

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES



MODELACION TERMICA EN RODILLOS
DE LAMINACION

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

MARTHA PATRICIA GUERRERO MATA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.
AGOSTO DE 1993

TM

Z5853

.M2

FIME

1993

G83



1020070656

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES



**MODELACION TERMICA EN RODILLOS
DE LAMINACION**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

PRESENTA

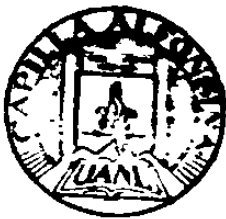
MARTHA PATRICIA GUERRERO MARTINEZ



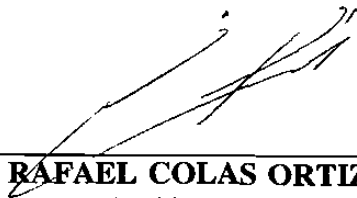
SECRETARÍA

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.
AGOSTO DE 1993

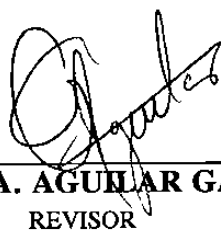
T



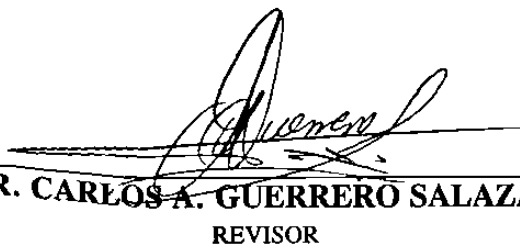
BONDO TESIS



DR. RAFAEL COLAS ORTIZ
ASESOR



DR. JUAN A. AGUILAR GARIB
REVISOR



DR. CARLOS A. GUERRERO SALAZAR
REVISOR

DEDICO ESTE TRABAJO

JUNTO CON MI AGRADECIMIENTO

A LOS QUE SU MANO ME TENDIERON

Y TAMBIEN A LOS QUE ME LA NEGARON.

MODELACION TERMICA EN RODILLOS DE LAMINACION.

C O N T E N I D O.

	RESUMEN.	3
1.	INTRODUCCION A LA LAMINACION.	5
2.	TRANSFERENCIA DE CALOR EN RODILLOS DE LAMINACION.	
	2.1. ASPECTOS GENERALES.	8
	2.2. CALENTAMIENTO.	10
	2.2.1. POR CONTACTO CON LA CINTA.	11
	2.3. ENFRIAMIENTO.	12
	2.3.1. LIQUIDOS REFRIGERANTES.	12
	2.3.2. ENFRIAMIENTO AL AIRE.	14
	2.3.3. CONTACTO CON EL RODILLO DE APOYO.	15
	2.4. SOLUCION A ECUACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.	16
	2.4.1. APROXIMACION NUMERICA.	17
	2.4.2. SOLUCION ANALITICA.	23
	2.4.2.1. CALENTAMIENTO.	23
	2.4.2.2. ENFRIAMIENTO POR LIQUIDOS.	25
	2.4.2.3. ENFRIAMIENTO AL AIRE.	26
	2.4.2.4. CONTACTO CON EL RODILLO DE APOYO.	27
	2.5. CONCLUSIONES.	29
3.	MODELACION DEL CICLO TERMICO POR DIFERENCIAS FINITAS.	
	3.1. INTRODUCCION.	30
	3.2. TRABAJOS PREVIOS DE MODELACION.	31
	3.3. DISCRETIZACION DEL RODILLO.	33
	3.4. TRANSFERENCIA DE CALOR.	34
	3.4.1. CALENTAMIENTO.	35
	3.4.2. ENFRIAMIENTO.	36
4.	RESULTADOS Y DISCUSION.	
	4.1. INTRODUCCION.	39
	4.2. UN CICLO DEL RODILLO.	39
	4.3. CINCO CICLOS DEL RODILLO.	42
	4.4. UN PLANCHON Y UN DESCANSO.	42
	4.5. CINCO PLANCHONES CON DESCANSOS.	44
	4.6. DEL PLANCHON 16 AL 20.	45

5.	CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.	47
	AGRADECIMIENTOS.	49
	REFERENCIAS.	50
	APENDICES.	52
	FIGURAS.	66

RESUMEN.

Se estudian los mecanismos responsables de la transferencia de calor en un rodillo de trabajo de laminación en caliente. Se encuentra que dichos mecanismos dominantes son los de conducción de calor dentro del rodillo y entre el rodillo y la lámina o planchón siendo deformado y de convección al aire o a los líquidos refrigerantes de la superficie del rodillo. Es conveniente mencionar que la conducción entre metal y rodillo se realiza a través de la resistencia de contacto que representa la capa o costra de óxido que se genera en la pieza siendo laminada.

Se implementa un modelo para simular la transferencia de calor usando el método explícito de la técnica de diferencias finitas, en este caso se consideran nodos o elementos de igual volumen, con el fin de incrementar la distancia en las regiones con menor gradiente térmico (centro). El problema de transferencia se resuelve en una dimensión (radial), considerando un vector de 100 nodos que gira hasta completar una circunferencia (360°), el tiempo de estabilidad se considera igual al requerido para que un punto en la superficie recorra una distancia angular de 1° .

Se encuentra que los resultados del modelo

concuerdan con observaciones experimentales y con predicciones de modelos más complejos, el modelo predice que los cambios de temperatura en un sólo ciclo del rodillo se restringen a la superficie del mismo, llegando la información térmica al centro sólo después de cinco planchones.

Las predicciones de la obtención del estado estacionario, que sólo se encuentra después de veinte planchones, concuerda con las prácticas operacionales de la planta industrial.

1. INTRODUCCION A LA LAMINACION.

La laminación puede definirse como un proceso de conformado en el que las herramientas en contacto con el producto a ser deformado son unos cilindros o rodillos que giran sobre un eje fijo. Al hacer pasar el metal entre los cilindros, éste se somete a intensos esfuerzos de compresión y de cizallamiento. Las fuerzas de fricción que se generan en la interfase rodillo-pieza son las encargadas de producir la entrada del material [1].

La laminación suele iniciarse con el lingote colado, el cual se transforma por desbastes pesados y ligeros hasta llegar a productos semiterminados, mismos que se emplean como materia prima para obtener otros productos de laminación.

En la laminación convencional en caliente o en frío, la constante reducción en espesor o sección transversal de la pieza se traduce en aumentos de longitud y de velocidad. La laminación, hoy en día, no es empleada solamente para controlar las dimensiones de la pieza, como en un principio, sino que es utilizada para obtener las propiedades metalúrgicas así como el acabado superficial requeridos [2].

Para laminar se requiere de una estación denominada molino o castillo, que se compone esencialmente de cilindros,

cojinetes adecuados, columnas que los soportan y un sistema de accionamiento para aplicar a los rodillos la fuerza motriz y controlar su velocidad. A un conjunto de molinos o castillos de laminación, que conduce a un producto terminado a través del paso sucesivo por cada uno de ellos, se le conoce como tren continuo de laminación.

Los molinos de laminación se clasifican según el número y disposición de los cilindros [2]. En la Fig. 1 se ejemplifican algunos casos. El objeto de tener diferentes configuraciones y juegos de rodillos es el de asegurar la reducción y espesor de la lámina en un dado paso, así como evitar la flexión en exceso de los rodillos. A los cilindros que se encuentran en contacto con la pieza se les conoce como rodillos de trabajo en tanto a aquellos que evitan la distorsión se les denomina rodillos de soporte o apoyo.

La primera operación de trabajo en caliente del acero, después de recalentar el lingote hasta la temperatura adecuada, se realiza en el tren de desbaste. En el caso de una empresa de la localidad, el desbaste se realiza en dos molinos reversibles, el primero dúo y el segundo cuatro. Como el desbaste representa el acondicionamiento de la estructura de colada del lingote a la de trabajado del planchón, éste se realiza en varias pasadas que dependen del producto final. A la salida de los desbastes se realiza el corte de punta y cola de la barra de transferencia o solera. Después de esto, se pasa a un tren continuo, que contiene seis laminadores cuatro,

Fig. 2, la reducción sufrida por la cinta en cada castillo es incremental, lo que produce un aumento progresivo en la velocidad del material a medida que disminuye su espesor. La velocidad de los rodillos debe estar convenientemente sincronizada para que cada laminador tome el material a la misma velocidad con que sale del anterior, con el fin de evitar atorones, rupturas o estrechamientos localizados de la solera.

Por último, la cinta terminada se transporta por la mesa de enfriamiento y se enrolla para su posterior corte en hojas o tiras, o bien para seguirla laminando en frío. El enrollador no sólo tiene la misión de recoger el producto acabado, sino de mantener la tensión en el último castillo. En la Fig. 3 se representa el último castillo del tren que es en el que se centrará la atención y estudio de este trabajo. En esta última figura se muestran los rodillos de trabajo y los de apoyo, es conveniente observar la disposición de cabezales de enfriamiento, localizados a la entrada y salida de la lámina y a ambos costados del rodillo de trabajo, éstos tienen la función de contrarrestar el calentamiento y, por ende, la expansión (también llamada coronamiento) térmica de los rodillos de trabajo.

2. TRANSFERENCIA DE CALOR EN RODILLOS DE LAMINACION.

2.1. ASPECTOS GENERALES.

Durante la laminación, como en todo proceso de deformación, gran parte de la energía requerida para cambiar de forma a la pieza se transforma en calor, el cual puede ser disipado hacia el medio ambiente, a los rodillos, o utilizado para elevar la temperatura de la pieza en forma adiabática [1]. El incremento de temperatura, ya sea en los rodillos o en la pieza, no es homogéneo, por lo que el descontrol de este calentamiento puede producir problemas de forma en la pieza laminada y de fátiga térmica en los rodillos [1]. Por lo tanto es primordial conocer las propiedades mecánicas, resistencia y expansión térmica de los rodillos con el fin de prevenir su temprano deterioro. Para lo anterior, se propone un modelo por computadora que simule el comportamiento térmico de los rodillos de trabajo, la información que se obtenga, además de ayudar en la solución del problema de los rodillos; es vital para predecir los perfiles y planeza de láminas producidas en molinos [14,18].

Las condiciones de transferencia de calor de un rodillo de trabajo se muestran en la Fig. 4, en la que el rodillo de trabajo se puede dividir en ocho zonas:

Zona A-B. En esta zona se considera que el rodillo se calienta por conducción, debido a la diferencia de temperaturas existentes entre la cinta y él mismo, y por fricción en la interfase. La contribución relativa de estos mecanismos depende del tipo de trabajo que se esté llevando a cabo, de tal forma que en el caso de laminación en frío, donde la diferencia de temperaturas entre rodillo y lámina es pequeña, la contribución por fricción es dominante.

Zonas C-D y G-H. El rodillo se enfría por convección y ebullición de los líquidos refrigerantes.

Zonas B-C, D-E, F-G y H-A. Aquí el rodillo se enfría por convección al medio ambiente.

Zona E-F. El rodillo de trabajo conduce calor al rodillo de apoyo, por lo que el primero sufre el enfriamiento de su superficie.

El objetivo de este trabajo es, en base a la descripción de los fenómenos de transferencia de calor para rodillos de laminación en caliente, realizada anteriormente, obtener un modelo lo más sencillo posible que permita encontrar resultados rápidamente sobre la evolución térmica general durante toda una campaña de laminación para analizar el calentamiento global de los mismos.

2.2. CALENTAMIENTO.

Los procesos de transferencia de calor que provocan que el rodillo de trabajo incremente su temperatura, durante la laminación en caliente son [3]:

- i) Radiación emitida por la cinta.
- ii) Conducción de calor entre planchón - rodillo.
- iii) Fricción a lo largo del arco de contacto rodillo planchón.

Se considera que el calentamiento se debe principalmente a la conducción por el contacto entre los dos metales, las demás fuentes de calor no se consideran por su parca contribución.

Lo anterior se justifica al observar la Fig. 5 en donde se presenta la disposición completa de los rodillos de apoyo y trabajo en un molino cuatro, en ésta se representan las guías a ambos lados del plano de laminación, lo que provoca el estancamiento de líquido refrigerante sobre la guía superior; estas guías también impiden la radiación de la lámina hacia el rodillo [18] de ahí que no se considere el factor de radiación. Ya que se puede considerar que la temperatura de las guías es la del ambiente, puesto que ellas son construidas a partir de placa de acero de 6.3 mm de

espesor y su cara superior se encuentra anegada por el agua que escurre de los rodillos de trabajo. En las fotografías 1 y 2 se observa esta disposición de un molino de una empresa de la localidad.

2.2.1. POR CONTACTO CON LA CINTA.

La cinta pierde su calor principalmente por radiación al medio ambiente y por conducción al rodillo de trabajo [4], dicha conducción se realiza a través de una resistencia de contacto, en este caso una película de óxido, compuesta principalmente de wustita (FeO) [5].

En un trabajo previo [5] se ha encontrado que los efectos de los cambios de temperatura del rodillo se llevan a cabo superficialmente. La penetración de los efectos térmicos en el rodillo de trabajo son función de la difusividad térmica del rodillo y de su período de rotación [6]; mas cabe señalar que dicho trabajo sólo reprodujo como máximo 50 ciclos del rodillo y para simular un sólo planchón se necesitan de 266 ciclos, aproximadamente. Una campaña de laminación está compuesta de 125 planchones. Por lo que es de gran interés conocer a partir de que planchón se estabiliza el rodillo y a partir de que planchón los cambios de temperatura empiezan a repercutir en el interior del rodillo.

2.3. ENFRIAMIENTO.

Los procesos de transferencia de calor que disminuyen la temperatura del rodillo de trabajo son [3]:

- i) Convección forzada (por líquidos refrigerantes).
- ii) Convección libre (enfriamiento al aire).
- iii) Conducción de calor del rodillo de trabajo al de apoyo.

2.3.1. LIQUIDOS REFRIGERANTES.

El objetivo principal de enfriar los rodillos de trabajo es mantener la temperatura de operación de éstos lo suficientemente baja, como para que retengan sus propiedades mecánicas y su resistencia al desgaste, para de esta manera minimizar o controlar la expansión térmica y su deterioro superficial [7].

El tren continuo de laminación en caliente posee un sistema de enfriamiento, cuyo objetivo es extraer calor del rodillo de trabajo.

Este sistema de refrigeración consiste de dos tubos o cabezales que portan una serie de espreas o boquillas que se encargan de aplicar el líquido refrigerante a la superficie

del rodillo, los cabezales se colocan a la entrada y salida de la zona de deformación a cierta altura e inclinación.

La eficiencia de este método depende del tipo y apertura de la esprea, la presión con la que se lanzan los líquidos refrigerantes y la distancia a la que se encuentra la superficie a enfriar [17].

El enfriamiento del rodillo se ha identificado como un factor crítico en los problemas de desgaste excesivo y falla por microgrietas, los cuales acortan la vida del rodillo, por lo que se debe tener control sobre este fenómeno [8]. Un enfriamiento adecuado no sólo contribuye a extender la vida útil de los rodillos, sino que también ayuda a estabilizarlos, esto quiere decir que acorta el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio térmico después de un descanso o al término de un campaña de laminación [18].

El enfriamiento insuficiente o inadecuado causa grandes gradientes térmicos cerca de la superficie del rodillo, induciendo esfuerzos térmicos que aceleran su agrietamiento [8].

Adicionalmente, los rodillos se enfrían naturalmente por convección al medio ambiente y por contacto con el rodillo de apoyo.

2.3.2. ENFRIAMIENTO AL AIRE.

En cualquier operación en caliente una cierta cantidad de calor se pierde por enfriamiento al aire, la convección y radiación son responsables de esto. Algunos autores [3] hacen una suma de ambas contribuciones para encontrar la cantidad total de calor perdido durante el enfriamiento. En este trabajo se ignorará la radiación, esto debido a la existencia de guías en la mesa de trabajo las cuales provocan que no llegue radiación del producto laminado a los rodillos de trabajo, tal y como se muestra en las fotografías 1 y 2; por lo tanto, sólo se tomará en cuenta la contribución debido a la convección al medio ambiente, para lo anterior se supone un coeficiente de transferencia de calor al aire de $500 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, este coeficiente se tomó de un trabajo que reporta los coeficientes de transferencia de calor en función de la temperatura al enfriarse una pieza [15,16]. En las Fig. 6 y 7 se pueden observar los valores reportados de los coeficientes al aire y al agua calmada respectivamente. El coeficiente que se utiliza en este trabajo se tomó de la Fig. 6, cuando se trabaja a un temperatura aproximada de 100°C .

2.3.3. CONTACTO CON EL RODILLO DE APOYO.

Después de que el rodillo sale de la zona de convección libre y entra en contacto con el rodillo de apoyo; el primero sufre un enfriamiento, ésto debido a la diferencia de temperaturas entre ambos rodillos, en este caso el rodillo de apoyo se encuentra a temperatura ambiente por lo que el rodillo de trabajo cede calor a éste y él mismo sufre enfriamiento por conducción. Sin embargo, dicho enfriamiento es contrarrestado por el efecto de la fricción entre ambos rodillos, por lo que para el caso presente, este fenómeno será ignorado.

En la Fig. 11 se observan los resultados obtenidos en un trabajo anterior [5] y en E-F, que es la zona de contacto con el rodillo de apoyo, se resalta el hecho que no considerar el contacto con los rodillos de apoyo no afecta en los resultados, por el mínimo efecto de éste. Como el objetivo es simplificar lo más posible el modelo, sin que pierda su esencia, se ignorará tal efecto.

2.4. SOLUCION A LAS ECUACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Debido a que los procesos de transferencia de calor son de gran impacto en la vida humana, se hace necesario, no sólo comprenderlos, sino predecirlos cuantitativamente siguiendo alguna metodología. Dichos fenómenos de transferencia están gobernados por ecuaciones diferenciales, por lo que el objetivo será resolver dichas ecuaciones, es decir, encontrar los valores de las variables relevantes que gobiernan al proceso.

Existen tres métodos para resolver problemas de transferencia de calor [9]:

1. Empírico.
2. Teórico.
3. Numérico.

En la Tabla I se comparan las ventajas y desventajas de los tres métodos. De dicha tabla se puede concluir que el caso de un método empírico no sería costeable, sobre todo por el equipo requerido, por lo que se usará alguno de los métodos alternativos, más concretamente aquel que se distinga por la simplificación inherente de éste y su bajo costo.

TABLA I

Método	Ventajas	Desventajas
Empírico	Rapidez en la respuesta	Equipo requerido, problemas de escala, dificultades de medición, costos de operación, no es extrapolable a otras situaciones.
Teórico	Limpieza, información general en forma de ecuación o procedimiento matemático.	Restringido a geometría y física simples; usualmente limitado a problemas lineales.
Numérico	Bajo costo, rapidez, información completa, habilidad para simular condiciones reales e ideales, uso de ecuaciones algebraicas en vez de ecuaciones diferenciales.	Errores de truncación, validez del modelo usado, problemas de condición a la frontera, tiempo de cómputo.

2.4.1. APROXIMACION NUMERICA

Una aproximación numérica reemplaza la información contenida en la ecuación diferencial por valores discretos. La simplificación inherente en el uso de ecuaciones algebraicas en vez de ecuaciones diferenciales es lo que los hace tan poderosos y ampliamente aplicables; razón por la cual, para resolver el problema de transferencia de calor en los rodillos de laminación, se usará una aproximación numérica [10].

