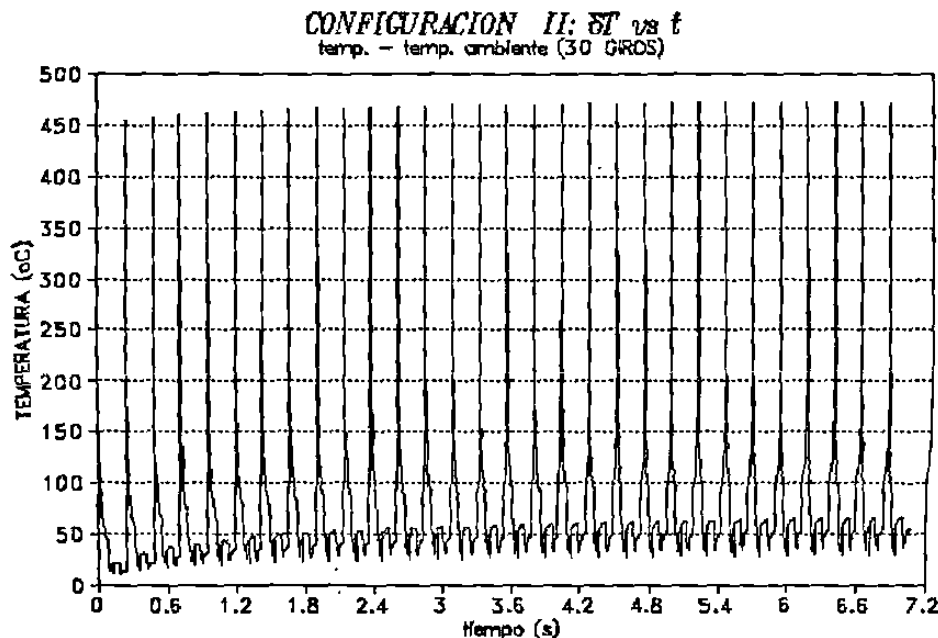
Tabla 7.3: Sectores angulares sometidos a los diferentes mecanismos de transferencia de calor en relación a la figura 7.3 para cada configuración.

Sector Angular (°)	I	II	III
A-B	3.7	3.7	3.7
B-C	67.1	108.6	35.3
C-D	34.9	42.1	50.7
D-E	77.5	28.8	93.5
E-F	1.0	1.0	1.0
F-G	26.2	80.9	17.5
G-H	48.6	33.9	55.6
H-A	101.0	61.0	102.7
TOTAL	360.0	360.0	360.0

Es conveniente mencionar que la temperatura máxima en la superficie del rodillo, obtenida a la salida de la cinta, concuerdan con las predicciones de otros modelos[16-18,27].

La observación y cuantificación del efecto de la disposición geométrica de los cabezales de refrigeración, en el fenómeno del calentamiento del rodillo de trabajo, se realiza por la comparación de los perfiles de temperatura y por la comparación del flujo de calor que entra al rodillo.

Las figuras 7.4 a 7.6 muestran claramente que el comportamiento en los tres casos es muy parecido, por lo que se requiere observar el efecto acumulado del fenómeno de transferencia tal como se realizó en el capítulo anterior para la configuración I (Fig. 6.6), en la figura 7.7, se presenta la los perfiles para los primeros treinta giros para la configuración II. En esta



**Fig. 7.7:** Perfil de temperatura para los primeros 30 giros (configuración II). Nótese el incremento de la temperatura a la entrada y salida de la zona de deformación.

figura se aprecia el incremento de la temperatura a la entrada y salida de la zona de deformación, que puede visualizarse como envolventes (se presento claramente en la figuras 6.7 y 6.8 para la configuración I) del comportamiento cíclico de las temperaturas en la superficie del rodillo de trabajo. Para la configuración III es similar.

Es precisamente con el uso de las curvas de evolución de temperatura, a la entrada y salida de la zona de deformación, como es posible observar el efecto que la disposición geométrica de los cabezales de refrigeración tiene sobre el perfil de temperatura en los rodillos. De ahí que se requiera realizar las siguientes comparaciones:

- A: Se comparan las temperaturas en la superficie del rodillo justo antes de tener contacto con el planchón (a la entrada de la zona de deformación o iniciales a cada giro, en la figura 6.7 se realizo para la configuración I) para las tres configuraciones y se presenta en la figura 7.8.
- B: Se realiza lo anterior con las correspondientes temperaturas a la salida de la zona de deformación (Fig. 6.8 configuración I), es decir la zona donde la superficie del rodillo alcanza la temperatura máxima y se gráfica en la figura 7.9.
- C: Finalmente se realiza la diferencia de la temperatura a la salida de la zona de deformación y temperatura al inicio de cada giro correspondiente para cada configuración (ver la Fig.7.10).

Es importante recordar que los valores de la temperaturas no son absolutos, sino la diferencia con respecto a la ambiente.

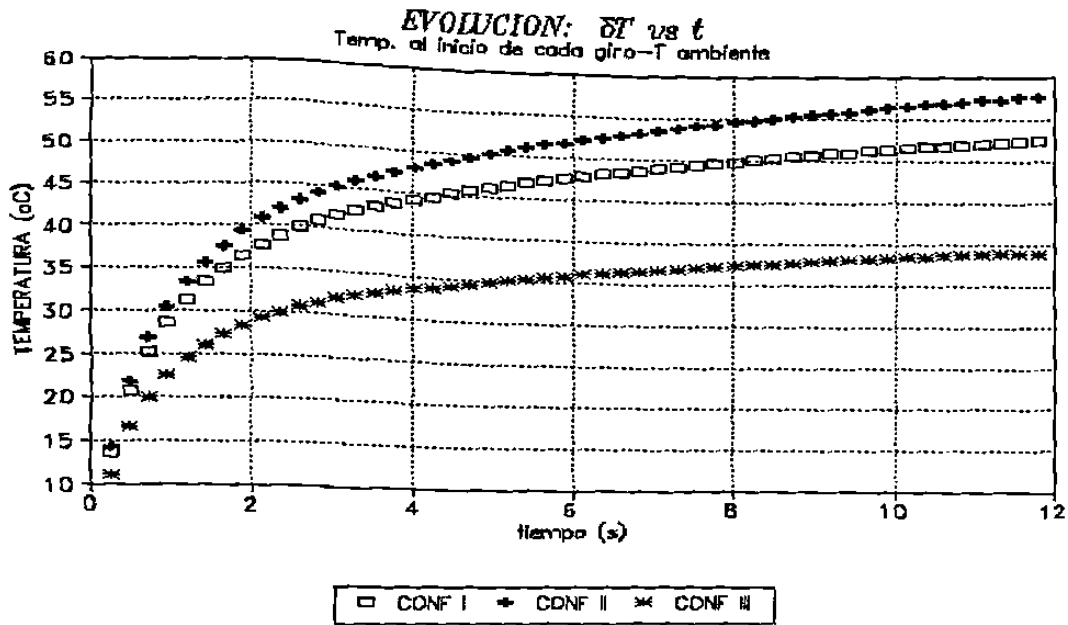


Fig. 7.8: Comparación de las temperaturas a la entrada de la zona de deformación para las tres configuraciones.

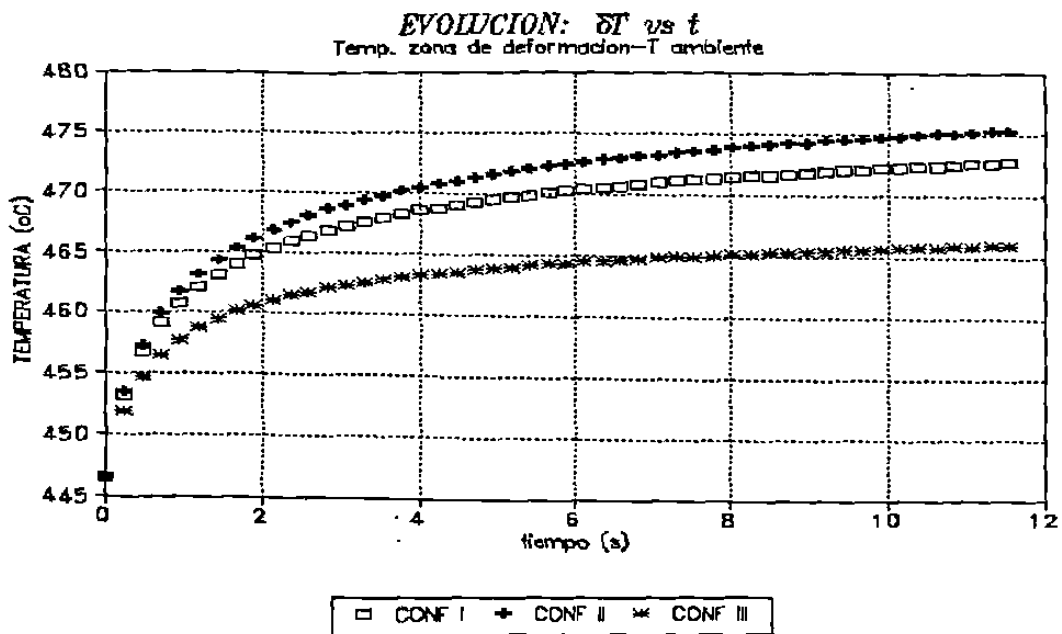


Fig. 7.9: Temperatura a la salida de la zona de deformación para cada una de las configuraciones.

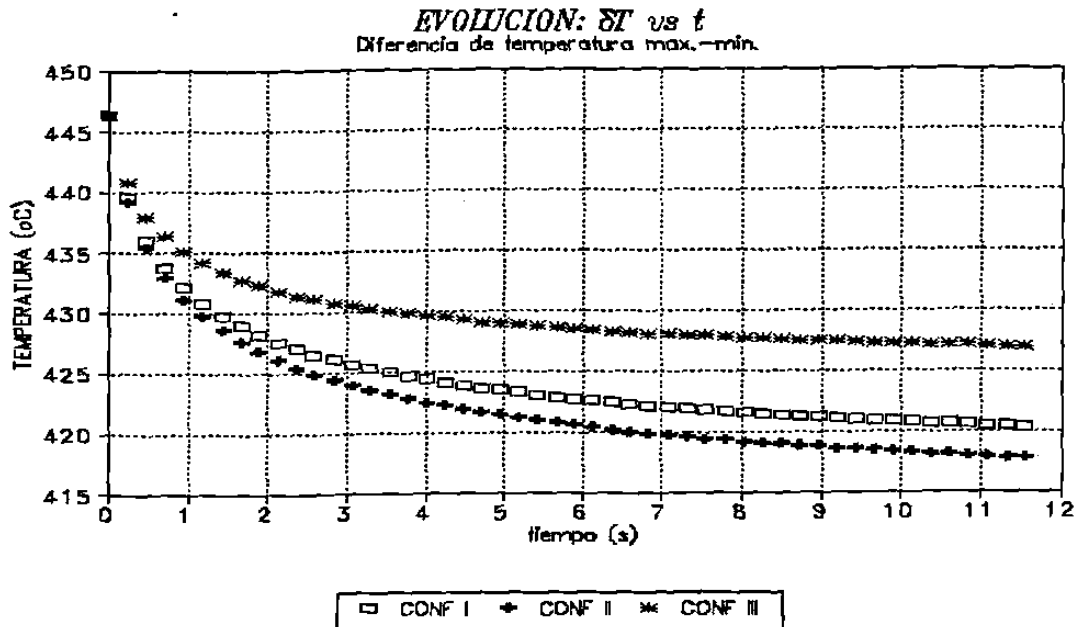


Fig. 7.10: Diferencia de temperatura de los perfiles de temperatura a la salida y entrada de la zona de deformación para las diferentes disposiciones geométricas de los cabezales de enfriamiento.

Finalmente, se cuantifica el efecto de la disposición geométrica de los cabezales de refrigeración, por el cálculo del flujo de calor por unidad de tiempo que entra al rodillo de trabajo en cada una de las tres configuraciones, por medio del simulador a partir de las ecuaciones de flujo de calor presentadas en el capítulo cuatro en función del fenómeno de transferencia de calor que exista para cada región angular (Fig. 7.3):

i) Calentamiento: conducción rodillo-óxido-lámina (Ec. 4.11).

ii) Enfriamiento: convección al aire o por el líquido refrigerante (Ec. 4.14) y por conducción del rodillo de trabajo al de apoyo (Ec. 4.17).



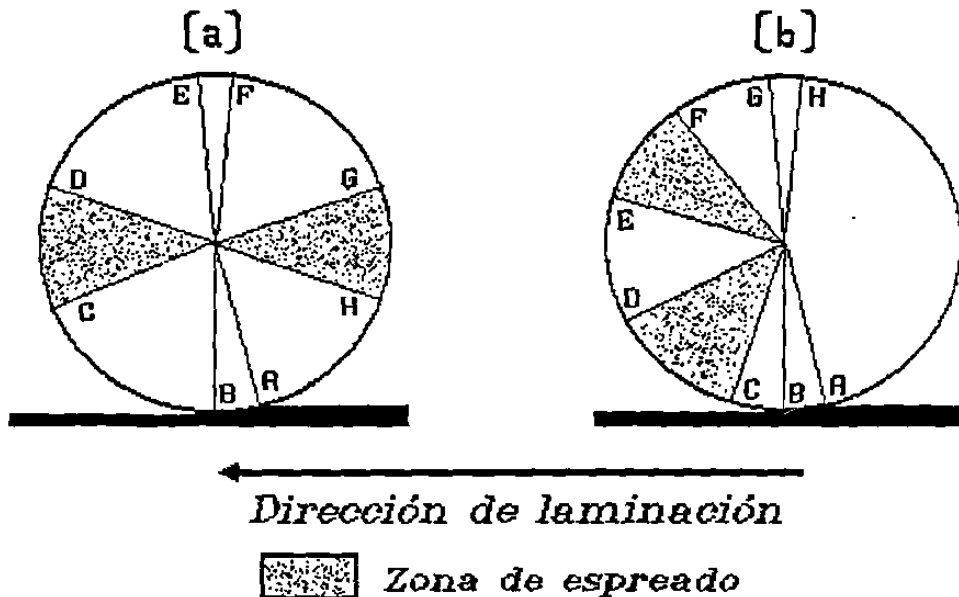
En la tabla 7.4. se resumen los resultados obtenidos, la energía por unidad de área que ingresa al rodillo de trabajo hasta el quincuagésimo giro o ciclo térmico, así como las temperaturas a la entrada y salida de la zona de deformación y la diferencia de temperatura a la salida y entrada a la zona de deformación.

**Tabla 7.4:** Resultados para cada configuración respecto a el flujo de calor por unidad de tiempo acumulado durante los 50 primeros giros (la energía/área) y las temperaturas a la entrada y salida de la zona de deformación y su diferencia en el quincuagésimo giro.

Configuración	Energía por Unidad de Area		Temperatura °C Zona de Deformación		
	J m <sup>2</sup>	cal ft <sup>2</sup>	Entrada	Salida	Δ T
I	4.64E7	1.03E6	52	473	421
II	2.92E7	6.48E5	58	475	417
III	0.34E7	7.55E4	39	466	427

### 7.3 RESULTADOS: PRUEBAS I A IV.

En las configuraciones anteriores se realizó modificando la disposición geométrica de los cabezales de enfriamiento, ésta modificación implica la variación en la distancia del cabezal a la superficie, en la incidencia del líquido refrigerante y en los sectores angulares sometidos a la refrigeración. Con el fin de aclarar el efecto del líquido refrigerante aplicado a la superficie del rodillo en zonas de igual sector angular se realiza la simulación de cuatro configuraciones prueba; las primeras tres poseen la ubicación de los cabezales de enfriamiento a la entrada y salida de la lámina (Fig 7.11 a), y en la última los dos cabezales se encuentran a la salida de la lámina (Fig 7.11 b).



**Fig. 7.11:** Zonas de transferencia de calor en los que se divide la superficie del rodillo de trabajo.

Las propiedades físicas del rodillo, óxido y cinta así como las condiciones de operación son las mismas que se presentaron en la tabla 7.1 y 7.2 respectivamente.

El rodillo es sometido a los regimenes de transferencia de calor; figura 7.11:

- i. Región **AB**, contacto entre lámina y rodillo de trabajo, en la que se encuentra el máximo ascenso de temperatura en la superficie del rodillo.
- ii. Regiones **BC, DE, FG y HA**. Enfriamiento de la superficie por convección al aire y conducción al centro del rodillo.

**Diagrama (a):**

- iii. Regiones **CD y GH**, enfriamiento por el contacto con el líquido arrojado por las boquillas.
- iv. Región **EF**, conducción de calor al rodillo de apoyo.

**Diagrama (b):**

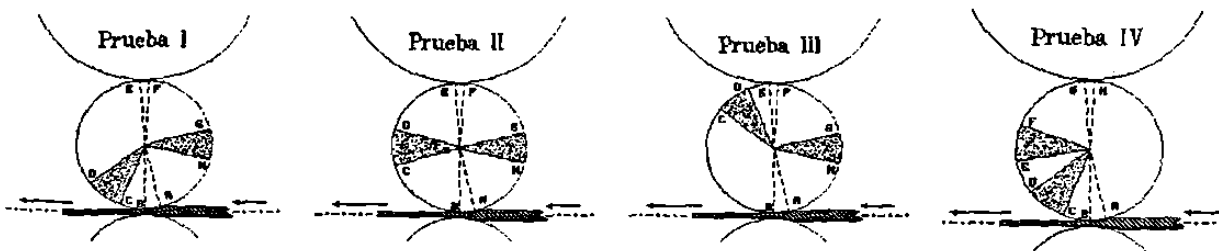
- iii. Regiones **CD y EF**, enfriamiento por el contacto con el líquido arrojado por las boquillas.
- iv. Región **GH**, conducción de calor al rodillo de apoyo.

