

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



MODELO BIDIMENSIONAL DEL ENFRIAMIENTO DE
CINTA DE ACERO LAMINADA EN CALIENTE

T E S I S

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

LUIS ENRIQUE HERNANDEZ CASTILLO

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

MAYO DE 2001

TM

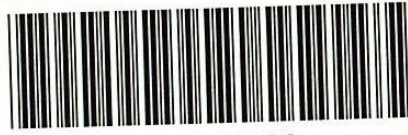
Z5853

.M2

FIVE

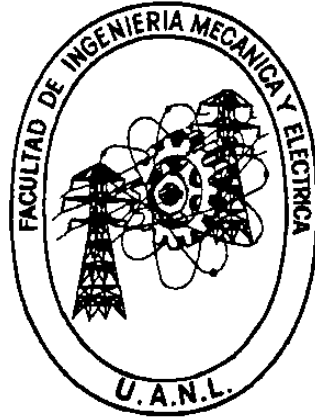
2001

44



1020145408

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



MODELO BIDIMENSIONAL DEL ENFRIAMIENTO DE CINTA
DE ACERO LAMINADA EN CALIENTE

TESIS

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

PRESENTA:

LUIS ENRIQUE HERNANDEZ CASTILLO

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

MAYO DE 2001

0150-07560

TM
Z5853
•M2
FINE
2001
H4

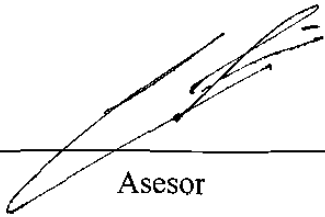


FONDO
TESIS


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

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Modelo bidimensional del enfriamiento de cinta de acero laminada en caliente”, realizada por el Ing. Luis Enrique Hernández Castillo, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis :

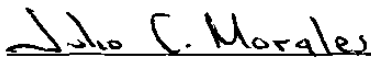


Asesor
Dr. Rafael Colás Ortiz



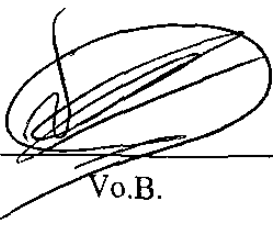
Revisor

Dra. Martha Patricia Guerrero Mata



Revisor

Dr. Julio César Morales Chavela



Vo.B.
M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Postgrado

San Nicolas de los Garza, N.L., Mayo de 2001

A mis padres, a mis hermanos y a mi chaparra.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por impulsar siempre mi desarrollo personal y profesional.

A Juany por su ayuda, su preocupación y por estar ahí.

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

A la Universidad Autónoma de Nuevo León.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Al Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales.

A mi asesor, el Dr. Rafael Colás Ortiz, por todo su apoyo y dedicación a este trabajo.

A la Dra. Martha Patricia Guerrero Mata, por su apoyo y por la revisión y las sugerencias para este trabajo.

Al Dr. Julio César Morales Chavela, por la revisión de este trabajo y por todos sus valiosos consejos y comentarios.

Al Dr. Luis A. Leduc Lezama y al personal de Hylsa por la ayuda incondicional y por todas las facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

Al Dr. Alberto J. Pérez Unzueta por su apoyo constante y por su sincera amistad.

A todos los profesores del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales.

A todos mis compañeros por los conocimientos compartidos, las experiencias vividas y por la variedad de amistades y personalidades.

Gracias Dios.

RESUMEN

En la actualidad los productos planos laminados en caliente requieren tener ciertas propiedades mecánicas y características de forma para satisfacer las necesidades de los clientes. El no cumplir con lo anterior puede llevar a la devolución de los productos o a trabajos de reproceso. Ambos efectos significan menor rentabilidad del proceso de laminación en caliente, por lo que es necesario controlar todas sus etapas para obtener el resultado deseado, productos de buena calidad.

Uno de los procesos de los que depende la calidad final del producto en la laminación en caliente, es el enfriamiento, ya que es aquí en donde se define la microestructura y las propiedades mecánicas, aunque estas últimas dependen principalmente de la composición química. El proceso de enfriamiento podría ser determinante también, para obtener o no las características de forma exentas de defectos, es por eso que el interés en conocer mejor el proceso de enfriamiento en la laminación en caliente que, en este caso en particular se refiere a los mecanismos que controlan la evolución térmica de la lámina.

La modelación del enfriamiento además de ser una herramienta necesaria para obtener las propiedades mecánicas deseadas en la lámina, también puede ayudar para conocer mejor como se lleva a cabo la evolución térmica, la evolución microestructural, y la formación de esfuerzos internos durante el enfriamiento.

El presente trabajo muestra los resultados de un modelo bidimensional que predice la evolución térmica de cinta de acero laminada en caliente durante el enfriamiento acelerado que se le da en la mesa de salida de una línea de laminación.

Primeramente se revisan trabajos anteriores referentes a la modelación del enfriamiento acelerado en una dimensión, también se estudian trabajos teóricos de modelación en dos direcciones, así como otros referentes al tema del enfriamiento de lámina.

Se procede a conocer el proceso de enfriamiento en sí, comprendiendo tanto los aspectos teóricos como los prácticos. Algo a lo que se prestó mucha atención, fue a observar cómo las variables que afectan a la temperatura de la lámina se pueden modificar, y la manera de obtener mediciones de dichas variables, así como también de la variable a modelar, la temperatura.

Se utiliza un modelo bidimensional de transferencia de calor que representa el proceso de enfriamiento de la lámina y cuyas aproximaciones se obtienen mediante el método explícito de la técnica de diferencias finitas. El enfriamiento se simula mediante un programa usado en computadoras personales, lo que permite el fácil acceso a los valores de las variables o condiciones de procesamiento de la lámina. El programa arroja una presentación muy clara de los resultados de la simulación, mostrando gráficas de evolución térmica en distintos puntos de la lámina.

Por último, se valida el modelo solo en la porción central de la lámina, ya que, aunque el modelo calcula la temperatura en varios puntos a lo ancho, solo se tienen mediciones de temperatura en el centro de la lámina, por lo que no se pudieron validar los perfiles de temperatura predichos. Los porcentajes de error de las predicciones de la temperatura de enrollado con respecto a las mediciones de planta fueron menores de 5.

CONTENIDO

DEDICATORIA.	i
AGRADECIMIENTOS.	ii
RESUMEN.	iii
CAPITULO 1. INTRODUCCION.	1
CAPITULO 2. PROCESO DE LAMINACION EN CALIENTE.	4
2.1.- INTRODUCCION	4
2.2.- LINEA DE LAMINACION EN CALIENTE	6
2.3.- SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	12
CAPITULO 3. TRANSFORMACION DE FASE DURANTE EL ENFRIAMIENTO	17
3.1.- INTRODUCCION	17
3.2.- FORMACION DE FERRITA	18
3.3.- MICROESTRUCTURA DE LA AUSTENITA LAMINADA EN CALIENTE	20
3.4.- REFINAMIENTO DEL GRANO FERRITICO	22
3.4.1.- Importancia de S_v en el refinamiento del grano ferrítico	23
3.4.2.- Importancia de A_{r3} en el refinamiento del grano ferrítico	24
3.5.- ANTECEDENTES DEL ENFRIAMIENTO ACELERADO	26
3.6.- ENFRIAMIENTO ACELERADO	27

CAPITULO 4. MODELACION MATEMATICA	31
4.1.- INTRODUCCION	31
4.2.- MODELACION Y SIMULACION	31
4.3.- TRANSFERENCIA DE CALOR	33
4.3.1.- Conducción	33
4.3.2.- Convección	35
4.4.3.- Radiación	35
4.4.- MODELACION MATEMATICA	36
4.4.1.- Definición del sistema	36
4.4.2.- Regímenes de enfriamiento	37
4.5.- FORMULACION NUMERICA	39
CAPITULO 5. TOMA DE DATOS EN LA PLANTA	42
5.1.- INTRODUCCION	42
5.2.- CONOCIMIENTO DE LA PLANTA	42
5.3.- LEVANTAMIENTO FISICO DE LA MESA DE SALIDA	45
5.4.- VARIABLES DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO	45
CAPITULO 6. RESULTADOS	48
6.1.- INTRODUCCION	48
6.2.- SIMULACION DEL ENFRIAMIENTO	48
6.3.- SUPOSICIONES DEL MODELO	52
6.4.- COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR	53
6.5.- VALIDACION DEL MODELO	56

CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
7.1.- CONCLUSIONES	58
7.2.- RECOMENDACIONES	59
REFERENCIAS	61
LISTA DE TABLAS	63
LISTA DE FIGURAS	64

CAPITULO 1

INTRODUCCION

El objetivo de este trabajo es modelar y simular la evolución térmica que sufre la cinta de acero de bajo carbono laminada en caliente durante su paso por la mesa de enfriamiento.

La razón de este trabajo es que, aunado a otros referentes a evolución microestructural y formación de esfuerzos residuales, se podrá predecir la generación del defecto de ondulaciones (Figura 1.1), pudiendo con ésto asegurar las condiciones que evitarían este problema, lo que llevaría a mejorar la calidad de los productos, reducción de reprocesos, facilitación para trabajos posteriores del producto, reducción de costos y, en suma, mayor competitividad del producto laminado en caliente.

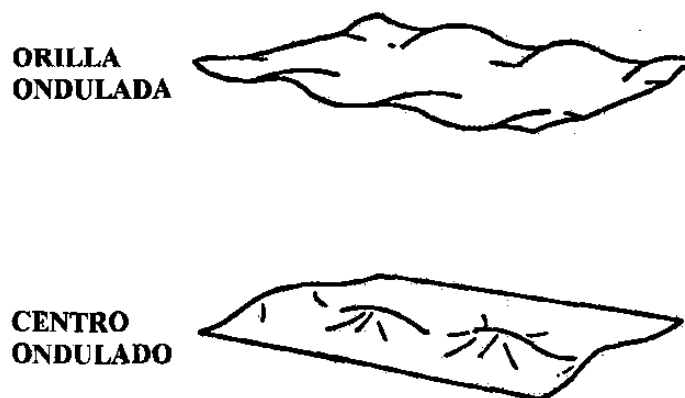


Figura 1.1.- Esquema del defecto de ondulaciones al centro y a las orillas.

Para lograrlo se requiere tener un conocimiento completo de cómo se lleva a cabo el proceso de enfriamiento que es parte de una miniacera de la localidad, la cual está compuesta, a grandes rasgos, por dos coladas continuas, dos hornos túnel, un molino continuo, una mesa de enfriamiento y dos enrolladores. La Figura 1.2 muestra el esquema de una línea de laminación. El proceso de interés se lleva a cabo en la mesa de enfriamiento o de salida, la cual se ubica justo después de que se le da a la lámina la última reducción en el molino continuo.

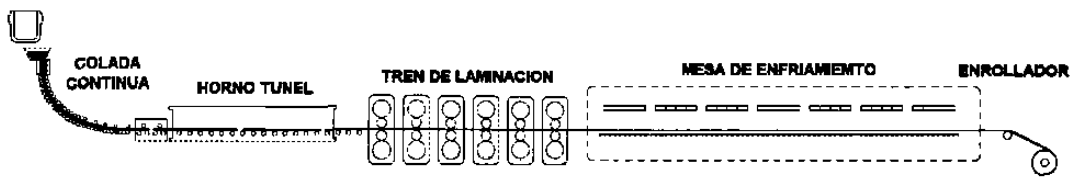


Figura 1.2.- Esquema de una línea de laminación.

Durante este proceso la lámina es transportada a velocidades superiores a los 10 m/seg sobre una serie de rodillos, siendo enfriada por agua que es aplicada en un principio en forma de aspersion, pero en la mayor parte de la mesa se aplica en forma laminar por arriba y por debajo de la lámina, Figura 1.3.

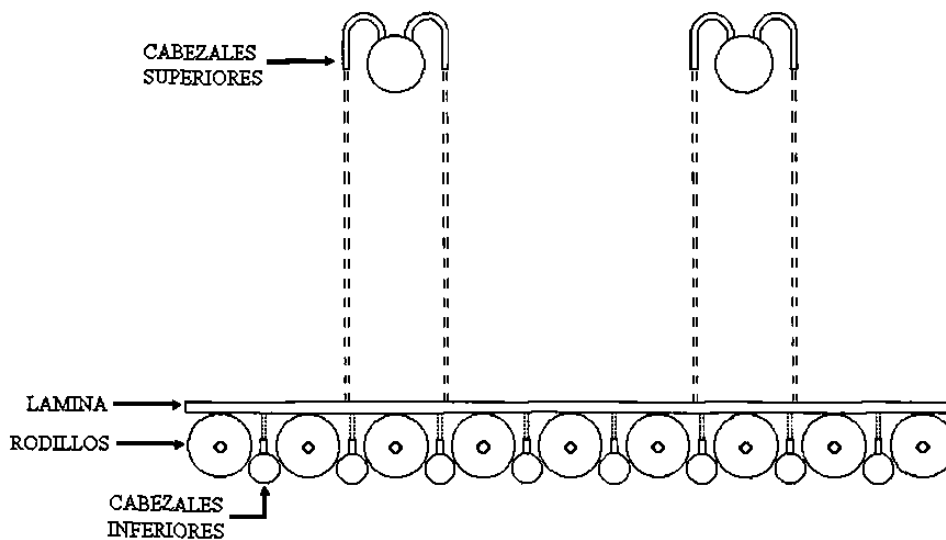


Figura 1.3.- Esquema del enfriamiento por flujo laminar superior e inferior.

Dependiendo de las condiciones de enfriamiento de la lámina, es decir, de las temperaturas de entrada y salida y la velocidad de enfriamiento (la cual depende del patrón de enfriamiento utilizado y de la velocidad de la lámina), resultará en una distribución de temperatura a lo ancho de la lámina, que de no ser uniforme pudiera producir diferentes microestructuras en la misma dirección junto con esfuerzos internos que, por último, pueden ser capaces de formar defectos de ondulaciones. De manera que es necesario conocer como se lleva a cabo la evolución térmica, ya que de ésta dependen la microestructura, los esfuerzos internos y algunas veces los defectos de forma, suponiendo que del molino la lámina sale sin defectos.

Para modelar la evolución térmica hay que conocer el funcionamiento de la mesa de salida, incluyendo velocidades de la lámina, flujos de agua, modos de control y operación de las válvulas de enfriamiento, etc. Ya conocido físicamente el proceso, hay que establecer cual será el sistema a analizar, y hacer la modelación matemática utilizando, para este caso en particular, el método de diferencias finitas para la aproximación de las ecuaciones de transferencia de calor. Este modelo se traduce en un programa de computadora que permite el ingreso de las diferentes condiciones que afectan a la temperatura de la lámina y, después de introducir toda esta información, la simulación arrojará resultados en valores y graficas, mostrando la predicción de la evolución térmica en diferentes puntos de la lámina.

CAPITULO 2

PROCESO DE LAMINACION EN CALIENTE

2.1 INTRODUCCION

Se le llama laminado en caliente al proceso del tratamiento termomecánico del metal a altas temperaturas (para el acero de 1100° a 1300°C aproximadamente¹) por el paso forzado entre los rodillos giratorios de un laminador, siendo la holgura entre los rodillos, menor que el espesor de la pieza a trabajar. El laminado da a la pieza un perfil y tamaño determinados, de manera que la producción obtenida puede ser utilizada como artículo terminado, o bien como materia prima para fabricar otros productos.

Este capítulo contiene una breve descripción de la línea de laminación en caliente en la que se realizó el trabajo, con el fin de hacer más familiares algunos conceptos que se manejarán mas adelante. Esta línea pertenece a una empresa de la localidad y tiene la capacidad de producir 1.5 millones de toneladas de acero de bajo carbono y baja aleación por año². En la Figura 2.1 se muestra un esquema de la línea de laminación.

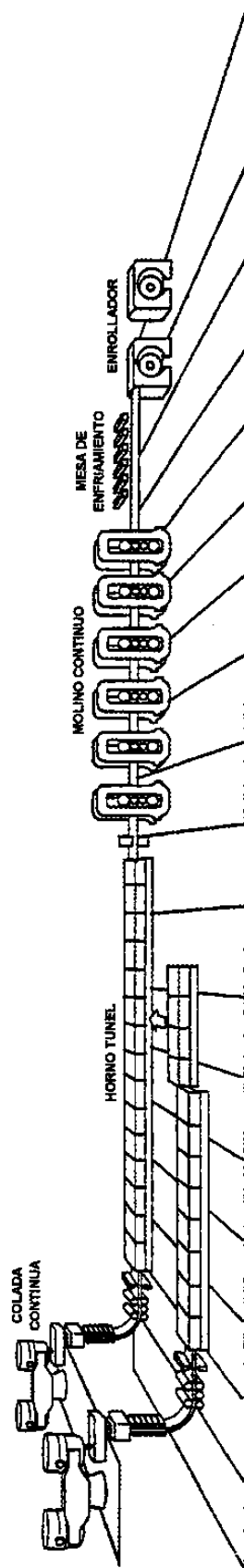


Figura 2.1.- Línea de laminación¹³

2.2 LINEA DE LAMINACION EN CALIENTE

Los equipos principales que integran la miniacera en donde se realizo este trabajo se describen a continuación:

a) Colada continua.