La aproximación numérica trata los valores de la variable dependiente, en este caso la temperatura del rodillo de trabajo, en un número finito de locaciones, conocidas como nodos, como sus incógnitas básicas. El método incluye las tareas de proveer un conjunto de ecuaciones algebraicas para esas incógnitas y de prescribir un algoritmo para resolver dichas ecuaciones [10].

La base de las aproximaciones es la discretización de las ecuaciones diferenciales, para lo que se necesita una ecuación que discretice. Ahora bien, una ecuación de discretización es una relación algebraica conectando valores de la variable dependiente para un grupo de nodos. Dicha ecuación se deriva de la ecuación diferencial que gobierna el proceso, por lo que la ecuación de discretización expresa la misma información física que la diferencial.

Los métodos de aproximación numérica se pueden agrupar en cualquiera de los tres siguientes casos: *i*) métodos integrales, *ii*) métodos de elementos finitos y *iii*) métodos de diferencias finitas. La diferencia entre estas aproximaciones resulta de la manera en que se deriven las ecuaciones de discretización. Aquí se empleará una técnica de diferencias finitas debido a la facilidad de su uso en comparación al método de elementos finitos; éste último es muy poderoso cuando se trata de geometrías irregulares, (que no es el caso), por lo que su empleo en este problema en particular no presenta ventaja alguna [9].

Existen varios procedimientos para derivar las ecuaciones de discretización de diferencias finitas, a saber [10]:

a) Series de Taylor: El procedimiento usual para derivar las ecuaciones de diferencias finitas, consiste en aproximar las derivadas de la ecuación diferencial vía una serie de Taylor truncada.

b) Formulación Variacional: El método está basado en el cálculo variacional, éste muestra que el resolver ciertas ecuaciones diferenciales es equivalente a minimizar una cantidad llamada el funcional. Esta equivalencia es conocida como el principio variacional. Si el funcional es minimizado con respecto a los valores de los nodos de la variable dependiente, las condiciones resultantes dan las ecuaciones de discretización requeridas.

c) Método de residuos ponderados: El concepto básico de este método consiste en tener una solución aproximada con un número de parámetros indeterminados para una ecuación diferencial, esta solución se sustituye en la ecuación diferencial, dejando un residuo, el cual, multiplicado por una función de peso e integrado en el intervalo de interés, se desea que sea mínimo; escogiendo una sucesión de funciones de peso se pueden generar tantas ecuaciones como se requieran para evaluar los parámetros. Una vez obtenidos éstos se tiene la solución aproximada a la ecuación diferencial. Se puede establecer una corrección con las ecuaciones de diferencias finitas, si la

solución aproximada se construye con los valores de los nodos como los parámetros desconocidos.

d) Formulaci3n Control-Volumen: Es un caso especial del m3todo de residuos ponderados, esto es, la funci3n de peso m3s sencilla es $W=1$. Y si se divide el dominio de c3lculo en subdominios o vol3menes de control que no se traslapan y se hace la funci3n de peso en un cierto subdominio igual a 1 y en el resto que sea cero y se integra sobre cada subdominio.

Para hacer la discusi3n m3s concreta se analizar3 el caso de inter3s. Consideremos la ecuaci3n de transferencia de calor en una dimensi3n:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

donde ρ es la densidad C_p el calor espec3fico, κ la conductividad t3rmica del material, los anteriores coeficientes se consideran como constantes, por el intervalo de temperaturas tan peque1o que se considera en el cuerpo del rodillo, aunque la variaci3n de temperatura en la superficie si es considerable, su efecto es minimizado dada la peque1a penetraci3n de la perturbaci3n t3rmica en el rodillo; x es la posici3n y T la temperatura. Para derivar la ecuaci3n de discretizaci3n se usa la malla mostrada en la Fig. 8, se centrar3 la atenci3n en el punto P que tiene a los puntos W y E como vecinos, W en la direcci3n negativa de x y E en la positiva. Para proseguir se necesita suponer un perfil o

fórmula de interpolación, en la Fig. 9 se muestran dos perfiles sencillos que se puede considerar. Al usar el método de control - volumen se discretiza como sigue:

$$\rho C_p \frac{\Delta X}{\Delta t} (T_p^1 - T_p^0) = f \left[\frac{\kappa_e (T_e^1 - T_p^1)}{(\delta x)_e} - \frac{\kappa_w (T_p^1 - T_w^1)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[\frac{\kappa_e (T_e^0 - T_p^0)}{(\delta x)_e} - \frac{\kappa_w (T_p^0 - T_w^0)}{(\delta x)_w} \right] \quad (2)$$

donde T_p es la temperatura en el nodo de interés y T_e y T_w son las temperaturas en los nodos adyacentes (anterior y siguiente, respectivamente) además δx_e y δx_w son las distancias existentes entre dicho nodo y los nodos adyacentes y los superíndices 0 y 1 indican el tiempo t y el tiempo $t+\Delta t$, respectivamente. En la Fig. 8 se esquematiza lo anterior.

A partir del valor de la función f , se deduce el esquema de aproximación, cuando $f=0$, conduce al esquema explícito, $f=0.5$ al esquema De Crank-Nicolson y $f=1$ al esquema completamente implícito [10].

El esquema explícito supone que el antiguo valor de T_p^0 prevalece a través del paso de tiempo, excepto en el tiempo $t+\Delta t$. El esquema completamente implícito postula que al tiempo t , T_p repentinamente cambia de T_p^0 a T_p^1 y permanece en T_p^1 todo el tiempo del intervalo, por lo que la temperatura durante el paso del tiempo está caracterizada por T_p^1 . El esquema de Crank-Nicolson supone una variación lineal de T_p durante el intervalo de tiempo (Fig. 10).

En el esquema explícito, en el cual $f=0$, (lo que

implica que T_p no está relacionada con otras incógnitas) se obtiene la ecuación en términos de las temperaturas conocidas. Cualquier esquema con $f \neq 0$ será implícito, en dicho caso, T_p estará ligado a las incógnitas T_e y T_w , y la solución será un conjunto de ecuaciones simultáneas, por lo que el método explícito parece más conveniente. Sin embargo existen serias limitaciones, que, resumidamente, se expresan en la siguiente restricción:

$$\delta t < \frac{\rho C_p (\delta x)^2}{2\kappa} \quad (3)$$

Si se viola esta condición, se obtendrán resultados físicos irreales, ya que un coeficiente negativo implicaría que a mayor T_p° menor T_p . Visto de otra manera se puede decir que los gradientes penetrarán más allá de un elemento. A dicha restricción se le conoce como el criterio de estabilidad [10].

2.4.2. SOLUCION ANALITICA.

La solución exacta de problemas de transferencia de calor está prácticamente confinada a problemas lineales en regiones de forma simple. Por lo que se harán algunas consideraciones al plantear las ecuaciones de transferencia de calor para las diversas formas de calentamiento y enfriamiento.

2.4.2.1. CALENTAMIENTO.

La cinta actúa como fuente de calor, la temperatura en la zona de deformación durante el contacto rodillo-pieza es aproximadamente constante, entonces el problema se puede reducir a la solución general de dos medios semi-infinitos separados por una resistencia de contacto.

La expresión que da el comportamiento térmico del rodillo se obtiene de la solución general a la ecuación de Fourier:

$$\nabla^2 T_r = \frac{\partial T_r}{K_r \partial t} \quad (4)$$

donde, K_r es la difusividad térmica del rodillo. T_r es la temperatura del rodillo, que debe ser resuelta al tiempo t con sus respectivas condiciones a la frontera y su condición inicial.

La condición inicial será el equilibrio térmico entre el rodillo y el medio ambiente al tiempo inicial. Donde T_a es la temperatura del medio ambiente.

$$T_r(t=0) = T_a \quad (5)$$

Las condiciones frontera son:

- 1) La temperatura de la cinta T_c es constante para todo tiempo y posición durante el contacto con el rodillo de trabajo.

$$T_c = CTE \quad (6)$$

- 2) La película de óxido entre los dos sólidos, actúa como resistencia de contacto con coeficiente de transferencia de calor H_o y $\partial T_r / \partial x$ es el gradiente de temperatura en la dirección x por lo que la rapidez de transferencia de calor está dada por:

$$H_o(T_r - T_c) = -\kappa_r \frac{\partial T_r}{\partial X} \quad (7)$$

Además la rapidez de transferencia de calor o flujo de calor, F , está dado por:

$$F = -\kappa_r \frac{\partial T_r}{\partial X} \quad (8)$$

donde κ_r es la conductividad térmica del rodillo [11].

2.4.2.2. ENFRIAMIENTO POR LIQUIDOS.

La extracción de calor del rodillo de trabajo, se lleva a cabo por convección. Esto sucede en las zonas C-D y G-H de la Fig. 4. El flujo de calor que se extrae en un punto de la superficie del rodillo, se calcula por la ecuación de enfriamiento de Newton:

$$F = H_1 (T_r - T_a) \quad (9)$$

donde H_1 es el coeficiente de transferencia de calor del líquido refrigerante, y T_r y T_a son las temperaturas del rodillo y el medio ambiente, respectivamente.

La temperatura alcanzada en un punto de la superficie del rodillo, después de un cierto tiempo t , se obtiene mediante la

integral del flujo térmico [5].

$$T_r = \frac{\sqrt{K_r}}{\kappa_r} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t H_o F(t') \frac{dt'}{\sqrt{t-t'}} \quad (10)$$

Donde t es el tiempo al que se desea calcular la temperatura y t' es un tiempo anterior a t , K_r y κ_r son la difusividad y conductividad térmica del rodillo y H_o es el coeficiente de transferencia de calor del líquido refrigerante.

De la Ec. (10) se observa que para obtener el cálculo de la temperatura superficial del rodillo, se requiere conocer la función del flujo térmico, que a su vez es función de la temperatura del rodillo, por lo que la solución del problema se encuentra por métodos numéricos.

2.4.2.3. ENFRIAMIENTO AL AIRE.

En las zonas B-C, D-E, F-G y H-A de la Fig. 4, el rodillo se enfría por convección al aire. Las expresiones para calcular la temperatura y el flujo térmico de un punto en la superficie del rodillo, se obtienen siguiendo el método usado en la sección anterior.

El flujo de calor está dado por:

$$F=H_a(T_r-T_a) \quad (11)$$

H_a es el coeficiente de transferencia de calor del medio ambiente.

La variación de temperatura está expresada por:

$$T_r = \frac{\sqrt{K_r}}{\kappa_r} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t H_a F(t') \frac{dt'}{\sqrt{t-t'}} \quad (12)$$

2.4.2.4. CONTACTO CON EL RODILLO DE APOYO.

El rodillo de apoyo se encuentra a menor temperatura que el rodillo de trabajo, por lo que, al entrar éste en contacto con el primero, sufre un enfriamiento. El enfriamiento se lleva a cabo mediante conducción, por lo que el cálculo de la temperatura y el flujo térmico en un punto sobre la superficie del rodillo, se realiza de igual modo que dos medios semi-infinitos, siendo en este caso la fuente de calor el rodillo de trabajo y el rodillo de apoyo se encuentra en equilibrio térmico con el medio ambiente, entonces el flujo

de calor cedido por el rodillo de trabajo al de apoyo es:

$$(13) \quad F = (T_a - T_r) \frac{\sqrt{\Delta t}}{\sqrt{\pi K_r}}$$

Esta expresión depende de la diferencia de temperatura existente entre ambos rodillos y de las propiedades físicas de éstos, mismas que se suponen idénticas para ambos rodillos.

2.5. CONCLUSIONES.

Se estableció la importancia de conocer el comportamiento térmico de los rodillos de laminación.

Se definieron 8 zonas de transferencia de calor, resumidas en conducción, entre el rodillo y la placa y entre el rodillo de trabajo y el de apoyo, ésta última decidió ignorarse, y convección forzada o libre en las demás zonas.

Se establecieron las ecuaciones de transferencia de calor en cada zona del rodillo.

Se opta por utilizar un método numérico para la simulación térmica.

3. MODELACION DEL CICLO TERMICO POR DIFERENCIAS FINITAS.

3.1. INTRODUCCION.

En este capítulo se presenta el desarrollo de un modelo unidimensional basado en el método de diferencias finitas explícito, con el cual se puede predecir la temperatura del rodillo a cualquier profundidad radial, esto es importante no durante el primer ciclo del rodillo pero si al analizar una campaña completa del rodillo, el modelo subdivide el rodillo en elementos de igual volumen, esta forma de subdivisión fue escogida para minimizar el número de elementos y hacer más exacta la representación de los gradientes de temperatura, los cuales aumentan en magnitud del centro del rodillo hacia su superficie. El modelo es relativamente simple ya que sólo considera términos de conducción de calor y convectivos, excluyendo los de radiación, la justificación de esta simplificación se mencionó anteriormente.

3.2. TRABAJOS PREVIOS DE MODELACION.

Existe una cantidad considerable de trabajos sobre el problema de transferencia de calor en rodillos de laminación; de éstos sobresalen dos trabajos.

El primero[5] resuelve el problema utilizando la solución analítica de las ecuaciones de transferencia de calor, al cual, para fines prácticos se le llamará modelo exacto.

Una vez obtenidas las ecuaciones de transferencia de calor por medio de un programa en BASIC se modelan los resultados, en la Fig.11 se observan dichos resultados. En la parte superior derecha de la figura se muestra las zonas de transferencia de calor del rodillo. Durante el contacto con la lámina el rodillo aumenta notablemente su temperatura superficial, para al ir pasando por las diferentes zonas de enfriamiento disminuir dicha temperatura, sin conseguirlo nunca del todo. Es importante notar que en la zona E-F, que es cuando el rodillo se encuentra en contacto con el rodillo de apoyo la temperatura del primero se reduce para inmediatamente recuperarse, por esta razón en el presente trabajo se tomó la decisión de ignorar esta zona.

Las desventajas de este modelo se centran en el tiempo de cómputo, es necesario 24 horas para obtener la información de 50 giros del rodillo del trabajo, y capacidad

de almacenar información, ya que cada nueva temperatura que se va calculando requiere de toda la historia térmica del rodillo, razones por las que este modelo sólo predice el comportamiento térmico del rodillo a través de los primeros 50 ciclos del rodillo o contactos con la lámina y sólo reporta la temperatura superficial, aunque el modelo está preparado para obtener la temperatura en el interior del rodillo.

El segundo trabajo es un modelo experimental [12], la mayor desventaja de este modelo es que sólo reporta resultados para un ciclo del rodillo, por la dificultad que representa medir las temperaturas, estos resultados se pueden consultar en la Fig. 13. En la parte superior derecha de la figura se observa la distribución de las zonas de transferencia de calor. El comportamiento del perfil térmico de la superficie del rodillo es básicamente el mismo que se reportó con el modelo exacto, esto es, aumenta bruscamente la temperatura del rodillo al contacto con la lámina y al ir pasando por las zonas de enfriamiento disminuye gradualmente, en la zona 5 que es cuando toca al rodillo de apoyo, se observa el mismo comportamiento que en el modelo exacto, el rodillo disminuye su temperatura, para luego recuperarla y al final del ciclo termina con una temperatura ligeramente superior a la inicial. En la misma figura se observan también los perfiles térmicos del rodillo a diferentes profundidades y el efecto de la zona 5 al 10 % de penetración ha desaparecido completamente; resulta interesante ver, como al

40% de peneración los cambios térmicos aun no repercuten.

Existen otros modelos [19,20], que utilizan elementos y diferencias finitas, respectivamente, pero los modelos que proponen, ambos, son en extremo complicado.

3.3. DISCRETIZACION DEL RODILLO.

Para discretizar el rodillo se toma un diferencial de un grado de la circunferencia del mismo, éste se divide en 100 elementos de igual área Fig. 12. Dicho diferencial se hace girar a lo largo de 360° , pasando por las diferentes zonas de transferencia de calor (Fig. 4).

Para obtener el número de elementos a utilizar se usó el criterio de estabilidad, Ec.(3), y las propiedades térmicas del rodillo que se utilizaron en los cálculos se muestran en la Tabla II. El desarrollo se puede consultar en el Apéndice A.

3.4. TRANSFERENCIA DE CALOR.

El modelo calcula la temperatura de cualquier elemento del rodillo al final de un intervalo de tiempo δt , pequeño, partiendo del conocimiento de las temperaturas de los elementos adyacentes al principio del intervalo y de las propiedades térmicas de cada elemento.

Si un elemento se encuentra en la superficie, la razón media de transferencia de calor por unidad de área, al final del intervalo de tiempo determina el gradiente local de temperatura.

Las propiedades térmicas características de los materiales involucrados [5] (rodillo y solera) que se utilizan en los cálculos se muestran en la Tabla II y las de los líquidos refrigerantes en cada zona [17], en la Tabla III [5].

Tabla II

PROPIEDADES	RODILLO	SOLERA
Conductividad térmica W/m°C	48.00	46.10
Densidad Kg/m ³	7400.00	7850.00
Calor específico J/Kg°C	520.00	494.00
Difusividad térmica 10 ⁻⁶ m ² /s	12.47	11.87

Tabla III

Boquilla	Zona (Fig. 4)	Coefficiente de transferencia de calor $W/m^2\text{°C}$
$H_{1/2}U25200$	C-D	100,000
$H_{1/2}U2560$	G-H	61,000

3.4.1. CALENTAMIENTO.

Como ya se mencionó, el rodillo aumenta su temperatura por el contacto con la cinta. El modelo de conducción de calor, supone una distribución uniforme de la temperatura a lo largo de la zona de contacto entre el rodillo y la cinta, la longitud de esta zona es función del radio del rodillo y de la reducción que sufre la cinta. A esta longitud se le conoce como arco de contacto o ángulo de mordida, que en el caso analizando es de 3° , para obtener esta magnitud se utilizaron las características enunciadas en la Tabla IV y el procedimiento marcado en [5].

Para hacer el cálculo de calor transferido al rodillo se toma el elemento que está en contacto con la solera y se utilizan las ecuaciones que se desarrollan en el Apéndice

B y las propiedades de ambas piezas; para los demás elementos se utiliza el mismo método, sólo que se considera que las propiedades son idénticas para los 100 elementos del diferencial de 1°. Una vez que se termina el cálculo en los 100 elementos el diferencial se traslada a través del arco de contacto.

3.4.2. ENFRIAMIENTO.

Al salir el diferencial de la zona de deformación, comienza el enfriamiento; la distancia angular de las diferentes zonas de la Fig. 4 se presentan en la Tabla V. Aquí es importante hacer la distinción entre el rodillo de trabajo inferior y el superior, ya que el último tiene una zona adicional de enfriamiento, la zona de estancamiento; esto es debido a la presencia de guías en el molino que provocan un estancamiento de agua, en esta zona se puede tomar el coeficiente de transferencia de calor del agua quieta [12].

Las ecuaciones que se utilizan para hacer los cálculos de la convección, entre el elemento superficial (el que se encuentra en la superficie del rodillo) y el líquido refrigerante o el aire, según sea el caso, se pueden consultar en el Apéndice C y los datos de la Tabla III. Para los demás

elementos, en los que se trata la conducción de calor, se utiliza el desarrollo mostrado en el Apéndice B y los datos de la Tabla II.

Para obtener la longitud en grados de cada zona de transferencia de calor se tomó en cuenta la disposición de los cabezales de enfriamiento y los ángulos de las boquillas, que se utilizan en la planta, así como las características dimensionales del rodillo y la solera [18], esta última información se presenta en las Tablas IV y V.