La tabla 7.5 presenta los valores de los arcos sometidos a estos mecanismos de transferencia de calor, observe que el arco barrido por el líquido refrigerante es de 30° en toda las simulaciones prueba y en la figura 7.12 resume el esquema de las cuatro disposiciones geométricas.

En las figuras 7.13 a 7.16 se presenta el perfil de temperatura en la superficie del rodillo de trabajo en su primer giro, en ellas se observa con claridad la ubicación del sistema de refrigeración. En las tres primeras (Figs. 7.13 a 7.15) la zona refrigerada por el cabezal a la entrada de la lámina se mantiene fija y sólo se desplaza la región refrigerada a la salida de esta zona. Mientras que en la figura 7.16 los dos cabezales se encuentran a la salida de la zona de deformación.

**Tabla 7.5:** Sectores angulares sometidos a los diferentes mecanismos de transferencia para las diferentes simulaciones prueba.

Sector Angular	I	II	III	IV
A-B	3.7	3.7	3.7	3.7
B-C	11.3	71.3	136.3	11.3
C-D	30.0	30.0	30.0	30.0
D-E	138.2	78.2	13.2	30.0
E-F	1.0	1.0	1.0	30.0
F-G	70.8	70.8	70.8	78.2
G-H	30.0	30.0	30.0	1.0
H-A	75.0	75.0	75.0	175.8
TOTAL	360.0	360.0	360.0	360.0



**Fig. 7.12:** regiones sometidas a el sistema de refrigeración en las simulaciones prueba ver tabla 7.5.

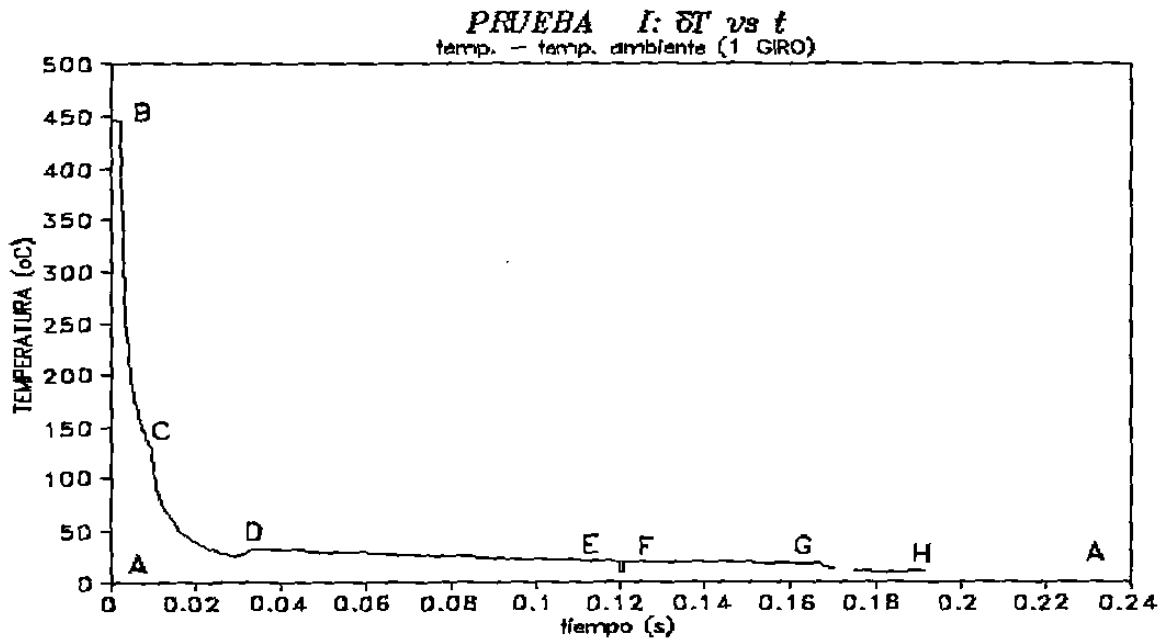


Fig. 7.13: Simulación del primer ciclo térmico para un rodillo de trabajo con el sistema de refrigeración para la Prueba I. El cabezal se aproxima a la zona de deformación.

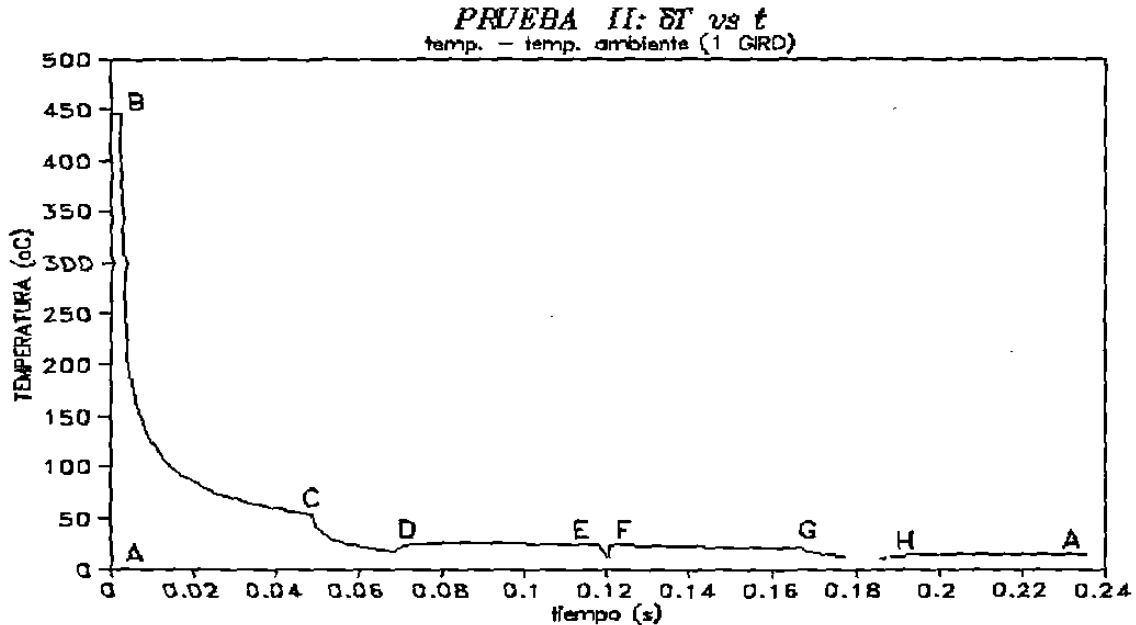


Fig. 7.14: Ciclo térmico para la configuración Prueba II. El cabezal se centra entre la zona de deformación y la zona de contacto rodillo de trabajo y el de apoyo.

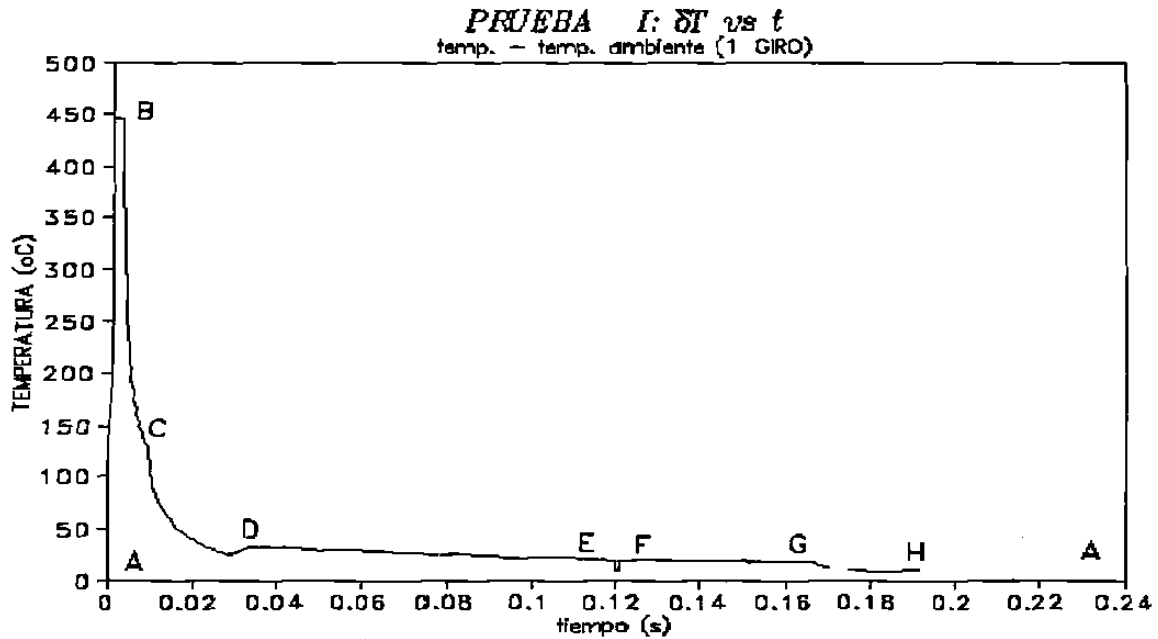


Fig. 7.13: Simulación del primer ciclo térmico para un rodillo de trabajo con el sistema de refrigeración para la Prueba I. El cabezal se aproxima a la zona de deformación.

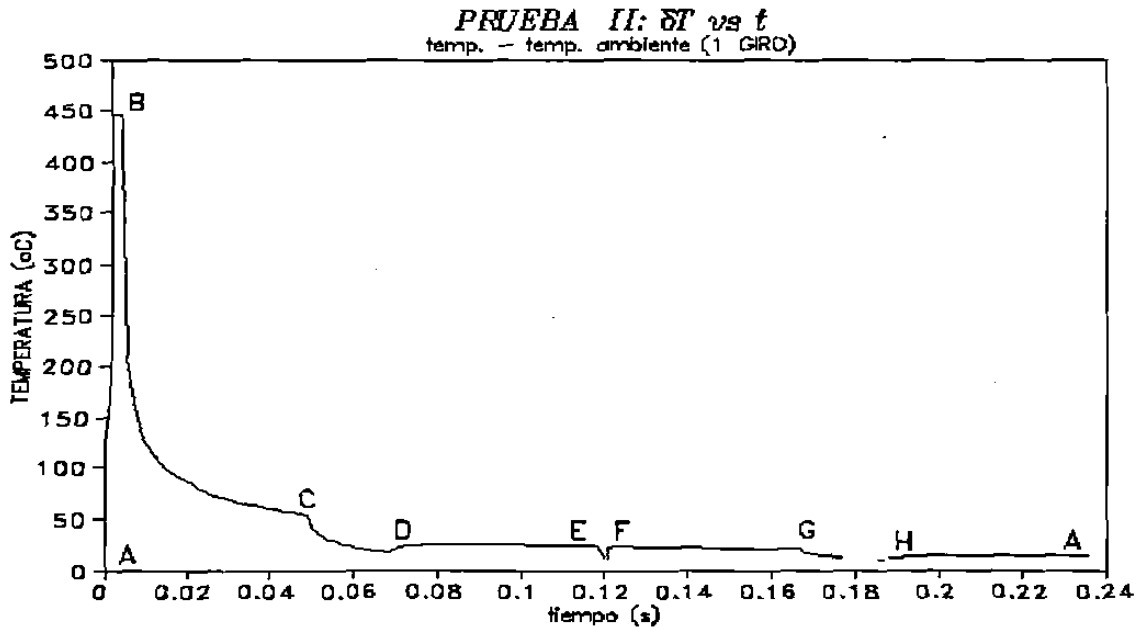


Fig. 7.14: Ciclo térmico para la configuración Prueba II. El cabezal se centra entre la zona de deformación y la zona de contacto rodillo de trabajo y el de apoyo.

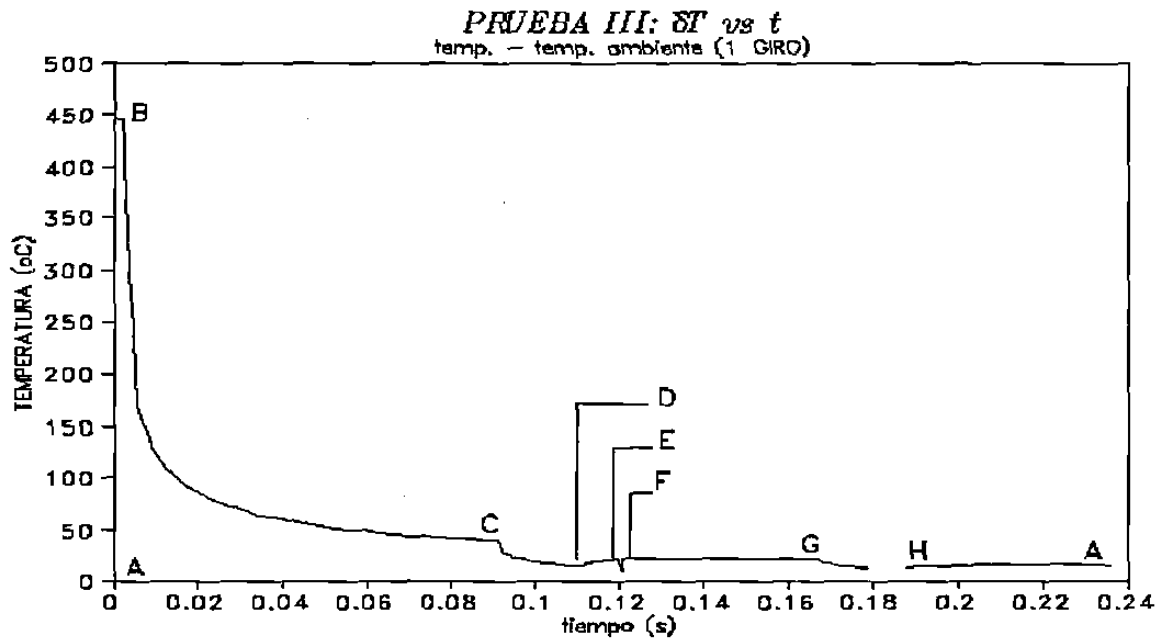


Fig. 7.15: Ciclo térmico para la configuración Prueba III. El cabezal se aleja de la zona de deformación.

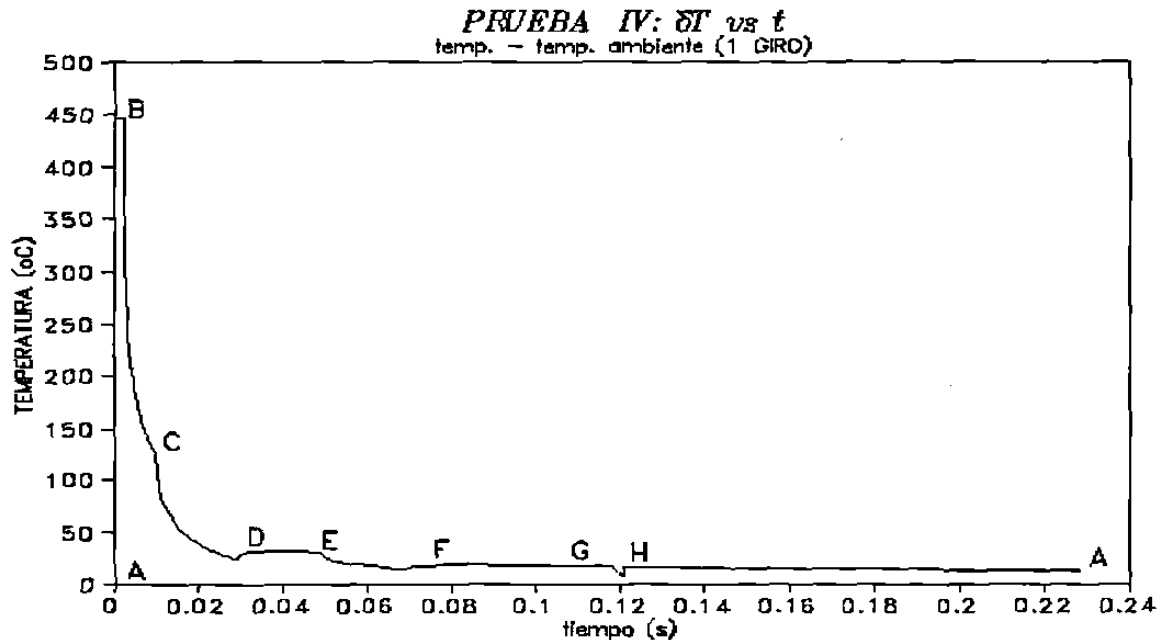


Fig. 7.16: Ciclo térmico para la configuración Prueba IV. Ambos cabezales se encuentran a la salida de la zona de deformación, ver tabla 7.5.

La observación y cuantificación del efecto de la disposición geométrica se realiza como en el caso anterior (configuraciones I a III). El comportamiento ascendente del perfil térmico para las temperatura a la entrada y salida de la zona de deformación se gráfica en las figuras 7.17 y 7.18 respectivamente. En estas, se presenta las envolventes para las cuatro configuraciones prueba y finalmente se realiza la diferencia de temperaturas a la salida y la entrada a la zona de deformación (Fig. 7.19). Las temperaturas a la entrada y salida de la zona de deformación y su diferencia en el vigésimo giro se presenta en la tabla 7.6. El flujo de calor por unidad de tiempo neto acumulado para los primeros 20 giros se presenta en la tabla 7.6.