En esta sección se tienen los siguientes elementos: un horno olla, un recipiente llamado distribuidor, boquillas sumergibles que tienen un diseño especial para tratar de reducir las turbulencias, un molde especialmente diseñado para poder colar planchones delgados, una barra iniciadora, segmentos de enfriamiento, rodillos dobladores y una tijera de péndulo para cortar el planchón, Figura 2.2. El acero líquido pasa del horno olla al distribuidor por medio de una válvula deslizante y, del distribuidor a un molde de cobre sin fondo enfriado con agua, por medio de una boquilla sumergible que controla la velocidad de colada. El metal se enfría sobre la barra iniciadora y la solidificación comienza inmediatamente alrededor de la periferia del molde. Después de que se inicia la colada y el nivel del metal sube en el molde hasta la altura deseada, se jala la barra falsa o iniciadora a la misma velocidad a la que el metal se introduce en el molde. La barra o planchón de acero se soporta mecánicamente hacia abajo y pasa a través de una zona de enfriamiento secundario donde se rocía agua sobre su superficie para completar el proceso de solidificación. El acero sigue su camino a través de los segmentos de enfriamiento hasta llegar a los rodillos dobladores, los cuales lo despegan de la barra falsa y lo guían hacia el siguiente grupo de rodillos, que a su vez colocan el planchón en posición horizontal para que, al llegar a la tijera, se puedan cortar a la medida deseada. La velocidad de operación de la colada oscila entre los 2.8 y 5.5 m/min, según sea el ancho del planchon².

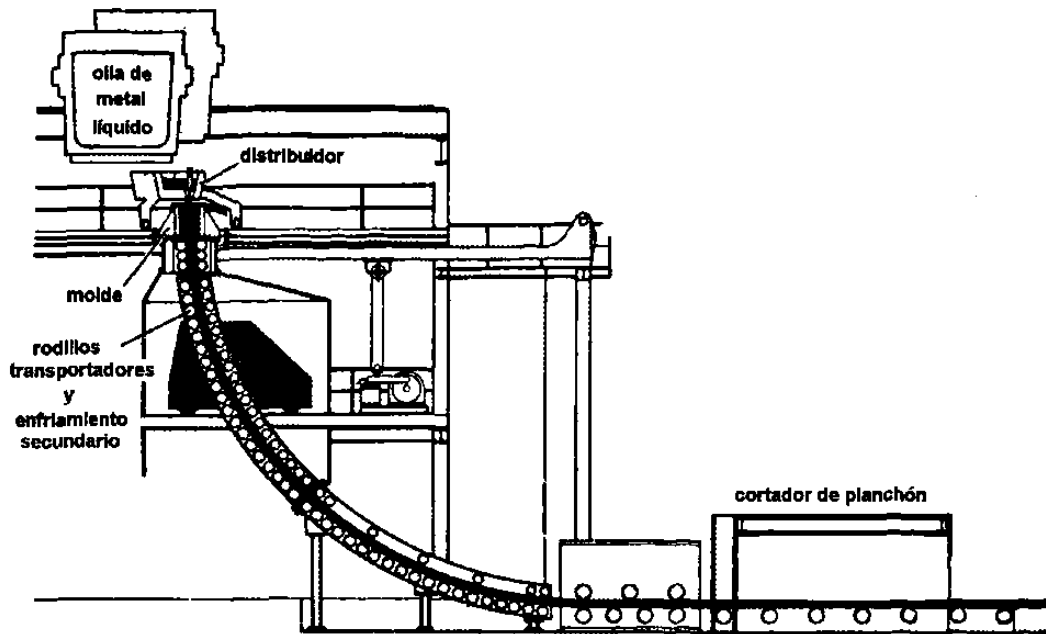


Figura 2.2.- Esquema general de una planta de colada continua¹².

b) El horno túnel.

Además de ser el medio de transferencia del planchón de la colada continua al tren de laminación, el horno túnel actúa como acumulador para absorber demoras del molino (cambio de rodillos y fallas, con duración de hasta 30 minutos)² y como homogenizador de temperatura. La uniformidad de la temperatura es de fundamental importancia durante el laminado, ya que las propiedades metalúrgicas y de resistencia a la deformación en caliente son muy sensibles a variaciones de temperatura durante el laminado, por lo que, tanto las fuerzas de laminado como la calidad dimensional y planeza del producto se verían afectadas al tener el planchón una temperatura heterogénea. El concepto de utilización del horno túnel como elemento uniformizador de temperaturas asegura una variación máxima de temperatura a lo largo, ancho y espesor del planchón de ± 10 °C. La temperatura del planchón a la salida del horno túnel puede ser de 1050, 1085 o 1150 °C dependiendo ésta del producto a laminar². A esta temperatura se aprovecha la menor resistencia del acero a la deformación, además de que la recristalización de la austenita es muy lenta o nula⁶.

c) El molino continuo.

Consta de seis estaciones laminadoras con cuatro rodillos cada una, dos de estos rodillos son de trabajo y dos de apoyo. Aquí se va reduciendo el espesor del planchón de aproximadamente 50 mm, hasta dejarlo en forma de lámina, con dimensiones desde 1 hasta 12.7mm de espesor². La microestructura del planchón, aunado al laminado con altas reducciones a temperaturas controladas, permite obtener una microestructura austenítica de granos deformados que incrementan la tasa de nucleación de la ferrita⁶. El resultado de la transformación a partir de esta estructura será ferrita fina, siendo el refinamiento de grano ferrítico el principal medio usado para mejorar las propiedades mecánicas de la cinta de acero de bajo carbono laminada en caliente. Las Figuras 2.3 y 2.4 muestran dos ángulos del tren de laminación o molino continuo pudiéndose observar tanto la entrada como la salida de éste.

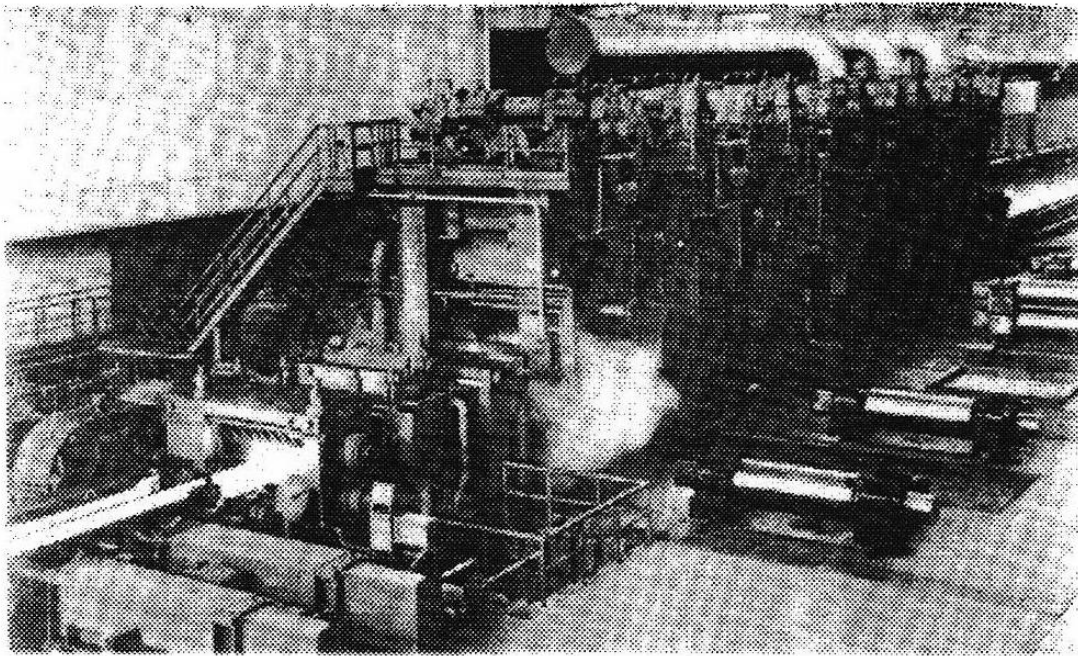


Figura 2.3.- Vista general del tren de laminación o molino continuo, mostrando la unidad de descascarado anterior a la entrada del tren³.

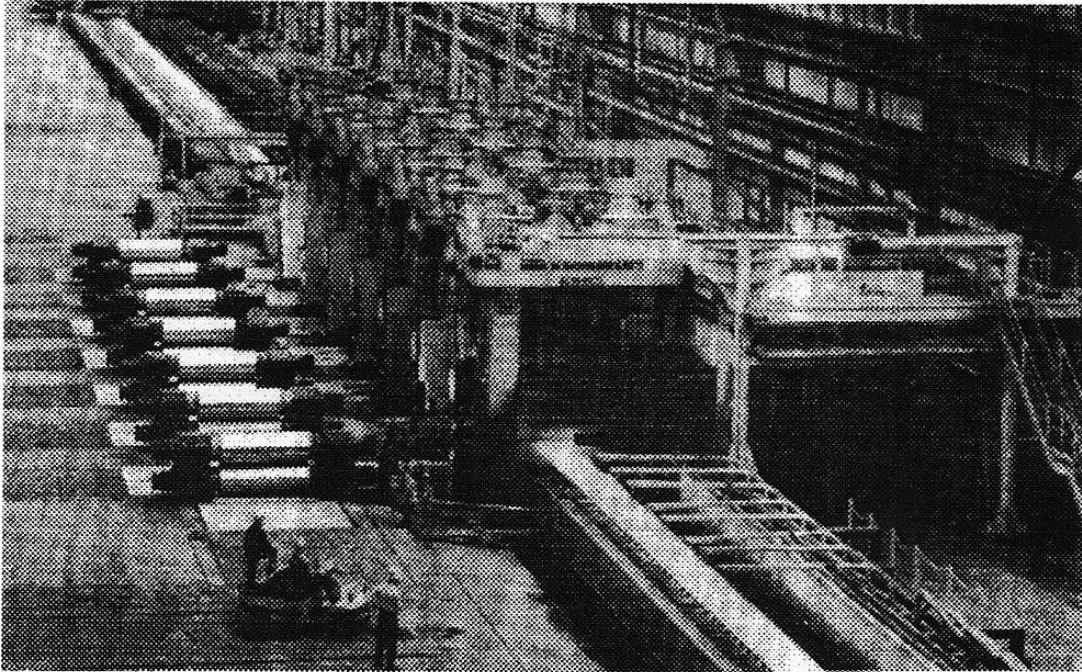


Figura 2.4.- Esta vista muestra la salida del molino continuo. También se observan rodillos de trabajo nuevos, alineados y listos para un cambio general de rodillos³.

d) La mesa de enfriamiento.

La cinta laminada en caliente se enfría hasta la temperatura de enrollado aplicándole agua para controlar su velocidad de enfriamiento y asegurar la uniformidad de las propiedades mecánicas de la lámina requeridas por el cliente. Esto se lleva a cabo en la mesa de enfriamiento o de salida en donde, además de realizarse el enfriamiento, la cinta se transporta hasta el enrollador. Las Figuras 2.5 y 2.6 muestran dos vistas de la mesa de enfriamiento.

e) El enrollador.

El enrollador es utilizado para permitir un manejo más fácil de la lámina y esto ha contribuido mucho a sus altas capacidades de producción. La velocidad del enrollador es generalmente algo mayor (de 7 a 15%) que la velocidad de la lámina en la mesa de salida³ para tensionar la lámina, consiguiendo una mejor práctica de enrollado. Las Figuras 2.7 y 2.8 muestran una vista general del enrollador y un acercamiento del mismo, respectivamente.

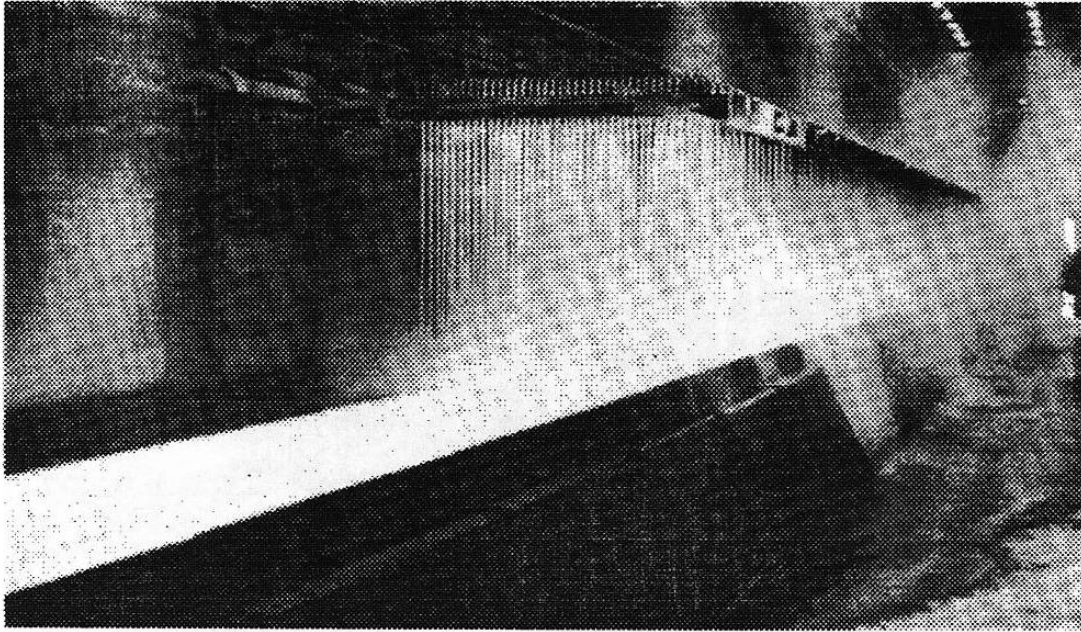


Figura 2.5.- Esta figura muestra el comienzo de la mesa de enfriamiento, observándose los primeros cabezales superiores aplicando agua sobre la cinta de acero en forma laminar.³

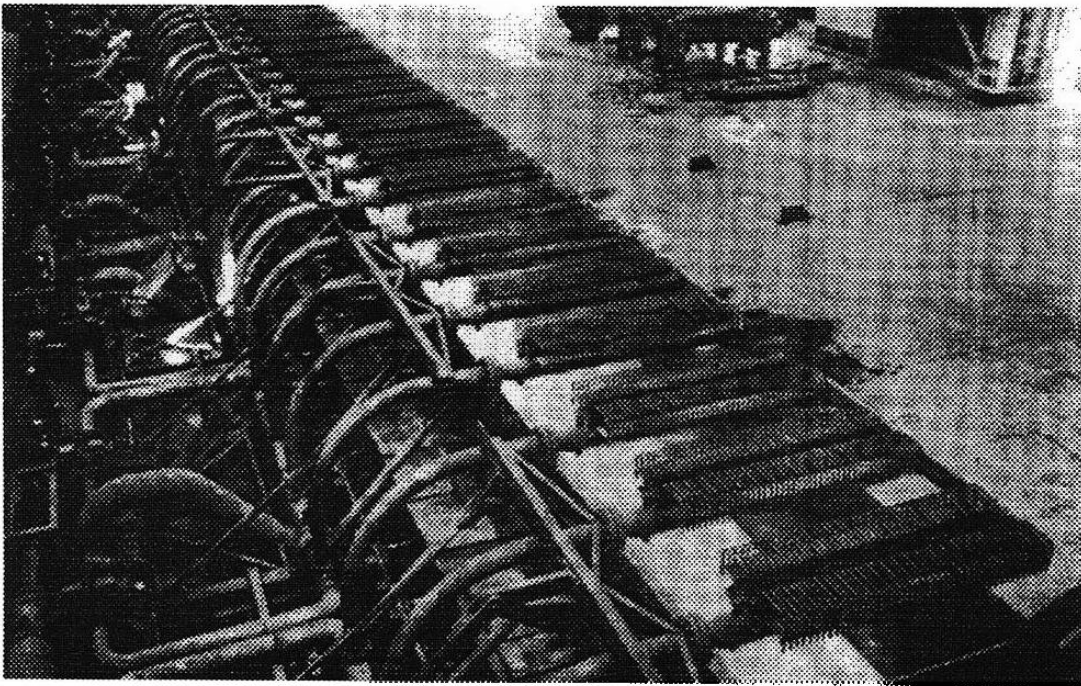


Figura 2.6.- Esta vista muestra desde arriba, el arreglo de cabezales y tuberías en la mesa de salida³.