TABLA IV

Radio del rodillo	23.495 cm
Espesor entrada lámina	0.2819 cm
Espesor salida lámina	0.2159 cm
Temperatura entrada lámina	870°C
Velocidad angular	267 RPM
Velocidad tangencial	6.024 m/seg
Período rodillo	≈0.225 seg
Angulo boquilla entrada	-26.7°C
Angulo boquilla salida	12.7°C

TABLA V

Zona	Longitud en grados
Deformación	0 - 3
Convección libre	4 - 75
Convección forzada	76 - 83
Convección libre	84 - 242
Convección forzada	243 - 252
Convección libre	253 - 360

4. RESULTADOS Y DISCUSION.

4.1. INTRODUCCION.

A continuación se muestran los resultados obtenidos usando el método descrito en el capítulo anterior, esto se logró mediante un programa elaborado en lenguaje BASIC y con la información contenida en las Tablas II, III, IV y V. En el apéndice D se puede consultar el listado del programa. Con este programa se obtuvieron los datos que más tarde se graficaron utilizando un programa elaborado en PASCAL, en el mismo apéndice se puede consultar su listado.

Se hicieron varias corridas del programa y los resultados se exponen en seguida.

4.2. UN CICLO DEL RODILLO.

Un ciclo del rodillo se refiere a un solo contacto con la lámina. En la Fig. 14 se presentan los perfiles térmicos de los tres primeros nodos del rodillo (recordando que son 100) y el nodo central. El comportamiento térmico de la superficie (línea(a)) es básicamente igual al encontrado por el modelo exacto y el modelo experimental, basándose en el tipo de curva que se encuentra, es decir en un principio el

rodillo, que se encuentra a temperatura ambiente, aumenta bruscamente su temperatura hasta alcanzar 422°C para después disminuir gradualmente su temperatura al pasar por las diferentes zonas de enfriamiento, las zonas se pueden consultar en la Fig. 4, al final del ciclo, el rodillo no se ha desecho de toda la temperatura que adquirió, por lo que termina con una temperatura de 32°C en la superficie, ligeramente superior a su temperatura inicial (25°C). En la Tabla VI se muestra la comparación entre los resultados obtenidos con este modelo y el modelo exacto, esta comparación es posible gracias a que se utilizaron los mismos datos y condiciones de laminación en ambos modelos. Con el modelo experimental no se hace comparación cuantitativa solo cualitativa debido a que utiliza condiciones de laminación diferentes a las que se utilizaron en este caso, y básicamente se desea hacer la comparación con el modelo exacto, aunque el modelo aquí expuesto se pudo ajustar a las condiciones del modelo experimental para futuros estudios y comparaciones.

TABLA VI

Zona	A-B	C-D	G-H	H-A
Modelo exacto	431°C	32°C	25°C	36°C
Modelo numérico	422°C	67°C	25°C	32°C
% Error	2	52	0	11

Los perfiles térmicos de los nodos externo y segundo, es decir el nodo 99 y el 98, respectivamente, también

coinciden con los encontrados por el modelo experimental [12]. El comportamiento térmico del centro del rodillo (nodo 1, línea(d)), es el mismo durante todo el ciclo, no existe cambio alguno, es decir que la información térmica de lo que está aconteciendo en la superficie del rodillo aún no llega al centro, según transcurra el tiempo y la superficie no se deshaga del calor que adquiere lo irá transmitiendo al interior del rodillo, por lo que es de gran interés saber de que manera se va calentando el rodillo y cuando se estabiliza.

En la Fig. 15 se reportan los resultados, durante un ciclo a diferentes penetraciones. A 3.5 mm (nodo 97) de la superficie se nota un ligero aumento de temperatura (línea (b)), haciéndose más imperceptible este aumento conforme se penetra más en el rodillo, de manera que al llegar a los 8 mm (nodo 93) de penetración ha desaparecido por completo las repercusiones térmicas, por lo que se puede considerar que los efectos se quedan básicamente en la superficie durante el primer ciclo. Para corroborar lo anterior se graficó la temperatura contra la penetración normalizada, es decir se tomó el radio del radio igual a la unidad, a diferentes tiempos, esto se puede observar en la Fig. 16; los tiempos a los que se graficó son inmediatos al contacto con la lámina, se puede concluir de esta última figura que la penetración no llega más allá de un 2%, en el primer ciclo.

Es importante aclarar que los resultados que se reportan se obtuvieron suponiendo que la temperatura de la

lámina no varía durante todo el proceso de laminación.

De las comparaciones hechas con estos resultados y los obtenidos en trabajos previos se observa que el modelo aquí presentado reproduce el comportamiento del rodillo de trabajo, por lo que se supondrá que los resultados que se encuentren más adelante son ciertos.

4.3. CINCO CICLOS DEL RODILLO.

Cinco ciclos del rodillo son cinco contactos con la lámina. En la Fig. 17 se observan los resultados de éstos, la superficie sube y baja bruscamente mientras que en los nodos externo y segundo (nodos 99 y 98) los cambios son más suaves. Y en el centro del rodillo aún no se observa cambio.

En la Fig. 18 se presentan los resultados hacia el interior del rodillo, se observa que a los 18 mm de la superficie (línea (d)) aún no existe cambio en la temperatura.

En la Fig. 19 se graficó la temperatura contra la penetración normalizada al final del quinto contacto con la lámina y es de notar que la penetración térmica no es mayor al 5% del rodillo.

4.4. UN PLANCHON Y UN DESCANSO.

Un planchón son 266 ciclos del rodillo y un descanso son 133 ciclos del rodillo, regularmente el tiempo necesario para laminar un producto (en este caso una lámina) es de un minuto y entre cada producto se deja descansar a los rodillos

medio minuto.

En la Fig. 20 se observan los resultados de un planchón y un descanso, las temperaturas que se tomaron para elaborar esta gráfica son en un punto a la salida de la zona de deformación, es decir, después del contacto con la lámina.

La temperatura de la superficie durante todo el planchón permanece constante y al empezar el descanso la temperatura de la superficie baja bruscamente, igualmente sucede con los nodos externo y segundo (99 y 98), pero en dichos nodos no se alcanzan temperaturas tan elevadas como en la superficie.

En la Fig. 21 se presentan los resultados en el interior del rodillo y se nota como la temperatura ha penetrado en el rodillo, aunque a 58 mm de la superficie prácticamente no ha sucedido ésto. En la Fig. 20 se observa como la temperatura del centro del rodillo después de un planchón no ha cambiado.

En la Fig. 22 se graficó la temperatura y la penetración normalizada al final del ciclo 266 del rodillo y es importante observar como la penetración ya ha alcanzado más del 15% de penetración.

En la Fig. 23 se graficó la temperatura del rodillo tomando un punto antes del contacto con la lámina o a la entrada de la zona de deformación, el comportamiento es el mismo en los primeros nodos (100, 99 y 98) y nuevamente el centro permanece sin cambio, pero al analizar los resultados

al interior del rodillo se observa como la superficie elimina casi todo el aumento de temperatura que recibe, pero en este proceso transfiere calor hacia el interior del rodillo y a los 17 mm y 36 mm de la superficie se observa este fenómeno, ya que la temperatura se va acumulando en los elementos interiores, mismos que no consiguen volver a su temperatura inicial, aunque la penetración no ha llegado a los 58 mm de la superficie.

Los resultados expuestos en hasta ahora se obtuvieron suponiendo la temperatura del planchón constante. En la fig. 25 se supuso que la temperatura del planchón variaba exponencialmente con el tiempo y los resultados son similares a los obtenidos sin esta suposición, a excepción del perfil de la superficie en el que se nota esta variación, más ésta no parece influir grandemente en el interior del rodillo, por lo que se puede concluir que la variación de temperatura a lo largo de la lámina no es tan importante.

4.5. CINCO PLANCHONES CON DESCANSOS.

Ahora se presentan los resultados obtenidos durante cinco planchones con descansos, en la Fig. 26 se observan los perfiles de los tres primeros nodos, el comportamiento es básicamente igual que durante el primer ciclo, pero para el centro no, ya que a partir del quinto planchón empieza a subir su temperatura, lo que quiere decir que la información térmica se ha transmitido hasta el centro del rodillo. En la Fig. 27 se

observa como va aumentando la penetración conforme pasa el tiempo y planchones a 23 y 50 mm de la superficie sigue aumentando y disminuyendo la temperatura pero a 82 mm el aumento de temperatura ya es lineal.

En la Fig. 28 se ha graficado la temperatura y la penetración normalizada al final de quinto planchón y después del quinto descanso y se nota que la penetración térmica va más allá del 60%.

En la Fig. 29 se presentan los resultados cuando la temperatura de la lámina no es constante y el comportamiento es el mismo, a excepción de la superficie, en la Fig. 30 se graficó la temperatura contra la penetración y se encontró exactamente lo mismo que cuando no se consideró que la temperatura de la lámina variaba, lo cual lleva a corroborar que la simplificación hecha en el modelo de no variar la temperatura es correcta.

4.6. DEL PLANCHON 16 AL 20.

En la Fig. 31 se observa la temperatura a la salida de la zona de deformación durante el planchón 16 al 20 y se nota como el centro ya ha aumentado su temperatura hasta 60°C, además de apreciarse que ya se ha estabilizado, la superficie sigue con temperatura alta y baja según donde se encuentre, en la Fig. 32 se graficó la temperatura vs. la penetración normalizada y la penetración en este caso es total es decir del 50%, por lo que sólo queda analizar un poco hacia adelante

y si no existe cambio, el centro se considerará estabilizado.

En las Figs. 33 y 34 se observa la temperatura del rodillo hacia su interior al final del planchón 30 y del 60, respectivamente, notándose como el centro está prácticamente estable sólo variando hacia el exterior del rodillo, de aquí se comprueba que el centro del rodillo se ha estabilizado ya que no existe cambio del planchón 30 al 60 en la temperatura del centro.

En la Fig. 35 se ha graficó la temperatura del centro del rodillo durante 60 planchones y se nota como va aumentando para estabilizarse alrededor del planchón 20, en esta gráfica se observan la diferencia en temperatura a la entrada y salida de la zona de deformación. Estos resultados concuerdan con la práctica operativa en la empresa de la localidad que utiliza alrededor de veinte soleras para calentar los rodillos [21].

5. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.

El presente trabajo permite concluir lo siguiente:

1. La técnica de simulación empleada (diferencias finitas método explícito) reproduce los resultados experimentales y de otros modelos más complejos, aunque el modelo se simplificó lo más posible, con el fin de agilizar la obtención de resultados.
2. Se observa que solamente cuando se han acumulado cinco planchones la información térmica llega al centro del rodillo.
3. Se encuentra que los rodillos alcanzan su estado estacionario hasta el vigésimo planchón, lo que concuerda con las observaciones empíricas y prácticas operacionales de la empresa de la localidad.
4. Se encuentra que la caída de temperatura de punta y cola del planchón no es significativa, por lo que el modelo puede ser aún más simplificado considerando a la temperatura promedio del planchón como constante.

Dada la amplitud del tema existen incógnitas por dilucidar, por lo que se sugiere continuar este tipo de modelación bajo los siguientes esquemas:

1. Analizar el comportamiento de los rodillos en otras

estaciones o castillos.

2. Evaluar los efectos de variación en la reducción y rapidez de laminación sobre la forma en que se alcanza el estado estacionario.

3. Incorporar la expansión térmica a la distribución de temperatura de los rodillos con el fin de estudiar fenómenos de dilatación.

4. Modificar el modelo para que se aumente el número de nodos durante el contacto planchón - rodillo y se reduzca este número en las otras posiciones, con el fin de incrementar la precisión de la respuesta y reducir el tiempo de cómputo.

AGRADECIMIENTOS.

* Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios.

* A la **Universidad Autónoma de Nuevo León** y muy especialmente a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y a la Facultad de Ingeniería Civil.

* Agradezco de manera muy especial a mi asesor el **Dr. Rafael Colás Ortiz** por su inmensa paciencia y todo su apoyo.

* A todos mis maestros que a lo largo de mis estudios me han dejado grandes enseñanzas.

* A todos mis amigos y compañeros, especialmente a los del DIMAT, que siempre me apoyaron y animaron a terminar este trabajo.

* De manera especial al M.C. Eulogio Velasco por sus múltiples consejos.

* A mis padres y hermanos por su comprensión, apoyo y cariño.

* Pero sobre todo deseo agradecer a **Dios** que al darme la vida me dió todo.

R E F E R E N C I A S .

1. F. Martínez , A.M. Estrada, R. Colás. **Gradientes de Temperatura en Rodillos de Laminación.** *Comunicación interna HYLSA 1987.*
2. J.N. Harris **Mechanical Working of Metals.** *Pergamon U.S.A. 1983.*
3. L.A. Leduc **Tesis Doctoral** *Universidad de Sheffield, Inglaterra 1980.*
4. H. Höfgen, G. Zouhar. **Aspects of the Mathematical Modelling of the hot Rolling on flat products.**
5. A. Pérez H. **Tesis de Maestría.** *U.A.N.L. - F.I.M.E. - D.I.M.A.T., México 1992.*
6. G.F. Bryant, T.S.L. Chiv. **Simplified roll temperature model: Convective cooling.** *478 Metals Technology Vol. 9, December 1982.*
7. Donald R. Hill, L. Edward Gray. **Cooling of Work Rolls in hot rolling mills.** *Iron and Steel Engineer, Junio 1981 pag. 57.*
8. D.A. Tseng, F.H. Lin, A.S. Gunderia, D.S.N. **Roll Cooling and its Relationships to Roll Life.** *Metallurgical Transactions, Volumen 20A. November 1989 pag. 2305.*
9. Suhas V. Patankar. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.** *Hemisphere Publishing Corporation, New York 1980.*
10. D.A. Anderson, J.C. Tannehill, R.H. Pletcher. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer.** *Hemisphere Publishing Corporation, New York 1984.*
11. Carslow, Jagger. **Heat Transfer in Solids.** *Oxford University Press, Great Britain 1959.*

12. D.M. Parke, J.L.L. Baker. **Temperature Effects Of Cooling Work Rolls.**
Association of Iron and Steel Engineers, U.S.A. 1971.
13. A. Pérez, R. Colás, R. Fuentes. **Temperature Distribution within a Hot Rolling Work Roll.** *34th. Mechanical Working and Steel Processing Conference. The Iron and Steel Society 1992.*
14. P. Zambrano, R. Colás,**Profile and Shape Evolution During Hot Rolling Of Steel Strip.** A ser presentado en *1st. Int. Conf. Modelling of Metal Rolling Processes, Londres Septiembre 1993.*
15. N. Lambert, M. Economopoulos. **Mathematical Models in Metallurgical Process.**
Iron Steel Inst. Pu.b. 123, 1970, pag. 133.
16. M. Bamberg, B. Prinz. **Mat. Sc. Techn. 2.** 1986. *pag. 410.*
17. R. Colás,**Análisis del sistema de enfriamiento de los rodillos de trabajo del molino continuo.** *Tecnología de procesos, HYLSA. Reporte interno mayo 1988.*
18. R. Carpenter, P. Hannan. **Improving the efficiency of work roll colling systems.** *Wean United Inc.*
19. A.A.Tseng, A.S.Gunderja, P.F.Sun. **Heat Transfer of Roll and Strip Cooling in Steel Rolling.** *Drexel University, U.S.A. 1990.*
20. C. Devadas, V. Samarasekera. **Heat transfer during hot rolling of steel strip.**
Ironmaking and steelmaking 1986 Vol. 13 No. 6 p. 311.
21. A. Pérez. **Tesis Doctoral. D.I.M.A.T., F.I.M.E.-U.A.N.L. a ser presentada.**

APENDICE A

Después de tomar un diferencial de 1° de la circunferencia del rodillo de trabajo (Fig.15), se procedió a obtener el número de elementos en que podía dividirse el diferencial, para esto se utilizó el criterio de estabilidad descrito por la Ec. (3).

Si b es el radio exterior del rodillo y r_n es el radio de cualquier elemento y cada elemento tiene igual área, sabiendo que existen N elementos, entonces el área de cualquiera de ellos será:

$$\pi r_n^2 = \frac{n\pi b^2}{N} \quad (\text{A1})$$

donde n es el número de un elemento cualquiera.

Despejando r_n de la Ec. (A1) se obtiene:

$$r_n = \sqrt{\frac{n}{N}} b \quad (\text{A2})$$

Definiendo:

$$y = n\delta y \quad (\text{A3})$$

Entonces:

$$\delta y = \frac{1}{N} \quad (\text{A4})$$

Usando la Ec. (A2), se tiene que:

$$y = \frac{r_n^2}{b^2} = \frac{n}{N} \quad (\text{A5})$$

Se necesita δr_n , diferenciando la Ec. (A5) obtenemos:

$$\delta y = \frac{2r_n \delta r_n}{b^2} \quad (\text{A6})$$

Sustituyendo en esta ecuación la Ec. (A2) y la Ec. (A4), haciendo $n=N$ y elevando al cuadrado se tiene que:

$$(\delta r_n)^2 = \frac{b^2}{4N^2} \quad (\text{A7})$$

Sustituyendo δr_n en el criterio de estabilidad se llega a:

$$\delta t < \frac{b^2 C_p \rho}{8 \kappa N^2} \quad (\text{A8})$$

donde C_p es el calor específico y κ la conductividad térmica.

Despejando de esta última ecuación N,

$$N^2 < \frac{b^2 C_p \rho}{8 \kappa \delta t} \quad (\text{A9})$$

Reemplazando los datos de las Tablas II y IV, esto es, el rodillo tarda 0.225 segundos en dar una vuelta y como se tomó 1° de la circunferencia, entonces $\delta t = 0.225/360$ seg y el radio del rodillo $b = 0.2349$ m; se llega a que $N < 940$. Debido a que δt es muy pequeño N puede ser muy grande.

En un principio se decidió tomar $N = 25$, pero al calcular el radio para $n = 24$, recordando la Ec. (A2) $r_{24} = 23.0154$ cm y $r_{25} = b$, por lo que la penetración es de 4.74 mm, y de trabajos previos [13] se sabe que la penetración térmica se pierde para el primer ciclo a los 5 mm, ésto evidencia la necesidad de mayor información por lo que después de varios cálculos se decidió tomar $N = 100$.

APENDICE B

Para el elemento n , el flujo de calor por unidad de longitud es H_n , en un incremento de tiempo δt ; $T_{n-1/2}$ es la temperatura promedio del elemento n , entonces:

$$H_n = -2\pi r_n \kappa \frac{dT}{dr} \delta t \quad (\text{B1})$$

Usando dr_n de la Ec. (A6) y sustituyendo en la Ec. (B1), se tiene que:

$$H_n = -\frac{4\pi r_n^2 \kappa dT}{b^2 dy} \delta t \quad (\text{B2})$$

además, usando la Ec. (A5) se obtiene:

$$H_n = -\frac{4\pi n \kappa dT}{N dy} \delta t \quad (\text{B3})$$

también se sabe que:

$$\frac{dT}{dy} = \frac{T_{n+1/2} - T_{n-1/2}}{\Delta y} = (T_{n+1/2} - T_{n-1/2}) N \quad (\text{B4})$$

ésto último, utilizando la Ec. (A3); los subíndices $n-1/2$ y $n+1/2$, indican la temperatura promedio del elemento n y del elemento adyacente, respectivamente.