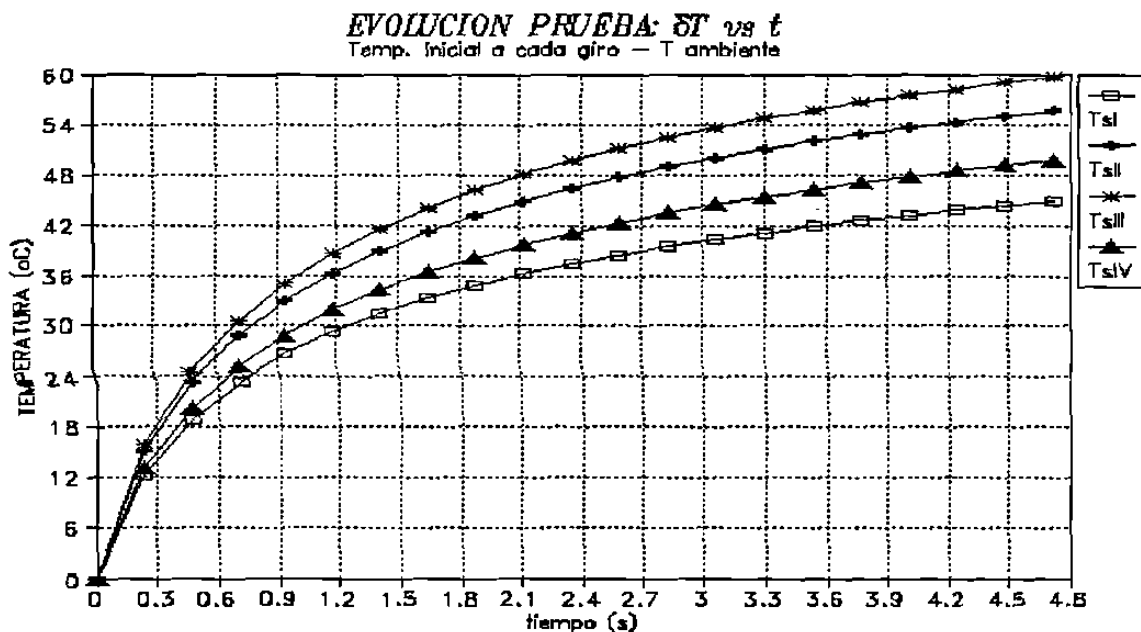


Fig. 7.17: Evolucion de la temperatura a la entrada a la zona de deformación para las cinco configuraciones prueba.



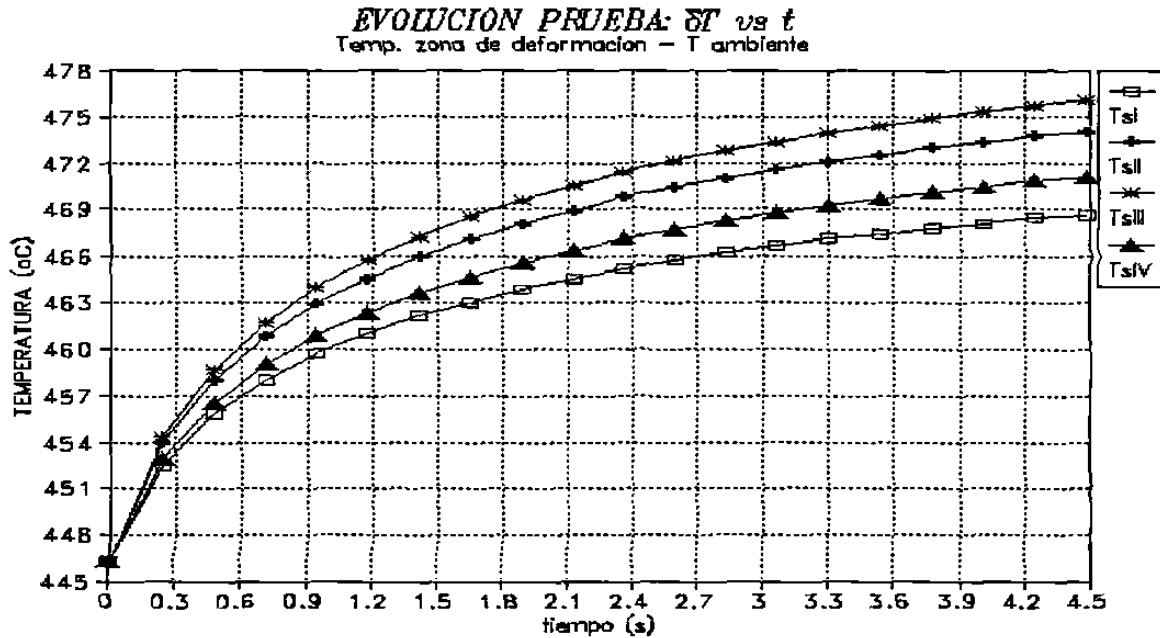


Fig. 7.18: Evolución de la temperatura a la salida de la zona de deformación para las cinco configuraciones prueba.

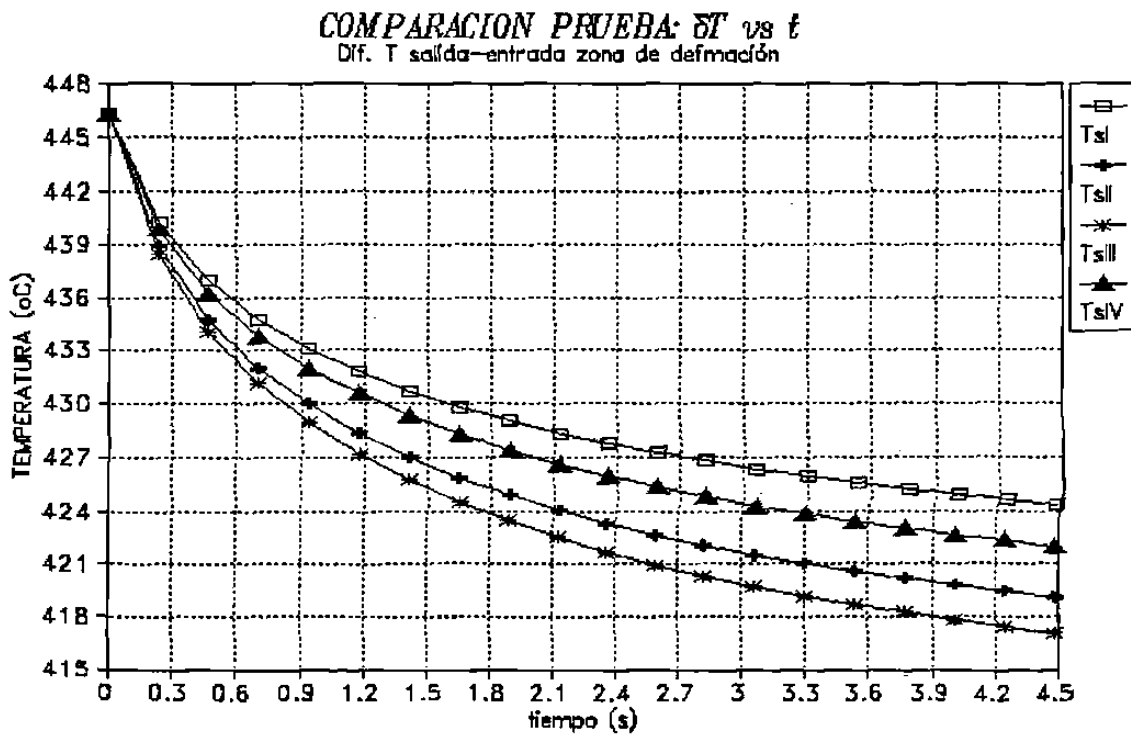


Fig. 7.19: Diferencia de temperatura de los perfiles de temperatura a la salida y entrada de la zona de deformación para las diferentes disposiciones geométricas de los cabezales de enfriamiento.

**Tabla 7.6:** Resultados para cada configuración prueba respecto a el flujo de calor por unidad de tiempo acumulado durante los 20 primeros giros (la energía/área) y las temperaturas a la entrada y salida de la zona de deformación y su diferencia en el vigésimo giro.

Configuración Prueba	Energía por Unidad de Area		Temperatura °C Zona de Deformación		
	J m <sup>2</sup>	cal ft <sup>2</sup>	Entrada	Salida	Δ T
I	2.23E6	4.95E4	44	468	424
II	2.57E6	5.70E4	55	474	419
III	2.83E6	6.28E4	59	476	417
IV	2.13E6	4.73E4	49	471	421

## 8 DISCUSION DE RESULTADOS.

### 8.1 INTRODUCCION.

El uso de un simulador es una herramienta de predicción y, como tal, posee ventajas y desventajas. Entre las primeras se tiene que:

- \* Minimiza la costosa experimentación en planta.
- \* Esencial para el diseño de sistemas de control automático.
- \* Permite la comprensión de las interacciones entre variables de proceso, separando los efectos casuales de los causales.
- \* Constituye una documentación compacta del proceso, que puede ser aplicada a condiciones similares.
- \* Predice el comportamiento en condiciones no observadas.

En tanto que, entre las desventajas principales, se puede mencionar a:

- \* La elaboración de los modelos consume mucho tiempo.
- \* Requiere de personal con conocimientos profundos en procesos y computación.

- \* Existe el riesgo de que el modelo no describa el proceso adecuadamente.
- \* Puede ser que el modelo sea mas complejo y sofisticado de lo que se requiere.

Los resultados arrojados por el simulador se han validado por la comparación de los resultados con otros trabajos[16-18, 27].

La validez del uso del modelo para el cálculo de temperatura en un punto fijo de la superficie del rodillo se considera como válido para todos los demás en base al hecho de que el fenómeno de transferencia de calor no es instantáneo, por lo que un punto sometido a un cambio de temperatura emplea un cierto tiempo (tiempo de retraso) en transmitir la información térmica a un punto próximo a ser sometido a este mismo cambio de temperatura.

D.Q. Kern[46] considera la aplicación de cambios de temperatura periódicos a una superficie de un material, donde el tiempo de retraso que transcurre en enviar el mensaje de la existencia de una nueva condición de temperatura de un punto a otro situado a una distancia "x" es:

$$t_{retraso} = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{T}{\alpha \pi}} \quad (8.1)$$

Donde  $x$  = Distancia. (m)

$T$  = Período de los cambios térmicos. (s)

$\alpha$  = Difusividad térmica. ( $m^2s^{-1}$ )

Despejando la ecuación, la velocidad media de retraso es:

$$V_{retraso} = \frac{x}{t_{retraso}} = 2 \sqrt{\frac{\alpha \pi}{T}} \quad (8.2)$$

Donde  $x$  = Distancia. (m)

$T$  = Período de los cambios térmicos. (s)

$\alpha$  = Difusividad térmica. ( $m^2s^{-1}$ )

En el caso del rodillo con difusividad  $\alpha=1.241 \times 10^{-5} m^2s^{-1}$  y el período  $T=0.23$  s; determina una velocidad media de retraso de  $0.026 m s^{-1}$ . Por otro lado la fuente o cambios de temperatura en la superficie se desplazan justamente a la velocidad tangencial del rodillo, por lo que, su velocidad media es:

$$V_{fuente} = \frac{2 \pi R}{T} \quad (8.3)$$

Donde  $R$  = Radio del rodillo. (m)

$T$  = Período del rodillo. (s)

Así para un rodillo con  $0.23$  m (9") de radio y  $0.23$  s de período, los cambios de temperatura se desplazan con una velocidad media de  $6.2 m s^{-1}$ .

De los dos resultados anteriores es claro que la velocidad con que la fuente alcanza a un nuevo punto es mucho mayor que la velocidad a la que viaja el mensaje de lo ocurrido al punto antecesor ( $V_{fuente} \gg V_{retraso}$ ), conservando condiciones idénticas en todos los puntos al momento de establecer contacto con diferentes mecanismos de transferencia de calor.

## 8.2 DISCUSION DE RESULTADOS

Con respecto a los resultados obtenidos por la simulación del perfil térmico en la superficie del rodillo de trabajo durante el proceso de laminación en caliente, realizado para las tres disposiciones geométricas de los cabezales de enfriamiento, se encuentra que el comportamiento térmico, en la superficie del rodillo, (Figs. 7.4, 7.5 y 7.6) es periódico (Fig. 7.7) y presenta un ascenso de temperatura con cada giro (Fig. 7.8). Lo anterior es consecuencia del efecto global los diferentes mecanismos de transferencia a los que es sometido el rodillo (Figs. 7.3 y 7.11).

Si no existe una interface inestable o estable de vapor entre el líquido refrigerante y la superficie del rodillo, la eficiencia del sistema de enfriamiento es directamente proporcional a la diferencia de la temperatura entre la superficie del rodillo y el líquido refrigerante. Por lo tanto es de esperar que:

- \* Si la boquilla del sistema refrigerante se aproxima a la salida de la zona de deformación (superficie del rodillo a mayor temperatura), su eficiencia crece por lo que el calentamiento del rodillo deberá ser menor.
- \* Y si se aleja la boquilla de la salida de la zona de deformación (superficie del rodillo a una menor temperatura), su eficiencia decrece por lo que el calentamiento del rodillo será mayor.

En el capítulo siete se realizarón dos gupos de simulaciones y los resultados se presentan en forma parcial en las tablas 7.4 y 7.6. Iniciemos con los resultados arrojados por el primer grupo.

### 8.2.1 SIMULACION: CONFIGURACION I, II Y III.

En éstas tres simulaciones se realiza el desplazamiento de los cabezales a la entrada y salida del castillo, en la primera (I); se simula las condiciones de operación en planta, mientras en las dos últimas se desplazan los cabezales alejándolos y aproximándolos a la zona más caliente del rodillo (II y III respectivamente).

El efecto de la eficiencia del sistema de enfriamiento en función de la diferencia de temperatura entre la superficie del rodillo y el líquido refrigerante, es ocasionado por la disposición de los cabezales y se refleja en la temperatura de la superficie del rodillo, como lo muestran las figuras 7.8 y 7.9. En la figura 7.8 se presenta para las tres configuraciones su evolución de temperatura o calentamiento que sufre la superficie del rodillo antes de ingresar a la zona de deformación, el simulador indica que el ascenso de la temperatura a los 12 segundos son 39, 58 y 52 °C (III, II y I respectivamente) sobre la temperatura ambiente. En tanto que la figura 7.9 presenta la evolución de la temperatura al término de la deformación, su comportamiento es similar a la anterior, sólo que su calentamiento o ascenso de temperatura es menor, el ascenso neto sobre la temperatura máxima alcanzada en su ciclo inicial para las configuraciones III, II y I al término de 50 giros (12 segundos), son respectivamente 20, 29 y 27 °C.

Los resultados concuerdan con lo esperado al aproximar o alejar el sistema de refrigeración de la región más caliente en la superficie del rodillo laminador.

El fenómeno de calentamiento-enfriamiento es cíclico (Fig. 7.7), el equilibrio se alcanzará cuando el flujo de calor que entra al rodillo es el mismo que el extraído por el sistema de refrigeración. para lo cual el rodillo deberá de alcanzar una temperatura de operación estable en su superficie, determinada por la eficiencia del sistema de refrigeración. Obsérvese que en la figura 7.8 la temperatura de operación tiende a ser mayor para la configuración II y menor para la III, por lo que desde el punto de vista de las temperaturas en la superficie, la configuración más eficiente es la III. Sin embargo una temperatura de operación baja implicará una mayor diferencia de temperatura a la entrada y salida de la zona de deformación, es decir que a una menor velocidad de calentamiento del rodillo éstos disparos decrecen con menor rapidez y viceversa. Lo anterior concuerda con los resultados de las figuras 7.8 y 7.10 en la que se gráfica el incremento de temperatura que ocurre en la superficie del rodillo laminador y la atenuación de los saltos de temperatura al ingresar a la zona de deformación para los primeros cincuenta giros, observe que las curva de mayor calentamiento (II) en la figura 7.8 corresponde a la curva de mayor atenuación, figura 7.10.

La tabla 7.4 presenta información del flujo de calor por unidad de tiempo que ingresó al rodillo durante los primeros cincuenta giros, donde  $4.64$ ,  $2.92$  y  $0.34 \cdot 10^7 \text{ J m}^{-2}$  ( $10.3$ ,  $6.48$  y  $0.755 \cdot 10^5 \text{ cal ft}^2$ ) es el flujo de calor por unidad de tiempo para las configuraciones I, II y III respectivamente, tomando la configuración I como referencia, se encuentra que la energía térmica en la configuración III es un orden de magnitud menor que la de referencia y que su evolución de temperatura es mas lenta, en tanto que el flujo de calor de la configuración II es aproximadamente un 38% menor que la de referencia. La discrepancia que existe entre esta y la de referencia dado que al encontrarse los cabezales de I más cerca de la salida de la lámina, se supone que tiene un menor flujo térmico. Sin embargo la boquilla del segundo sistema es más eficiente, por encontrarse a menor distancia del rodillo mismo[31].