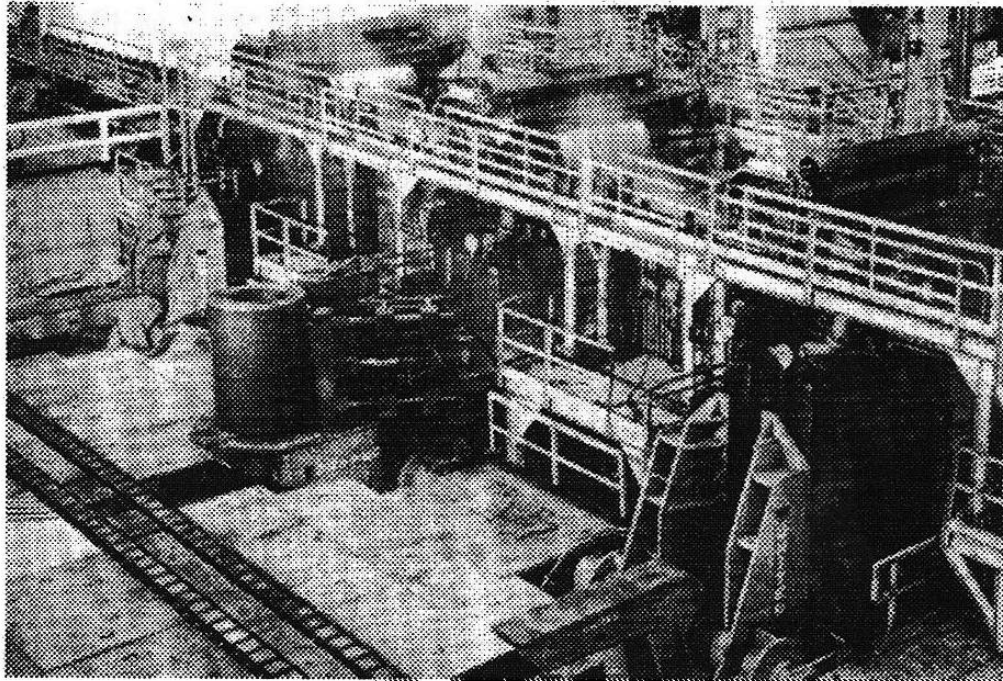


Figura 2.7.- Vista general del enrollador. Las líneas de laminación de alta producción cuentan con hasta tres enrolladores dispuestos de tal manera que cada uno se puede sacar de funcionamiento para fines de mantenimiento³.

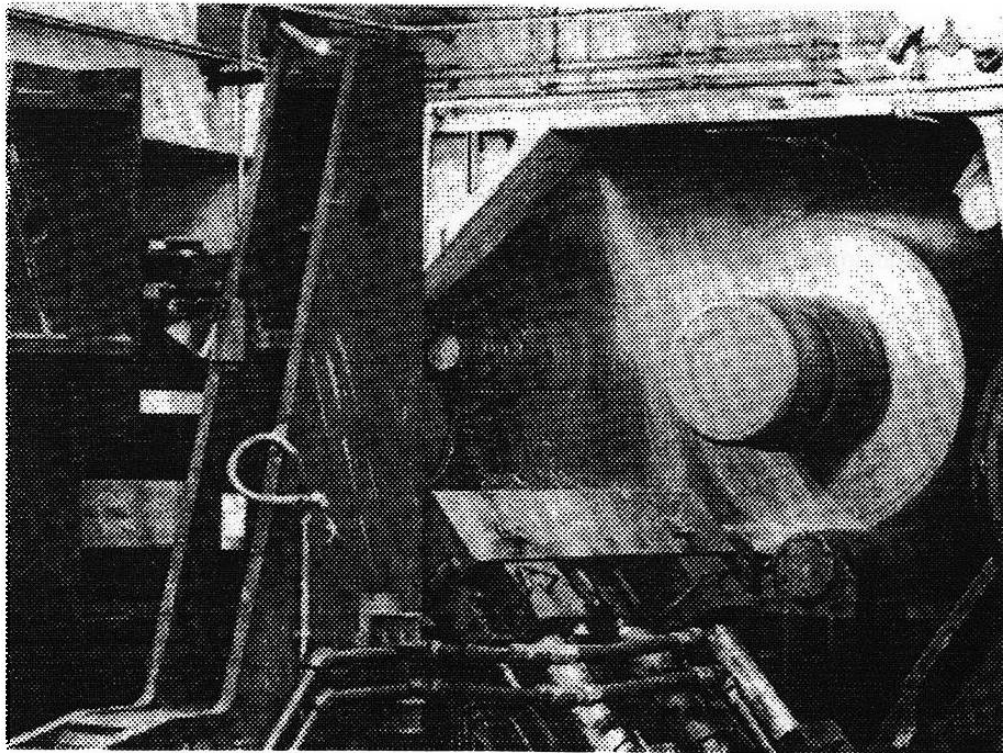


Figura 2.8.- Acercamiento de un enrollador que recibe un rollo completo de lámina³.

2.3 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

El sistema de enfriamiento consta de cabezales localizados arriba y abajo de los rodillos de la mesa de salida. El flujo de agua es del tipo laminar y aspersión en los cabezales superiores y laminar en los inferiores. La mesa de salida consiste de 26 zonas de enfriamiento, las cuales son operadas individualmente, esto se puede observar en el esquema de la Figura 2.9.

Los tipos de enfriamiento con los cuales operan estas zonas de enfriamiento son:

Aspersión: En este tipo de enfriamiento se aplica una película constante de agua a todo lo ancho de la superficie superior de la cinta; la zona que opera por aspersión consiste de dos cabezales superiores y ocho cabezales inferiores, los cabezales superiores en conjunto aplican a la cinta $120 \text{ m}^3/\text{hr}$ de agua, mientras que el conjunto de cabezales inferiores suministra $160 \text{ m}^3/\text{hr}$ de agua de enfriamiento², Figura 2.10. La mesa de salida cuenta con una zona de enfriamiento por aspersión.

Grueso: Este tipo de enfriamiento consiste de dos cabezales superiores y ocho cabezales inferiores por zona; el conjunto de cabezales superiores suministran $140 \text{ m}^3/\text{hr}$ de agua, mientras que el conjunto de cabezales inferiores suministran a la cinta $160 \text{ m}^3/\text{hr}$ de agua de enfriamiento², Figura 2.11. La mesa de salida cuenta con 5 zonas de enfriamiento grueso.

Mediano. Este tipo de enfriamiento consiste de un cabezal superiores y cuatro cabezales inferiores en cada una de las 12 zonas; la capacidad de descarga de agua es la mitad de la del tipo grueso, el conjunto de cabezales superiores suministran $70 \text{ m}^3/\text{hr}$ de agua, mientras que el conjunto de cabezales inferiores suministran a la cinta $80 \text{ m}^3/\text{hr}$ de agua de enfriamiento², Figura 2.11. La mesa de salida cuenta con 12 zonas de enfriamiento mediano.

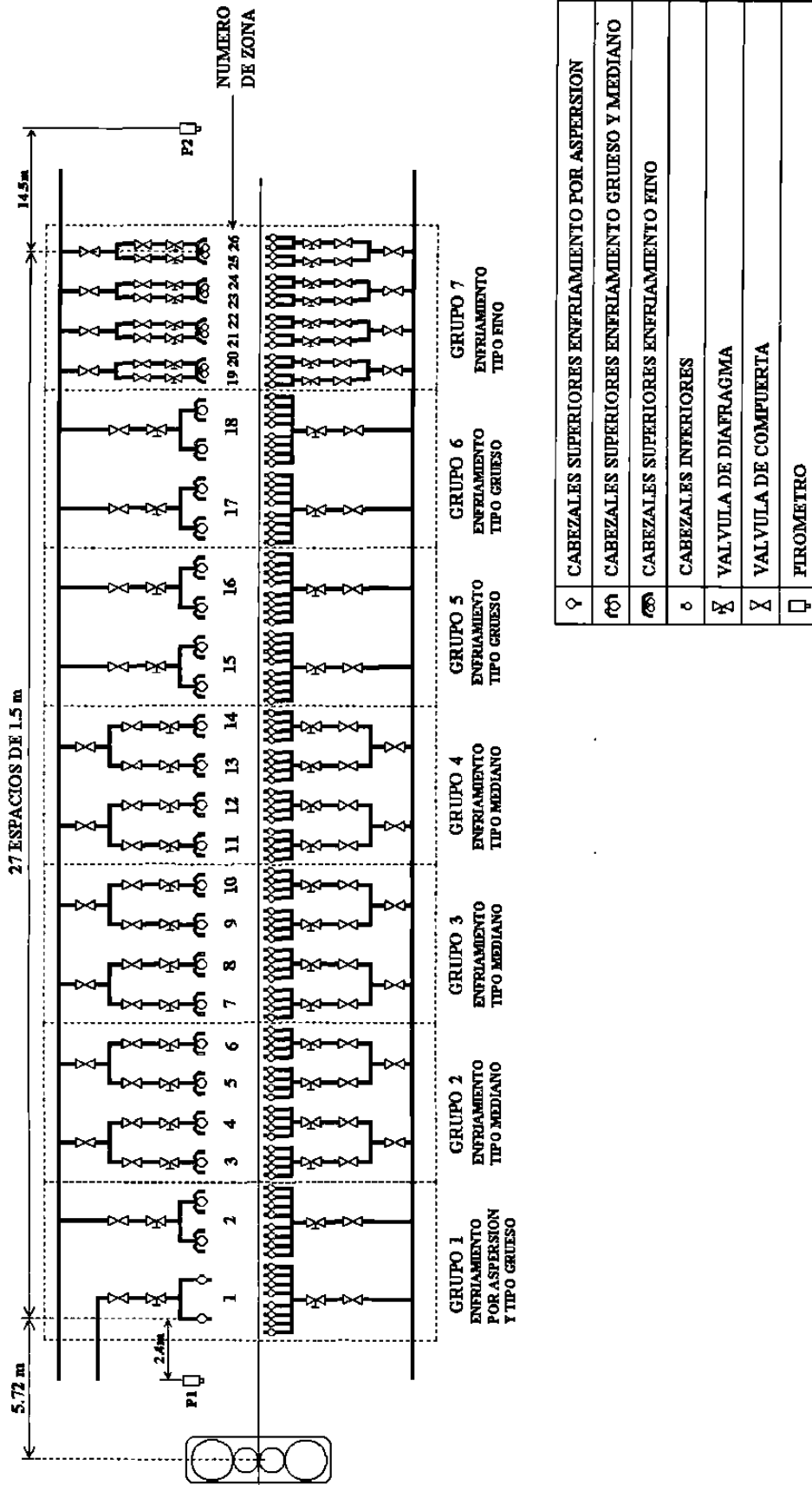


Figura 2.9. - Esquema de las válvulas que controlan la mesa de enfriamiento.

Fino: Este tipo de enfriamiento se lleva a cabo en las últimas 8 zonas y consiste de un cabezal superior y dos cabezales inferiores por zona; la capacidad de descarga de agua es la mitad de la del tipo mediano, el cabezal superior suministra $35 \text{ m}^3/\text{hr}$ de agua, mientras que el conjunto de cabezales inferiores suministran a la cinta $40 \text{ m}^3/\text{hr}$ de agua de enfriamiento², Figura 2.12. La mesa de salida cuenta con 8 zonas de enfriamiento fino.

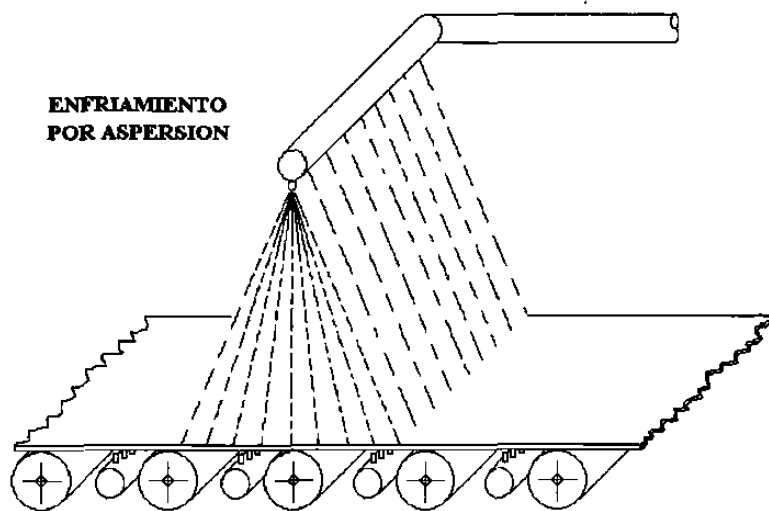


Figura 2.10.- Esquema de los cabezales para el enfriamiento por aspersión.

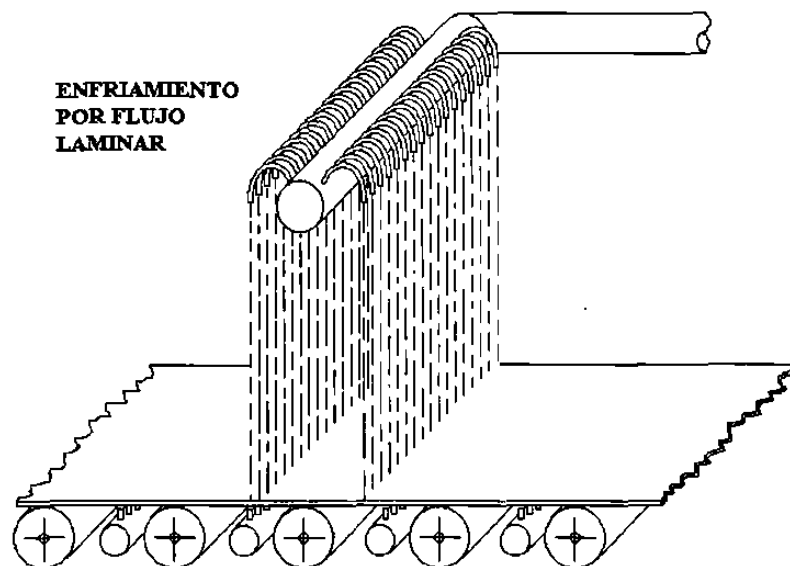


Figura 2.11.- Esquema de los cabezales para el enfriamiento grueso y mediano.

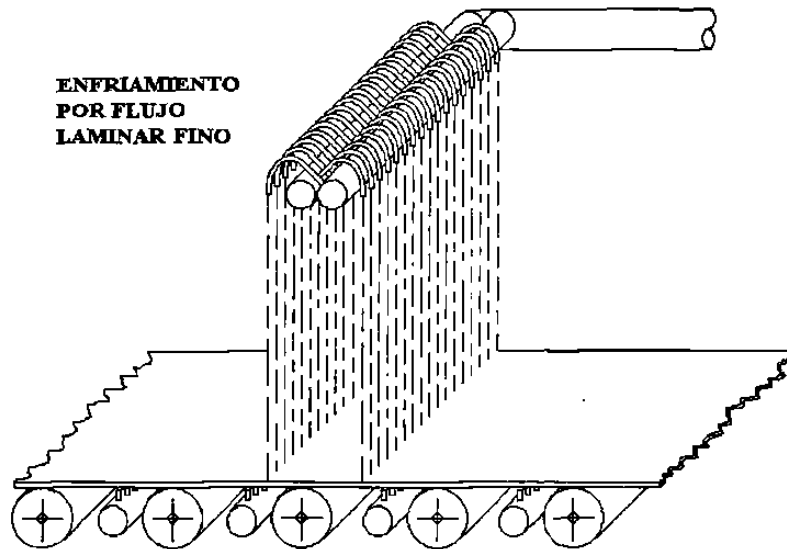


Figura 2.12.- Esquema de los cabezales para el enfriamiento fino.

Las zonas de enfriamiento están distribuidas de la siguiente manera: la zona 1 es del tipo aspersión, las zonas 2 y 15 a la 18 son del tipo grueso, las zonas 3 a la 14 son del tipo mediano y las zonas 19 a la 26 son del tipo fino, Figura 2.9. Esta diversidad de control debe permitir cumplir con $\pm 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ de variación². Las zonas de enfriamiento finas son usadas para el control de la temperatura.

La activación de las zonas de enfriamiento es realizada por un operador en forma manual, automática o semiautomática desde el pulpito de control del enrollador. El operador manda señales de control a válvulas solenoides que permiten o no el paso de aire a alta presión, el cual controla el estado (abierto/cerrado) de válvulas de diafragma que permiten o no el paso del agua de a través de los cabezales de las zonas de enfriamiento. Dicho control se tiene tanto para las 26 zonas de enfriamiento superiores, como para las 26 inferiores.

La temperatura de la cinta es medida en dos puntos, el primero esta entre el ultimo molino del tren de laminación y la primer zona de enfriamiento, y el segundo esta entre la última zona de enfriamiento y el enrollador. La operación y monitoreo de esta área se efectúa en el pulpito de control del enrollador, cabe añadir que una

válvula rociadora transversal deberá encontrarse antes y a ambos lados de cada punto de medición de temperatura para limpiar la cinta de agua u oxido y por lo tanto permitir la medición precisa de la temperatura real de la cinta.