Sustituyendo la Ec. (B4) en la Ec. (B3) se obtiene:

$$H_n = -4\pi n\kappa (T_{n+1/2} - T_{n-1/2}) \delta t \quad (\text{B5})$$

Si :

$$\Delta H_n = H_{n-1} - H_n \quad (\text{B6})$$

Sustituyendo, en la Ec. (B5), $n=n-1$, se llega a:

$$H_{n-1} = -4\pi\kappa (n-1) (T_{n-1/2} - T_{n-3/2}) \delta t \quad (\text{B7})$$

entonces:

$$\Delta H_n = -4\pi\kappa [(n-1) (T_{n-1/2} - T_{n-3/2}) - n(T_{n+1/2} - T_{n-1/2})] \delta t \quad (\text{B8})$$

Esta última ecuación proporciona el flujo de calor neto, causante del cambio en temperatura del elemento n.

Si $T_{n-1/2}^*$ es la temperatura del elemento n al final del incremento de tiempo δt , y es la que interesa, entonces:

$$\Delta T_{n-1/2} = T_{n-1/2}^* - T_{n-1/2} \quad (\text{B9})$$

y si:

$$\Delta H_n = \frac{\pi b^2}{N} C_p \rho \Delta T_{n-1/2} \quad (\text{B10})$$

donde C_p y ρ son la conductividad térmica y la densidad, respectivamente, del elemento n , usando la Ec. (B9):

$$\Delta H_n = \frac{\pi b^2}{N} C_p \rho (T_{n-1/2}^* - T_{n-1/2}) \quad (\text{B11})$$

utilizando la Ec. (B8) para ΔH_n en la Ec. (B11) y despejando de ésta última $T_{n-1/2}^*$, se tiene que:

$$T_{n-1/2}^* = T_{n-1/2} - \frac{4\kappa N}{b^2 C_p \rho} [(n-1)(T_{n-1/2} - T_{n-3/2}) - n(T_{n+1/2} - T_{n-1/2})] \delta t \quad (\text{B12})$$

para el elemento en el centro del rodillo ($n=1$) no existe flujo de calor a través de la línea central, por lo que la temperatura será:

$$T_{1/2}^* = T_{1/2} + \frac{4\kappa N}{C_p \rho b^2} (T_{3/2} - T_{1/2}) \delta t \quad (\text{B13})$$

APENDICE C

En la superficie, donde $n=N$, el flujo de calor que sale, es la razón del flujo de calor por unidad de área h_o multiplicado por el área de la superficie. h_o es una función de la temperatura superficial si el rodillo está siendo enfriado al aire y una función de la diferencia de las temperaturas entre el rodillo y la lámina. Las relaciones para obtener la temperatura son las mismas en ambas situaciones, entonces:

$$H_N = 2\pi b h_o \delta t \quad (C1)$$

además utilizando las Ecs. (B5) y (B6) se tiene:

$$\Delta H_N = [-4\pi\kappa(N-1)(T_{N-1/2} - T_{N-3/2}) - 2\pi b h_o] \delta t \quad (C2)$$

y de la Ec. (B12) se tiene que la temperatura está dada por:

$$T_{N-1/2}^* = T_{N-1/2} - \frac{2N}{b^2 C_p \rho} [2\kappa(N-1)(T_{N-1/2} - T_{N-3/2}) + b h_o] \delta t \quad (C3)$$

Para evaluar esta ecuación h_o debe conocerse y esto requiere conocimiento de la temperatura de la superficie al principio del incremento de tiempo. Si se supone que la distribución de temperatura en el exterior es parabólica después del incremento de tiempo δt , entonces:

$$T_{N-1/2}^* = \frac{T_N^* - T_{N-1/2}^*}{2} \quad (C4)$$

de la suposición parabólica se tiene:

$$T_N^* = T_{N+1/2}^* - \frac{h^* b}{4\pi\kappa} \quad (C5)$$

donde :

$$h^* = h_o (T_{N-1/2} - T_o) \quad (C6)$$

$$H_{n-1/2} = -4\pi\kappa (n-1) (T_{n-1/2} - T_{n-3/2}) \delta t \quad (C7)$$

por lo que $T_{N-1/2}$, se obtiene despejando de la Ec. (C3):

$$T_{N-1/2} = \frac{T_N^* T_{N-1}^*}{2} - \frac{2N}{b^2 C_p \rho} [2\kappa (N-1) (T_{N-1/2} - T_{N-3/2}) + b h_o] \delta t \quad (C8)$$

APENDICE D.

```
Program Un_ciclo;

uses
  graph,ejes,varios,mouse;

const
  un = 'a: '; xt = '.dat'; ar = 'datINRO';

type
  dt_i = array [0..4] of integer;

procedure marco;

  begin
    inicioejes;
    titulograf ('UN CICLO DEL RODILLO');
    multigraf(60,50,600,430); entero:=cierto;
    ejex(0,240,20,falso); ejey(0,500,100,falso);
    titulox('Tiempo      (mseg)'); tituloy('Temperatura
(C) ');
  end;

procedure grafica;

  type
    dt_r = array [0..4] of real;

  var
    tt : dt_r; m : dt_i; i,j,k : integer; t : real;

  begin
    assign(ff,un+ar+xt); reset(ff);
    i:=1;
    while not eof(ff) do
      begin
        for j:=1 to 4 do read(ff,tt[j]);
        readln(ff,t); tt[0]:=1e3*t;
        for j:=1 to 4 do
          begin
            setcolor(15-j);
            pospix(tt[0],tt[j]);
            if i <> 1 then line(m[0],m[j],entx,enty);
            m[j]:=enty;
          end;
        inc(i); m[0]:=entx;
```

```

        end;
        close(ff);
    end;

procedure letreros;

type
    lt = array [1..4] of string;

const
    ti : lt = ('Superficie', '3.5 mm', '5.6 mm', '8 mm');
    cl : dt_i = (0,11,12,13,14);

var
    r,s : string; a,b,c,d,i : integer;

begin
    a:=xder-140; b:=ysup+15;
    for i:=1 to 4 do
    begin
        r:='('+chr(96+i)+')';    s:=ti[i];    c:=a-15;
d:=b+i*15;
        setcolor(cl[i]);
        estletra(0,6); outtextxy(a,d,s);
        estletra(2,5); outtextxy(c,d,r);
    end;
    inicio_ms; estletra(1,5);
    for i:=1 to 4 do
    begin
        r:='('+chr(96+i)+')'; setcolor(cl[i]);
        mshow;
        repeat
            mpos(c,a,b);
        until c <> 0;
        mhide;
        outtextxy(a,b,r);
    end;
    end;

begin
    marco;
    grafica;
    letreros;
    finejes;
end.

```

***** INTRODUCCION DE DATOS *****

OPEN A:DAT\FRE.DAT FOR OUTPUT AS #1

NUMERO DE PUNTOS DEL DIFERENCIAL

N = 100
NN = N - 1
NI1 = N - 2
EN T(1) = 25

TEMPERATURA DE LA LAMINA

TF = 870

DIFERENCIAL DE TIEMPO, CUANDO EL PERIODO T=.225 SEG

DT = .000625

CONSTANTE CTE1=4KK/Cpb*2RO; K=48 Cp=520 b=.235 RO=7400

CTE1 = 192 * N / 212505.8

CONSTANTE CTE2=2N/b*2CpRO

CTE2 = 2 * N / 212505.8

CONSTANTE CTE3=b/4KK

CTE3 = .235 / (192 * N)

CONSTANTE CTE4=2K(N-1)

CTE4 = 96 * (N - 1)

INICIALIZANDO TEMPERATURAS DEL DIFERENCIAL

FOR I = 1 TO N

T(I) = 25

NEXT I

FOR K = 1 TO 266

CALCULO DE CONDUCCION AL CONTACTO CON LA LAMINA

FOR J = 1 TO 3

T(N) = (TF - T(N)) / 2

FOR I = NN TO 2 STEP -1

T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1)) - I * (T(I + 1) - T(I)))

NEXT I

T(1) = T(1) + CTE1 * (T(2) - T(1)) * DT

TIEMPO = (K - 1) * .225 + J * DT

FOR I = NI1 TO N

PRINT #1, USING " ###.###"; T(I);

NEXT I

PRINT #1, USING " ###.###"; T(1);

PRINT #1, USING " ##.#####"; TIEMPO;

PRINT #1,

NEXT J

FOR I = NI1 TO N

PRINT #1, USING " ###.###"; T(I);

NEXT I

PRINT #1, USING " ###.###"; T(1);

PRINT #1, USING " ##.#####"; TIEMPO;

PRINT #1,

FOR J = 4 TO 75

T(N) = T(N) - CTE3 * 500 * (T(N) - 25) - CTE2 * (CTE4 * (T(N) - T(NN)) + 117.5 * (T(N) - 25)) * DT

FOR I = NN TO 2 STEP -1

T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1)) - I * (T(I + 1) - T(I)));

NEXT I

T(1) = T(1) + CTE1 * (T(2) - T(1)) * DT

TIEMPO = (K - 1) * .225 + J * DT

```

FOR I = NI TO N
  PRINT #1, USING "AAA.AAA"; T(I);
NEXT I
PRINT #1, USING "AAA.AAA"; TIEMPO;
PRINT #1,
GOTO 10

FOR J = 76 TO 83
  T(N) = T(N) - CTE3 * 10000 * (T(N) - 25) - CTE2 * (CTE4 * T(N) - T(NN)) + 2350 * (T(N) - 25) * DT
  FOR I = NN TO 2 STEP -1
    T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1)) - I * (T(I + 1) - T(I)));
  NEXT I
  T(1) = T(1) + CTE1 * (T(2) - T(1)) * DT
  TIEMPO = (K - 1) * .225 + J * DT
  FOR I = NI1 TO N
    PRINT #1, USING "AAA.AAA"; T(I);
  NEXT I
  PRINT #1, USING "AAA.AAA"; T(1);
  PRINT #1, USING "AA.AAAAA"; TIEMPO;
  PRINT #1,
NEXT J
GOTO 10

FOR J = 84 TO 242
  T(N) = T(N) - CTE3 * 500 * (T(N) - 25) - CTE2 * (CTE4 * T(N) - T(NN)) + 117.5 * (T(N) - 25) * DT
  FOR I = NN TO 2 STEP -1
    T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1)) - I * (T(I + 1) - T(I)));
  NEXT I
  T(1) = T(1) + CTE1 * (T(2) - T(1)) * DT
  TIEMPO = (K - 1) * .225 + J * DT
  FOR I = NI1 TO N
    PRINT #1, USING "AAA.AAA"; T(I);
  NEXT I
  PRINT #1, USING "AAA.AAA"; T(1);
  PRINT #1, USING "AA.AAAAA"; TIEMPO;
  PRINT #1,
NEXT J
GOTO 10

FOR J = 243 TO 252
  T(N) = T(N) - CTE3 * 61000 * (T(N) - 25) - CTE2 * (CTE4 * T(N) - T(NN)) + 14335 * (T(N) - 25) * DT
  FOR I = NN TO 2 STEP -1
    T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1)) - I * (T(I + 1) - T(I)));
  NEXT I
  T(1) = T(1) + CTE1 * (T(2) - T(1)) * DT
  TIEMPO = (K - 1) * .225 + J * DT
  FOR I = NI1 TO N
    PRINT #1, USING "AAA.AAA"; T(I);
  NEXT I
  PRINT #1, USING "AAA.AAA"; T(1);
  PRINT #1, USING "AA.AAAAA"; TIEMPO;
  PRINT #1,
NEXT J
GOTO 10

FOR J = 253 TO 360
  T(N) = T(N) - CTE3 * 500 * (T(N) - 25) - CTE2 * (CTE4 * T(N) - T(NN)) + 117.5 * (T(N) - 25) * DT
  FOR I = NN TO 2 STEP -1

```

```

      T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1)) - I * (T(I + 1) - T(I)))
NEXT I
T(2) = T(1) + CTE2 * (T(2) - T(1)) * DT
TIEMPO = (K - 1) * .225 + J * DT
FOR I = NI1 TO N
  PRINT #1, USING "   AAA.AAA"; T(I);
NEXT I
PRINT #1, USING "   AAA.AAA"; T(1);
PRINT #1, USING "   AAA.AAA"; TIEMPO;
PRINT #1,
NEXT J
FOR I = NI1 TO N
  PRINT #1, USING "   AAA.AAA"; T(I);
NEXT I
PRINT #1, USING "   AAA.AAA"; T(1);
PRINT #1, USING "   AA.AAAAA"; TIEMPO;
PRINT #1,

NEXT K
'GOTO 10

```

FOR K = 267 TO 400

CALCULO DE CONDUCCION AL CONTACTO CON LA LAMINA

FOR J = 1 TO 3

T(N) = T(N) - CTE3 * 500 * (T(N) - 25) - CTE2 * (CTE4 * (T(N) - T(NN)) + 117.5 * (T(N) - 25)) * DT

FOR I = NN TO 2 STEP -1

T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1)) - I * (T(I + 1) - T(I)))

NEXT I

T(1) = T(1) + CTE1 * (T(2) - T(1)) * DT

TIEMPO = (K - 1) * .225 + J * DT

NEXT J

FOR I = NI1 TO N

PRINT #1, USING " AAA.AAA"; T(I);

NEXT I

PRINT #1, USING " AAA.AAA"; T(1);

PRINT #1, USING " AA.AAAAA"; TIEMPO;

PRINT #1,

FOR J = 4 TO 75

T(N) = T(N) - CTE3 * 500 * (T(N) - 25) - CTE2 * (CTE4 * (T(N) - T(NN)) + 117.5 * (T(N) - 25)) * DT

FOR I = NN TO 2 STEP -1

T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1)) - I * (T(I + 1) - T(I)))

NEXT I

T(1) = T(1) + CTE1 * (T(2) - T(1)) * DT

FOR I = NI1 TO N

PRINT #1, USING " AAA.AAA"; T(I);

NEXT I

PRINT #1,

NEXT J

'GOTO 10

FOR J = 76 TO 83

T(N) = T(N) - CTE3 * 10000 * (T(N) - 25) - CTE2 * (CTE4 * (T(N) - T(NN)) + 2350 * (T(N) - 25)) * DT

FOR I = NN TO 2 STEP -1

T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1)) - I * (T(I + 1) - T(I)))

NEXT I

T(1) = T(1) + CTE1 * (T(2) - T(1)) * DT

FOR I = NI1 TO N

```

      T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1))) - I * (T(I + 1) - T(I))
    NEXT I
    T(1) = T(1) + CTE1 * (T(2) - T(1)) * DT
    FOR I = N11 TO N
      PRINT A1, USING " AAA.AAA "; T(I);
    NEXT I
  PRINT A1,
NEXT J
GOTO 10

FOR J = 243 TO 252
  T(N) = T(N) - CTE3 * 61000 * (T(N) - 25) - CTE2 * (CTE4 * (T(N) - T(NN)) + 14335 * (T(N) - 25)) * DT
  FOR I = NN TO 2 STEP -1
    T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1))) - I * (T(I + 1) - T(I))
  NEXT I
  T(1) = T(1) + CTE1 * (T(2) - T(1)) * DT
  FOR I = N11 TO N
    PRINT A1, USING " AAA.AAA"; T(I);
  NEXT I
  PRINT A1,
NEXT J
GOTO 10

FOR J = 253 TO 360
  T(N) = T(N) - CTE3 * 500 * (T(N) - 25) - CTE2 * (CTE4 * (T(N) - T(NN)) + 117.5 * (T(N) - 25)) * DT
  FOR I = NN TO 2 STEP -1
    T(I) = T(I) - CTE1 * DT * ((I - 1) * (T(I) - T(I - 1))) - I * (T(I + 1) - T(I))
  NEXT I
  T(1) = T(1) + CTE1 * (T(2) - T(1)) * DT
  TIEMPO = (K - 1) * .225 + J * DT
  FOR I = N11 TO N
    PRINT A1, USING " AAA.AAA"; T(I);
  NEXT I
  PRINT A1,
NEXT J
  FOR I = N11 TO N
    PRINT A1, USING " AAA.AAA"; T(I);
  NEXT I
  PRINT A1, USING " AAA.AAA"; T(1);
  PRINT A1, USING " AA.AAAAA"; TIEMPO;
  PRINT A1,
NEXT K

```

```

CLOSE
ENC

```

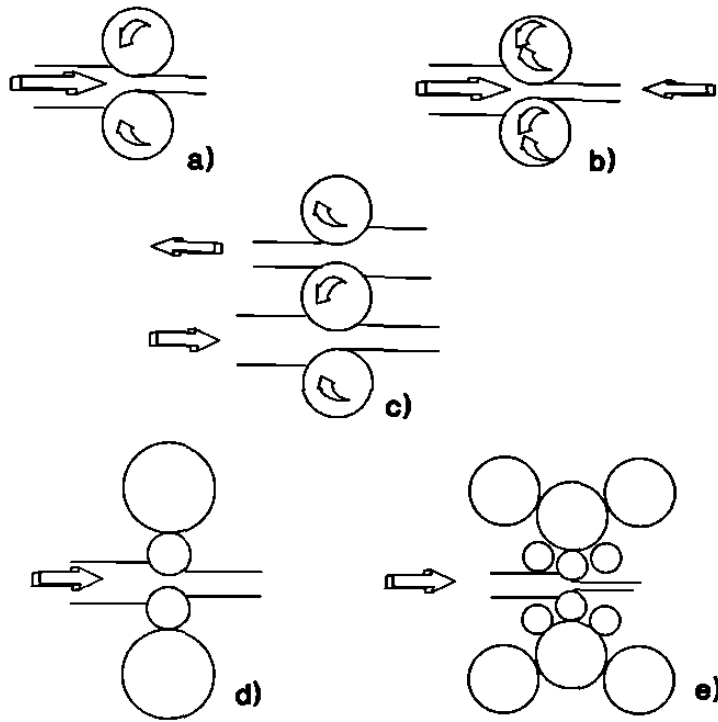
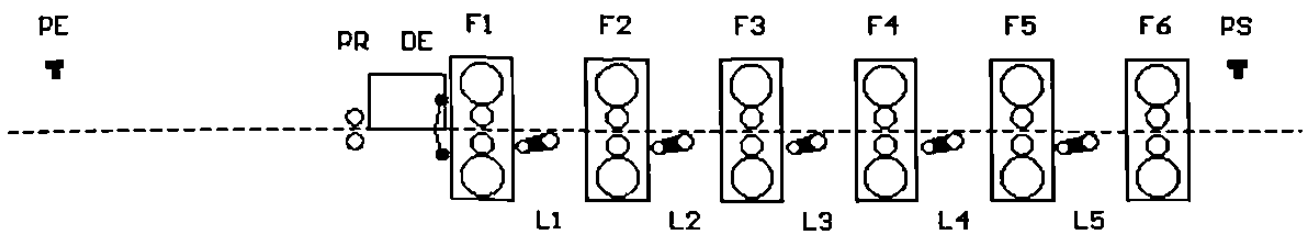


Fig. 1 Disposiciones típicas de cilindros en molinos de laminación. a)dúo, b)dúo reversible c)trio, d)cuatro, e)racimo.