Otro factor que se involucra en esta inversión de los resultados son los sectores angulares sometido a los diferentes mecanismos de transferencia de calor (Fig. 7.3) en la superficie del rodillo, la magnitud de estos sectores angulares se dan en la tabla 7.3 y se observa que el ángulo barrido por el fluido refrigerante en la configuración II es mayor que en el caso de la configuración I en la zona de mayor temperatura (a la salida de la lámina), lo que introduce el efecto del tamaño de la zona refrigerada. En el punto siguiente se revisan los resultados de la simulación en la cual el sector angular barrido por el líquido refrigerante es constante.

#### **8.2.1 SIMULACION: PRUEBAS I A IV.**

Como se menciono anteriormente en éstas cuatro simulaciones los arcos barridos por el líquido refrigerante es constante ( $30^\circ$ ), las primeras tres poseen cabezales a la entrada y salida del castillo (se mantendrá fijo éste último) mientras que en la última ambos cabezales se encuentran a la salida del castillo, la figura 7.12 muestra el esquema de los sectores angulares y sus valores se dan en la tabla 7.5. Las figuras 7.13 y 7.16 se presentaron los perfiles de temperatura para el primer giro y se marcan las regiones sometidas a los diferentes mecanismos de transferencia de calor. Las figuras 7.17 y 7.18 se presentan la evolución de la temperatura a la entrada y salida de la zona de deformación respectivamente, mientras que la figura 7.19 muestra el efecto de atenuación en los saltos de temperatura en la zona de deformación por el calentamiento del rodillo, finalmente la tabla 7.6 presenta la energía por area que ingreso al rodillo para las cuatro simulaciones durante los primeros veinte giros, así como las temperaturas a la entrada y salida a la zona de deformación y el salto de temperatura en el vigésimo giro.

De la tabla 7.6 y las figuras 7.17, 7.18 y 7.19, observe que para los primeros tres casos (cabezales a la entrada y salida del castillo), I corresponde a la que curva con de menor calentamiento (Figs. 7.17 y 7.18) pero posee la mayor diferencia de temperaturas o saltos en la zona de deformación (Fig. 7.19) que concuerda con el efecto de la eficiencia del sistema de refrigeración con la disposición de los cabezales en la zona de mayor temperatura en el rodillo, mientras que la prueba III corresponde a una disposición en una zona más fría del rodillo y los resultados se invierten; posee un calentamiento mayor (Figs. 7.17 y 7.18) y saltos menores en la zona de deformación (Fig. 7.19). En la simulación IV, al poseer ambos cabezales a la entrada de la zona de deformación permite que el calor se redistribuya en la región de entrada a la lámina que tiene por efecto el incremento en la temperatura superficial a la entrada a la zona de deformación que afecta el comportamiento de la evolución de la temperatura pero da el veneficio de un menor ingreso de calor al ser más eficiente.

El lograr un baja entrada de energía térmica y un menor calentamiento en la superficie del rodillo se reflejaría en el incremento de su vida útil disminuyendo los problemas de deterioro del rodillo con un aumento de kides por rodillo (kilómetro desgaste [47]).

## **9 CONCLUSIONES.**

Las conclusión de la presente investigación puede ser separada en cuatro puntos:

- \* MODELO MATEMATICO.
- \* SIMULADOR.
- \* SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.
- \* BENEFICIO.

### **9.1 MODELO MATEMATICO.**

El modelo matemático se basa en la solución analítica de las ecuaciones diferenciales involucradas al fenómeno de transferencia de calor y no en la solución aproximada de las mismas por métodos numéricos.

### **9.2 SIMULADOR.**

El simulador desarrollado puede ser utilizado como una herramienta para predecir el comportamiento térmico del rodillo de trabajo en el proceso de laminación en caliente en función de:

1. Las propiedades físicas de los materiales en contacto en el sistema lámina-óxido-rodillo y rodillo-óxido-rodillo.
2. La disposición geométrica de los cabezales.
3. La capacidad de extracción de calor de las boquillas elegidas.
4. Las dimensiones del rodillo de trabajo.
5. La temperatura, sobre la ambiente, de la lámina de acero.
6. El porcentaje de deformación.
7. Período del rodillo de trabajo.
8. Velocidad tangencial en el rodillo mayor que la velocidad de retraso.

### **9.3 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.**

El sistema de enfriamiento es tanto más efectivo cuando se acercan los cabezales a la salida de la lámina, desde el punto de vista de la evolución de la curva de calentamiento y el flujo de calor neto que ingresa al rodillo, siempre que se mantengan constantes los factores que afectan la eficiencia de extracción de calor de las boquillas.

El sistema de refrigeración es afectado en su capacidad de extracción de calor por: el tipo de boquilla elegida, la presión del fluido, la distancia cabezal-rodillo y el ángulo de incidencia del líquido a la superficie del rodillo; entre otros factores.

#### 9.4 BENEFICIO.

El flujo térmico al rodillo de trabajo puede ser reducido en un orden de magnitud mediante la reubicación de los cabezales del sistema de enfriamiento.

El modelo permite simular el proceso de laminación bajo diferentes condiciones de operación en cualquiera de los seis castillos que constituyen el tren continuo de laminación en caliente.

#### 9.5 RECOMENDACIONES

Una vez elegido el tipo de boquilla a utilizar en el sistema de refrigeración se recomienda observar el efecto que sobre el coeficiente de transferencia de calor  $\alpha$  tienen las variables variables de operación tales como la presión, la distancia y el ángulo de incidencia del líquido refrigerante a la superficie del rodillo.

a) La presión del fluido afecta directamente a  $\alpha$  pero su valor tiende a un límite o saturación con el aumento de la presión (manteniendo la distancia e inclinación constante.).

b) La distancia boquilla-rodillo influye inversamente a  $\alpha$  decese y tiende al valor mínimo (Convección libre), con el aumento de la distancia (con la inclinación y presión cte.).

c)  $\alpha$  es máximo si el ángulo de incidencia del flujo de líquido refrigerante es cero (presión y distancia cte.), y decese conforme se aleja de la normal.

Y en general se recomienda el rediseño de los cabezales, de forma tal que la aplicación del líquido refrigerante sea uniforme y laminar, así como la facilidad de colocarlo próximo a la salida de la lámina.

## REFERENCIAS

1. A.M. Estrada: Conversación personal, HYLISA S.A. de C.V. 1988.
2. G.F. Bryant and T.S.L. Chiu: Metals Technology, **9**, 478 (1982).
3. R. Kaway: SIMULATION OF ROD CARBON MANGANESE STEEL, Tesis Doctoral, University of Sheffield. 1985.
4. W.L. Roberts: HOT ROLLING OF STEEL, M.Dekker, Inc. New York. 1983.
5. J.N. Harris: MECHANICAL WORKING OF METALS, Pergamon Press, Oxford, 1983.
6. J.A. Schey: TRIBOLOGY IN METALWORKING: Friction, Lubrication and Wear, ASM, Metals Park, 2<sup>th</sup> Ed. 1981.
7. R. Colás: 29 Int. Mathematical Modelling of the Hot Rolling of Steel Conf., Canada Agosto, 1990.
8. D.R. Gaskell: INTRODUCTION TO METALLURGICAL THERMODYNAMICS, Mc.Graw Hill, New. York, 2<sup>th</sup> Ed. 1981.
9. G. Poirie: TRANSPORT PHENOMENA IN METALLURGY, Addison Wesley, New. York, 1973.

10. W.D. Kingery, H.K. Bowen and D.R. Uhlman: INTRODUCTION TO CERAMICS, J. Wiley & Sons, New York, 1960.
11. F. Hollander: Mathematical Models in Metallurgical Process Development, Iron Steel Inst, **123**, 46 (1970).
12. S. Wilmotte, J. Mignon, M. Economopoulos, G. Thomas: C.R.M. Reports **36**, 35 (1973).
13. E.M. Ferris y H.T. Gisborne: 3er. Seminario ILAFA. Monterrey, México Marzo 1988.
14. K.K. Mishra: 3er. Seminario ILAFA. Monterrey, México Marzo 1988.
15. Inf. Tecnico Hylsa 1987: HOT, STRIP MILL ROLLS TECHNICAL INFORMATION.
16. G.F. Bryant and T.S.L. Chiu: Metals Technology, **9**, 485 (1982).
17. D.M. Parke and J.L. Baker: Iron and Steel Eng. **49**(12), 83 (1972).
18. C. Devadas and I.V. Samarasekera: Ironmaking and Steelmaking, **13**, 311 (1986).
19. A. Pérez: SIMULACION DEL PERFIL TERMICO EN ESTADO ESTABLE DE UN RODILLO DE TRABAJO, Reporte interno HYLSA. Mayo 1991.
20. H.S. Carslaw and J.C. Jager: CONDUCTION OF HEAT IN SOLIDS, Oxford University Press, Oxford, 1959.



21. M. Abramowitz and I.A. Stegun: HANDBOOK OF MATHEMATICAL FUNCTIONS, 9<sup>th</sup> Ed, Dover Pub. Inc., New York. 1972.
22. I.S. Gradshteyn and I.M. Ryzhik: TABLE OF INTEGRALS, SERIES, AND PRODUCTS", 4th edition, Academic Press, New York, 1965.
23. G.L. Myers: ANALYTICAL METHODS IN CONDUCTION HEAT TRANSFER, McGraw Hill, New York, 1971.
24. M.L. Boas: MATHEMATICAL METHODS IN THE PHYSICAL SCIENCES, 2<sup>th</sup> Ed., John Wiley and Sons Inc., New York, 1966.
25. G. Arfken: MATHEMATICAL METHODS FOR PHYSICISTS, 2<sup>th</sup> Ed. Academic Press, New York, 1970.
26. C.R. Wylie: ADVANCED ENGINEERING MATHEMATICS, 4<sup>th</sup> Ed. McGraw Hill, New York, 1975.
27. P.G. Stevens, K.P. Ivens and P. Harper, J. Iron and Steel Inst., **209**, 1 (1971).
28. P. Harper: Iron & Steel Engineer, **65** (10), 34 (1988).
29. D.R. Hill and L.E. Gray: Iron & Steel Engineer, **58** (6), 57 (1981).
30. W.L. Roberts: FLAT PROCESSING OF STEEL, M. Dekker, Inc. New York, 1988.

31. G.V. Steden and J.G.M. Tellman: 4<sup>th</sup> Int. Steel Rolling Conf. Sc. Tech. Flat Rolling, IRSID, 1987, A.29.1.
32. A.A. Tseng, F.H. Lin, A.S. Gunderia and D.S. Ni: Metall. Trans. A, **20A**, 2305 (1989).
33. E.A. Garber, A.A. Goncharskii and A.A. Okunev: Steel USSR, **16**, 332 (1986).
34. T. Sheppard and J.M. Roberts: Int. Metall. Rev. **18**, 1 (1973).
35. H. W. O'Connor and A. S. Weinstein: J. Eng. Ind. ASME, **94**, 1113 (1972).
36. W.Y.D. Yuen: 4<sup>th</sup> Int. Steel Rolling Conf. Sc. Tech. Flat Rolling, IRSID, 1987, E23.1.
37. T. Nagai, E. Takeda, T. Masui and M. Shoji: Restructuring Steel Plants for the Nineties, Inst. of Metals, London 1986, 238.
38. V.N. Khloponin et al: Steel USSR, **18**, 78 (1988).
39. D.J. Fapiano: Iron Steel Eng., **59** (10), 29 (1982).
40. E.N. Nikitenko et al: Iron Steel Eng., **18**, 26 (1988).
41. A.M. Estrada: 3er. Seminario ILAFA, Monterrey México, Marzo de 1988.

42. C.M. Van Weele: SURVEY OF HOT STRIP MILL OF HYLSA, Monterrey N.L. México, Marzo 1980.
43. R. Colas: ANALISIS DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LOS RODILLOS DE TRABAJO DEL MOLINO CONTINUO, Tec. de Procesos HYLSA, Mayo 1988.
44. Spray System Co.: Industrial Catalog 27.
45. M. Economopoulos: Mahematical Process Models in Iron and Steelmaking The Metals Society, 1975.
46. D.Q. Kern: PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, CECSA, México 1976.
47. A.M. Estrada: 3er. Seminario ILAFA, Monterrey México, Marzo de 1988.

# APENDICES

- A1** LISTADO DEL PROGRAMA. A.2
- A2** PUBLICACION EN FORO NACIONAL.  
XIII ENCUENTRO DE INVESTIGACION METALURGICA.  
NOVIEMBRE 27, 28 Y 29 DE 1991.  
INSTITUTO TECNOLOGICO DE SALTILLO.  
SALTILLO, COAHUILA, MEXICO. A.17

## **INTRODUCCION:**

El simulador es una herramienta para la predicción del comportamiento térmico del rodillo de trabajo en el proceso de laminación en caliente en función de:

1. Las propiedades físicas de los materiales en contacto en el sistema lámina-óxido-rodillo y rodillo-óxido-rodillo.
2. La disposición geométrica de los cabezales.
3. La capacidad de extracción de calor de las boquillas elegidas.
4. Las dimensiones del rodillo de trabajo.
5. La temperatura, sobre la ambiente, de la lámina de acero.
6. El porcentaje de deformación.
7. Período del rodillo de trabajo.
8. Velocidad tangencial en el rodillo mayor que la velocidad de retraso.

**A1 LISTADO DEL PROGRAMA.**

Programa: **JPH.BAS**

Objetivo: calculo del perfil de temperaturas en la superficie del rodillo de trabajo y flujo de calor en el estado transitorio.

\*\*\*\*\* Entrada al programa menu principal \*\*\*\*\*

SCREEN 2

DIM T(20), TEMPE(20), MAX(20), TEMPE(205, 20), TT(205, 20), FLUJO(205, 20)

PI= 4\*ATN(1): DEF FNARCSIN(X)= ATN(X/SQR(1 - X\*X))

50 CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B

LINE (2, 30)-(618, 30): LINE (2, 148)-(618, 148)

LOCATE 3, 32: PRINT " M E N U"

LOCATE 7, 15: PRINT "1) CONFIGURACION GEOMETRICA"

LOCATE 9, 15: PRINT "2) COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR"

LOCATE 11, 15: PRINT "3) CALCULO DE TEMPERATURA Y FLUJO EN EL RODILLO"

LOCATE 13, 15: PRINT "4) GRAFICAS DE TEMPERATURA Y FLUJO EN EL RODILLO"

LOCATE 15, 15: PRINT "5) SALIDA "

55 LOCATE 21, 35: INPUT "OPCION ", Q\$: Q= VAL(Q\$)

IF Q\$= "1" OR Q\$= "2" OR Q\$= "3" OR Q\$= "4" OR Q\$= "5" THEN GOTO 60

LOCATE 21, 43: PRINT " " " ": GOTO 55

60 ON Q GOSUB 100, 200, 300, 400, 500

\*\*\*\*\* INTRODUCCION DE DATOS GEOMETRICOS \*\*\*\*\*

100 CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),, B: LINE (2, 2)-(618, 178),, B

LOCATE 8, 24: PRINT "1) LLAMAR UN ARCHIVO EXISTENTE"