Las boquillas de abajo o inferiores se localizan entre los huecos que existen entre los rodillos de la mesa de salida. Los cabezales de las zonas inferiores se pueden observar esquemáticamente en las Figuras 2.10, 2.11 y 2.12. Hay siete grupos de cabezales instalados, seis de ellos están constituidos por cuatro cabezales superiores y ocho inferiores (zonas medianas, gruesas y aspersion) y el octavo grupo por ocho superiores y ocho inferiores (zonas finas), Figura 2.9.

CAPITULO 3

TRANSFORMACION DE FASE DURANTE EL ENFRIAMIENTO

3.1 INTRODUCCION

De todas las características microestructurales exhibidas por los aceros laminados en caliente, ninguna es más importante que el tamaño de grano ferrítico. Esto es debido a que éste no solamente contribuye a la resistencia del acero, sino que también reduce la temperatura de transición dúctil-frágil⁴.

El tamaño de grano ferrítico en aceros microaleados laminados en caliente depende fuertemente de (1) la condición metalúrgica de la austenita antes de la transformación y (2) de la temperatura a la cual se forma la ferrita. El primer factor es normalmente determinado por el parámetro S_v el cual esencialmente da el número de sitios en la austenita en los cuales es posible nuclear a la ferrita. El segundo factor es, simplemente, la temperatura A_{r3} , la temperatura a la que inicia la transformación a ferrita durante el enfriamiento. El parámetro S_v es controlado por la composición del acero y el tratamiento termomecánico aplicado a la austenita. La temperatura A_{r3} también es controlada por estos factores y por la velocidad de enfriamiento en el intervalo de temperaturas de transformación⁴.

Desde una perspectiva metalúrgica, los nuevos aceros microaleados difieren de los anteriores aceros C-Mn-Si laminados en caliente en cuatro puntos importantes: (1) tienen un tamaño de grano ferrítico más fino, (2) son endurecidos por precipitación, (3) contienen mucho menos carbono y (4) exhiben un contenido de inclusiones no metálicas benéficas⁴. La alta resistencia de los aceros microaleados es debida al refinamiento de grano y precipitación. La mejorada resistencia a la fractura frágil es también un resultado del refinamiento de grano. Finalmente, desde que estos nuevos aceros son endurecidos por el tamaño de grano y por precipitación, no hay razón para que niveles apreciables de carbono estén presentes en estos aceros microaleados. Los bajos contenidos de carbono llevan a mejorar la soldabilidad⁴, facilitando los trabajos posteriores que se llevan a cabo cuando la lamina es usada como materia prima para la manufactura de otros productos.

3.2 FORMACION DE FERRITA

Bajo condiciones de equilibrio la ferrita proeutectoide será formada en aleaciones hierro-carbono que contienen hasta un 0.8% de carbono. La reacción ocurre a 910°C en hierro puro, pero tiene lugar entre los 910 y 723°C en aleaciones hierro-carbono, sin embargo la ferrita podrá ser formada a temperaturas inferiores a los 600°C por medio de un rápido enfriamiento de la austenita debajo de la temperatura eutectoide $Ae1^2$, Figura 3.1.

La transformación de austenita en ferrita proeutectoide se efectúa por medio de una reacción de nucleación y crecimiento, en la que la ferrita se genera de manera heterogénea sobre los defectos cristalinos que existen en la austenita en el punto de transformación.

El tamaño de grano ferrítico aparentemente depende de la composición química del acero, el procedimiento de laminación en caliente y la temperatura de

transformación. Se ha encontrado que el tamaño de grano ferrítico puede ser reducido por la adición de elementos microaleantes, por un decremento en la temperatura de laminación con incremento en la reducción y por una disminución de la temperatura de transformación a ferrita debido al incremento de la velocidad de enfriamiento⁴.

En resumen, el tamaño de grano ferrítico final puede ser fuertemente afectado por la composición del acero, la práctica de laminación empleada y la naturaleza del ciclo de enfriamiento usado después del proceso mecánico.

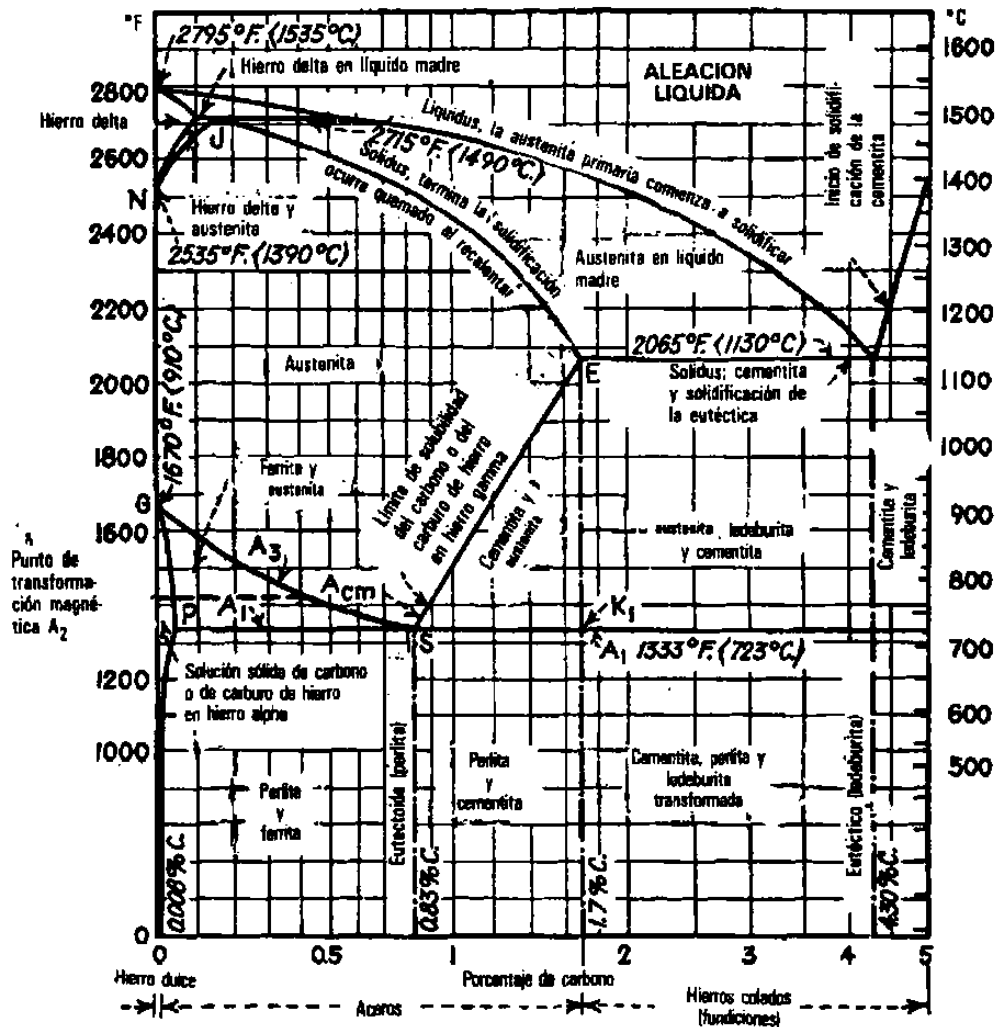


Figura 3.1.- Diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro¹².

3.3 MICROESTRUCTURA DE LA AUSTENITA LAMINADA EN CALIENTE

Desde que se ha mostrado que la microestructura de la austenita tiene un gran efecto en el comportamiento de la transformación, es benéfico revisar algunos de los parámetros que controlan la microestructura de la austenita laminada en caliente.

Una descripción metalúrgica completa del estado de la austenita antes de la transformación involucra su microestructura, composición y textura. La microestructura puede ser descrita en detalle comenzando con la del grano, la cual es de gran importancia debido a que ésta dicta la densidad de los sitios de nucleación de la ferrita. La austenita puede existir en una variedad de condiciones desde no recristalizada hasta completamente recristalizada pasando por una gran gama de estados intermedios. Cuando la austenita está completamente recristalizada, su tamaño de grano puede ser caracterizado por el diámetro promedio. De todas maneras, un parámetro más general es el tamaño de grano efectivo S_v (que representa la relación superficie y volumen de los granos), para cuantificar los granos elongados no equiaxiales, tanto como la presencia de heterogeneidades intergranulares como bandas de deformación y maclas. De manera que una estructura de grano austenítica con un S_v grande tendrá una gran capacidad de nucleación de los productos de transformación a alta temperatura. Esta microestructura austenítica entonces exhibirá la habilidad para generar una microestructura ferrita-perlita final muy fina⁵, como se muestra en la Figura 3.2.

La austenita con un S_v bajo después de la deformación tendrá relativamente, pocos sitios para la nucleación de la ferrita y la perlita y exhibirá una estructura final gruesa. Grandes valores de S_v pueden ser logrados con deformaciones severas o granos elongados, o con granos equiaxiales muy finos⁵.

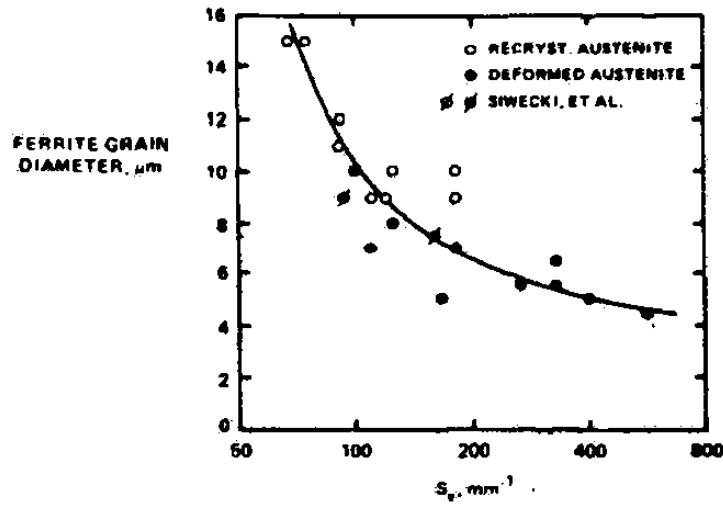


Figura 3.2.- Tamaños de grano ferrítico formados a partir de austenita recristalizada y no recristalizada a varios valores de S_p .

El efecto más importante de los elementos microaleantes, como el Nb, Ti y V, es el control de la temperatura de recristalización de la austenita⁵, Figura 3.3. En este contexto el objetivo usual es tener una combinación de procesos para que este fenómeno (la recristalización) no se presente, para permitir la acumulación de tanta deformación como sea posible, es decir, el mayor número de pases de laminación que se den por debajo de la temperatura de recristalización.

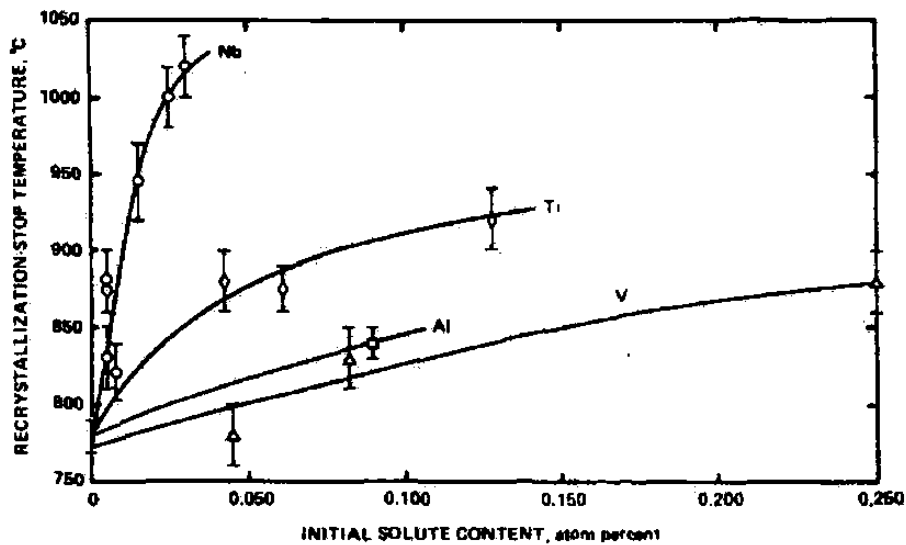


Figura 3.3.- Efecto de algunos aleantes en la temperatura de fin de recristalización⁵.

El niobio tiene el efecto más profundo en cuanto al incremento de la temperatura de no recristalización⁵, y ésto lo hace ser seleccionado como el principal elemento microaleante en los modernos aceros HSLA (High Strength Low Alloy), donde la resistencia y la tenacidad son los requerimientos principales. Las altas temperaturas de recristalización en los aceros que tienen Nb llevan a grandes deformaciones siendo aplicadas a la austenita durante el procesamiento por debajo de esta temperatura. Esto, por supuesto, lleva a grandes valores de S_v , como se muestra en la Figura 3.4.

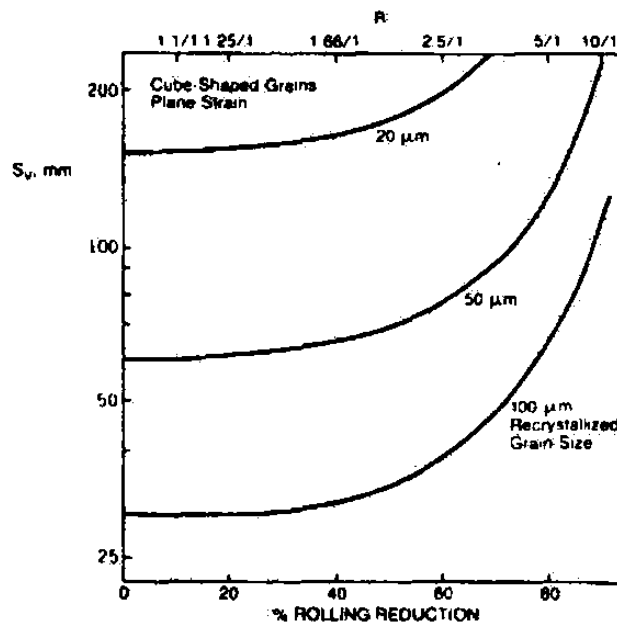


Figura 3.4.- Efecto del proceso de laminado sobre S_v en granos de austenita⁵.

3.4 REFINAMIENTO DEL GRANO FERRITICO

El refinamiento del grano ferrítico puede ser relacionado a tres parámetros principales: a) la composición del acero, b) los parámetros de temperatura y reducción en la transformación y c) la temperatura de transformación de austenita a ferrita.

3.4.1 Importancia de Sv en el refinamiento del grano ferrítico

El parámetro Sv tiene unidades de mm^{-1} o área equivalente (mm^2) por unidad de volumen (mm^3). Sv cuantifica el número de sitios en la austenita termomecánicamente procesada para la nucleación potencial de ferrita. El potencial de una dada microestructura austenítica trabajada en caliente para nuclear granos de ferrita puede ser relacionada con la magnitud de Sv, la cual puede también caracterizar la microestructura austenítica.

Si el trabajado en caliente se da por debajo de la temperatura de recristalización, entonces los granos de austenita se elongarán y, a una deformación suficientemente grande, se llenarán con defectos intergranulares tales como bandas de deformación y maclas, dando como resultado altos valores de Sv (área por unidad de volumen)⁴, como se muestra en la Figura 3.5.

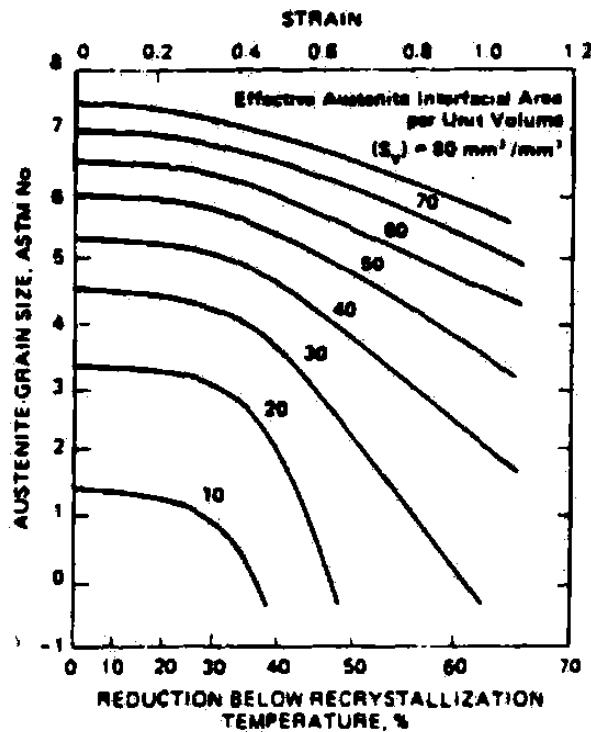


Figura 3.5.- Variación de Sv con la deformación por debajo de la temperatura de recristalización⁴.