- | | |
|---------|---------------------------|
| PE | Pirómetro de entrada. |
| PS | Pirómetro de salida. |
| DE | Descascarado. |
| PR | Rodillos de alimentación. |
| F1...F6 | Castillos. |
| L1...L5 | Formadores de onda. |

Fig.2 Diagrama del molino continuo de laminación en caliente.

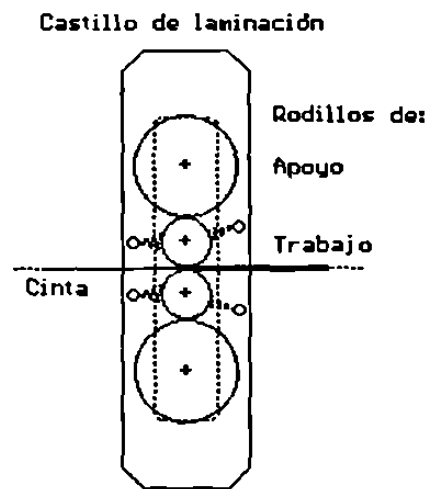


Fig. 3 Sexto castillo del tren continuo de laminación en caliente.

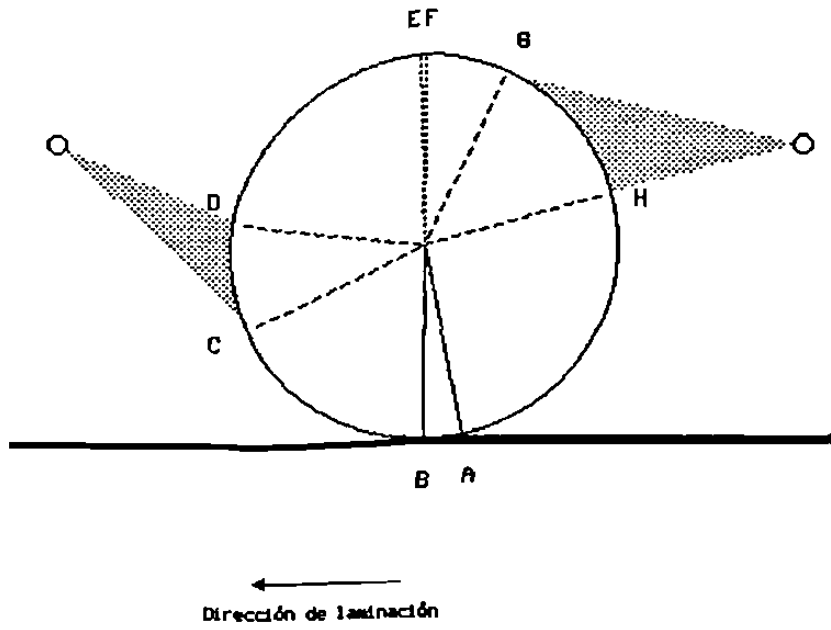


Fig. 4 Diagrama de las zonas de transferencia de calor en las que se divide el rodillo.

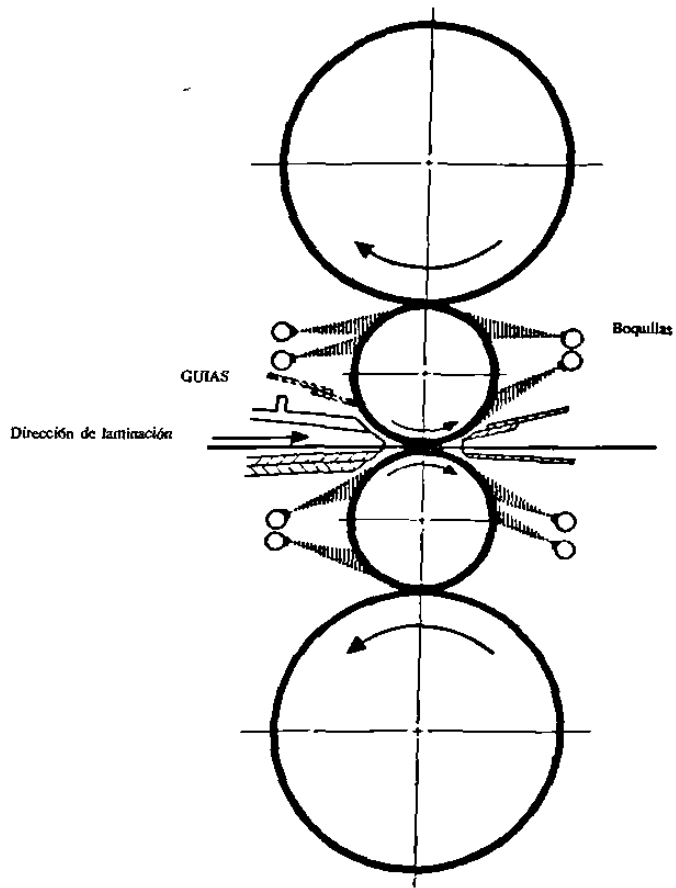


Fig. 5 Diagrama que muestra las guías en el molino.

ENFRIAMIENTO EN AIRE CALMADO

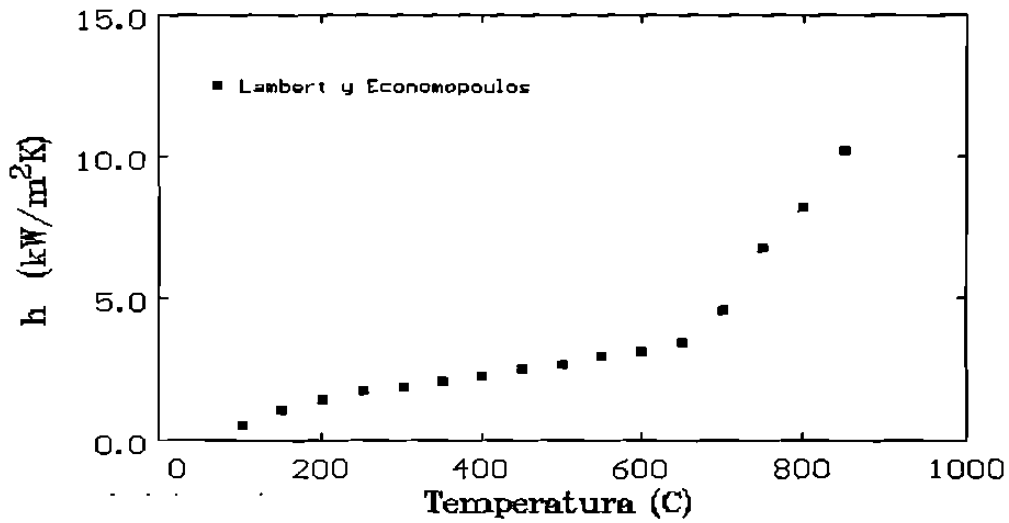


Fig. 6 Coeficientes de transferencia de calor en aire calmado.

ENFRIAMIENTO EN AGUA CALMADA

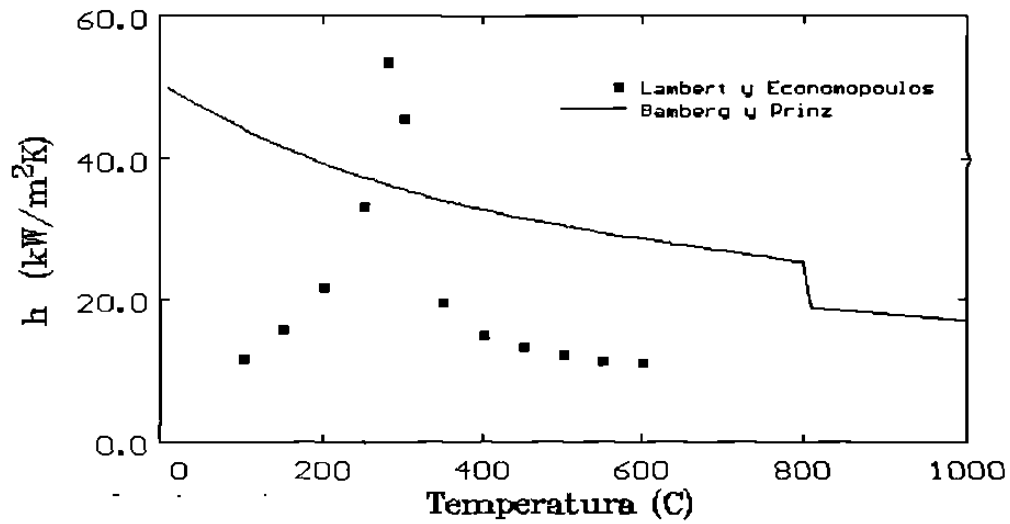


Fig. 7 Coeficientes de transferencia de calor en agua calmada.

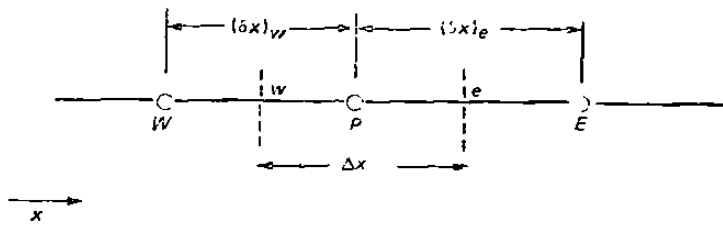


Fig. 8 Malla para la discretización en una dimensión.

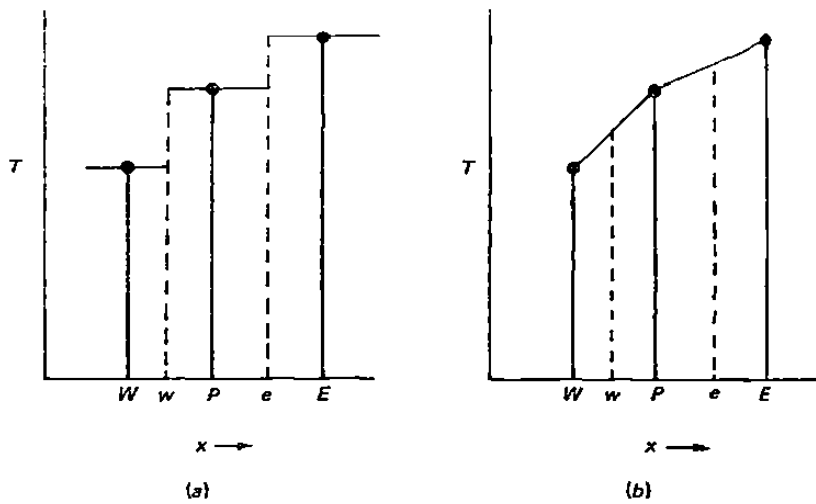


Fig. 9 Suposiciones de perfiles a) Perfil escalón b) Perfil lineal.

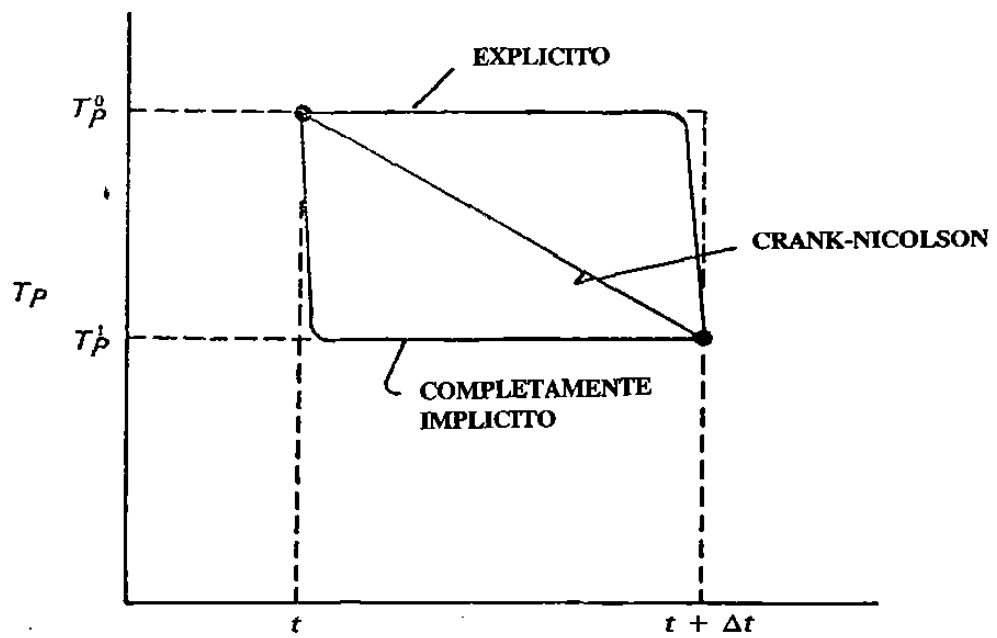


Fig. 10 Variación de la temperatura con el tiempo para tres diferentes esquemas.

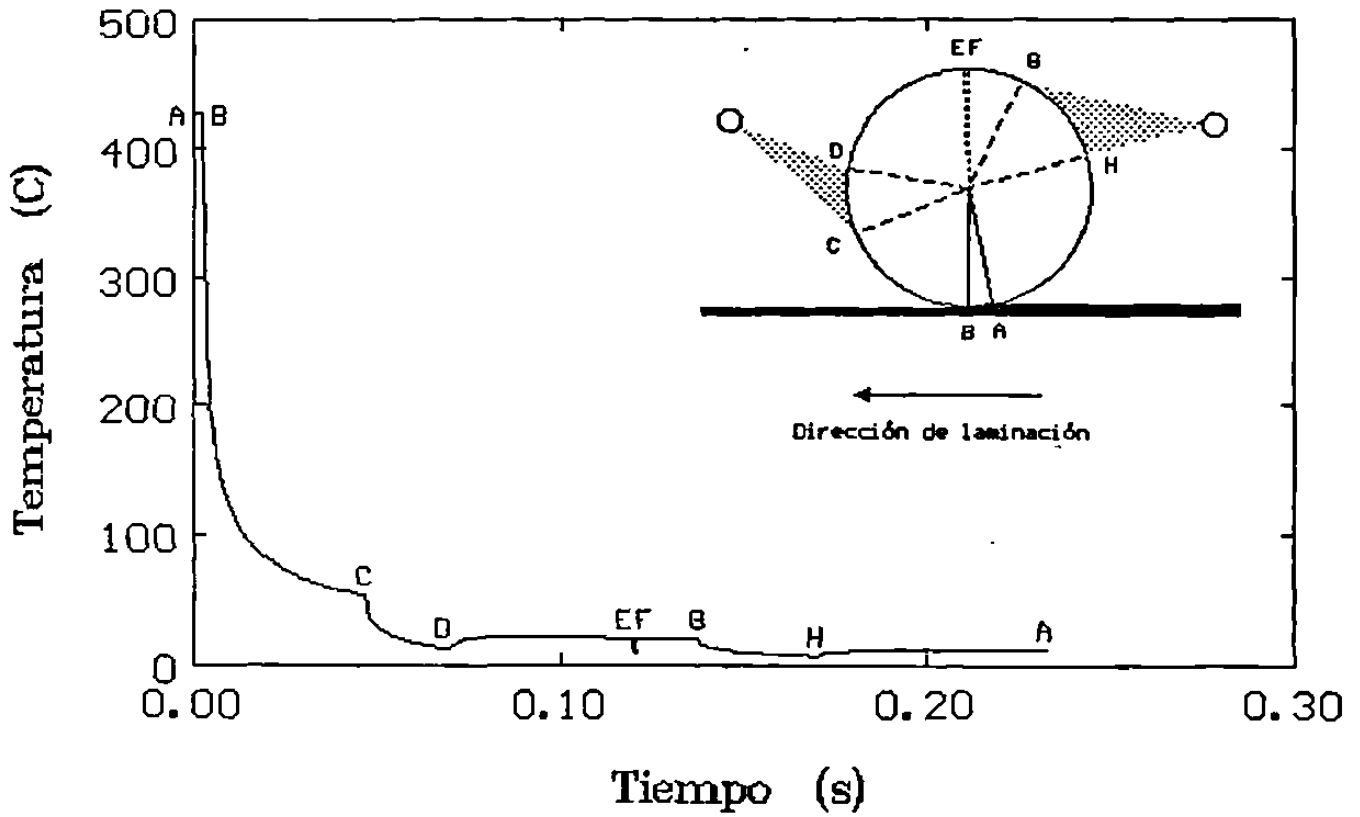


Fig. 11 Predicción de la temperatura con el modelo exacto.

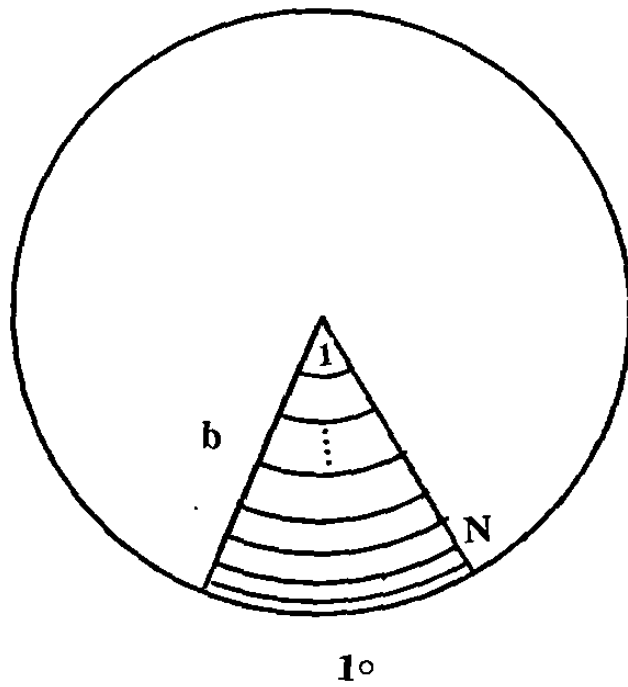


Fig. 12 Diferencial de 1° , mostrando los nodos.

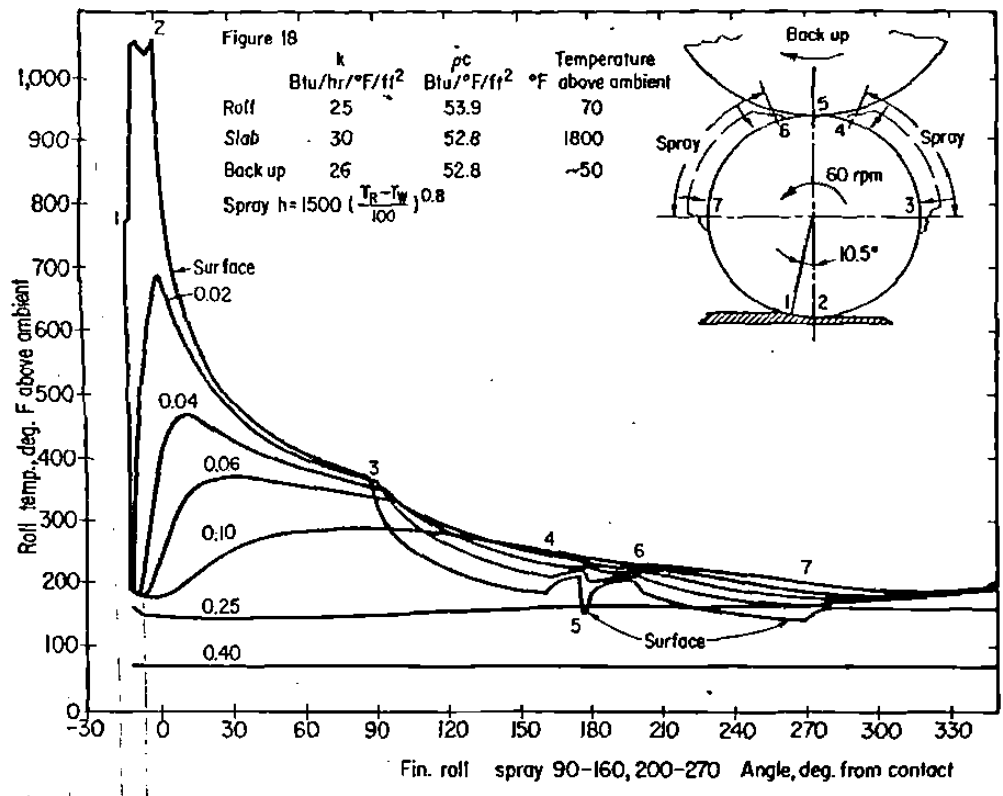


Fig. 13 Predicción de la temperatura con el modelo empírico.