LOCATE 12, 24: PRINT "2) GENERAR UN NUEVO ARCHIVO": S= 0: M= 0

---

```
S= 0: M= 0
101 LOCATE 21, 35: INPUT "OPCION ", Q$
    Q= VAL(Q$)
    IF Q$= "1" OR Q$= "2" THEN GOTO 102
    LOCATE 21, 43: PRINT "          ": GOTO 101
102 ON Q GOSUB 103, 104
103 'LEYENDO DATOS DE ARCHIVO
    CLS : LINE (0, 0)-(620, 180),, B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
    LOCATE 9, 5: INPUT "NOMBRE DE SU ARCHIVO DE DATOS      ",Z$
    LOCATE 13, 5: INPUT "UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA SU ARCHIVO",Y$
    W1$= Y$ + ":" + Z$ + "1": W2$= Y$ + ":" + Z$ + "2"
105 OPEN W1$ FOR INPUT AS #1
    FOR I= 1 TO 8: INPUT #1, GEO(I): NEXT I: CLOSE #1: GOTO 107
104 GEO(1)= 18: GEO(2)= 13.75: GEO(3)= 13: GEO(4)= .2: GEO(5)= 5
    GEO(6)= -25: GEO(7)= 1200: GEO(8)= 1
    M= M + 1
107 CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
    LOCATE 3, 3: PRINT "1) DIAMETRO DEL RODILLO          ", GEO(1)
    LOCATE 5, 3: PRINT "2) ALTURA DE ENTRADA              ", GEO(2)
    LOCATE 7, 3: PRINT "3) ALTURA DE SALIDA                ", GEO(3)
    LOCATE 9, 3: PRINT "4) ESPESOR DE SALIDA              ", GEO(4)
    LOCATE 11, 3: PRINT "5) ANGULO DEL CHORRO DE ENTRADA  ", GEO(5)
    LOCATE 13, 3: PRINT "6) ANGULO DEL CHORRO DE SALIDA   ", GEO(6)
    LOCATE 15, 3: PRINT "7) VELOCIDAD TANGENCIAL          ", GEO(7)
    LOCATE 17, 3: PRINT "8) ANGULO DE CONTACTO           ", GEO(8)
108 LOCATE 21, 5: PRINT "          "
109 LOCATE 21, 5: INPUT "DESEA CORREGIR ALGUN DATO ? S/N ", Q$
    S= S + 1
    IF Q$= "n" OR Q$= "N" THEN GOTO 180
    IF Q$= "s" OR Q$= "S" THEN GOTO 110
    LOCATE 21, 39: PRINT "          ": GOTO 109
```

```
110 LOCATE 21, 5: PRINT " "
    LOCATE 21, 5: INPUT "QUE NUMERO DE DATO DESEA CORREGIR ? ",Q
    ON Q GOSUB 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118
111 LOCATE 3, 43: PRINT " ": LOCATE 3, 3: INPUT "1) DIAMETRO DEL
RODILLO ", GEO(1): GOTO 108
112 LOCATE 5, 43: PRINT " ": LOCATE 5, 3: INPUT "2)ALTURA DE
ENTRADA ", GEO(2): GOTO 108
113 LOCATE 7, 43: PRINT " ": LOCATE 7, 3: INPUT "3) ALTURA DE
SALIDA ", GEO(3): GOTO 108
114 LOCATE 9, 43: PRINT " ": LOCATE 9, 3: INPUT "4) ESPESOR DE
SALIDA ", GEO(4): GOTO 108
115 LOCATE 11, 43: PRINT " ": LOCATE 11, 3: INPUT "5) ANGULO DEL
CHORRO DE ENTRADA ",GEO(5): GOTO 108
116 LOCATE 13, 43: PRINT " ": LOCATE 13, 3: INPUT "6) ANGULO DEL
CHORRO DE SALIDA ",GEO(6): GOTO 108
117 LOCATE 15, 43: PRINT " ": LOCATE 15, 3: INPUT "7) VELOCIDAD
TANGENCIAL ", GEO(7): GOTO 108
118 LOCATE 17, 43: PRINT " ": LOCATE 17, 3: INPUT "8) ANGULO DE
CONTACTO ", GEO(8): GOTO 108
180 IF M > 0 THEN GOTO 120
    IF M= 0 AND S= 1 THEN 50 ELSE 190
120 CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
    LOCATE 9, 5: INPUT "NOMBRE DE SU ARCHIVO DE DATOS ",Z$
    LOCATE 13, 5: INPUT "UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA SU ARCHIVO ", Y$
    W1$= Y$ + ":" + Z$ + "1": W2$= Y$ + ":" + Z$ + "2"
190 OPEN W1$ FOR OUTPUT AS #1
    FOR I= 1 TO 8: PRINT #1, GEO(I): NEXT I: CLOSE #1
    D= GEO(1): Y1= GEO(2): Y2= GEO(3): HS= GEO(4)
    ALFA= GEO(5): DELTA= GEO(6): V= GEO(7): TETTAC= GEO(8)
    ***** CALCULO DE LOS TIEMPOS *****
    DISPER= 25/2: REDUCCION= 16/100: R= D*0.5: Z= R+HS*0.5
    DPe= 30.7 - 1.1*D: DP= 19.0375 - 0.5375*D
```



```

HE= HS/(1 - REDUCCION): V= V*0.2: W= V/R: Pe= Y1 - HS*0.5 - R
IF Y1 < Z THEN Pe= Z-Y1
Ps= Y2 - HS * .5 - R
IF Y2 < Z THEN Ps= Z - Y2
Xe= SQR((R + DPe) * (R + DPe) - Pe*Pe): Xs= -SQR((R + DPs) * (R + DPs) - Ps*Ps)
ARCOM= SQR((HE - HS)/R): TETTAM= FNARCSIN(ARCOM): TETTAC= TETTAC*PI/180
ALFA= ALFA*PI/180: DELTA= DELTA*PI/180: DISPER= DISPER*PI/180
M1= -ALFA + DISPER: M2 = -ALFA - DISPER: M(1)= TAN(M1): M(2)= TAN(M2)
Y(1)= Pe: Y(2)= Pe: M3= DELTA + DISPER: M4= DELTA - DISPER
M(3)= TAN(M3): M(4)= TAN(M4): Y(3)= Ps: Y(4)= Ps
FOR I= 1 TO 2
  B(I)= Y(I) - M(I)*Xe: CTEe= 1 + M(I)*M(I): AA= R*R*CTEe - B(I)*B(I)
  IF AA < 0 AND I= 1 THEN GOSUB 1
  IF AA < 0 AND I= 2 THEN GOSUB 2
  X= (SQR(AA) - M(I)*B(I))/CTEe
181  Y= M(I)*X + B(I): A(I)= ATN(Y/X)
NEXT I
182  FOR I = 3 TO 4
  B(I)= Y(I) - M(I)*Xs: CTEs= 1 + M(I)*M(I): AA= R*R*CTEs - B(I)*B(I)
  IF AA < 0 AND I= 3 THEN GOSUB 3
  IF AA < 0 AND I= 4 THEN GOSUB 3
  X= -(SQR(AA) + M(I)*B(I))/CTEs
183  Y= M(I)*X + B(I): A(I)= PI + ATN(Y/X)
NEXT I
184  TETTAE= A(1) - A(2): TETTAS= A(4) - A(3): TN(1)= TETTAM/W
TN(2)= (3*PI*.5 - A(4) + TETTAM)/W: TN(3)= (3*PI*.5 - A(3) + TETTAM)/W
TN(4)= (PI - TETTAC*.5 + TETTAM)/W: TN(5)= (PI + TETTAC*.5 + TETTAM)/W
TN(6)= (3*PI*.5 - A(2) + TETTAM)/W :TN(7)= (3*PI*.5 - A(1) + TETTAM)/W
TN(8)= 2*PI/W
'----- GUARDANDO LOS TIEMPOS -----
OPEN W1$ FOR OUTPUT AS #1: OPEN W2$ FOR OUTPUT AS #2
FOR I= 1 TO 8: PRINT #1, GEO(I): PRINT #2, TN(I): NEXT I: CLOSE: GOTO 50

```

## ----- SUBRUTINAS -----

```
1 CLS: PRINT "1: LA BOQUILLA DE ENTRADA ESTA MUY INCLINADA"
  PRINT " INCIDE EN EL PLANCHON, ELEVALA MAS"
  E$= INPUT$(1): RETURN 107

2 CLS: PRINT "2: LA BOQUILLA DE ENTRADA ESTA MUY INCLINADA"
  PRINT " INCIDE EN EL RODILLO DE APOYO, DECLINALA MAS"
  E$= INPUT$(1): RETURN 107

3 CLS: PRINT "3: LA BOQUILLA DE SALIDA ESTA MUY INCLINADA"
  PRINT " INCIDE EN EL RODILLO DE APOYO, DECLINALA MAS"
  E$= INPUT$(1): RETURN 107

4 CLS: PRINT "4: LA BOQUILLA DE SALIDA ESTA MUY INCLINADA"
  PRINT " INCIDE EN EL PLANCHON, ELEVALA MAS"
  E$= INPUT$(1): RETURN 107

***** INTRODUCCION DE COEFICIENTES DE CALOR *****

200 CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
    LOCATE 8, 24: PRINT "1) LLAMAR UN ARCHIVO EXISTENTE"
    LOCATE 12, 24: PRINT "2) GENERAR UN NUEVO ARCHIVO"
    S= 0: M= 0

221 LOCATE 21, 35: INPUT "OPCION ", Q$
    Q= VAL(Q$)
    IF Q$= "1" OR Q$= "2" THEN GOTO 222
    LOCATE 21, 43: PRINT "          ": GOTO 221

222 ON Q GOSUB 223, 202

223 'LEYENDO DATOS DE ARCHIVO
    CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
    LOCATE 9, 5: INPUT "NOMBRE DE SU ARCHIVO DE DATOS ", Z$
    LOCATE 13, 5: INPUT "UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA SU ARCHIVO ", Y$
    W3$= Y$ + ":" + Z$ + "3"

201 OPEN W3$ FOR INPUT AS #3
    FOR I= 1 TO 10: INPUT #3, H(I): NEXT I: CLOSE #3: GOTO 203
```

```

202  H(1)= 250000: H(2)= 270: H(3)= 2700: H(4)= 1000: H(5)= 27000: H(6)= 38000: H(7)= 61000
      H(8)= 91000: H(9)= 98000: H(10)= 100000: M= M + 1
203  CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
      LOCATE 2, 3: PRINT "1) COEF. DE TRANSFERENCIA DE CALOR LAMINA-RODILLO ", H(1)
      LOCATE 4, 3: PRINT "2) COEF. DE CONVECCION LIBRE (AIRE)           ", H(2)
      LOCATE 6, 3: PRINT "3) COEF. DE CONVECCION FORZADA (AGUA)       ", H(3)
      LOCATE 8, 3: PRINT "4) COEF. DE TRANSFERENCIA DE CALOR RODILLO-RODILLO", H(4)
      LOCATE 10, 3: PRINT "5) COEF. DE CONVECCION FORZADA (BOQUILLA 2520) ", H(5)
      LOCATE 12, 3: PRINT "6) COEF. DE CONVECCION FORZADA (BOQUILLA 2530) ", H(6)
      LOCATE 14, 3: PRINT "7) COEF. DE CONVECCION FORZADA (BOQUILLA 2560) ", H(7)
      LOCATE 16, 3: PRINT "8) COEF. DE CONVECCION FORZADA (BOQUILLA 25100) ", H(8)
      LOCATE 18, 3: PRINT "9) COEF. DE CONVECCION FORZADA (BOQUILLA 25150) ", H(9)
      LOCATE 20, 2: PRINT "10) COEF. DE CONVECCION FORZADA (BOQUILLA 25200) ", H(10)
      '----- CORRIGIENDO DATOS -----
204  LOCATE 22, 5: PRINT "
205  LOCATE 22, 5: INPUT "DESEA CORREGIR ALGUN DATO ? S/N ", Q$
      S= S + 1
      IF Q$= "n" OR Q$= "N" THEN GOTO 280
      IF Q$= "s" OR Q$= "S" THEN GOTO 210
      LOCATE 22, 39: PRINT "
      ": GOTO 205
      LOCATE 22, 5: PRINT "
210  LOCATE 22, 5: INPUT "QUE NUMERO DE DATO DESEA CORREGIR ? ",Q
      ON Q GOSUB 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220
211  LOCATE 2, 58: PRINT "
      ": LOCATE 2, 58: INPUT "", H(1): GOTO 204
212  LOCATE 4, 58: PRINT "
      ": LOCATE 4, 58: INPUT "", H(2): GOTO 204
213  LOCATE 6, 58: PRINT "
      ": LOCATE 6, 58: INPUT "", H(3): GOTO 204
214  LOCATE 8, 58: PRINT "
      ": LOCATE 8, 58: INPUT "", H(4): GOTO 204
215  LOCATE 10, 58: PRINT "
      ": LOCATE 10, 58: INPUT "", H(5): GOTO 204
216  LOCATE 12, 58: PRINT "
      ": LOCATE 12, 58: INPUT "", H(6): GOTO 204
217  LOCATE 14, 58: PRINT "
      ": LOCATE 14, 58: INPUT "", H(7): GOTO 204
218  LOCATE 16, 58: PRINT "
      ": LOCATE 16, 58: INPUT "", H(8): GOTO 204
219  LOCATE 18, 58: PRINT "
      ": LOCATE 18, 58: INPUT "", H(9): GOTO 204
220  LOCATE 20, 58: PRINT "
      ": LOCATE 20, 58: INPUT "", H(10): GOTO 204

```

```

280  IF M > 0 THEN 290
      IF S= 1 AND M= 0 THEN GOTO 50 ELSE 295
290  CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
      LOCATE 9, 5: INPUT "NOMBRE DE SU ARCHIVO DE DATOS      ", Z$
      LOCATE 13, 5: INPUT "UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA SU ARCHIVO ", Y$
      W3$= Y$ + ":" + Z$ + "3"
295  OPEN W3$ FOR OUTPUT AS #3
      FOR I = 1 TO 10: PRINT #3, H(I): NEXT I: CLOSE #3: GOTO 50

***** RUTINA PARA OBTENER FLUJOS Y TEMPERATURAS *****
'----- LEYENDO TIEMPOS Y COEFICIENTES -----
300  CLS : LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
      LOCATE 6, 5: PRINT "NOTA. PARA LOS MODELOS DE IGUAL GEOMETRIA "
      LOCATE 7, 5: PRINT "   TECLEA : A396842"
      LOCATE 9, 5: INPUT "NOMBRE DE SU ARCHIVO DE DATOS      ", Z$
      IF Z$= "A396842" THEN 302
      LOCATE 13, 5: INPUT "UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA SU ARCHIVO ", Y$
      W1$= Y$ + ":" + Z$ + "1": W2$= Y$ + ":" + Z$ + "2"
      W3$= Y$ + ":" + Z$ + "3": W4$= Y$ + ":" + Z$ + "4"
      OPEN W2$ FOR INPUT AS #2
      OPEN W3$ FOR INPUT AS #3
      FOR I= 1 TO 8: INPUT #2, TN(I): NEXT I
      FOR I= 1 TO 10: INPUT #3, H(I): NEXT I
      CLOSE: GOTO 307
302  CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
      LOCATE 7, 5: INPUT "BASE DE DATOS GEOMETRICO          ", ZZ$
      LOCATE 9, 5: INPUT "UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA SU ARCHIVO ", YY$
      LOCATE 13, 5: INPUT "NOMBRE DE SU ARCHIVO DE DATOS      ", Z$
      LOCATE 15, 5: INPUT "UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA SU ARCHIVO ", Y$
      W1$= YY$ + ":" + ZZ$ + "1": W2$= YY$ + ":" + ZZ$ + "2"
      W3$= YY$ + ":" + ZZ$ + "3": W4$= Y$ + ":" + Z$ + "4"

```

```

OPEN W2$ FOR INPUT AS #2
OPEN W3$ FOR INPUT AS #3
FOR I = 1 TO 8: INPUT #2, TN(I): NEXT I
FOR I = 1 TO 10: INPUT #3, H(I): NEXT I
CLOSE
'----- ORDENANDO COEFICIENTES -----
307 CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
H1(1)= H(1): H1(2)= H(2): H1(3)= H(10): H1(4)= H(3)
H1(5)= H(4): H1(6)= H(2): H1(7)= H(7): H1(8)= H(3)
LOCATE 5, 25: INPUT "NUMERO DE GIROS ", GN 'GIROS DEL RODILLO
LOCATE 7, 15: INPUT "TEMPERATURA INICIAL DEL PLANCHON ", TP0
'----- CONSTANTES -----
KAPAp= 1.187E-05: KAPAr= 1.247E-05: Eo= 1E-08: kp= 46.1: kr= 48: ko= 2.51: HH= ko/Eo
TR0= 0 'TEMPERATURA INICIAL DEL RODILLO DE TRABAJO
TA= 0 'TEMPERATURA AMBIENTE
TRA= 0 'TEMPERATURA INICIAL DEL RODILLO DE APOYO
CTEb= (TR0 - TA)/(TP0 - TR0): CTEa= HH * (kr * SQR(KAPAp) + kp * SQR(KAPAr)) / (kr * kp)
CTE0= CTEa * SQR(PI): CTE1= HH * (TP0 - TR0) / CTE0
CTE2= TR0 + (TP0 - TR0) * HH * SQR(KAPAr) / (CTEa * kr): CTE3= 2 * SQR(KAPAr / PI) / kr
CTE4= HH / (CTEa * SQR(PI)): CTE5= HH * SQR(KAPAr) / (CTEa * kr)
OPEN W4$ FOR OUTPUT AS #4 'ARCHIVO PARA GUARDAR RESULTADOS
TINTER1= TN(1)*.04: TINTER2= (TN(2) - TN(1))*0.04: TINTER3= (TN(3) - TN(2))*0.04
TINTER4= (TN(4) - TN(3))*0.04: TINTER5= (TN(5) - TN(4))*0.04: TINTER6= (TN(6) - TN(5))*0.04
TINTER7= (TN(7) - TN(6))*0.04: TINTER8= (TN(8) - TN(7))*0.04
I= 0
FOR G= 1 TO GN
CTE1= HH * (TP0 - TEMPE)/CTE0
CTE2= TR0 + (TP0 - TEMPE)*HH*SQR(KAPAr)/(CTEa*kr)
JJ= I: I= 0
LOCATE 19, 25: PRINT "NUMERO DE PUNTOS", JJ
LOCATE 21, 25: PRINT "NUMERO DE GIRO ", G'GIRO DEL RODILLO

```

\*\*\*\*\* CALENTAMIENTO DEL RODILLO \*\*\*\*\*

FOR T= TINTER1 TO TN(1) STEP TINTER1

I= I + 1: T1= T: T11= T + TN(8)\*(G - 1)

\*\*\*\*\* FUNCION ERFC \*\*\*\*\*

SUMA= 0: ARGUM= CTEa\*SQR(T1)

FOR N= 0 TO 50

IF N= 0 THEN DENO= 1: DENO1= 1: GOTO 310

DENO= DENO\*2\*N \* (2\*N + 1): DENO1= DENO1\*N

310 SUMA0= SUMA: SUMA1= ((-1) ^ N)/DENO1: SUMA2= 1 / ((2\*ARGUM)^(N + 1))

SUMA3= SUMA1\*SUMA2\*DENO: SUMA= SUMA + SUMA3\*SUMA2

IF ABS(SUMA0/SUMA - 1) < .000001 THEN GOTO 320

NEXT N

PRINT "ERROR"; ABS(SUMA0/SUMA - 1)

320 SUMAT= 2 \* SUMA: FLUJO1= CTE1\*(1 - SUMAT): FLUJO= FLUJO1/SQR(T1)

TEMPE1= FLUJO\*SQR(KAPAr)/(CTEa\*kr): TEMPE= CTE2 - TEMPE1 + CORRC

TT(I, G)= T11: TEMPE(I, G)= TEMPE: FLUJO(I, G)= FLUJO

LOCATE 9, 33: PRINT " "