3.4.2 Importancia de A_{r3} en el refinamiento del grano ferrítico

Se ha reconocido que hay una reducción en el tamaño de grano ferrítico asociada con la disminución de las temperaturas a las cuales se presenta la transformación de austenita a ferrita⁴.

La manera más concisa de expresar esta variación de temperatura es usando la temperatura de inicio de transformación, A_{r3} . El subenfriamiento ΔT es definido por la diferencia entre las temperaturas A_{e3} y A_{r3} . Por lo tanto, para una temperatura A_{e3} dada, entre más baja sea la temperatura A_{r3} , mayor será ΔT . Dado que a mayores valores de ΔT se incrementa la velocidad de nucleación⁴, entonces se esperan mayores tasas de nucleación al reducirse la temperatura A_{r3} .

La adición de aleantes afecta fuertemente a la línea A_{r3} , pero A_{e3} no es muy influenciada por pequeñas adiciones de elementos en solución sólida tales como Mn, Ni y Cr. Por otro lado, para unas condiciones experimentales dadas, la temperatura A_{r3} se ha mostrado que es fuertemente reducida cuando elementos de este tipo están en solución en la austenita⁴.

Aunque la temperatura A_{r3} puede ser reducida por aleantes, ésta también puede disminuir, en un acero dado, con el aumento en la velocidad de enfriamiento⁴. La disminución por enfriamiento acelerado causa un incremento en el subenfriamiento con una tendencia a incrementar la velocidad de nucleación de la ferrita. Para un subenfriamiento dado, el número total de sitios posibles para nucleación observado se incrementará con la velocidad de enfriamiento⁴. El resultado neto es que la alta velocidad de enfriamiento puede llevar a tamaños de grano ferrítico más finos.

Aunque las adiciones de Ni y el enfriamiento acelerado bajan el valor de Ar_3 , el último es mucho más efectivo en la reducción del tamaño de grano ferrítico⁴, como se muestra en la Figura 3.6.

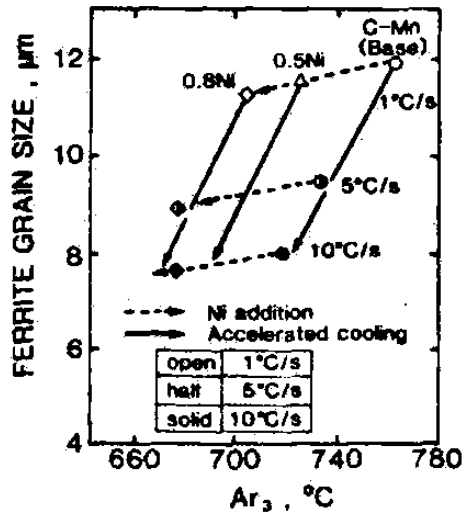


Figura 3.6.- Efecto del enfriamiento acelerado y contenido de Ni en el tamaño de grano ferrítico transformado a partir de austenita deformada no recristalizada⁴.

En resumen, los factores que controlan el tamaño de grano ferrítico son muchos y variados. Sin embargo, mucha, si es que la mayoría de la complejidad puede ser reducida considerando como la composición del acero, el proceso termomecánico y el enfriamiento pueden afectar el valor de S_v de la austenita y la temperatura Ar_3 . En general, se ha encontrado que mayores valores de S_v y menores valores de temperatura Ar_3 son asociados con tamaños de grano ferrítico finos. La Figura 3.7 es una ilustración esquemática que muestra algunas de las interrelaciones de interés.

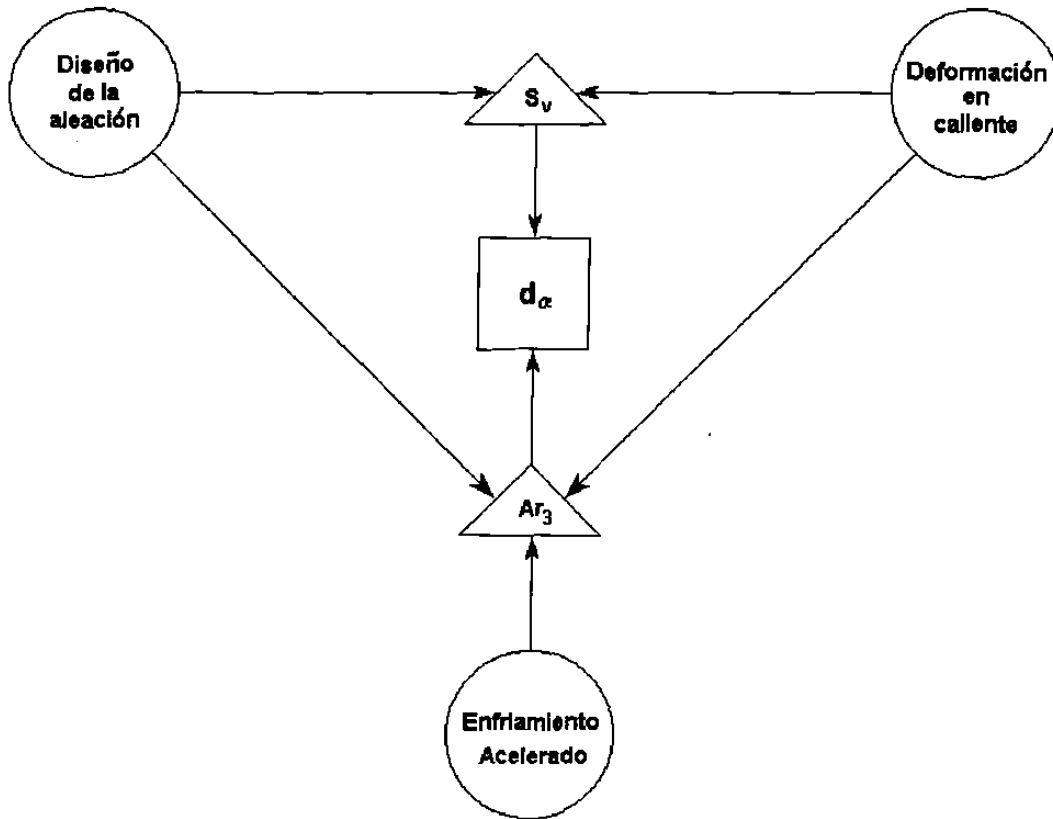


Figura 3.7.- Ilustración esquemática de la interacción de varios parámetros que controlan el tamaño de grano ferrítico en aceros microaleados procesados termomecánicamente⁴.

3.5 ANTECEDENTES DEL ENFRIAMIENTO ACELERADO

Antes del año 1962, el enfriamiento al aire era la forma de enfriamiento más rápida usada durante el procesamiento industrial de acero laminado en caliente⁵. Por ejemplo, la lámina trabajada en caliente era enfriada al aire en la mesa de salida y después enrollada. A partir de que las propiedades de los rollos de acero son mejoradas bajando las temperaturas de enrollado, la producción de alta tecnología de estos productos fue requiriendo mesas de salida más largas.

La primera aplicación del enfriamiento acelerado ocurrió en un molino de lámina en caliente en Brinsworth, Reino Unido en 1962⁵. El uso de enfriamiento de lámina caliente por aspersión de agua permitió que se obtuvieran bajas temperaturas de enrollado con mesas de salida relativamente cortas. Tal vez éste es el primer ejemplo en que el enfriamiento acelerado fue usado para mejorar la estructura y las propiedades de un producto comercial.

En los primeros días del enfriamiento acelerado, de 1962 a 1970, éste fue usado exclusivamente en molinos calientes de lámina⁵, principalmente para reducir la longitud de la mesa de salida ya que se requerían bajas temperaturas de enrollado. Los beneficios inesperados derivados de los usos iniciales del enfriamiento acelerado dieron lugar a la investigación y desarrollo en esa área, lo que continúa actualmente.

3.6 ENFRIAMIENTO ACELERADO

El proceso de enfriamiento acelerado en su forma más simple, es justamente un ciclo de enfriamiento con agua que baja la temperatura del acero desde la temperatura final de laminación hasta la temperatura requerida. Dado que las propiedades físicas y mecánicas requeridas varían con cada tipo de producto, el uso específico del enfriamiento acelerado para mejorar las propiedades dependerá de la aplicación del producto.

Algunos de los beneficios asociados con el enfriamiento acelerado de productos planos son los siguientes⁵:

- (a) Incremento de la resistencia en rollos de lámina de acero microaleado.
- (b) Mejor formabilidad en rollos de lámina .
- (c) Alta resistencia en productos planos sin deteriorar la tenacidad.
- (d) Mejor soldabilidad de productos planos sin sacrificio en otras propiedades físicas y mecánicas.

La aplicación del enfriamiento acelerado en la producción en caliente de rollos de lámina resulta en menores temperaturas de enrollado. Esto es un beneficio en lámina con alta resistencia desde que el enfriamiento acelerado y las bajas temperaturas de enrollado resultan en la formación de tamaños de grano ferrítico y precipitados finos y menos engrosamiento durante el enfriamiento lento del rollo⁵.

El enfriamiento acelerado de acero ha llevado a mejores refinamientos de grano ferrítico, mayor endurecimiento por deformación, resistencia adicional causada por la bainita finamente dispersada en la matriz ferrítica y por lo tanto mayores niveles de resistencia. El tamaño de grano más fino y el reemplazo de perlita gruesa por granos finos de bainita dispersada contribuyen a mantener una alta resistencia a la fractura frágil. Una ventaja adicional del enfriamiento acelerado es que el mismo nivel de dureza se puede conseguir con menos aleantes. Esto no solamente trae bajos costos de los aceros, sino que también permite aceros con bajos valores de carbono equivalente, por lo tanto una mejoría en la soldabilidad⁵.

Es claro que la combinación de buenas condiciones de austenita y enfriamiento acelerado ha llevado a importantes mejorías en los productos de lámina. Austenita con buenas condiciones significa, en el sentido más general, que el Sv ha sido maximizado durante el trabajado en caliente.

Así como la temperatura de transformación decrece como resultado del enfriamiento acelerado, la austenita que no se ha transformado a ferrita se transformará a bainita, bajo ciertas condiciones⁵.

Parece que hay dos grandes cambios en la microestructura final cuando la velocidad de enfriamiento se incrementa en un dado acero. Primero se tendrá menos ferrita y perlita y más bainita conforme se incrementa la velocidad de enfriamiento y, segundo, las características microestructurales estarán presentes en una escala más fina⁵, como se muestra en la Figura 3.8.

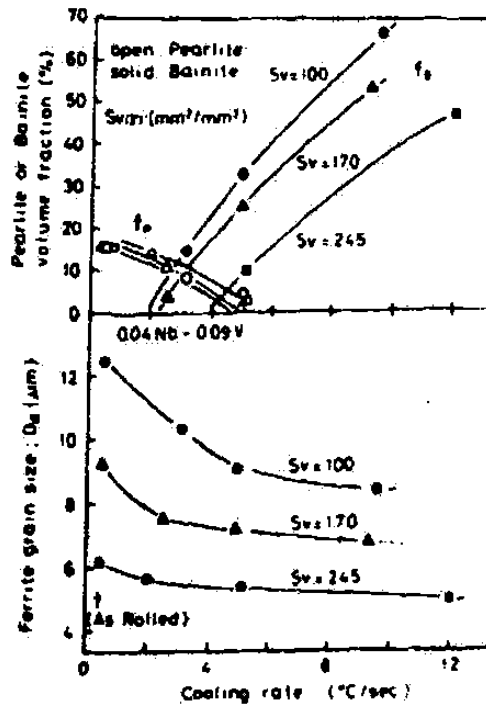


Figura 3.8.- Cambios de microestructura con la velocidad de enfriamiento después del laminado en un acero con 0.1%C-1.5%Mn-0.04%Nb-0.09%V⁵.

El cambio más obvio causado por el enfriamiento acelerado es que el reemplazo de la microestructura ferrita-perlita (80%F + 20%P) por una de ferrita bainita (50%F + 50%B). Al parecer hay por lo menos cuatro mecanismos que explican el incremento en resistencia en aceros enfriados aceleradamente⁵:

- (1) La formación de una fina dispersión de bainita.
- (2) Un refinamiento significativo del grano ferrítico.
- (3) Endurecimiento por precipitación más efectivo.
- (4) Mayores densidades de dislocaciones en la ferrita.

El enfriamiento acelerado causa que la formación de ferrita ocurra a menores temperaturas. El tamaño de grano ferrítico final depende de las velocidades de nucleación, crecimiento y engrosamiento. La velocidad de nucleación de la ferrita es controlada por el número de sitios de nucleación generados en los diversos sitios. El factor Sv es determinado por el estado de la austenita al tiempo de la transformación

(el grado de laminación controlada) y la velocidad de nucleación específica es determinada por la temperatura de transformación (el subenfriamiento)⁵.

Como la temperatura de transformación disminuye por el enfriamiento acelerado, tanto la ferrita y los precipitados que acompañan la transformación se forman en una escala más fina. Esto significa que los precipitados que se forman a temperaturas más bajas son dispersados más finamente y, por lo tanto, resultan en mayores incrementos en el endurecimiento por precipitación⁵.

La combinación de laminación controlada y enfriamiento acelerado ha llevado a mejorar la resistencia sin deteriorar la tenacidad a bajas temperaturas. Se ha atribuido la buena tenacidad a bajas temperaturas a dos factores en los aceros con estructura ferrita-bainita que han sido enfriados aceleradamente. El primero es, desde luego, debido al refinamiento del grano ferrítico. Es bien sabido que la resistencia a la fractura frágil se incrementa en gran medida por el refinamiento de grano. El segundo concierne a los productos de transformación a baja temperatura como la bainita que se forma con una distribución más fina y homogénea⁵.

CAPITULO 4

MODELACION MATEMATICA

4.1 INTRODUCCION

Este capítulo trata de la modelación matemática del enfriamiento de la cinta, por lo cual se comenzará con una revisión de los mecanismos básicos de transferencia de calor y las ecuaciones que los describen, pasando después a las bases, criterios y métodos utilizados para la realización de la modelación.

4.2 MODELACION Y SIMULACION

El uso de técnicas de modelación en el diseño de procesos industriales ha pasado de ser una mera curiosidad académica a formar parte de las técnicas y herramientas empleadas en diversas industrias y empresas. Los modelos desarrollados para ambientes industriales pueden ser utilizados en la solución de los siguientes problemas:

- Diseño de nuevos procesos o escalamiento de los disponibles.
- Reducción en el tiempo de evaluación y pruebas de nuevos productos o procesos.
- Optimización de un proceso para reducir costos y disminuir defectos.

- Mejora en la calidad del producto mediante la reducción de la variabilidad del proceso.

El desarrollo del modelo se basa en la abstracción o circunscripción de la entidad a estudiar, llámese fenómeno, proceso o sistema, discretizando dicha entidad en los módulos o unidades que se requieren para deducir con precisión las relaciones matemáticas que describen a cada módulo o unidad. Las ecuaciones así desarrolladas se ensamblan para componer al modelo completo, que es simulado en una computadora.

El esquema mencionado se muestra en la Figura 4.1 y tiene a su favor una serie de ventajas que se resumen en lo siguiente⁶:

- Minimiza la costosa experimentación en planta.
- Es 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 por lo mismo, permite su uso y extensión a situaciones similares.
- Permite predecir el comportamiento de procesos en condiciones no observadas o experimentadas.

Sin embargo este esquema adolece de una serie de desventajas que pueden surgir y entre las que se encuentran⁶:

- La elaboración de los modelos tiende a consumir mucho tiempo.
- El personal encargado de la elaboración de los modelos debe contar con conocimientos profundos de computación y del proceso mismo.
- Existe el riesgo de que el modelo no describa adecuadamente al proceso.
- Puede ser que el modelo resulte más complejo y sofisticado de lo que se requiere.

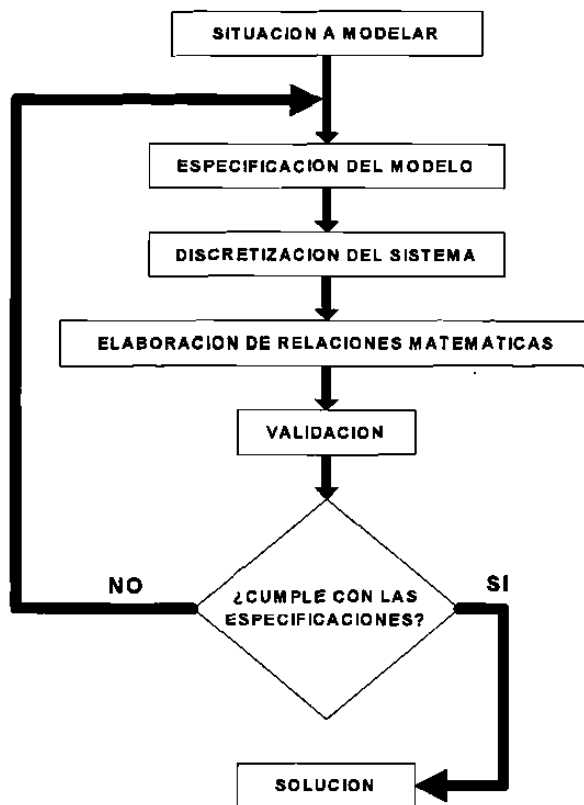


Figura 4.1.- Procedimiento usado en la elaboración de modelos de procesos⁶.