UN CICLO DEL RODILLO

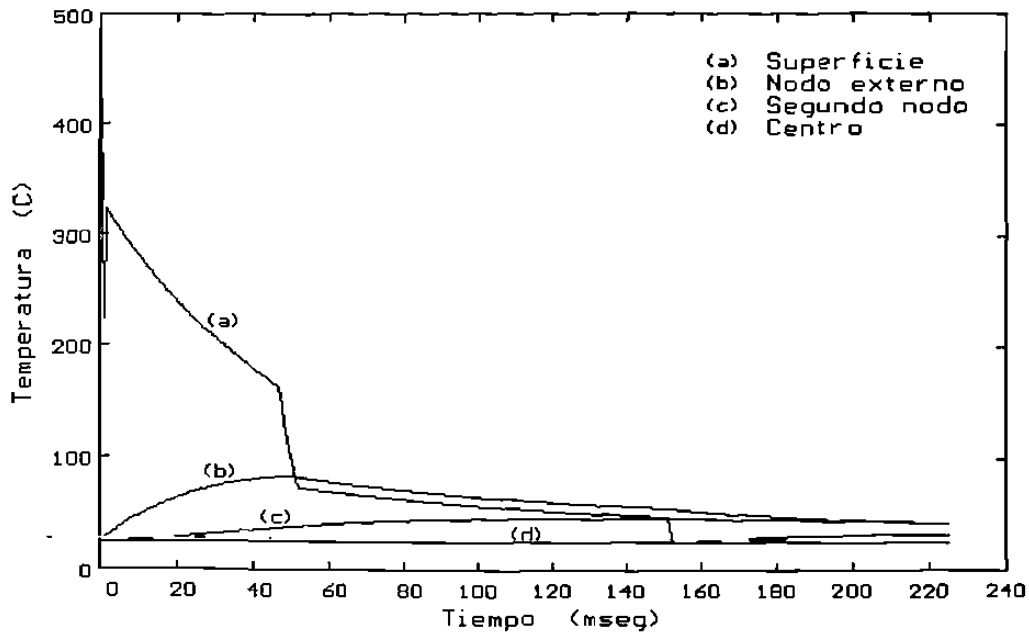


Fig. 14 Temperatura del rodillo durante un contacto con la lámina.

UN CICLO DEL RODILLO

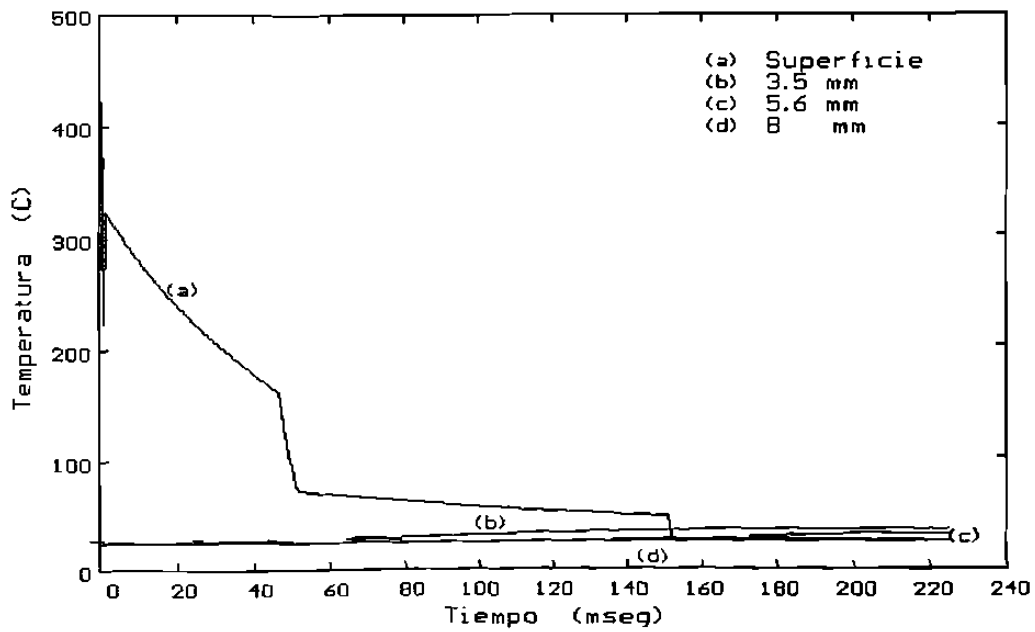


Fig. 15 Temperatura del rodillo a diferentes penetraciones.

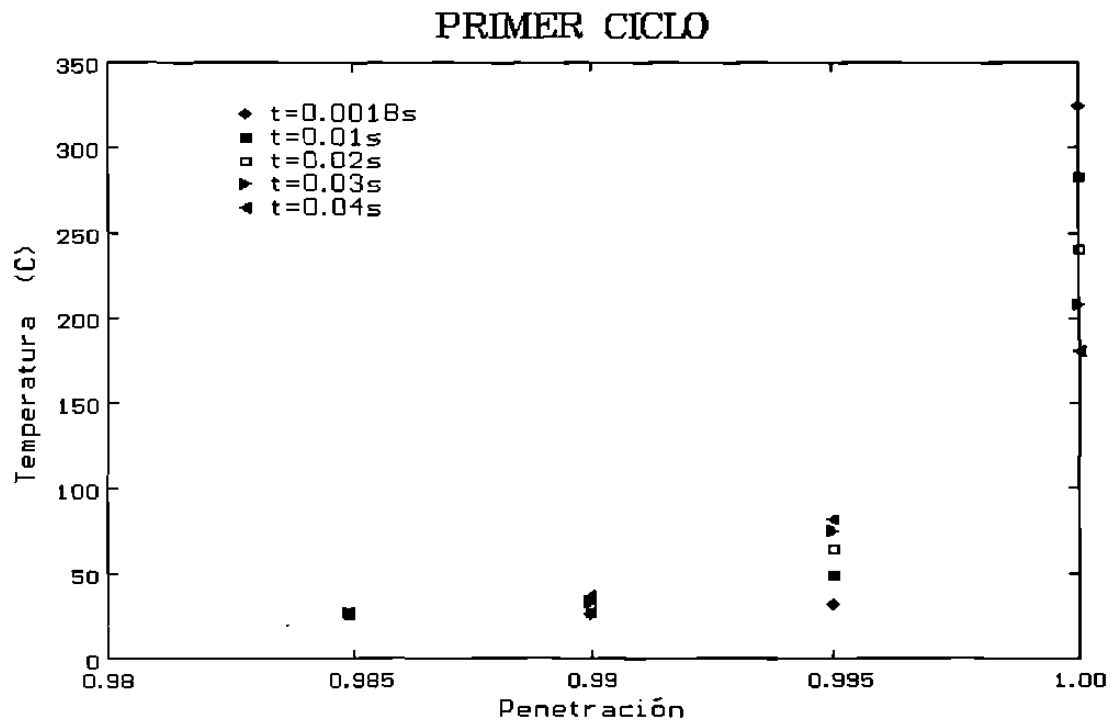


Fig. 16 Penetración del gradiente térmico al final del primer contacto.

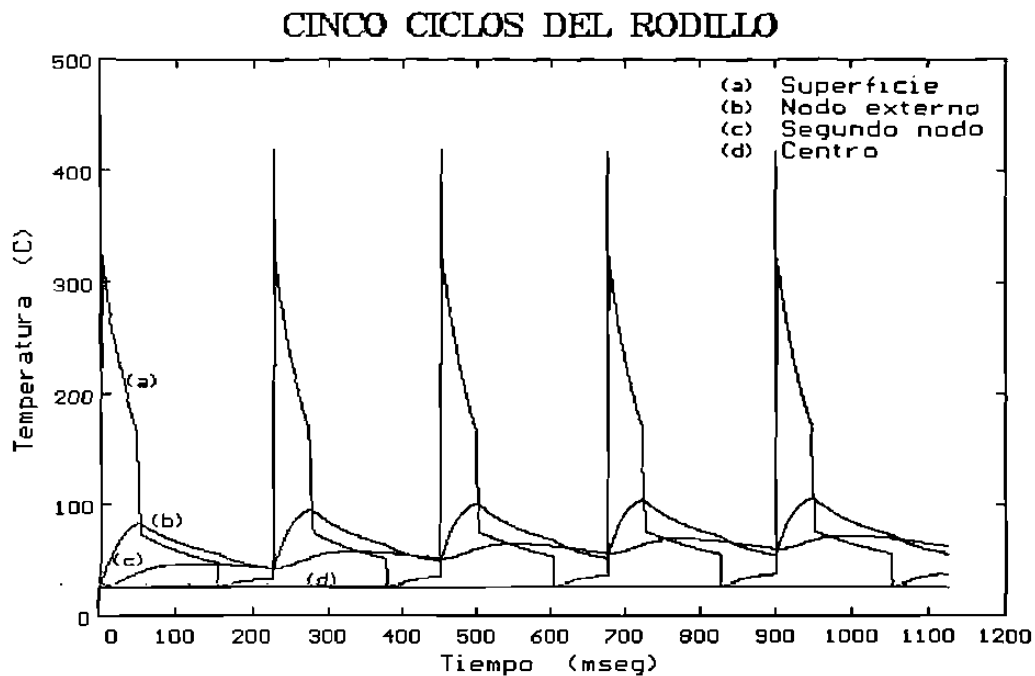


Fig. 17 Temperatura del rodillo durante cinco contactos con el planchón.

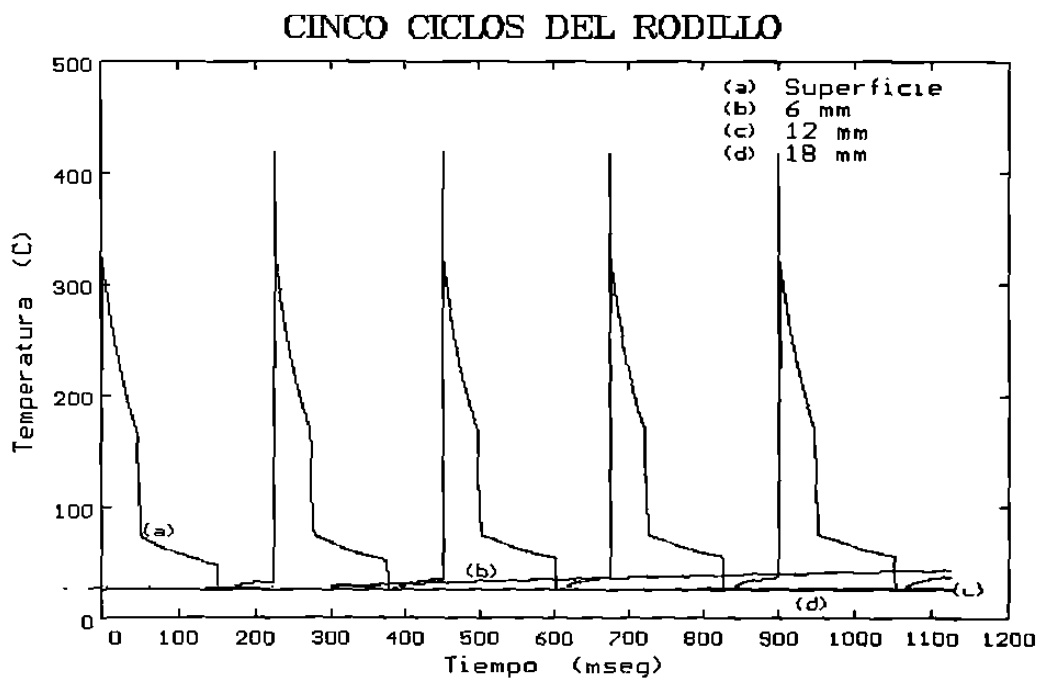


Fig. 18 Temperatura del rodillo a diferentes penetraciones.

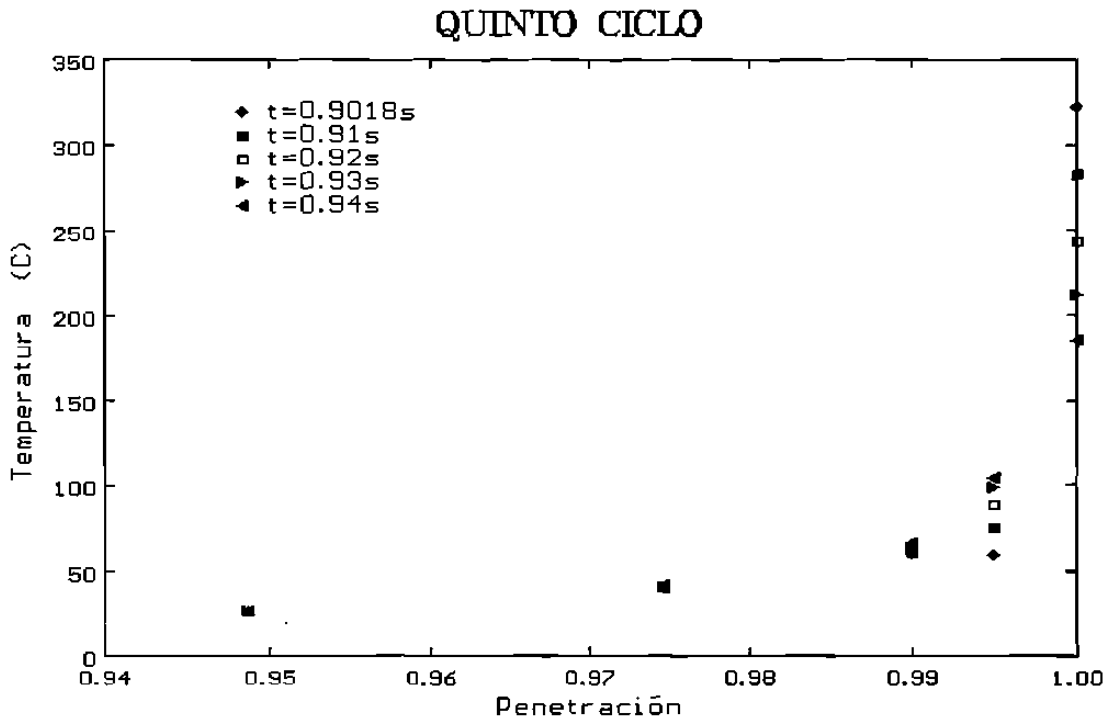


Fig. 19 Penetración térmica al final del quinto ciclo.

UN PLANCHON UN DESCANSO

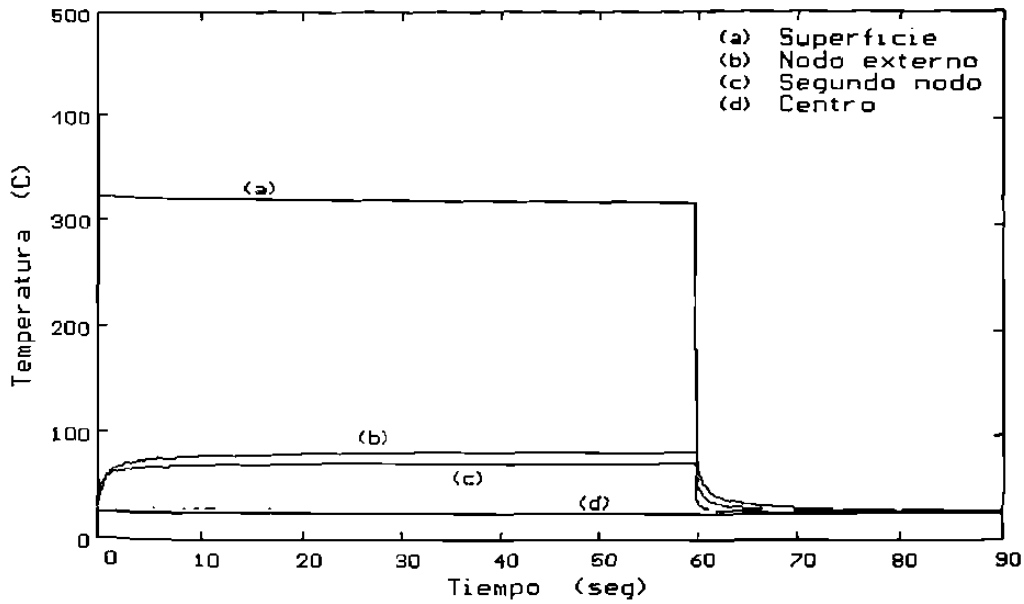


Fig. 20 Temperatura del rodillo a la salida de la zona de deformación.

UN PLANCHON UN DESCANSO

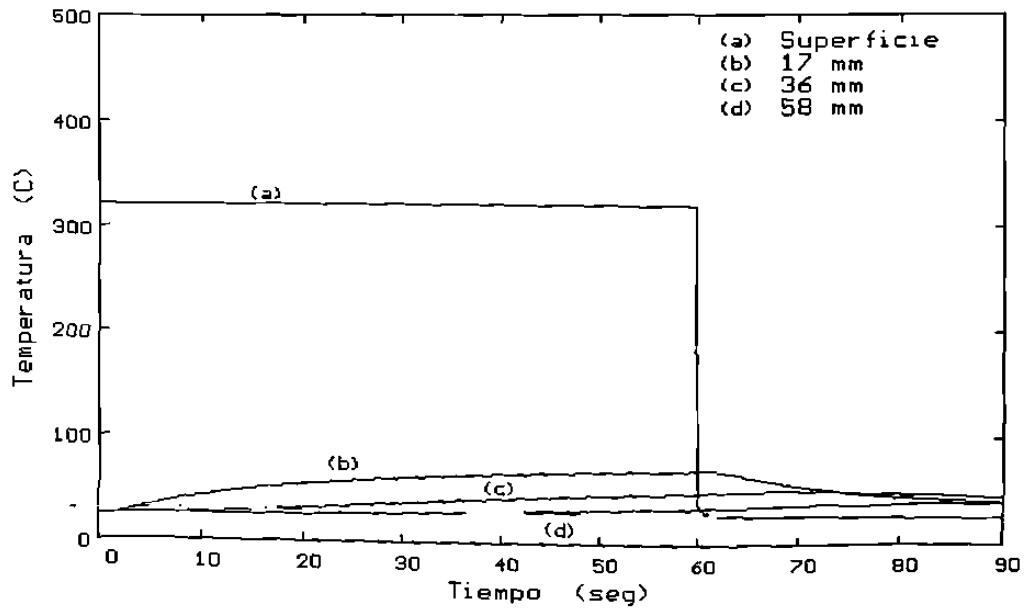


Fig. 21 Temperatura del rodillo a la salida de la zona de deformación.