LOCATE 9, 10: PRINT "TEMPERATURA DEL RODILLO "; TEMPE

LOCATE 11, 33: PRINT " "

LOCATE 11, 10: PRINT "FLUJO DEL INTERVALO "; FLUJO

LOCATE 13, 31: PRINT " "

LOCATE 13, 10: PRINT "TIEMPO DEL INTERVALO "; T11

LOCATE 15, 35: PRINT " "

LOCATE 15, 10: PRINT "COEFICIENTE DEL INTERVALO "; H1(1)

PRINT #4, T11, TEMPE, FLUJO 'ESCRIBIENDO DATOS EN ARCHIVO

NEXT T

\*\*\*\*\* ENFRIAMIENTO DEL RODILLO \*\*\*\*\*

FOR P= 2 TO 8

IF P= 2 THEN TINTER= TINTER2: GOTO 340

IF P= 3 THEN TINTER= TINTER3: GOTO 340

IF P= 4 THEN TINTER= TINTER4: GOTO 340

IF P= 5 THEN TINTER= TINTER5: GOTO 330

IF P= 6 THEN TINTER= TINTER6: GOTO 340

```

IF P= 7 THEN TINTER= TINTER7: GOTO 340
IF P= 8 THEN TINTER= TINTER8: GOTO 340
'----- CUANDO EXISTE CONTACTO RODILLO-RODILLO -----
330 CTE6= CTE4*(TRA - TEMPE): CTE7= TR0 + CTE5*(TEMPE - TRA)
FOR T= TN(P - 1) TO TN(P) STEP TINTER
  I= I + 1
  T1= T + TN(8)*(G - 1): SUMA= 0: ARGUM= CTEa*SQR(T1)
  ' FUNCION ERFC
  FOR N= 0 TO 100
    IF N= 0 THEN DENO= 1: DENO1= 1: GOTO 350
    DENO= DENO*2*N*(2*N + 1): DENO1= DENO1*N
350  SUMA0= SUMA: SUMA1= ((-1)^N)/DENO1: SUMA2= 1/((2*ARGUM)^(N + 1))
    SUMA3= SUMA1*SUMA2*DENO: SUMA= SUMA + SUMA3*SUMA2
    IF ABS(SUMA0/SUMA - 1) < .000001 THEN GOTO 360
  NEXT N
360  SUMAT= 2*SUMA: FLUJO1= CTE6*(1 - SUMAT): FLUJO= FLUJO1/SQR(T1)
  TEMPE1= FLUJO*SQR(KAPAr)/(CTEa*kr): TEMPE= CTE7 - TEMPE1
  TT(I, G)= T1: TEMPE(I, G)= TEMPE: FLUJO(I, G)= FLUJO
  LOCATE 9, 33: PRINT "          "
  LOCATE 9, 10: PRINT "TEMPERATURA DEL RODILLO "; TEMPE
  LOCATE 11, 33: PRINT "          "
  LOCATE 11, 10: PRINT "FLUJO DEL INTERVALO "; FLUJO
  LOCATE 13, 31: PRINT "          "
  LOCATE 13, 10: PRINT "TIEMPO DEL INTERVALO "; T1
  LOCATE 15, 35: PRINT "          "
  LOCATE 15, 10: PRINT "COEFICIENTE DEL INTERVALO "; H1(P)
  PRINT #4, T1, TEMPE, FLUJO 'ESCRIBIENDO DATOS EN ARCHIVO
NEXT T
GOTO 325
'----- ENFRIAMIENTO POR CHORROS Y CONVECCION LIBRE -----
340 FOR T= TN(P - 1) TO TN(P) STEP TINTER
  I= I + 1: T1= T + TN(8)*(G - 1): TT(I, G)= T1: SUMTEM= 0
  FOR C= 1 TO (G - 1)

```

```

FOR S= 1 TO JJ
  SUMTEM= SUMTEM + (FLUJO(S, C))*(SQR(T1 - TT(S, C)) - SQR(T1 - TT(S + 1, C)))
NEXT S
NEXT C
FOR S= 1 TO I - 1
  SUMTEM= SUMTEM + (FLUJO(S, G)) * (SQR(T1 - TT(S, G)) - SQR(T1 - TT(S + 1, G)))
NEXT S
TEMPE= CTE3*SUMTEM: FLUJO= -H1(P)*(TEMPE - CTEb)
TT(I, G)= T1: TEMPE(I, G)= TEMPE: FLUJO(I, G)= FLUJO
LOCATE 9, 33: PRINT "          "
LOCATE 9, 10: PRINT "TEMPERATURA DEL RODILLO "; TEMPE
LOCATE 11, 33: PRINT "          "
LOCATE 11, 10: PRINT "FLUJO DEL INTERVALO "; FLUJO
LOCATE 13, 31: PRINT "          "
LOCATE 13, 10: PRINT "TIEMPO DEL INTERVALO "; T1
LOCATE 15, 35: PRINT "          "
LOCATE 15, 10: PRINT "COEFICIENTE DEL INTERVALO "; H1(P)
PRINT #4, T1, TEMPE, FLUJO 'ESCRIBIENDO DATOS EN ARCHIVO
NEXT T
325  NEXT P
      TT(I + 1, G)= T1 + TN(1)/25: CORRC= TEMPE(I, G)
NEXT G: CLOSE: LOCATE 21, 23: PRINT "USE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
A$= INPUT$(1): GOTO 50

***** GRAFICAS DE LA TEMPERATURA *****
400  CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
      LOCATE 6, 5: PRINT "NOTA. PARA LOS MODELOS DE IGUAL GEOMETRIA "
      LOCATE 7, 5: PRINT "  TECLEA : A396842"
      LOCATE 9, 5: INPUT "NOMBRE DE SU ARCHIVO DE DATOS          ", Z$
      IF Z$= "A396842" THEN 402
      LOCATE 13, 5: INPUT "UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA SU ARCHIVO ", Y$
      W2$= Y$ + ":" + Z$ + "2": W4$= Y$ + ":" + Z$ + "4": GOTO 404

```



```

402  CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
      LOCATE 7, 5: INPUT "BASE DE DATOS GEOMETRICO          ", ZZ$
      LOCATE 9, 5: INPUT "UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA SU ARCHIVO ", YY$
      LOCATE 13, 5: INPUT "NOMBRE DE SU ARCHIVO DE DATOS          ", Z$
      LOCATE 15, 5: INPUT "UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA SU ARCHIVO ", Y$
      W2$= YY$ + ":" + ZZ$ + "2": W4$= Y$ + ":" + Z$ + "4"
404  CLS: LINE (0, 0)-(620, 180),,B: LINE (2, 2)-(618, 178),,B
      LOCATE 5, 15: INPUT "NUMERO DE PUNTOS CALCULADOS/GIRO  ", JJ
      IF JJ= 0 THEN JJ= 202
      LOCATE 7, 15: INPUT "PARA CUANTOS CICLOS DESEA SU GRAFICA ", GN
      LOCATE 9, 15: INPUT "TEMPERATURA INICIAL DEL PLANCHON   ", TP0
      LOCATE 12, 23: PRINT "POR FAVOR ESPERE UN MOMENTO"
      '----- LEYENDO TIEMPOS Y TEMPERATURAS DE ARCHIVOS -----
      OPEN W2$ FOR INPUT AS #2
      OPEN W4$ FOR INPUT AS #4
      FOR I= 1 TO 8: INPUT #2, TN(I): NEXT I
      FOR G= 1 TO GN
        FOR C= 1 TO JJ
          INPUT #4, TT(C, G), TEMPE(C, G), FLUJO(C, G)
          IF TEMPE(C, G) > MAXIMA THEN MAXIMA= TEMPE(C, G)
        NEXT C
        MAX(G)= MAXIMA: MAXIMA= 0: T(G)= TT(JJ, G): TEMPES(G)= TEMPE(JJ, G)
        IF MAX(G) > TEPMAX THEN TEPMAX= MAX(G)
        IF TEMPES(G) > TEPMIN THEN TEPMIN= TEMPES(G)
      NEXT G: CLOSE
      IF GN < 21 THEN PASO= TN(8): IF GN < 41 AND GN > 20 THEN PASO= TN(8)*2
      IF GN < 61 AND GN > 40 THEN PASO= TN(8)*3
      IF GN < 81 AND GN > 60 THEN PASO= TN(8)*4: IF GN >= 81 THEN PASO= TN(8)*5
      '----- GRAFICA DE TEMPERATURAS MAXIMAS -----
      TEESC= TEPMAX*5/100: B$= " ) = ": CLS : WINDOW (0, 0)-(TN(8)*GN, TEPMAX*1.2)
      LOCATE 1, 3: PRINT "TEPMAX "; TEPMAX: LOCATE 2, 3: PRINT "TEMPmin.": MAX(1)
      LINE (0, 0)-(TN(8) * GN, 0) 'EJE DEL TIEMPO
      LINE (0, 0)-(0, TEPMAX + TEESC) 'EJE DE LA TEMPERATURA

```

```

'ESCALA DEL EJE DEL TIEMPO
FOR S = 0 TO TN(8) * GN STEP PASO: LINE (S, TEPMAX/50)-(S, -TEPMAX/50): NEXT S
'ESCALA DEL EJE DE LA TEMPERATURA
FOR M = 0 TO TEPMAX STEP TEPMAX/10: LINE (TN(8)/10, M)-(-TN(8)/10, M): NEXT M
'LETREROS DE LAS ESCALAS
LOCATE 1, 50: PRINT "ESCALA TIEMPO: "; PASO
LOCATE 2, 50: PRINT "ESC.TEMPERATURA: "; TEPMAX/10
FOR X= 1 TO GN - 1
  LOCATE 1, 1: PRINT "TEMPERATURA ("; T(X); B$; MAX(X)
  LINE (T(X), MAX(X))- (T(X + 1), MAX(X + 1))
NEXT X
LOCATE 21, 23: PRINT "USE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
A$= INPUT$(1): CLS : WINDOW SCREEN (1, 1)-(630, 200) 'BORRADOR DE WINDOW
'----- GRAFICA DE TEMPERATURAS MINIMAS -----
TEESC= TEPMIN*5/100: B$= ") = "
CLS: WINDOW (0, -TEESC)- (TN(8)*GN, TEPMIN*1.2)
LINE (0, 0)- (TN(8)*GN, 0) 'EJE DEL TIEMPO
LINE (0, 0)- (0, TEPMIN + TEESC) 'EJE DE LA TEMPERATURA
'ESCALA DEL EJE DEL TIEMPO
FOR S= 0 TO TN(8)*GN STEP PASO: LINE (S, TEPMIN/50)-(S, -TEPMIN/50): NEXT S
'ESCALA DEL EJE DE LA TEMPERATURA
FOR M= 0 TO TEPMIN STEP TEPMIN/10: LINE (TN(8)/10, M)- (-TN(8)/10, M): NEXT M
'LETREROS DE LAS ESCALAS
LOCATE 1, 50: PRINT "ESCALA TIEMPO: "; PASO
LOCATE 2, 50: PRINT "ESC.TEMPERATURA: "; TEPMIN/10
FOR X= 1 TO GN
  LOCATE 1, 1: PRINT "TEMPERATURA ("; T(X); B$; TEMPES(X)
  LINE (T(X - 1), TEMPES(X - 1))- (T(X), TEMPES(X))
NEXT X
LOCATE 21, 23: PRINT "USE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR": A$= INPUT$(1): CLS
WINDOW SCREEN (1, 1)-(630, 200) 'BORRADOR DE WINDOW

```

```
'----- GRAFICA DE TEMPERATURAS VS TIEMPOS -----  
'LEYENDO DATOS DE TIEMPO,TEMPERATURA Y FLUJO  
CLS: WINDOW (0, 0)-(TN(8)*GN, TP0)  
LINE (0, 0)-(TN(8)*GN, 0) 'EJE DEL TIEMPO  
LINE (0, -10)-(0, TP0) 'EJE DE TEMPERATURA  
'ESCALA DEL EJE DEL TIEMPO  
FOR S1= 0 TO TN(8)*GN STEP PASO: LINE (S1, TP0/50)-(S1, -TP0/50): NEXT S1  
'ESCALA DEL EJE DE TEMPERATURA  
FOR M1= 0 TO TP0 STEP TP0/10: LINE (TN(8)/10, M1)-(-TN(8)/10, M1): NEXT M1  
'LETREROS DE ESCALAS  
LOCATE 1, 50: PRINT "ESCALA TIEMPO :"; PASO  
LOCATE 2, 50: PRINT "ESCALA TEMPERATURA :"; TP0/10  
LOCATE 3, 50: PRINT "NO. DE CICLOS GRAFICANDO:"; GN  
LOCATE 2, 1: PRINT "CICLO NUMERO :"  
'RUTINA DE LA GRAFICA  
FOR SS= 1 TO GN  
  LOCATE 2, 16: PRINT ""; SS  
  FOR XX= 1 TO JJ - 1  
    LOCATE 1, 1: PRINT "TEMPERATURA ("; TT(XX, SS); B$; TEMPE(XX, SS)  
    LINE (TT(XX, SS), TEMPE(XX, SS))- (TT(XX + 1, SS), TEMPE(XX + 1, SS))  
  NEXT XX  
  TT(1, SS + 1)= TT(XX, SS): TEMPE(1, SS + 1)= TEMPE(XX, SS)  
NEXT SS: CLOSE: A$= INPUT$(1)  
CLS: WINDOW SCREEN (1, 1)-(630, 200)' BORRADOR DE WINDOW  
GOTO 50
```

500 END

**CICLO TERMICO EN RODILLOS DE TRABAJO  
DE LAMINACION EN CALIENTE.**

Antonino Pérez

Rafael Colás

Raúl Fuentes

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,  
Universidad Autónoma de Nuevo León, San  
Nicolás de Los Garza, N.L.

Hylsa, S.A. de C.V., A.P. 996, 64000 Monterrey,  
N.L.

CIDIM, Penférico 424, 64630 Monterrey, N.L.

## **Abstract.**

The effect that the geometrical arrangement of the cooling system of a hot rolling working roll is analyzed in this work. Results obtained with a mathematical model, able to calculate the heating and cooling cycles that take place on the roll surface in its transient state, are presented. The model is based on evaluation of the analytical solution of the heat transfer equation, and not by approximation from numerical methods.

## **Resumen.**

En este trabajo se analiza el efecto de la disposición geométrica del sistema de refrigeración de un rodillo de trabajo de laminación en caliente. Se presentan los resultados de un modelo matemático capaz de calcular los ciclos de calentamiento y enfriamiento de la superficie del rodillo en el estado transitorio. El modelo está basado en la evaluación de la solución analítica de la ecuación de transferencia de calor y no por a aproximación por métodos matemáticos.

## **Introducción.**

A pesar de que el proceso de laminación de metales parece ser una operación muy sencilla, el estudio profundo del mismo, nos revela la complejidad del proceso. puesto que se encuentran una serie de fenómenos, no del todo entendidos o explicados,

asociados con la deformación plástica de la pieza, efectos tribológicos en la interface de metal con el rodillo y el comportamiento mismo de éstos últimos.

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

Los rodillos de laminación constituyen un componente muy importante del proceso, dado que las fuerzas y presiones que ejercen sobre la pieza siendo deformada le confieren, a esta última, su forma. 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, como la oportunidad y forma de aplicar el líquido refrigerante, son críticas para controlar la dilatación y posibles fallas en los rodillos.

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados encontrados al modelar los ciclos de enfriamiento y calentamiento que se producen en la superficie de un rodillo de trabajo de laminación en caliente. Este modelo es empleado para predecir los efectos producidos por cambios en el diseño del sistema de enfriamiento.

### **Modelación.**

Los factores que intervienen en el cálculo de los ciclos de enfriamiento y calentamiento a que está sujeto un rodillo de trabajo son múltiples. Se considera que el flujo de

calor hacia el interior del rodillo se incrementa como resultado de:

- i. Radiación emitida por la cinta siendo laminada...
- ii. Conducción de calor de la cinta al rodillo a través de la capa de óxido.
- iii. Efectos de fricción a lo largo del arco de mordida o zona de deformación.
- iv. Fricción en el cuello del rodillo y con el rodillo de apoyo.

Para fines de modelación, se considerará solamente el efecto de conducción de calor en la zona de deformación, delimitada por el ángulo de mordida  $\theta_d$  [1-3].

$$\theta_d = \tan^{-1} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (1)$$

donde  $\Delta h = h_o - h_i$  es la reducción en espesor de la cinta deformada con rodillos de radio  $R$ ;  $h_o$  y  $h_i$  son respectivamente los espesores de la cinta a la entrada y salida del casto. Se considera que la profundidad del choque térmico en el rodillo es función de la difusividad térmica ( $\kappa$ ) y el periodo de giro ( $\eta$ ) del rodillo:

$$\delta = 2 \sqrt{\frac{\kappa \cdot \eta}{\pi}} \quad (2)$$

donde  $\delta$  es la penetración del choque térmico.  $\kappa = k/\rho c_p$  depende de la temperatura.  $\kappa$  es la conductividad térmica,  $\rho$  la densidad y  $c_p$  la capacidad calorífica del rodillo [18]. En la Tabla I se presentan las propiedades físicas del óxido, que se supone es wustita (FeO), ámina y rodillo [4-7]. En este trabajo denominaremos como piel a la capa afectada por los cambios de temperatura. Dada la poca profundidad de penetración del choque térmico [1,9,11,18], el problema se puede simplificar como el calentamiento de un medio semi-infinito en contacto con una fuente a una temperatura dada.