4.3 TRANSFERENCIA DE CALOR

Se reconoce al calor como la cantidad de energía que pasa de un cuerpo a otro en virtud de la diferencia de temperatura entre ellos. Hay tres mecanismos básicos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

4.3.1 Conducción

En el mecanismo de conducción la energía se transmite mediante el choque de los átomos y moléculas de un cuerpo a mayor temperatura, dado que su nivel de energía cinética es mayor, con las de un cuerpo a menor temperatura.

La cantidad de calor conducida a través de un material es proporcional al área de su sección transversal, al tiempo y a la diferencia de temperaturas a ambos lados de sus caras e inversamente proporcional a su espesor⁶:

$$\Delta Q = \frac{kA \Delta T \Delta t}{d} \quad (4.1)$$

donde ΔQ es la cantidad de calor, A es el área de la sección transversal, d es el espesor, ΔT la diferencia de temperaturas registrada a ambos lados del espesor, Δt el tiempo transcurrido y k la constante de proporcionalidad que se denomina conductividad térmica y es característica del material.

La conducción de calor dentro de un cuerpo se maneja en forma analítica de acuerdo a la ecuación propuesta por Fourier⁶:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \left[\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right] \quad (4.2)$$

donde x, y, z representan las coordenadas del cuerpo en un sistema cartesiano y α es la difusividad térmica expresada por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (4.3)$$

donde ρ es la densidad y c la capacidad calorífica del cuerpo.

4.3.2 Convección

La transferencia de calor se acelera en los fluidos (líquidos y gases), o en sólidos en contacto con éstos, al entrar en acción el mecanismo denominado convección. En este caso, las corrientes que se generan por cambios en la densidad del fluido, o cualquier otro factor externo, ponen material más frío o caliente en contacto con la superficie, lo que acelera el enfriamiento o calentamiento. La cantidad de calor que se transfiere por este mecanismo es proporcional a la superficie expuesta al fluido y a la diferencia entre el cuerpo y el medio⁶:

$$\Delta Q = h A \Delta T \Delta t \quad (4.4)$$

donde h es el denominado coeficiente de convección y depende del medio y de su temperatura.

4.3.3 Radiación

La mayor parte del calor que pierde un cuerpo que se encuentra a altas temperaturas no se transfiere ni por conducción, ni por convección, sino por radiación. La cantidad de calor que se transfiere en este caso es proporcional a la superficie radiante y a la diferencia de temperaturas, elevadas a la cuarta potencia, de la superficie del cuerpo y del medio que lo rodea⁶:

$$\Delta Q = \sigma \epsilon A (T_s^4 - T_o^4) \Delta t \quad (4.5)$$

donde T_s y T_o son las temperaturas de la superficie y del medio que lo rodea, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) y ϵ la emisividad de la superficie, que depende del material y de la temperatura.

4.4 MODELACION MATEMATICA

Un modelo matemático consiste en una serie de ecuaciones algebraicas o ecuaciones diferenciales que cuantitativamente representan un proceso, o algún aspecto de un proceso. La modelación ha probado ser muy efectiva para propósitos de diagnóstico, solución de problemas, mejora y optimización de procesos existentes y desarrollo de nuevos¹⁴.

En esta parte se muestra y se describe el sistema a modelar y las consideraciones hechas acerca de éste, además de las ecuaciones que describen la transferencia de calor a tres regímenes de enfriamiento presentes en el sistema.

4.4.1 Definición del sistema

El sistema a modelar está formado solamente por la lámina después de salir del molino continuo, y los alrededores del sistema son el aire del ambiente, el agua de enfriamiento, antes y después del contacto con la lámina, y una capa de vapor que se forma entre la lámina y el agua que queda sobre ésta. Para esta aproximación no se considera el flujo de calor hacia los rodillos, por el contacto con ellos.

En la Figura 4.2 se muestra un esquema del acercamiento de la lámina al ser impactada por los chorros de flujo laminar de agua tanto de los cabezales superiores como de los inferiores, observándose el sistema antes mencionado.

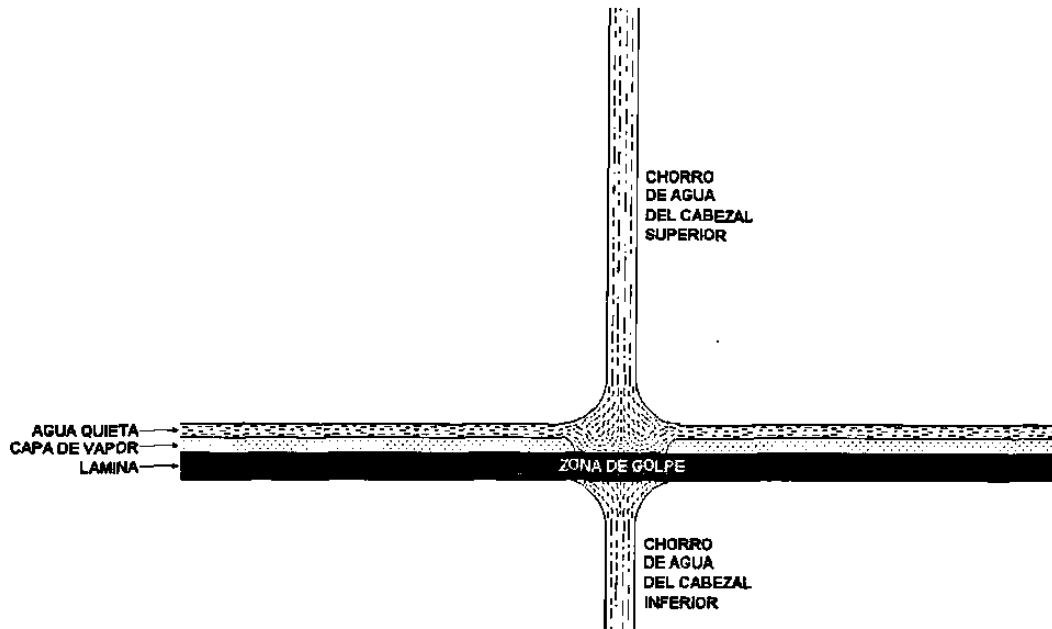


Figura 4.2.- Diagrama esquemático de la zona de golpe durante el enfriamiento acelerado con flujo laminar.

4.4.2 Regímenes de enfriamiento

Se supone que la transferencia de calor tiene tres velocidades o regímenes de enfriamiento diferentes en el sistema a estudiar, los cuales se presentan a continuación, con las ecuaciones que determinan el flujo de calor para cada uno de ellos:

(i) enfriamiento al aire, (h_a).

$$h_a = -6746 + 21.2T_s + 4.763 \cdot 10^{-8} (T_s + 273)^4 \text{ W/m}^2 \quad (4.6)$$

el cual ha sido determinado mediante experimentos de laboratorio⁷. T_s es la temperatura instantánea de la superficie en °C.

(ii) enfriamiento al agua bajo el ancho del impacto de la cortina (h_w).

$$h_w = KH_1 (T_s - T_w) \text{ W/ m}^2 \quad (4.7)$$

donde T_w es la temperatura inicial del agua en °C (la cual se supone que no cambia), H_1 es el coeficiente de transferencia de calor que es desconocido y K es un factor de eficiencia del enfriamiento del agua que ha sido determinado por pruebas experimentales⁷. El ancho del impacto del agua también es incierto y se supone que es de 2 a 3 veces el ancho del agua justo antes del impacto⁷. El cambio de este ancho es el método como se controlan los diferentes flujos en el cabezal.

(iii) enfriamiento bajo agua quieta. La Ec. (4.7) es usada de nuevo con H_1 reemplazado por un valor H_2 mucho más bajo, el cual se supone que es constante sobre la distancia desde el límite de la zona de impacto y hasta el punto en el cual el agua es removida.

Se supone que el valor mucho más bajo de H_2 es debido a la capa aislante de vapor entre el agua y la lámina o placa, Figura 4.2.

La secuencia típica para el enfriamiento en la cara superior es la siguiente:

(i), (iii), (ii), (iii).....(iii), (i)

en tanto que la cara inferior de la lámina estará enfriada según:

(i), (ii), (i),...

con los intervalos de tiempo para cada tipo de enfriamiento determinados a partir de la geometría del sistema de enfriamiento⁶. En la Figura 4.2 se muestra un esquema donde se observan las zonas que representan dos de los regímenes de enfriamiento, en la zona de golpe o de impacto y enfriamiento bajo agua quieta.

4.5 FORMULACION NUMERICA

La Ec. (4.2) no es integrable directamente, puesto que la difusividad térmica depende de la temperatura, pero su solución puede ser aproximada por medio de técnicas numéricas, de las que el método de diferencias finitas es un ejemplo⁶.

Se puede considerar el caso bidimensional en el estado estacionario de una placa de espesor unitario, tal que la ecuación (4.2) se transforme a:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} = 0 \quad (4.8)$$

Si se toma un cuerpo dividido en m nodos o elementos de dimensiones $\delta x \cdot \delta y \cdot 1$, (como se muestra en la Figura 4.3), la solución de la Ec. (4.8) por diferencias finitas en la posición a estará dada por⁶:

$$\frac{T_b - 2T_a + T_c}{(\delta x)^2} + \frac{T_d - 2T_a + T_e}{(\delta y)^2} = 0 \quad (4.9)$$

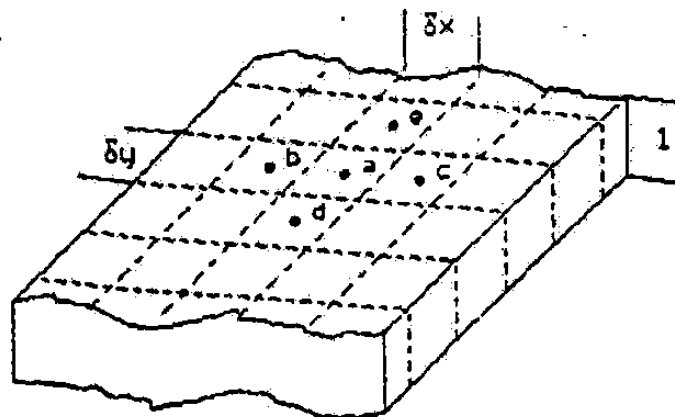


Figura 4.3.- División de un cuerpo en m elementos.

En el estado no estacionario, el cambio de la temperatura con respecto al tiempo ($\partial T/\partial t$) puede ser aproximado a⁶:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_a^* - T_a}{\Delta t} \quad (4.10)$$

donde T_a^* es la temperatura en el nodo a una vez que el intervalo de tiempo Δt ha transcurrido.

Se pueden plantear dos esquemas para la solución de un problema de transferencia de calor por el método de diferencias finitas. El primero, llamado explícito, calcula la temperatura futura de un nodo en particular en base a las temperaturas de los nodos vecinos⁶:

$$\frac{T_a^* - T_a}{\Delta t} = \alpha \left[\frac{T_b - 2T_a + T_c}{(\delta x)^2} + \frac{T_d - 2T_a + T_e}{(\delta y)^2} \right] \quad (4.11)$$

El segundo esquema, denominado implícito, calcula la temperatura futura de un nodo en particular en base a las temperaturas futuras de los nodos vecinos⁶:

$$\frac{T_a^* - T_a}{\Delta t} = \alpha \left[\frac{T_b^* - 2T_a^* + T_c^*}{(\delta x)^2} + \frac{T_d^* - 2T_a^* + T_e^*}{(\delta y)^2} \right] \quad (4.12)$$

donde los términos con el asterisco indican las temperaturas al término del intervalo de tiempo.

El uso de uno u otro esquema depende mucho de la capacidad computacional con que se cuente, puesto que el primero puede realizar los cálculos nodo por nodo, en tanto que el segundo requiere de la solución del sistema de ecuaciones, similares a la Ec. (4.12), con tantas incógnitas como nodos se tienen.

Por otro lado, el esquema implícito tiene la ventaja de no depender tanto de un criterio de estabilidad, cuyo sentido físico es el de asegurar que el gradiente térmico no penetra más allá de un nodo en un dado intervalo, lo que incrementa el número de iteraciones necesarias⁶ y, por ende, el tiempo computacional requerido para resolver un problema planteado siguiendo el esquema explícito.

CAPITULO 5

TOMA DE DATOS EN LA PLANTA

5.1 INTRODUCCION

En este capítulo se describen las actividades realizadas en la línea de laminación en caliente concernientes al conocimiento del funcionamiento de la línea de laminación y a la captura de información necesaria para la modelación.

5.2 CONOCIMIENTO DE LA PLANTA

Para conocer la línea se procede a entender a detalle el funcionamiento y los componentes de la mesa de enfriamiento, que es en donde se realiza el trabajo de modelación. Se estudió, mediante el manual de procesos de la planta, la teoría relacionada a la mesa de enfriamiento para facilitar su conocimiento físicamente. El estudio del manual de procesos también sirve para observar si han habido cambios en la mesa, encontrando que el único cambio está relacionado con el funcionamiento y no en equipamiento, ya que los flujos de agua entregados por los cabezales de enfriamiento medidos resultaron diferentes a los indicados en el manual (Tabla 5.1), por lo que se tuvieron que ajustar lo mas cercano posible a los valores indicados como nominales en el manual de procesos, Tabla 5.2.

Cabezales Superiores			Cabezales Inferiores		
Zona	Medición (m ³ /hr)	Manual (m ³ /hr)	Zona	Medición (m ³ /hr)	Manual (m ³ /hr)
1	139	120	1	125	160
2	188	140	2	88	160
3	79	70	3	63	80
4	79	70	4	64	80
5	85	70	5	39	80
6	65	70	6	49	80
7	78	70	7	55	80
8	68	70	8	48	80
9	80	70	9	57	80
10	88	70	10	53	80
11	79	70	11	43	80
12	82	70	12	43	80
13	90	70	13	42	80
14	90	70	14	62	80
15	185	140	15	96	160
16	205	140	16	138	160
17	190	140	17	180	160
18	270	140	18	104	160
19	36	35	19	26	40
20	69	35	20	30	40
21	70	35	21	31	40
22	42	35	22	31	40
23	54	35	23	27	40
24	46	35	24	29	40
25	72	35	25	32	40
26	87	35	26	24	40

Tabla 5.1.- Comparación de flujos de agua de los cabezales de enfriamiento medidos contra los indicados en el manual de procesos.

Cabezales Superiores			Cabezales Inferiores		
Zona	Medición (m ³ /hr)	Manual (m ³ /hr)	Zona	Medición (m ³ /hr)	Manual (m ³ /hr)
1	117	120	1	0	160
2	140	140	2	161	160
3	71	70	3	80	80
4	71	70	4	81	80
5	69	70	5	79	80
6	70	70	6	81	80
7	71	70	7	80	80
8	71	70	8	80	80
9	70	70	9	81	80
10	70	70	10	81	80
11	70	70	11	80	80
12	70	70	12	81	80
13	69	70	13	81	80
14	71	70	14	79	80
15	139	140	15	159	160
16	142	140	16	160	160
17	140	140	17	164	160
18	140	140	18	159	160
19	36	35	19	39	40
20	34	35	20	40	40
21	35	35	21	43	40
22	35	35	22	41	40
23	34	35	23	42	40
24	35	35	24	41	40
25	35	35	25	41	40
26	34	35	26	40	40

Tabla 5.2.- Comparación de flujos de agua de los cabezales de enfriamiento ajustados contra los indicados en el manual de procesos.

5.3 LEVANTAMIENTO FISICO DE LA MESA DE SALIDA

Se realiza un levantamiento físico de la mesa de salida, obteniendo las distancias que se requieren conocer para la modelación. Estas distancias incluyen las que existen entre cabezales, tanto superiores como inferiores, entre el pirómetro a la salida del tren de laminación y el primer cabezal de la mesa de enfriamiento, la distancia entre el último cabezal y el pirómetro colocado antes del enrollador, el espacio existente entre el último molino y el primer cabezal, la distancia entre el último cabezal y el enrollador, etc.

Como parte del conocimiento de la planta y del levantamiento físico se revisa el control de las diferentes zonas de enfriamiento, el número y modo de activación de las válvulas. Esto se puede observar en la Figura 2.9, que es un esquema de la mesa de enfriamiento y de las válvulas que operan ahí.

5.4 VARIABLES DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO

Para realizar la modelación del enfriamiento en la mesa de salida se requiere información de diversas variables del proceso que se listan a continuación:

- 1.- Tipo de acero.
- 2.- Espesor de la cinta.
- 3.- Ancho de la cinta.
- 3.- Temperatura de acabado.
- 4.- Temperatura de enrollado.
- 5.- Temperatura del agua de enfriamiento.
- 6.- Estado de las zonas de enfriamiento durante el enfriamiento (abierta/cerrada).
- 7.- Velocidad de la lámina.