PRIMER PLANCHON

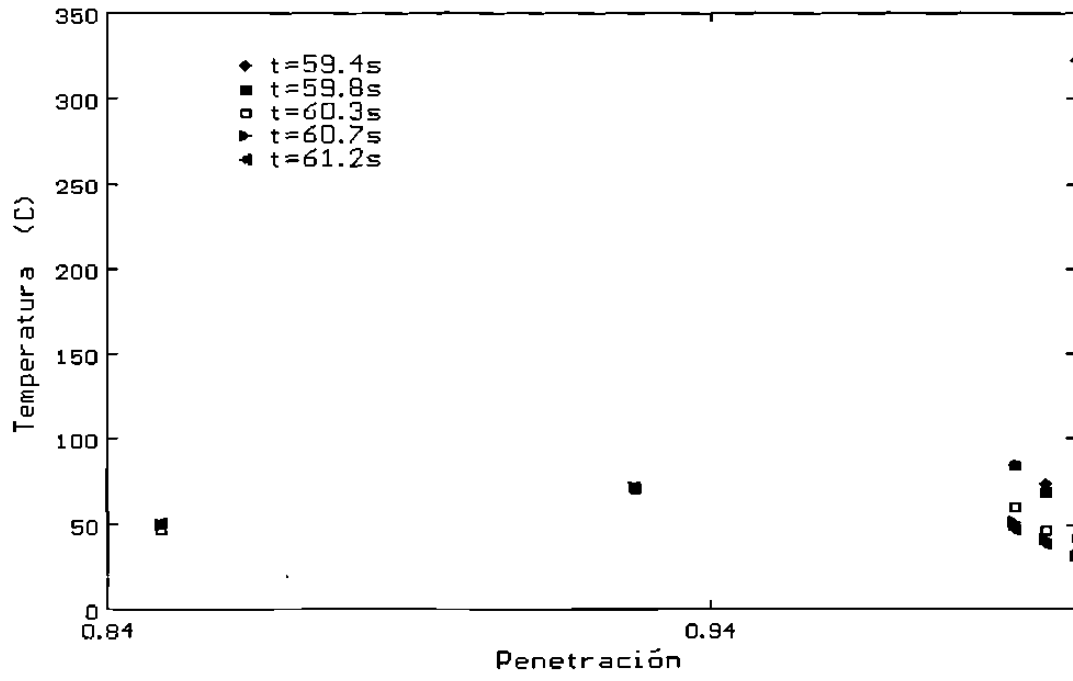


Fig. 22 Penetración térmica al final del primer planchón.

UN PLANCHON UN DESCANSO

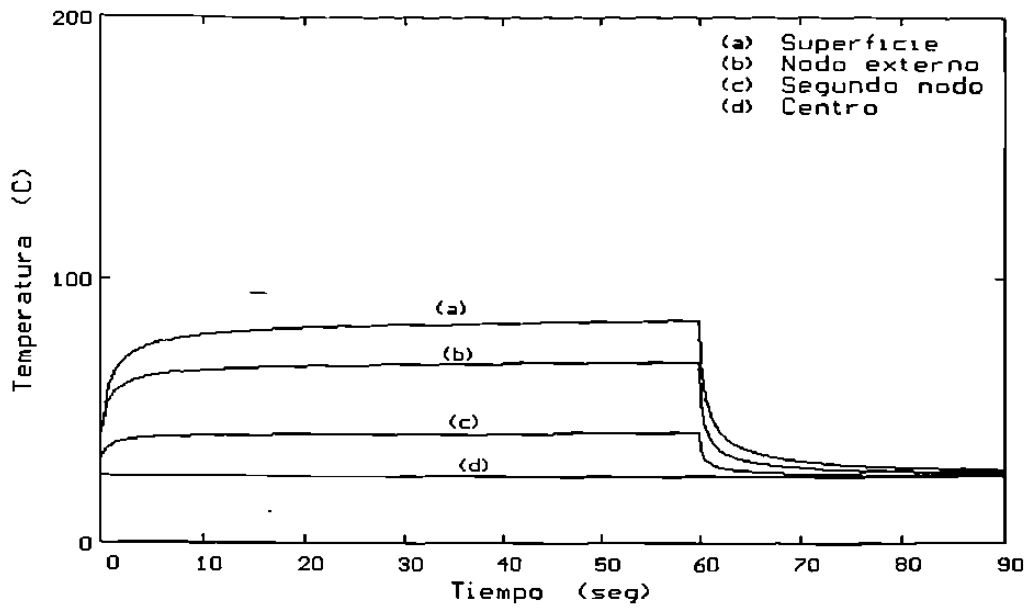


Fig. 23 Temperatura a la entrada de la zona de deformación.

UN PLANCHON UN DESCANSO

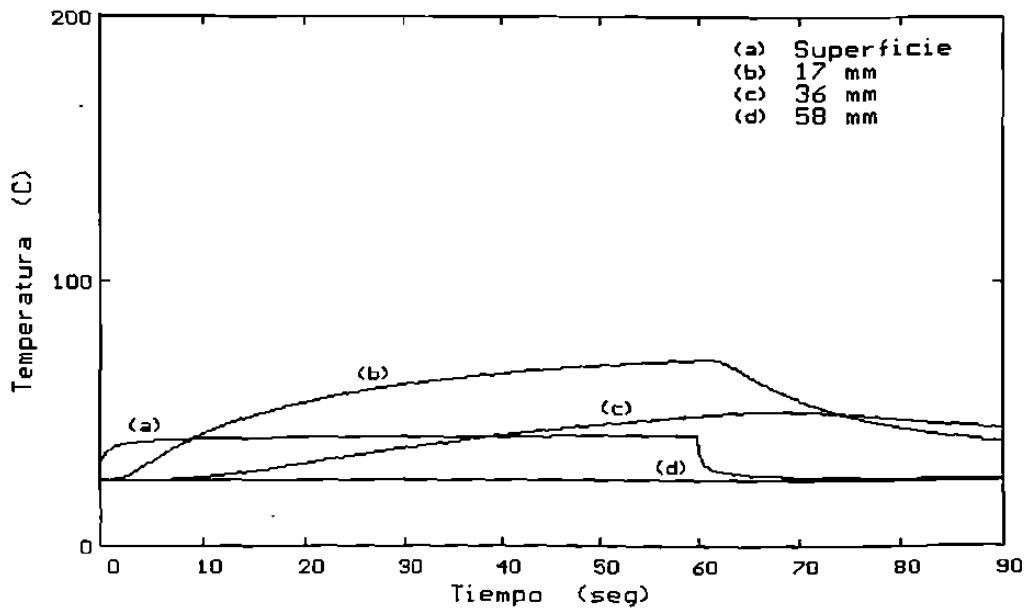


Fig. 24 Temperatura del rodillo a la entrada de la zona de deformación.

UN PLANCHON UN DESCANSO

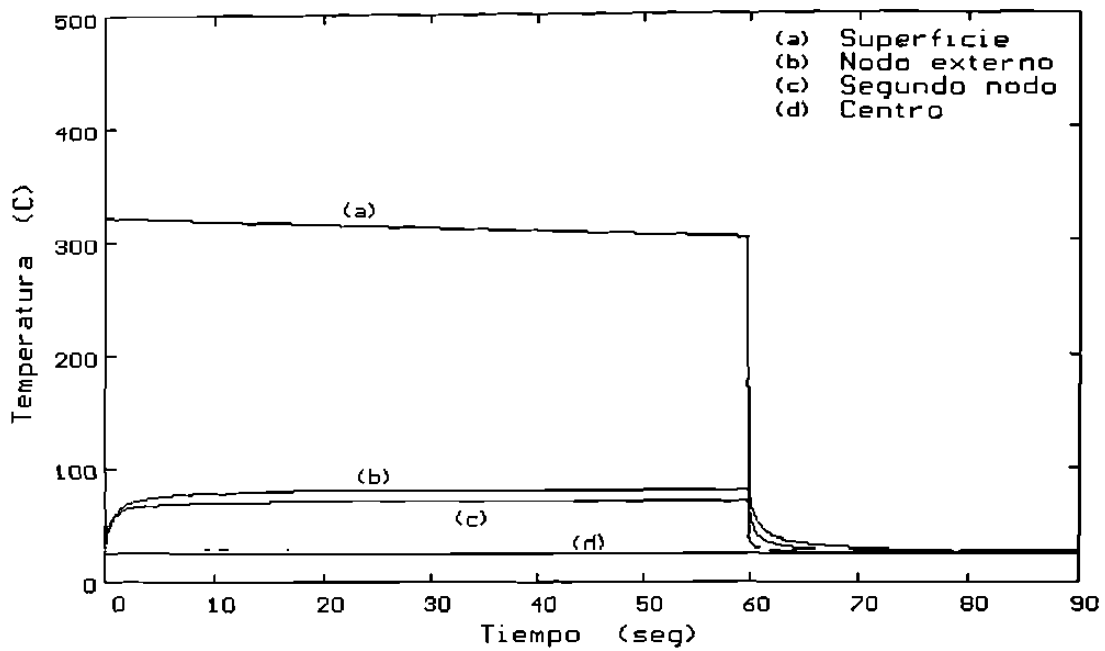


Fig. 25 Perfil variando la temperatura del planchón a la salida de la deformación.

CINCO PLANCHONES Y DESCANSOS

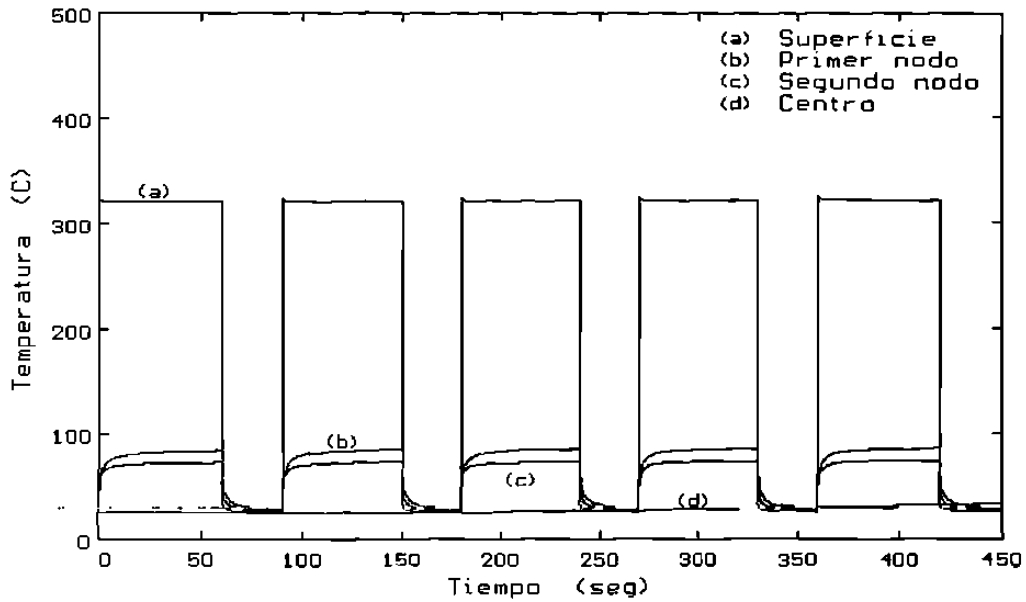


Fig. 26 Temperatura del rodillo a la salida de la zona de deformación.

CINCO PLANCHONES Y DESCANSOS

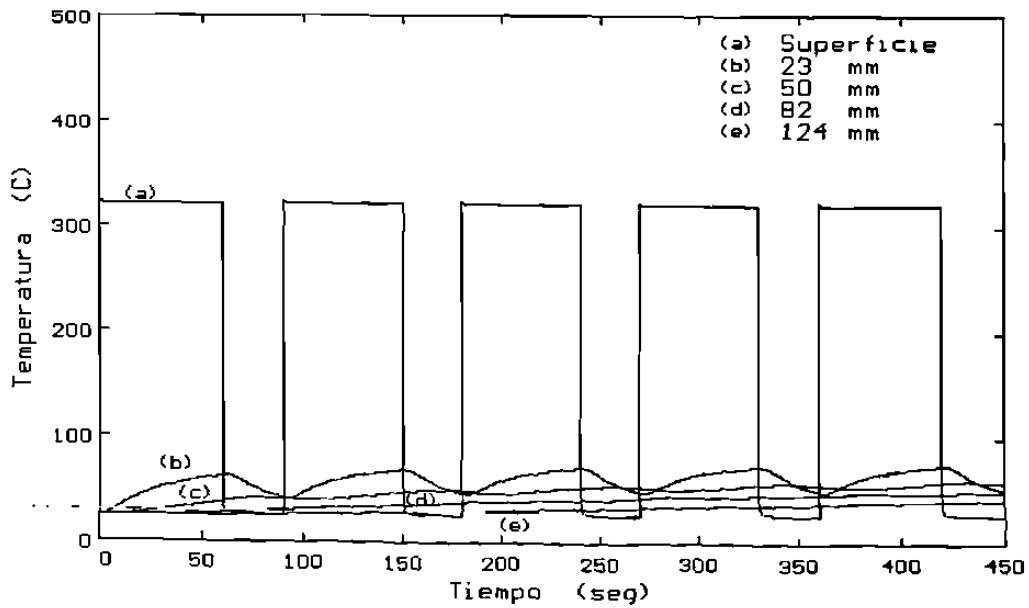


Fig. 27 Temperatura del rodillo a la salida de la zona de deformación.

QUINTO PLANCHON

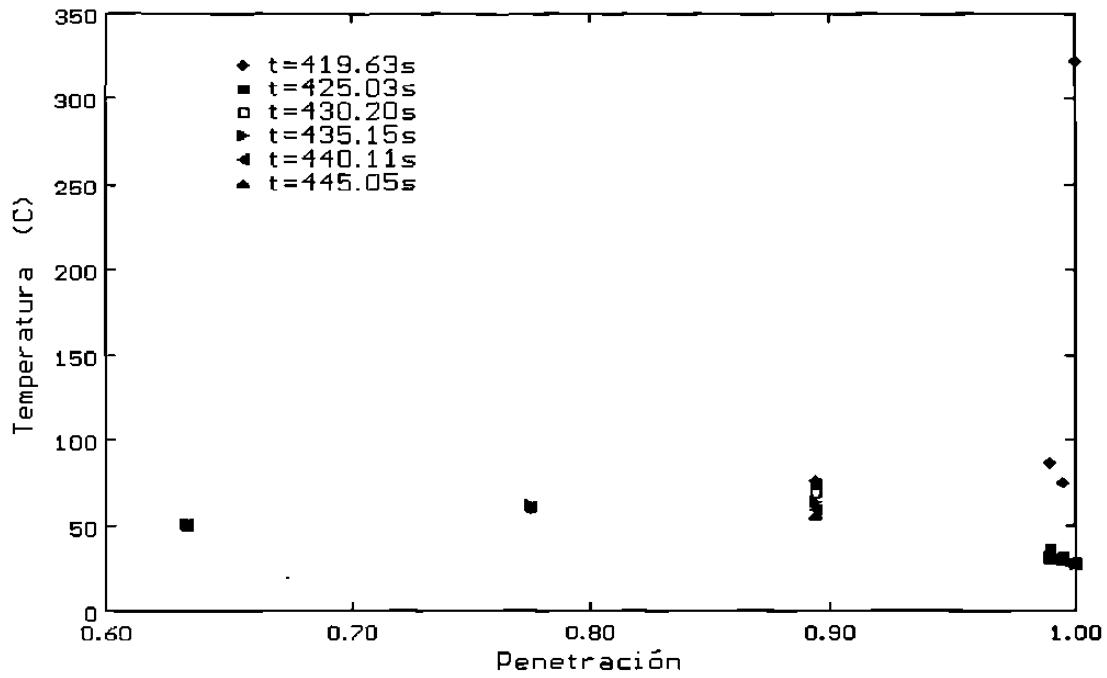


Fig. 28 Penetración térmica a la salida de la deformación del quinto planchón.

CINCO PLANCHONES Y DESCANSOS

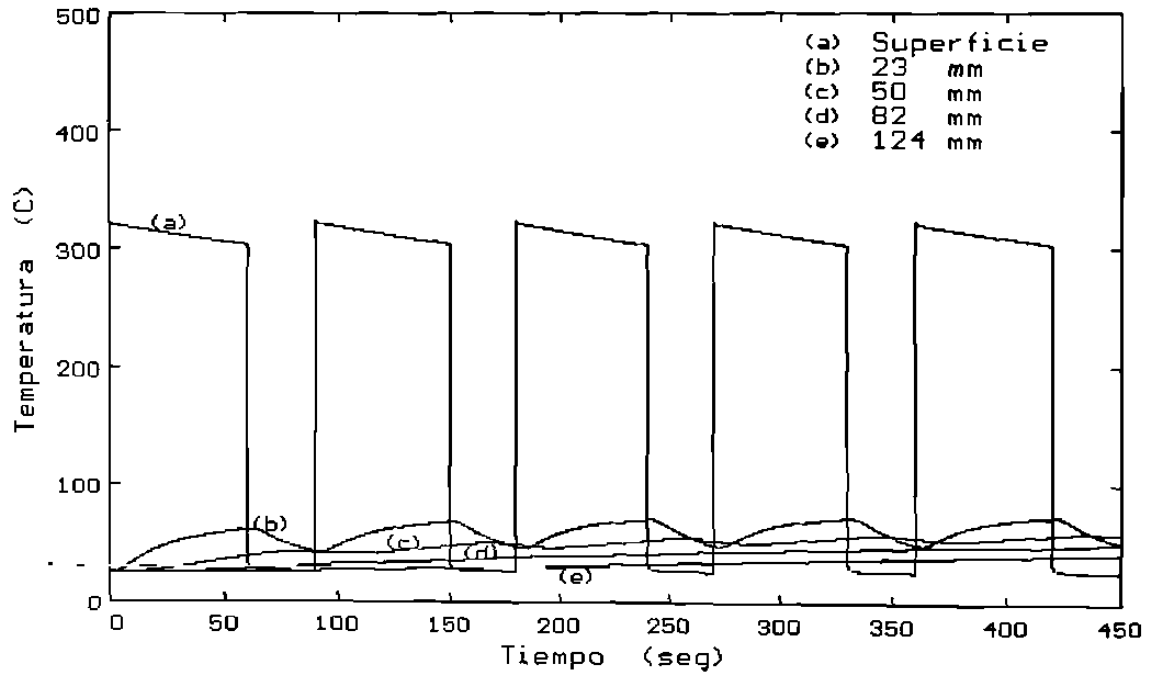


Fig. 29 Temperatura a la salida de la deformación variando la temperatura del planchón.