La modelación del calentamiento del rodillo se realiza bajo las siguientes suposiciones:

- i. La conducción de calor en la dirección axial es despreciable.
- ii. El gradiente térmico en la dirección superficial es despreciable.
- iii. El flujo de calor es únicamente en la dirección radial a través de una resistencia de contacto (película de óxido).
- iv. Se parte de la condición inicial de equilibrio termodinámico del rodillo con el medio ambiente, es decir, se lleva a cabo el contacto entre rodillo y cinta por primera vez.

La ecuación de transferencia de calor [10,12-17] se resuelve en una dimensión; la condición a la frontera está dada por el flujo de calor en las interfaces cinta-óxido-rodillo. La solución de la ecuación diferencial parcial, implica que la temperatura y el flujo de calor instantáneo superficial, en un punto dado del rodillo en contacto con la lámina, están dados por:

$$T_{(0,t)} = (T_p - T_a) \frac{\beta}{1+\beta} [1 - \exp(h^2 \kappa t) \cdot \text{erfc}(h\sqrt{\kappa t})] \quad (3)$$

$$f_{(0,t)} = \frac{k_o}{\epsilon_o} (T_p - T_a) \cdot \exp(h^2 \kappa t) \cdot \text{erfc}(h\sqrt{\kappa t}) \quad (4)$$

donde  $T_{(0,t)}$  y  $f_{(0,t)}$ , son respectivamente la temperatura en la superficie del rodillo y el flujo de calor, el subíndice  $(0,t)$  indica las coordenadas espacial ( $0 \equiv$  superficie) y temporal ( $t$ ) en el intervalo de contacto,  $T_p$ , y  $T_a$  las temperaturas de la cinta y ambiente,  $\beta$  y  $h$  son constantes que dependen de las propiedades físicas de la cinta y del rodillo,  $k_o$  es la conductividad de la capa de óxido y  $\epsilon_o$  su espesor, es conveniente mencionar que los valores de temperatura no son absolutos, sino la diferencia con respecto a la ambiente.



El calentamiento del rodillo de trabajo es compensado por los siguientes mecanismos de extracción de calor [1]:

- i.* Contacto con el líquido refrigerante, ya sea proveniente de las boquillas o encharcado en las guías.
- ii.* Enfriamiento por el cuello de los rodillos.
- iii.* Convección al aire.
- iv.* Conducción al rodillo de apoyo.

La porción del rodillo en contacto con el líquido refrigerante está sujeta a diferentes modos de transferencia de calor (convección, ebullición, etc.), que dependen de las propiedades físicas del líquido y de la diferencia de temperatura entre éste y el rodillo [20,21].

El sistema de enfriamiento debe ser diseñado con el fin de mantener la temperatura del rodillo lo suficientemente baja, para reterner sus propiedades mecánicas y resistencia al desgaste, así como controlar la expansión térmica del mismo [11,18-30]. El sistema está constituido por cabezales portantes de una serie de boquillas o espreas que se encargan de aplicar el líquido refrigerante a presión sobre el rodillo. La eficiencia de una boquilla es función del tipo, apertura, presión y distancia a la que se encuentra la superficie a enfriar [22].

El modelo de enfriamiento del rodillo de trabajo considera pérdidas de temperatura por convección, al líquido refrigerante y al aire, y por conducción al rodillo de apoyo. La velocidad de extracción de calor por convección es función de la diferencia de temperatura entre la superficie y el medio ambiente por lo que se manejan  $n$ -intervalos en la periferia del rodillo en los cuales la temperatura se considera constante. El flujo de calor

extraído, en un punto dado de la zona de espreas o al aire, es calculada en base al coeficiente de transferencia de calor:

$$f_{n(0;t)} = -\alpha \cdot T_{n-1(0;t)} \quad (5)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de transferencia de calor al medio convectivo. Dado que la tasa de enfriamiento cambia con el tiempo, el cálculo de la temperatura se obtiene al integrar el flujo de calor :

$$T_{n+1(0;t)} = \frac{\kappa^{1/2}}{k\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^t f_{n(0;t^*)} \frac{dt^*}{\sqrt{t-t^*}} \quad (6)$$

donde  $t^*$  indica cada incremento de tiempo comprendido en el intervalo 0 a  $t$ . La solución de la Ec. (6) está sujeta al conocimiento de la historia térmica:

$$T_{n(0,t)} = 2 \cdot f_{(0;t_{n-1})} \cdot \frac{\kappa^{1/2}}{k\sqrt{\pi}} \cdot [\sqrt{t-t_{n-1}} - \sqrt{t-t_n}] \quad (7)$$

donde  $t_n$  y  $t_{n-1}$  corresponden a puntos sucesivos en el intervalo de tiempo. Es decir, para conocer la temperatura en un punto es necesario conocer los valores del flujo de calor y la temperatura en los puntos anteriores al que se desea. Es conveniente mencionar que la precisión del modelo se incrementa al reducir el incremento de tiempo, que se obtiene al aumentar el número de intervalos.

El flujo de calor extraído por el rodillo de apoyo es calculado por medio de:

$$F_{(0;\Delta t)} = k(T' - T_B) \cdot \sqrt{\frac{\Delta t}{\pi \cdot \kappa}} \quad (8)$$

donde  $F_{0,\Delta t}$  es el flujo de calor cedido por el rodillo de trabajo durante el tiempo de contacto  $\Delta t$ ,  $k$  y  $\kappa$  la conductividad y difusividad térmicas del rodillo de trabajo,  $T_B$  a

temperatura superficial del rodillo de apoyo y  $T'$  la del rodillo de trabajo antes de entrar en contacto con el de apoyo. La temperatura resultante del contacto entre los dos rodillos se calcula por medio de:

$$T_{(0;t)} = \frac{T_B - T'}{2} \cdot [1 - \exp(-h^2 \kappa t) \cdot \operatorname{erfc}(h\sqrt{\kappa t})] \quad (9)$$

donde  $h$  es una constante que depende de las propiedades físicas de los rodillos de apoyo y de trabajo.

El modelo desarrollado evalúa los regímenes de transferencia de calor, asociados a los sectores angulares mostrados en la Fig. 2, en un rodillo enfriado por cabezales colocados a los lados de entrada y salida de lámina:

- i.* Región **AB**. Contacto entre lámina y rodillo de trabajo, en la que se encuentra el máximo ascenso de temperatura en la superficie del rodillo.
- ii.* Regiones **BC**, **DE**, **FG** y **HA**. Enfriamiento de la superficie por convección al aire y conducción al centro del rodillo.
- iii.* Regiones **CD** y **GH**. Enfriamiento por contacto con los líquidos arrojados por las boquillas.
- iv.* Región **EF**. Conducción de calor al rodillo de apoyo.

## Resultados y discusión.

El diseño típico de un sistema de enfriamiento de rodillos de trabajo consiste en la disposición de cabezales a ambos lados del castillo, ver Fig. 1 [1,9,11]; de ahí que se decidiera evaluar el efecto de la localización del área de impacto del agua arrojada por

las boquillas, colocadas en dichos cabezales en tres, configuraciones diferentes: disposición actual (I) y alejamiento (II) y acercamiento (III), a la posición de salida de la cinta, una vez que fue deformada, Fig. 3. La simulación se realizó fijando los parámetros indicados en la Tabla II, así como las distancias horizontales de los cabezales con respecto al centro del rodillo de trabajo.

La Fig. 4 muestra el ciclo a que está sometido un punto en la periferia del rodillo, sujeto este último a las condiciones de enfriamiento producidas por el sistema actual (I). Las letras A a la H del diagrama corresponden a las posiciones angulares mostradas en el diagrama de la Fig. 2. Las Figs. 5 y 6 muestran los ciclos obtenidos al simular las configuraciones II y III. Es conveniente mencionar que la temperatura máxima, obtenida a la salida de la cinta, concuerda con predicciones de modelos similares [8,9,11,18].

Las Figs. 4 a 6 muestran claramente que el comportamiento en los tres casos es muy parecido, por lo que se requiere simular el acumulamiento de giros o ciclos, tal y como se presenta en la Fig. 7 para la configuración I, antes de poder evaluar claramente el efecto de la disposición geométrica. En la Fig. 7 se puede apreciar como las temperaturas a la entrada y salida del molino se incrementan con el número de giros. Las envolventes de dichas temperaturas, calculadas para las tres configuraciones se presentan en las Figs. 8 y 9. Se puede observar la tendencia ascendente en todas las curvas, lo que indica la incapacidad de los sistemas para extraer el total de calor introducido al rodillo durante la reducción de la cinta, sin embargo, la eficiencia del sistema aumenta al incrementarse la temperatura del rodillo, lo que conduce a encontrar una temperatura límite característica del sistema de que se trate.

Las condiciones térmicas al final de los cincuenta ciclos se muestran en la Tabla

III; de ella se puede ver concluir que la configuración más eficiente, desde el punto de vista del flujo térmico, es la III, en la cual los cabezales están más próximos a la salida de la lámina, Fig. 3, y, por ende, son capaces de extraer mayor cantidad de energía (compárese la caída de temperatura correspondiente a la región BC en las Figs. 4 a 6), antes de que ésta difunda al interior del rodillo [8,11].

Otro punto que salta la vista al observar la Tabla III, es la inversión de los valores esperados de flujo térmico, al comparar los sistemas I y II, dado que al encontrarse los cabezales del primer sistema más cerca del punto de salida de la lámina, se supone un menor flujo térmico. Sin embargo, la extracción de calor de los cabezales del segundo sistema es más eficiente, por encontrarse a menor distancia del rodillo mismo [22].

### **Conclusiones.**

El modelo desarrollado puede ser utilizado como una herramienta para predecir el comportamiento térmico del sistema lámina - rodillo - cabezales de enfriamiento en el proceso de laminación en caliente.

El sistema de enfriamiento es tanto más eficiente cuanto se acercan los cabezales a la salida de la lámina, siempre que se mantengan constantes los factores que afectan la eficiencia de extracción de calor de las boquillas.

El flujo térmico al rodillo de trabajo puede ser reducido en un orden de magnitud mediante el rediseño del sistema de enfriamiento.

## Agradecimientos.

A.P. agradece el apoyo económico del CONACYT y la empresa Hylsa, S.A. de C.V., así como las facilidades otorgadas por esta última para la realización del trabajo.

## Referencias.

1. W.L. Roberts: Hot Rolling of Steel, M.Dekker, Inc. New York, 1983.
2. J.N. Harris: Mechanical Working of Metals, Pergamon Press, Oxford, 1983.
3. J.A. Schey: Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear, ASM, Metals Park, 1983.
4. D.R. Gaskell: Introduction to Metallurgical Thermodynamics, Mc.Graw Hill, Nva. York, 2<sup>th</sup> Ed. 1981.
5. G. Poirie: Transport Phenomena in Metallurgy, Addison Wesley, Nva. York, 1973.
6. W.D. Kingery, H.K. Bowen y D.R. Uhlman: Introduction to Ceramics, J. Wiley & Sons, New York, 1960.
7. F. Hollander: Mathematical Models in Metallurgical Process Development, Iron Steel Inst. pub. 123, 970.
8. G.F. Brayant y T.S.L. Chiu: Metals Technology, **9**, 485 (1982).
9. C. Devadas e I.V. Samarasekera: Ironmaking and Steelmaking, **13**, 311 (1986).
10. H.S. Carslaw y J.C. Jager: Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press, Oxford, 1959.
11. D.M. Parke y J.L. Baker: Iron Steel Eng., **49** (12), 83 (1972).
12. M. Abramowitz e I.A. Stegun: Handbook of Mathematical Functions, 9<sup>th</sup> edition, Dover Pub., Inc., Nva. York, 1972.
13. I.S. Gradshteyn e I.M. Ryzhik: Table of Integrals, Series and Products, 4<sup>th</sup> Ed., Academic Press, Nva. York, 1965.
14. G.L. Myers: Analytical Methods in Conduction Heat Transfer, Mc.Graw Hill, Nva. York, 1971.
15. M.L. Boas: Mathematical Methods in the Physical Sciences, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley and Sons Inc., Nva. York, 1966.
16. G. Arfken: Mathematical Methods for Physicists, 2<sup>nd</sup> Ed., Academic Press, Nva. York, 1970.
17. C.R. Wylie: Advanced Engineering Mathematics, Mc.Graw Hill, 4<sup>th</sup> Ed., Nva. York, 1975.
18. P.G. Stevens, K.P. Ivens y P. Harper: J. Iron Steel Inst. **209**, 1 (1971).
19. P. Harper: Iron Steel Eng., **65** (10), 34 (1988).
20. D.R. Hill y L.E. Gray: Iron Steel Eng., **58** (6), 57 (1981).
21. W.L. Roberts: Flat Processing of Steel, M. Dekker Inc., Nva. York, 1988.
22. G.V. Steden y J.G.M. Tellman: 4<sup>th</sup> Int. Steel Rolling Conf. Sc. Tech. Flat Rolling, IRSID. 1987. A.29.1.
23. A.A. Tseng, F.H. Lin, A.S. Gunderia y D.S. Ni: Metall. Trans. A, **20A**, 2305 (1989).
24. E.A. Garber, A.A. Goncharskii y A.A. Okunev: Steel USSR, **16**, 332 (1986).
25. T. Sheppard y J.M. Roberts: Int. Metall. Rev., **18**, 1 (1973).
26. H.W. O'Connor y A.S. Weinstein: J. Eng. Ind. ASME, **94**, 1113 (1972).
27. W.Y.D. Yuen: Ob. Cit. Ref. 22, E23.1.
28. T. Nagai, E. Takeda, T. Masui y M. Shoji: Restructuring Steel Plants for the Nineties, Inst. of Metals, Londres, 1986, 238.
29. A.L. Kanevskii, Sh.Ts. Tszyan, A.A. Medenkoy y Yu.M. Karakin: Steel USSR, **18**, 175 (1988).
30. D.J. Fapiano: Iron Steel Eng., **59** (10), 29 (1982).

Tabla I. Propiedades físicas del óxido, rodillo y lámina de acero.

	$k$ [W/m°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kg°C]	$\kappa$ [10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]
Oxido	2.51	5728	113.4	3.86
Rodillo	48.0	7400	520.0	12.47
Lámina	46.1	7850	494.0	11.87

Tabla II. Datos de operación.

Líquido refrigerante	:	agua.
Velocidad tangencial	:	6.1 m/s.
Radio del rodillo de trabajo	:	0.472 m.
Temperatura de la cinta de acero	:	900°C.
Angulo de contacto rodillo-rodillo	:	1.0°.
Angulo de mordida	:	3.74°.

Tabla III. Condiciones térmicas al fin de cincuenta ciclos.

Configuración	Flujo térmico neto [J/m <sup>2</sup> ]	Temperaturas [C]		
		Entrada	Salida	$\Delta T$
I	$4.64 \cdot 10^7$	52	473	421
II	$2.92 \cdot 10^7$	58	475	417
III	$0.34 \cdot 10^7$	39	466	427

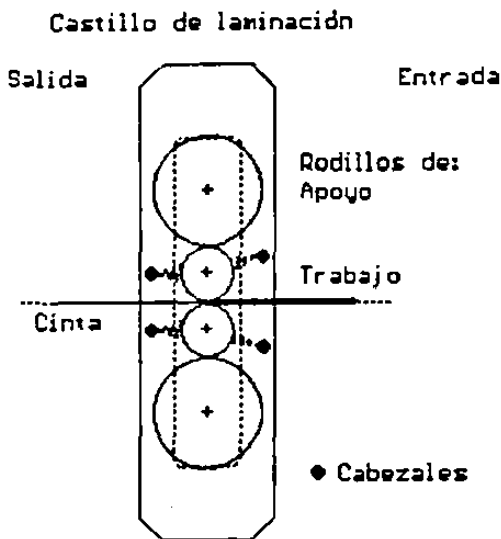


Fig. 1. Diagrama de un castillo de laminación en el que la cinta se alimenta por el lado derecho.

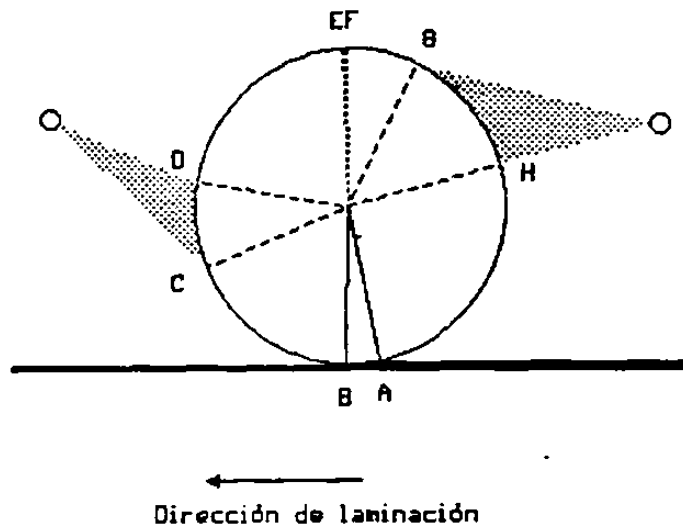


Fig. 2. Sectores angulares en los que se divide el rodillo de trabajo.