Las variables de la lista anterior se almacenan en una base de datos después de que la cinta ha sido procesada, siendo posible acceder a la información del rollo que se desee. Esta información se puede obtener a través de la red interna de la planta, resultando en archivos que pueden ser manejados como base de datos en EXCEL. . Unos ejemplos de esta base de datos se muestran en las Tabla 5.2. Sin embargo, había un inconveniente, ya que aunque se conociera el estado de las zonas de enfriamiento (abierta/cerrada), no se conocía con certeza el flujo que estaban entregando dichas zonas, debido a que no había ningún tipo de instrumentación permanente que midiera dicha variable, que es un factor muy importante en la modelación, ya que éste va a determinar el ancho de la zona de impacto del agua con la lámina, siendo ahí donde el acero pierde la mayor cantidad de calor.

Para conocer el flujo entregado por las zonas de enfriamiento se utiliza un flujómetro de ultrasonido el cual requiere ser colocado exteriormente en la tubería que alimentaba la zona a la que se le desea medir el flujo, teniendo que cumplir con ciertos requisitos como distancias adecuadas entre el captador de señal y elementos de la tubería como codos o válvulas antes y después, esto para evitar turbulencias que afectan la medición, también se requiere una cierta preparación sobre la tubería en la zona donde se coloca el captador para asegurar continuidad de sólido entre el flujo de agua y el captador, por lo que hay que eliminar con lija o pulidor las posibles irregularidades que pudieran existir entre el material de la tubería y alguna capa de óxido o pintura mal aplicada. También fue importante cuidar una correcta colocación del captador sobre la tubería utilizando grasa en el área de contacto ya que la medición de flujo requiere un medio continuo. Para lo anterior también es necesario que la tubería este llena al 100% en su sección transversal, ya que de no cumplirse con esta condición, no se presentan lecturas en el aparato de medición.

ROLLO	PROC	ACERO	CAL	ANCHO	T. ACAB	T. ENR	VEL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26				
220700	39	7061	2.16	1258	876	714	11.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
220701	4	7061	1.56	1220	851	625	11.73	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
220702	39	7061	2.16	1258	873	715	11.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
220703	4	7061	1.56	1220	858	625	11.73	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
220704	4	7061	1.56	1220	855	622	11.73	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
220705	39	7061	2.16	1258	870	713	11.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
220706	4	7061	1.56	1220	855	627	11.73	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
220707	39	7061	2.03	1258	865	711	11.28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
220708	57	7061	2.54	1258	878	583	9.11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
220709	58	7061	1.1	1220	879	674	3.11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
220710	57	7061	2.66	1258	865	548	8.77	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
220711	4	7061	1.56	1220	860	588	11.73	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
220712	4	7061	1.56	1220	851	665	11.73	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
220713	39	7061	2.03	1258	866	732	11.28	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
220714	4	7061	1.56	1220	854	624	11.73	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220715	57	7061	2.54	1258	863	738	9.45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220716	4	7061	1.56	1220	851	821	11.73	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220717	4	7061	1.56	1220	828	686	11.73	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
220718	4	7061	1.56	1220	853	689	11.73	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
220719	4	7061	1.56	1220	831	692	11.73	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
220720	4	7061	1.56	1220	868	641	11.73	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
220721	4	7061	1.56	1220	868	745	11.73	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
220722	4	7061	1.56	1220	882	616	11.73	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220723	4	7061	1.56	1220	879	823	11.73	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220724	4	3083	3.42	1220	880	609	6.55	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220725	4	7061	1.56	1220	868	611	11.73	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220726	4	3083	3.42	1195	885	609	7.04	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220727	4	7061	1.56	1220	871	605	11.73	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220728	4	3083	5.21	1168	906	638	6.23	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220729	58	2060	3.42	1220	877	649	7.51	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220730	72	3083	5.21	1169	873	588	4.95	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 5.3.- Ejemplo de la información obtenida de la planta de laminación, con valores de las variables de interés bajo las que se procesaron varios rollos de lámina.

CPITULO 6

RESULTADOS

6.1 INTRODUCCION

En el presente capítulo se muestra el programa utilizado para la simulación del enfriamiento de cinta de acero laminada en caliente, además de la validación de los resultados que se obtuvieron con éste, aclarando las principales suposiciones tomadas para la modelación.

6.2 SIMULACION DEL ENFRIAMIENTO

Se utiliza un programa escrito en TURBO PASCAL para poder acceder fácilmente la variables del proceso y también para presentar más claramente los resultados del modelo de enfriamiento. Este programa está hecho para poder correrse en computadoras personales .

El programa toma información de archivos tipo texto, como por ejemplo, los valores de los coeficientes de transferencia de calor de las diferentes zonas, y consta de tres pantallas principales, una para referir la unidad y el directorio en donde se encuentra la información auxiliar tipo texto, otra para accesar el valor de las variables y las condiciones que se desean simular, y la última para observar las

curvas de evolución térmica y las temperaturas resultantes del enfriamiento, en diferentes puntos de la sección transversal de la lámina. Cada una se explica más a detalle a continuación:

Primer pantalla: en esta primer pantalla se seleccionara, dirigiendo el cursor o flecha del *mouse* y pulsando el botón izquierdo, para indicar en que unidad se encuentra la información de los archivos tipo texto de los cuales el programa toma valores como los coeficientes de transferencia de calor. Ya que se seleccionó la unidad o el *drive* donde está la información, se escribe el nombre del directorio en el que están los archivos y, al terminar, se presiona la tecla *Enter* y para pasar a la siguiente pantalla se presiona el botón derecho del *mouse* y nuevamente *Enter*. En la Figura 6.1 se muestra un ejemplo de esta primer pantalla.

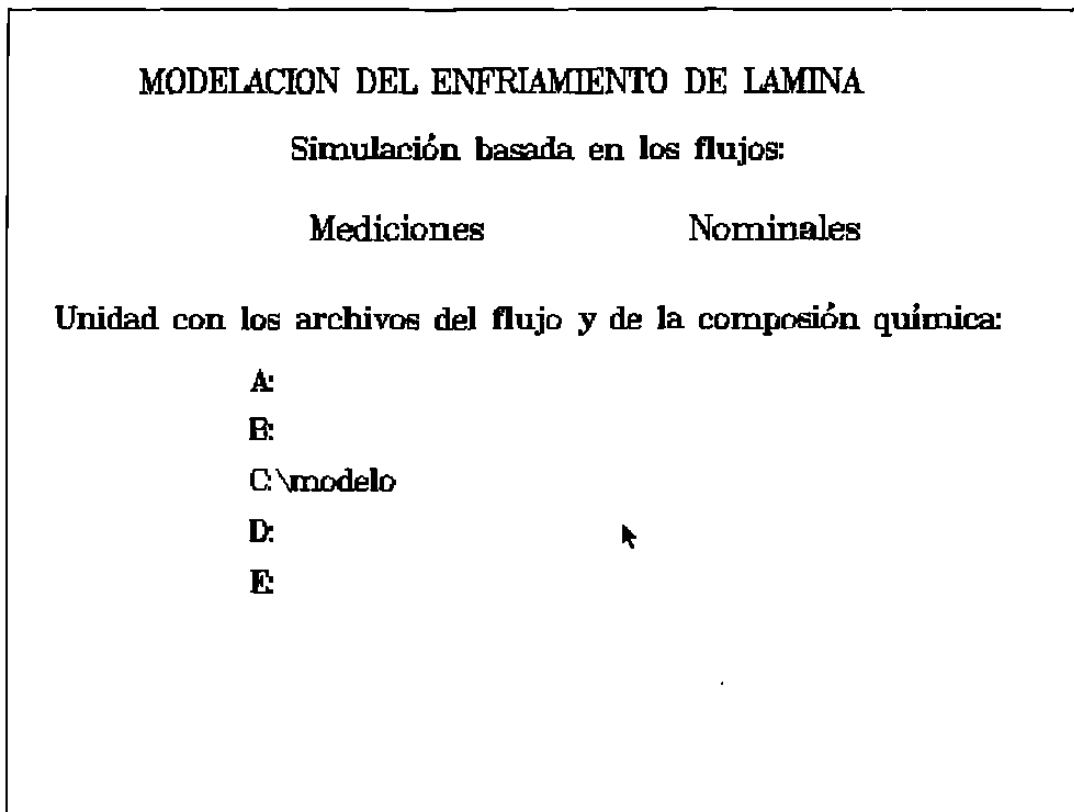


Figura 6.1.- Primer pantalla del programa para la simulación del enfriamiento.

Segunda pantalla: en ésta, lo que se hace es introducir la información, según las condiciones que se deseen modelar, es decir, los valores de las variables principales de las que depende la evolución térmica de la lámina cuando es enfriada en la mesa de salida. Estas variables son el espesor de la lámina, el ancho, la velocidad, el tipo de acero, el contenido en porcentaje de sus componentes, la temperatura superficial al centro, la temperatura a la orilla o también la diferencia entre las temperaturas al centro y a la orilla de la lámina. También se pueden introducir la temperatura del agua, el flujo de agua que entrega cada cabezal y el estado abierto o cerrado de las zonas de enfriamiento. Para acceder los valores deseados hay que colocar el cursor o la flecha del *mouse* sobre los valores ya existentes, ya que el programa comienza con algunos valores iniciales, después presionar el botón izquierdo del *mouse* para desaparecer el valor anterior y teclear el nuevo y, por último, pulsar *Enter*. Para seleccionar las zonas que estarán abiertas en la simulación del enfriamiento, se coloca la flecha del *mouse* sobre el círculo que representa el cabezal de perfil en el diagrama de la mesa de enfriamiento en esta pantalla y se presiona el botón izquierdo para activar o desactivar el cabezal según este se encuentre desactivado o activado. Y por último para cambiar el valor del flujo de agua que entregan los cabezales, se posiciona el cursor del *mouse* sobre el círculo que se encuentra arriba (para los cabezales superiores) y abajo (para los cabezales inferiores) del círculo que representa los cabezales vistos de perfil, se presiona el botón izquierdo del *mouse*, se teclea el nuevo valor de flujo y se presiona *Enter*. Y para ver el valor de flujo que tienen los cabezales en ese momento, se coloca el cursor del *mouse* sobre la línea que en el diagrama representa el chorro de agua y se presiona el botón izquierdo. Además en esta pantalla se muestran dos gráficas, una indicando el nivel relativo de flujo de agua entre las diferentes zonas de enfriamiento y otra que muestra el perfil inicial de la temperatura en la superficie superior de la lámina, sólo en la mitad del ancho, ya que dicho perfil se considera simétrico. En la Figura 6.2 se muestra esta segunda pantalla.

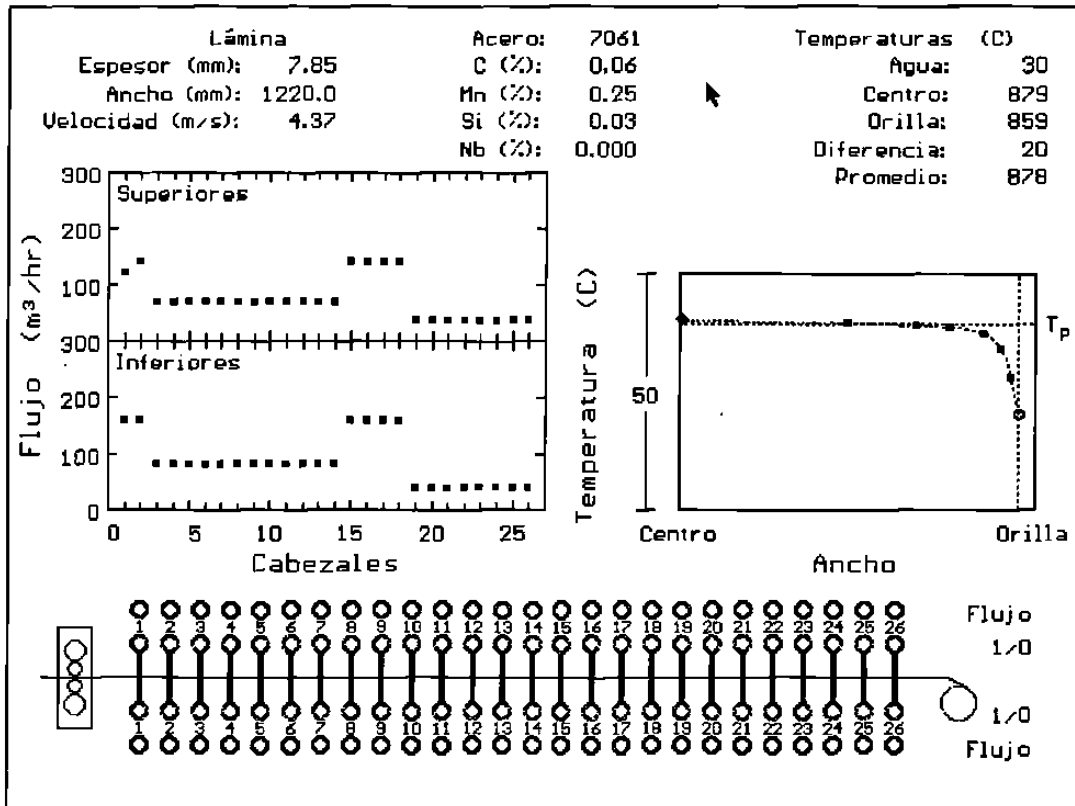


Figura 6.2.- Segunda pantalla del programa para la simulación del enfriamiento.

Tercer pantalla: En esta última pantalla se observa como cambia la temperatura con respecto al tiempo en seis diferentes puntos de la sección transversal de la lámina. Además se presenta un esquema de la mesa de salida, mostrando los cabezales que están abiertos y aplicando agua a la lámina la cual también se observa durante su recorrido por la mesa. También se muestran en esta pantalla los valores iniciales y finales en los seis puntos antes mencionados, así como también las temperaturas superficial y promedio al centro de la lámina en el momento en que pasan por los pirómetros, cuyos valores son las referencias de la modelación. En la Figura 6.3 se muestra esta tercer pantalla.

145408

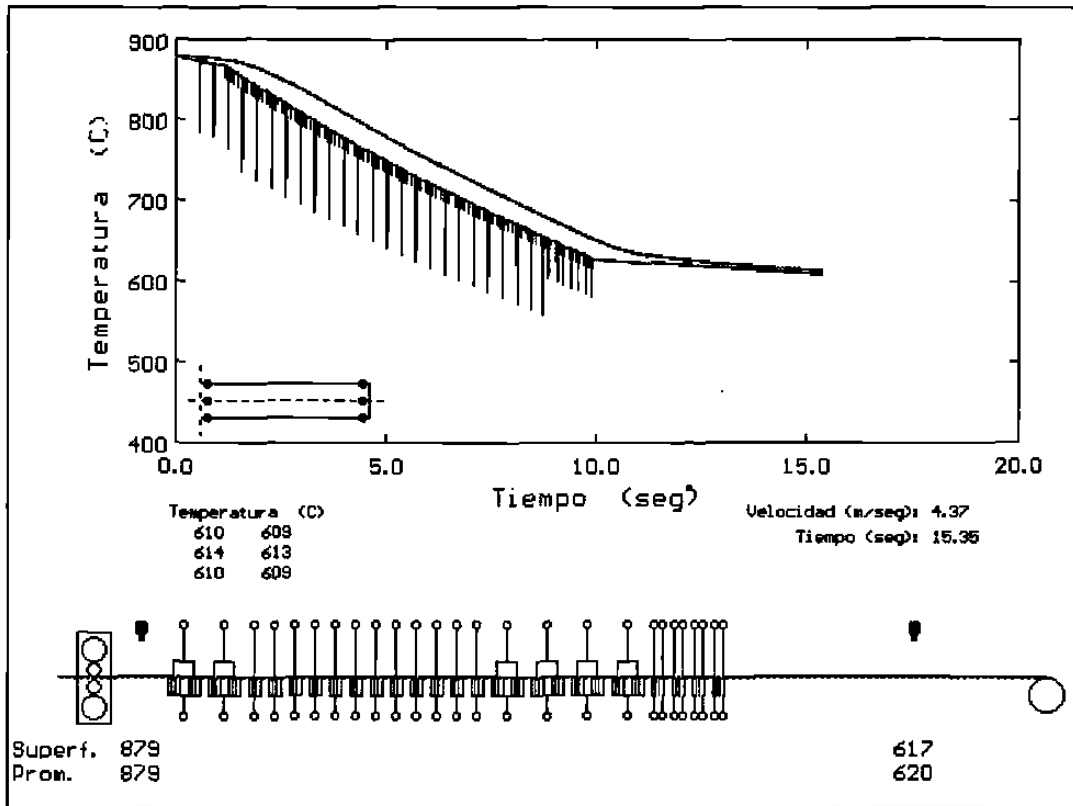


Figura 6.3.- Tercer pantalla del programa para la simulación del enfriamiento.