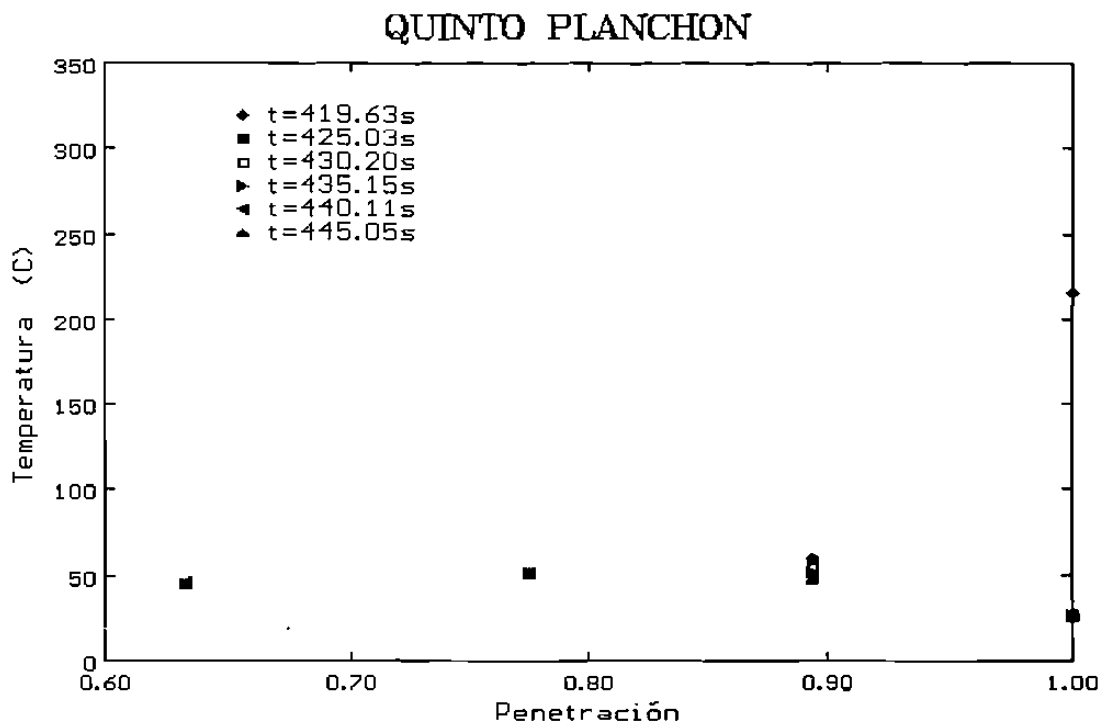


Fig. 30 Penetración térmica variando temperatura del planchón.

DEL PLANCHON 16 AL 20

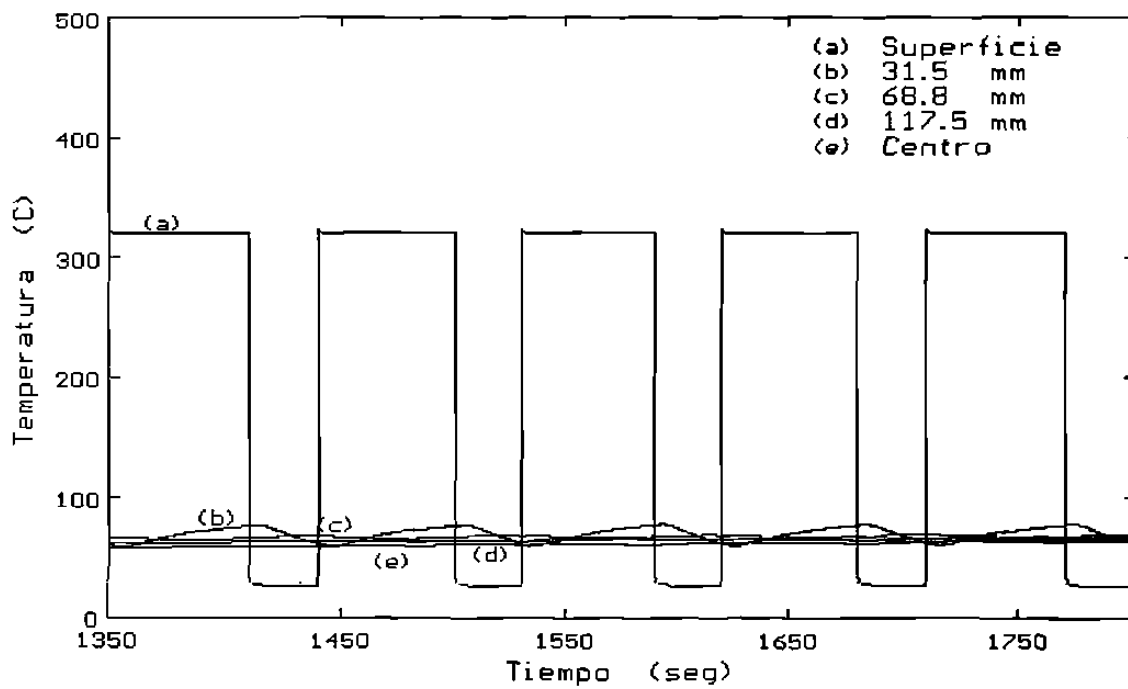


Fig.31 Temperatura a la salida de la zona de deformación.

VIGESIMO PLANCHON

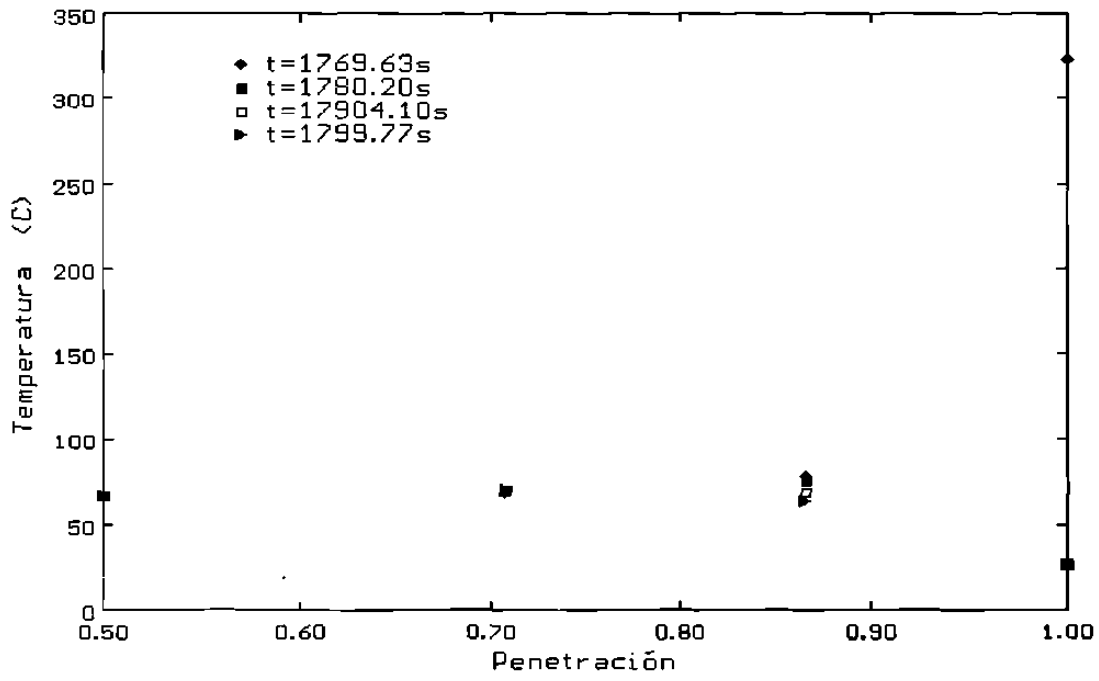


Fig. 32 Penetración térmica al final del vigésimo planchón.

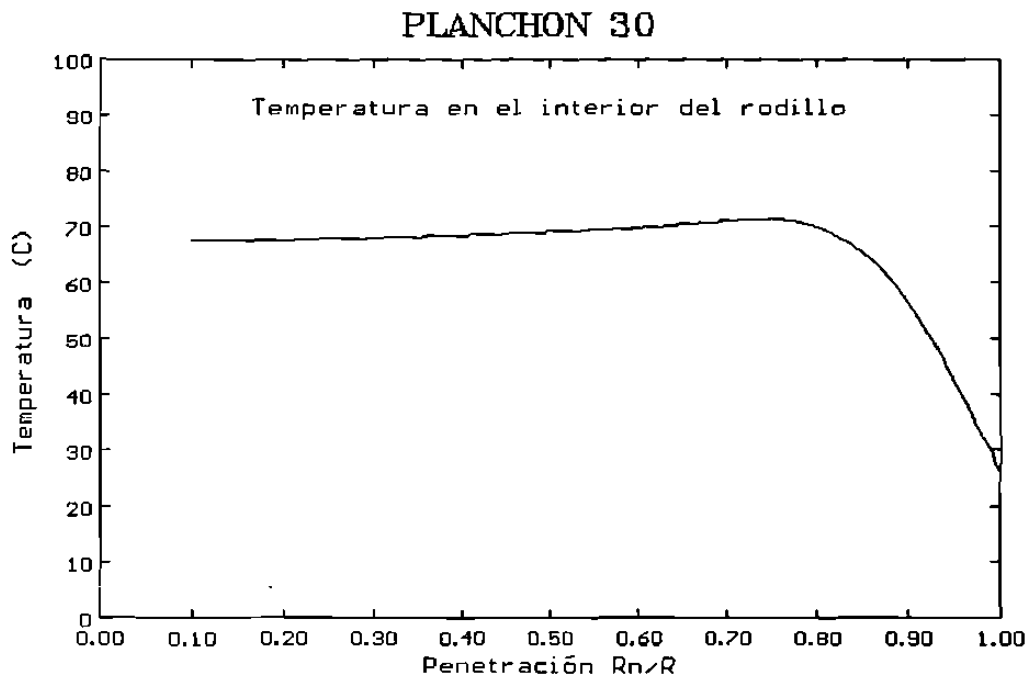


Fig. 33 Penetración normalizada vs. temperatura en el interior del rodillo.

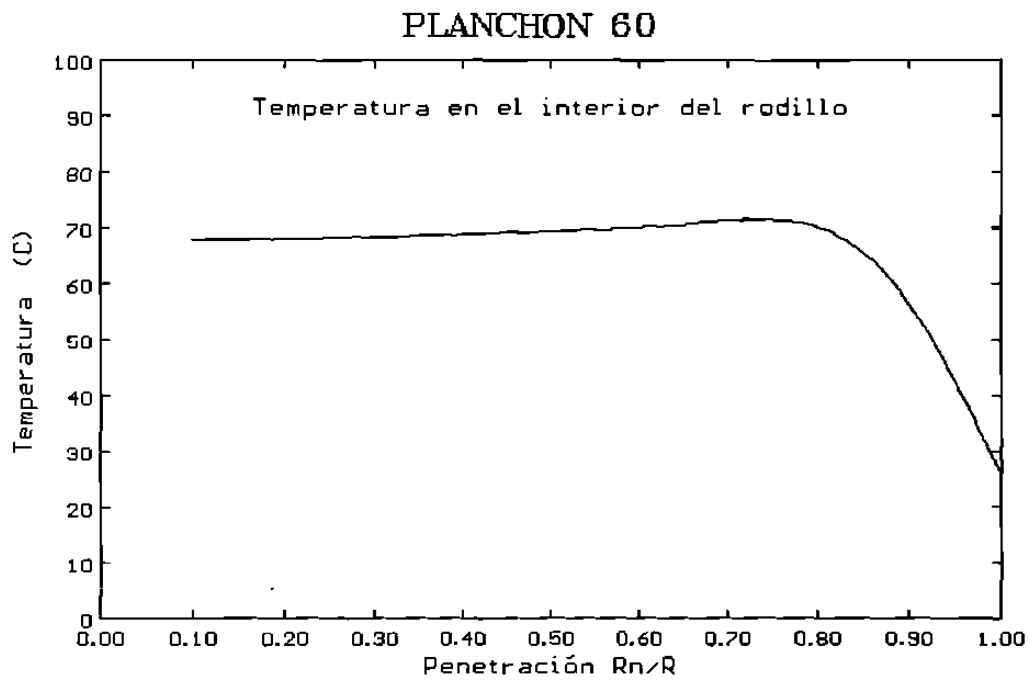


Fig. 34 Penetración normalizada vs. temperatura en el interior del rodillo.

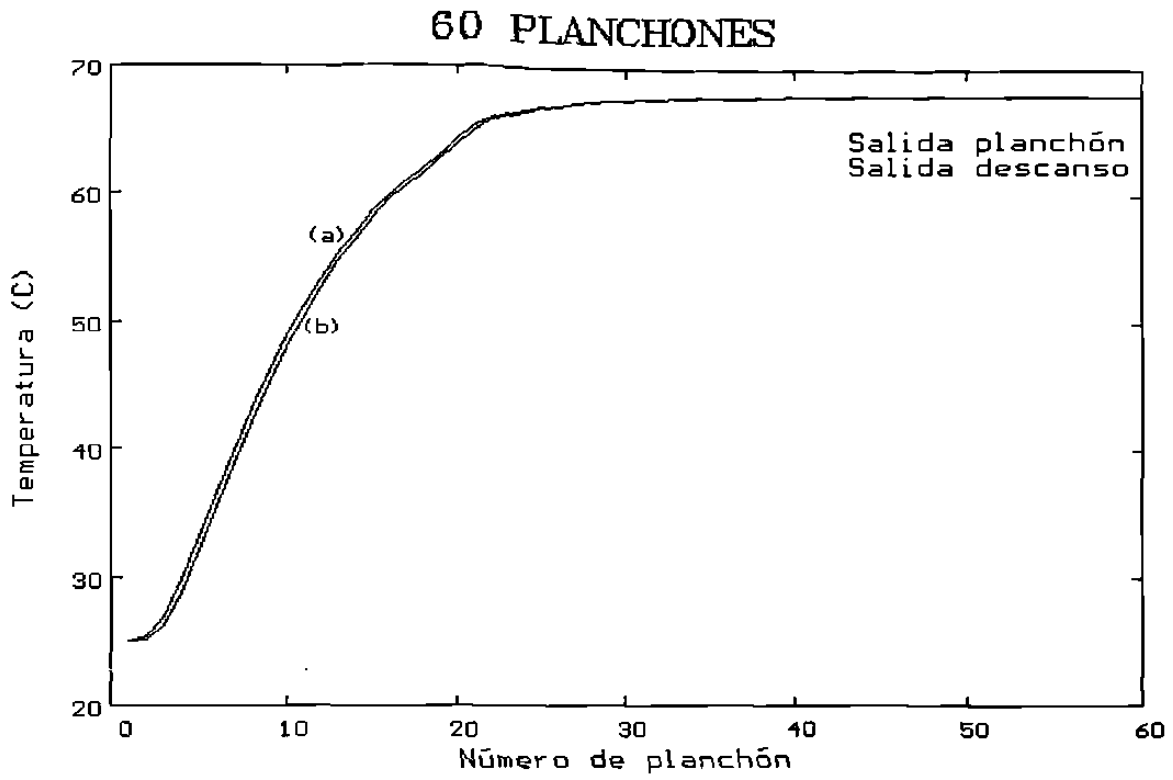
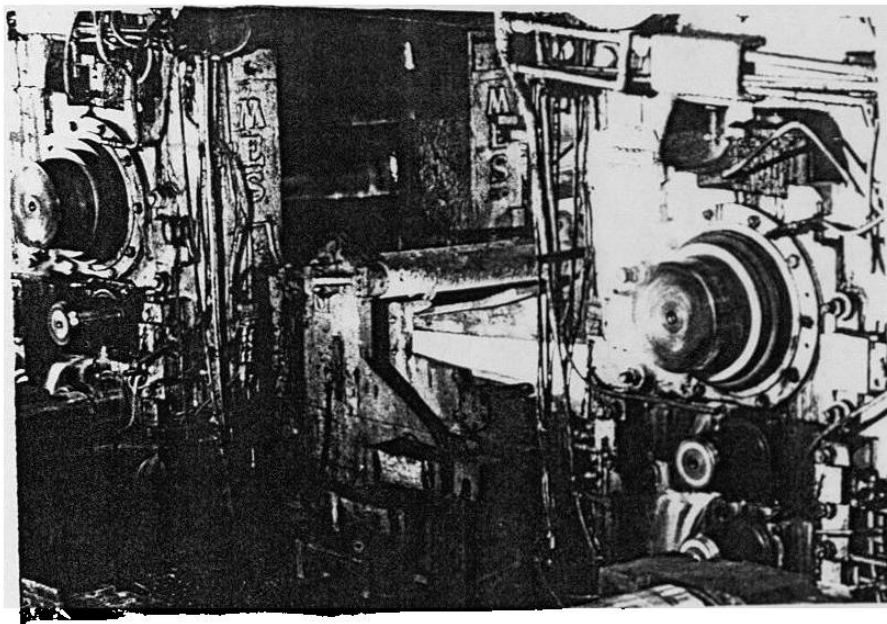
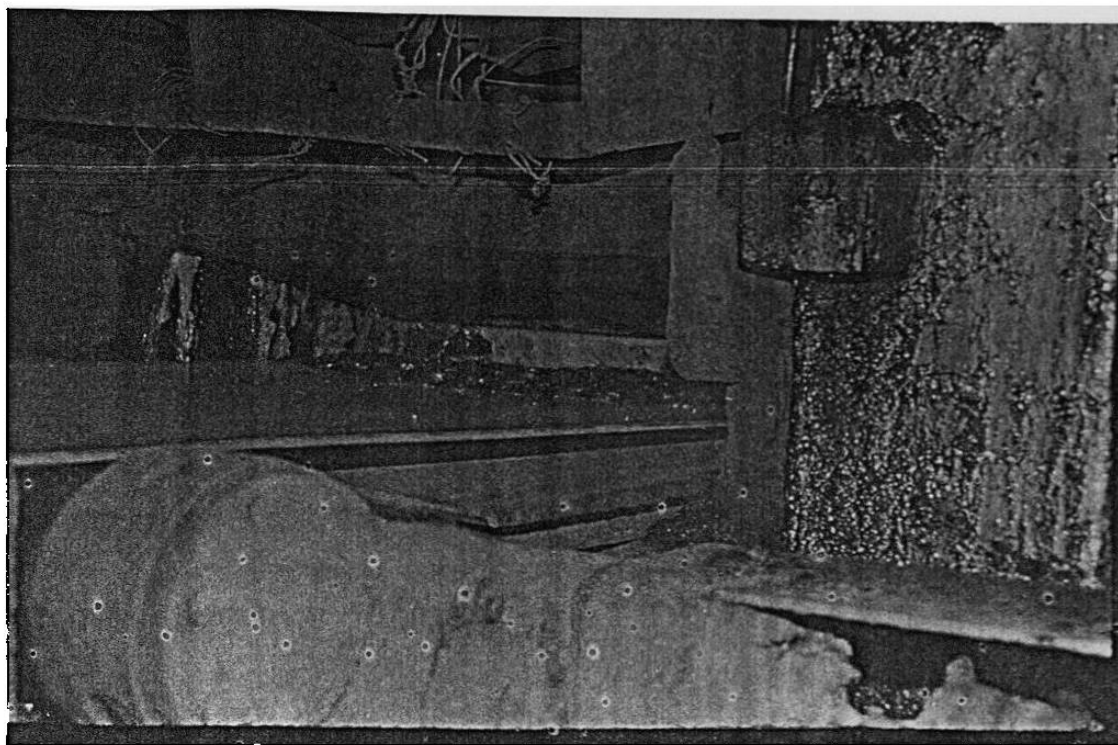


Fig. 35 Evolución térmica del centro del rodillo.



Fotografia 1.



Fotografia 2.