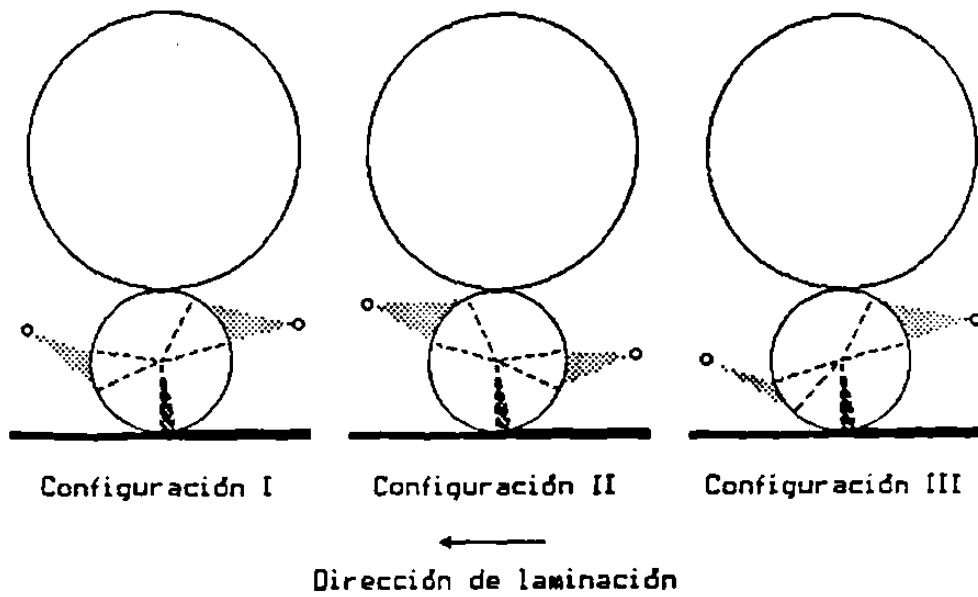


Fig. 3. Configuraciones empleadas para evaluar el efecto de la disposición geométrica de los cabezales de enfriamiento. I normal, II alejamiento y III acercamiento a la salida de la lámina.



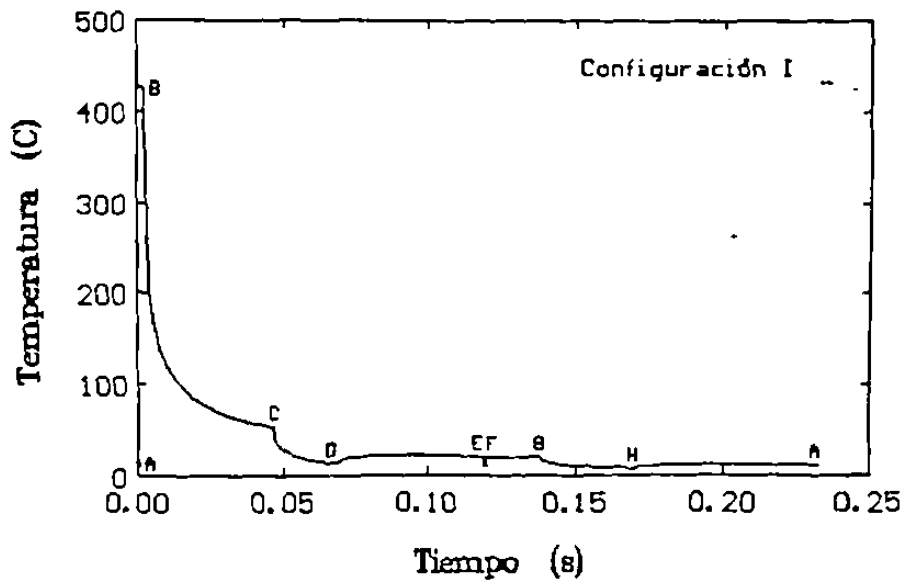


Fig. 4. Simulación del primer ciclo térmico para un rodillo de trabajo siendo enfriado por el sistema de configuración I. Las letras A a la H corresponden a los sectores angulares mostrados en la Fig. 2.

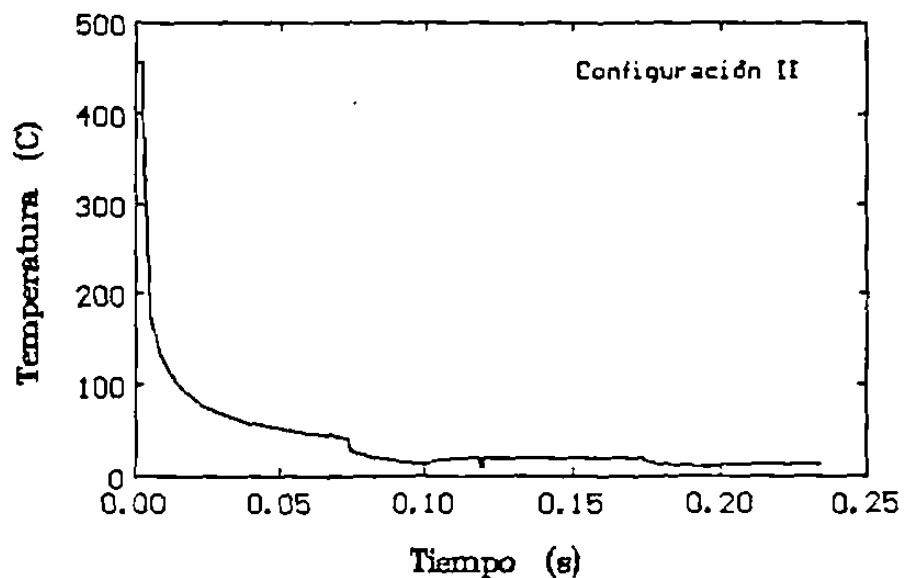


Fig. 5. Simulación del primer ciclo térmico para un rodillo de trabajo siendo enfriado por el sistema de configuración II.

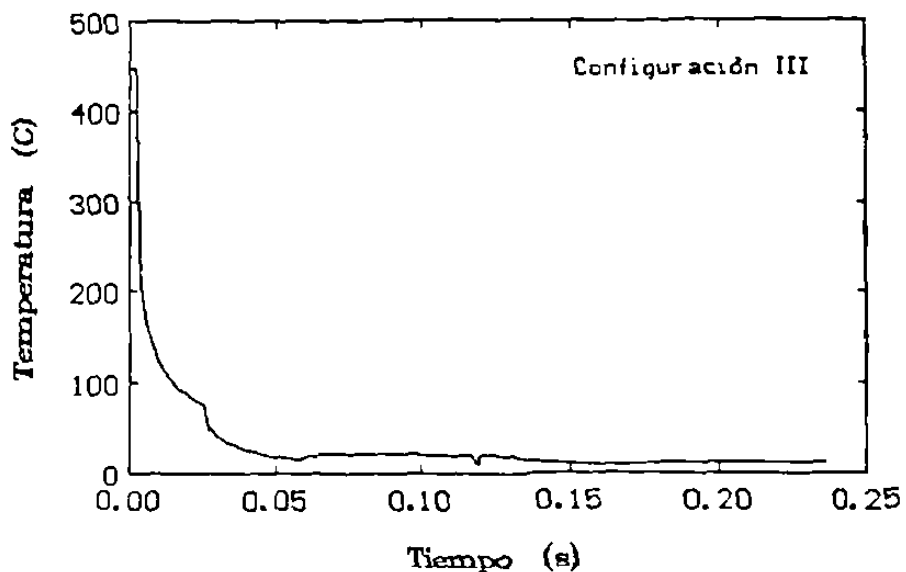


Fig. 6. Simulación del primer ciclo térmico para un rodillo de trabajo siendo enfriado por el sistema de configuración III.

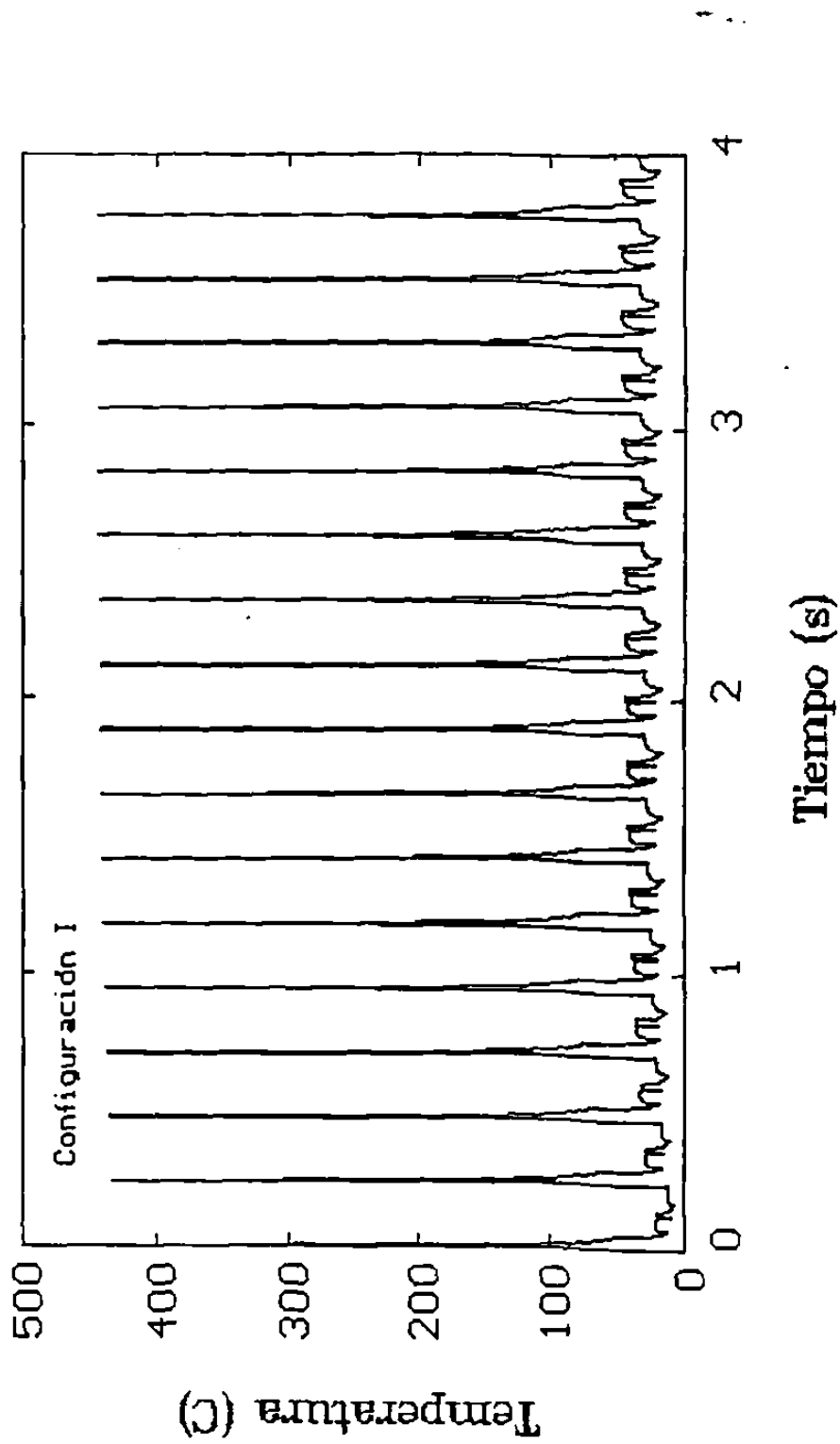


Fig. 7. Acumulación de los primeros 17 ciclos térmicos en un rodillo de trabajo siendo enfriado con el sistema de configuración I. Nótese el incremento de las temperaturas a la entrada y salida de la zona de deformación.

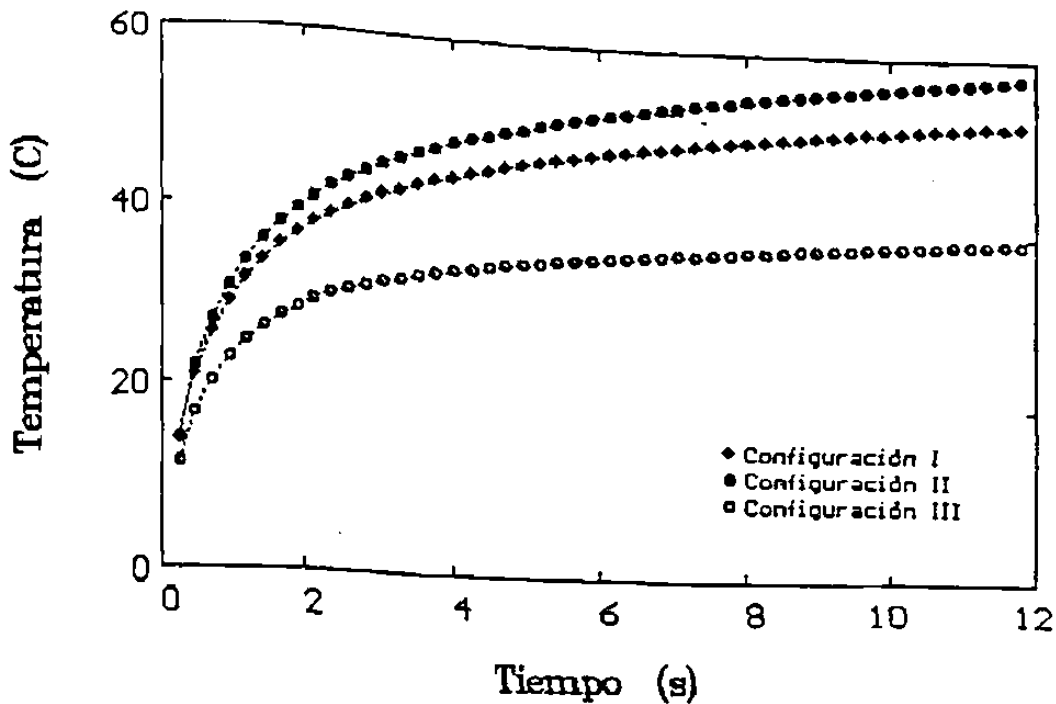


Fig. 8. Evolución de la temperatura a la entrada de la zona de deformación durante los primeros cincuenta ciclos para las tres configuraciones consideradas.

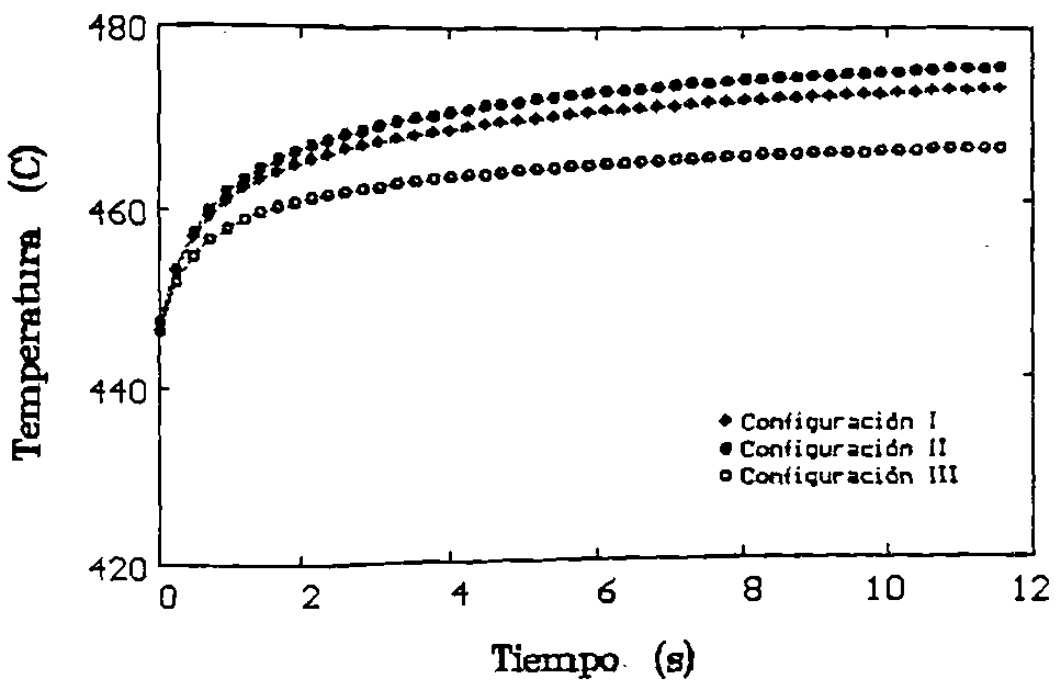


Fig. 9. Evolución de la temperatura a la salida de la zona de deformación durante los primeros cincuenta ciclos para las tres configuraciones consideradas.

## **AGRADECIMIENTOS.**

A la empresa HYLSA S.A. de C.V. por todas las facilidades prestadas en el desarrollo de la esta tesis, así como a los Doctores Luis R. Farias y Luis A. Leduc. por su apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo para la realización de estos estudios.

Al personal docente y administrativo del Doctorado en Ingeniería de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Muy especialmente a mis asesores los Doctores Rafael Colás y Raúl Fuentes, por su respaldo y dedicación.

A todos mis compañeros: maestros y alumnos del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales que de una u otra forma participaron en esta. Y en forma especial a C.A. Nuñez, J.A. Aguilar y M.A. Neri sin los cuales este trabajo se hubiese terminado antes.