6.3 SUPOSICIONES DEL MODELO

Para la modelación del enfriamiento se hicieron algunas suposiciones, la cuales se presentan a continuación:

- 1.- Se desprecia el flujo de calor en la dirección del largo de la lámina, por ser esta dimensión mucho mayor que el ancho y el espesor, por lo que se considera un caso de transferencia de calor en dos direcciones.
- 2.- Las superficies superior e inferior están sujetas a condiciones de enfriamiento idénticas, así como también las superficies laterales.
- 3.- En el régimen de agua tranquila se considera la formación de una capa de vapor que separa el agua de la lámina.

4.- Se consideran condiciones de enfriamiento simétricas en la dirección del ancho, es decir, que el flujo laminar de los cabezales produce el mismo enfriamiento a todo lo ancho de la lámina.

5.- Se plantean tres diferentes regímenes de transferencia de calor:

i.- Convección y radiación al medio ambiente, cuando la lámina no se encuentra cubierta por agua.

ii.- Convección y a través de una capa de vapor, cuando la lámina se encuentra cubierta por agua tranquila o estancada.

iii.- Convección y ebullición del agua de enfriamiento, cuando el agua de los cabezales rompe la capa de vapor.

6.- Se considera que el ancho de la zona de golpe o de impacto del agua sobre la mesa es de 2 a 3 veces el diámetro interno de la tubería.

7.- Se manejaron 5 coeficientes de transferencia de calor que dependen del tipo de zona y del flujo de agua que ésta entrega..

6.4 COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Para calcular los coeficientes de calor se variaron sistemáticamente sus valores hasta encontrar una correlación aceptable entre mediciones y predicciones. Para este propósito se usaron aproximadamente 200 casos de productos procesados en planta, con velocidades desde 1.85 hasta 12.92 m/seg.

Se corrió el programa descrito anteriormente, buscando los coeficientes de transferencia de calor que dieran buenas predicciones de los valores de temperatura real de enrollado obtenidos de la planta (errores menores del 1%), y se encontró una marcada dependencia del coeficiente de transferencia de calor con la velocidad de la lámina, Figura 6.4.

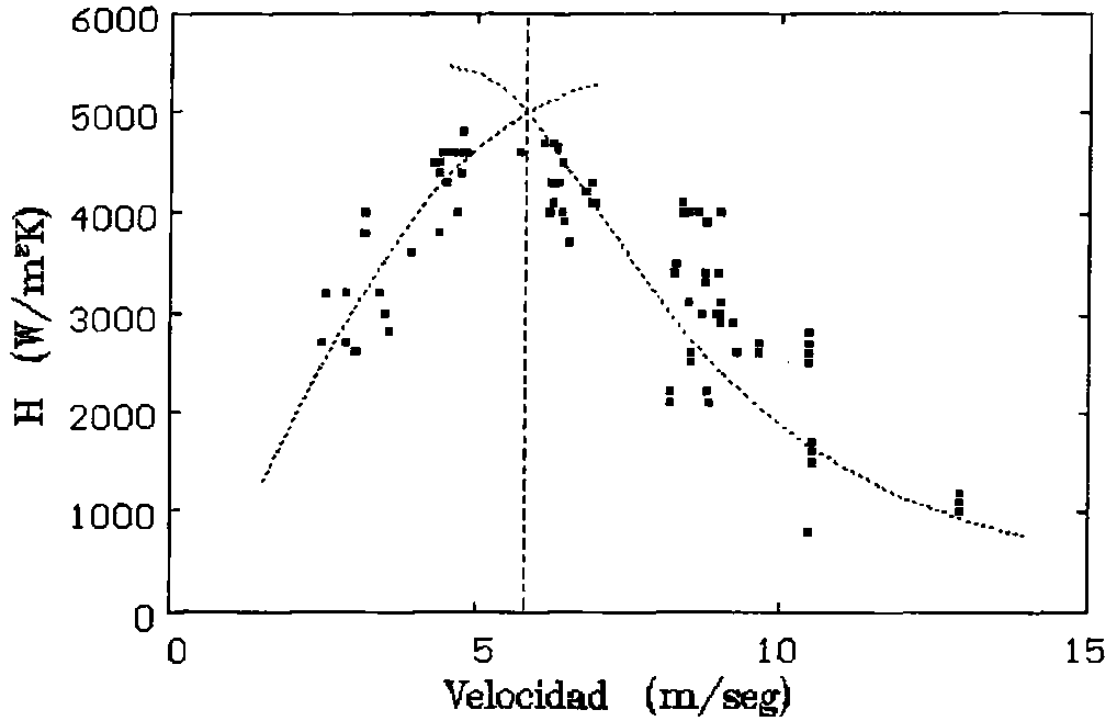


Figura 6.4.- Variación del coeficiente de transferencia de calor con respecto a la velocidad.

En la Figura 6.4 se muestra el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor H en W/m^2K con respecto a la velocidad en m/seg observándose dos tendencias diferentes. En la primer tendencia, la cual se sigue hasta una valor de velocidad de aproximadamente 5.82 m/seg , se puede suponer que el aumento en velocidad provoca un alargamiento de la zona de golpe y una mayor turbulencia, ya que esta última está directamente relacionada con la velocidad relativa entre un fluido y sus paredes limitantes^{10,11}. Este aumento de H se mantiene aún en contra del efecto negativo que tiene la disminución del período de contacto del chorro en la zona de golpe (debido al aumento en velocidad), disminuyendo también la extracción de calor de la lámina. Sin embargo, este aumento de la zona de golpe con el aumento de la velocidad, parece llegar a un punto en el que termina y su efecto a favor de la extracción de calor se mantiene constante, es decir, ya no es posible mejorar la extracción de calor con el aumento de la velocidad, además de que el incremento de la turbulencia por el aumento de velocidad pudiera producir

burbujas de aire que afectarían negativamente al valor del coeficiente de transferencia de calor, y al mismo tiempo la disminución en el período de contacto por el aumento de la velocidad de la cinta, afecta a la extracción de calor en forma dominante, por lo que los valores de H tienden a disminuir.

La razón de variar el valor de H con respecto a la velocidad se debe a que la modelación contempla una zona de golpe supuesta y constante de 2 a 3 veces el diámetro interior del tubo de descarga de agua sin considerar el crecimiento de ésta por el aumento en velocidad, además de que no se modela la variación del coeficiente de transferencia de calor con la variación de la turbulencia, la cual esta ligada a la velocidad^{10,11}, de esta forma el programa se simplifica.

Las curvas de la Figura 6.4 siguen una tendencia, que para el intervalo de puntos cuya velocidad es menor o igual a 5.82 m/seg, estaría descrita por la siguiente ecuación:

$$H = 5400[1-\exp(-0.127V^{1.665})]+100 \quad (6.1)$$

y para los puntos cuya velocidad es mayor de 5.82 m/seg, la curva estaría descrita por la siguiente ecuación:

$$H = 5400[1-\exp(-794.7V^{3.298})]+100 \quad (6.2)$$

Estas formulas calculan el coeficiente de transferencia de calor H en la zona en la zona de golpe y, debido a la existencia de diferentes tipos de zonas y flujos, se consideran para la modelación cinco coeficientes, cuyos valores parten del coeficiente H calculado por las Ecs. (6.1) y (6.2), y cuyas formulas se deben a las relaciones entre los flujos y al esquema de los cabezales utilizado en la simulación.

- $h_1 = 0.75 H$ Zona superior de aspersión
- $h_2 = H$ Zonas superiores gruesas y medianas
- $h_3 = 0.5H$ Zonas superiores finas
- $h_4 = 0.125H$ Zonas inferiores de aspersión, gruesas y medianas
- $h_5 = 0.0625H$ Zonas inferiores finas

6.5 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar el modelo se corre el programa, prediciendo la temperatura de enrollado al centro de la lámina, con condiciones reales de 100 productos procesados en planta, usando las Ecs. (6.1) y (6.2) para calcular el coeficiente de transferencia de calor a utilizar, según la velocidad a la que se corrió la lámina. Al correlacionar las predicciones de la temperatura de enrollado con mediciones de planta, se obtienen porcentajes de error menores de 5, Figura 6.5.

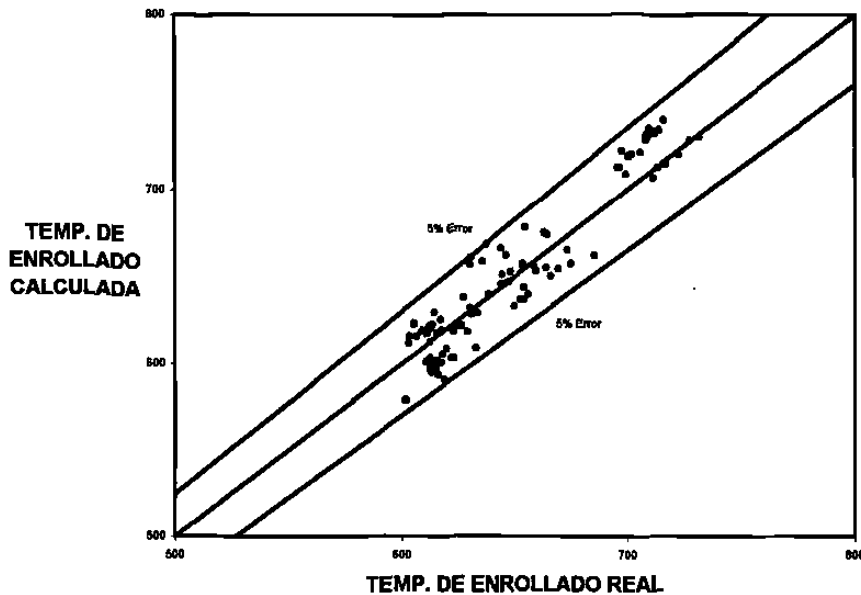


Figura 6.5.- Correlación entre mediciones y predicciones de la temperatura de enrollado.

Las predicciones de los perfiles térmicos a lo ancho de la lámina no se pudieron validar debido a que, aunque la planta cuenta con pirómetros de barrido antes y después de la mesa de enfriamiento, no se pudieron obtener lecturas debido a problemas técnicos con la llegada de información a las estaciones de trabajo.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Se logra modelar y simular el enfriamiento de cinta de acero de bajo carbono laminada en caliente prediciendo su evolución térmica mediante el desarrollo de un modelo de transferencia de calor cuya aproximación se obtuvo mediante el método explícito de la técnica de diferencias finitas. Lo que da un mejor conocimiento del proceso de enfriamiento usado en la laminación en caliente.

Para llevar a cabo la modelación se determina una dependencia del coeficiente de transferencia de calor con la velocidad, la cual físicamente no es real, sin embargo se tuvieron que ligar dichas variables, ya que el modelo no calcula los cambios de ancho de la zona de golpe ni los cambios de la turbulencia en la misma zona, así como otros fenómenos que se pudieran presentar al variar la velocidad. Para establecer una relación del coeficiente de transferencia de calor con la velocidad hubo que suponer dos comportamientos diferentes, uno para velocidades menores o iguales a 5.82 m/seg y otro para valores mayores a éste. También se consideraron diferentes coeficientes de transferencia de calor dependiendo del tipo de zona de enfriamiento.

Ya habiendo determinado la relación que tiene el coeficiente de transferencia de calor con la velocidad, se encontró una buena correlación entre mediciones y predicciones teniendo 100 casos modelados con errores menores al 5%, validando así el modelo de transferencia de calor en la parte central de la lámina. Las predicciones del perfil de temperatura a lo ancho de la lámina no se pudieron validar por no contar con mediciones de temperatura en otros puntos fuera de la línea central de la cinta.

7.2 RECOMENDACIONES

Debido a que es difícil en la modelación considerar todas las variables que afectan a la temperatura en el enfriamiento de la lámina, los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser mejorados dando seguimiento a las variables que no se tomaron en cuenta o sólo parcialmente, por ejemplo el ancho de la zona de golpe, y que podrían modelarse de manera más cercana a la realidad. Así como también, para mejorar los resultados, sería necesario trabajar con más cambios en algunas variables, como el patrón de cabezales activados, para ampliar la gama de aplicación del modelo. También benéfico para el modelo sería confirmar las suposiciones hechas acerca de algunos fenómenos.

Para mejorar los resultados de este trabajo se pueden tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- 1.- Establecer una relación entre el flujo de agua y el ancho de la zona de golpe, lo cual no es fácil debido a la dificultad para medir ambas variables y también por la dificultad para realizar cambios de flujo durante la operación de la planta, y el efecto que esto tendría sobre las propiedades y la calidad de los productos.
- 2.- Conocer más acerca del efecto que tiene la turbulencia sobre el coeficiente de transferencia de calor, ya que se sabe que al aumentar la velocidad de la lámina

aumenta la turbulencia en la zona de golpe, mejorando la extracción de calor, pero no se tiene una relación que describa este comportamiento.

3.- Hacer pruebas en planta, utilizando, en algunos casos, enfriamiento solamente con los cabezales superiores, y en otros solamente con los inferiores, para confirmar o modificar la suposición de enfriamiento idéntico en ambas superficies.

4.- Trabajar con diferentes estados de las válvulas, ya que para este trabajo el 90 % de los casos utilizados se tenían todas sus válvulas abiertas, que es lo más común, pudiendo aumentar el error para casos en los que no todas las zonas están activadas.

5.- Obtener datos de distribuciones de temperatura a lo ancho de la lámina para validar los perfiles predichos por el modelo.

6.- Estudiar más a fondo, para descartar, los casos cuya dispersión es muy grande debido a dificultades en la captación, por ejemplo, cuando por factores externos los pirómetros entregan mediciones al parecer erróneas de las temperaturas de acabado y enrollado.

REFERENCIAS

- 1.- G.E. Dieter, Mechanical Metallurgy, McGraw Hill, 1988.
- 2.- Hylsa, Manual de Procesos.
- 3.- T.J. Ess, The Hot Strip Mill, Generation II, AIME, 1970.
- 4.- A.J. DeArdo, Accelerated Colling of Steel, Editado por P.D. Southwick, AIME, Pittsburgh, Penn, 1985.
- 5.- A.J. DeArdo, Accelerated Colling of Steel, Editado por G.E. Ruddle y A.F. Crawly, Pergamon Press, Winnipeg, Canada, 1985.
- 6.- R. Colás, Laminación de productos planos, U.A.N.L., 1997.
- 7.- R. Colás y C.M. Sellars, Accelerated Colling of Steel, Editado por P.D. Southwick, AIME, Pittsburgh, Penn, 1985.
- 8.- C. García, Tesis de Maestría, U.A.N.L., 1995.
- 9.- R.A. Harding, Tesis Doctoral, U. de Sheffield, G.B., 1976.
- 10.- J.P. Holman, Heat Transfer, McGraw Hill, 1989.
- 11.- V.L. Streeter, Mecanica de los Fluidos, McGraw Hill, 4ª Edición, 1971.
- 12.- A.T. Petters, Producción Siderúrgica, Limusa, 1ª Edición, 1987.
- 13.- Memorias de Curso Acero 2000, 1999.
- 14.- J. Szekely, The Mathematical and Physical Modelling of Metal Processing Operations, Cambridge, Massachosetts, AIME, 1981.
- 15.- R. Colas, Mathematical modelling of hot rolling steel strip, U.A.N.L., 1998.
- 16.- R. Colás, C. García, J.C. Morales, L.A. Leduc, Development of a model to Control the Coiling of Flat Strip, U.A.N.L., 1995.
- 17.- P. del C. Zambrano, Tesis de Maestría, U.A.N.L., 1995.
- 18.- Z. Kolenda, Métodos Matemáticos en Transferencia de Calor y de Masa, Polonia, 1991.
- 19.- G. Tacke, H. Litzke, E. Raquet, Accelerated Colling of Steel, Editado por P.D. Southwick, AIME, Pittsburgh, Penn, 1985.

- 20.- M. Korchynsky, Accelerated Colling of Steel, Editado por P.D. Southwick, AIME, Pittsburgh, Penn, 1985.
- 21.- I. Kozasu, Accelerated Colling of Steel, Editado por P.D. Southwick, AIME, Pittsburgh, Penn, 1985.
- 22.- J. Filipovic, R. Viskanta, F.P. Incropera, A parametric study of accelerated cooling of steel, USA, 1992.
- 23.- K. Yanagi, Prediction of Strip Temperature for Hot Strip Mills, Japón, 1974.
- 24.- J. Filipovic, R. Viskanta, F.P. Incropera, T.A. Veslocki, Thermal behavior of a moving steel strip cooled by an array of planar water jets, USA, 1992.
- 25.- N. Hatta, H. Osakabe, Numerical Modeling for Cooling Process of a Moving Hot Plate by a Laminar Water Curtain, Japón, 1989.
- 26.- M. Bamberger, B. Prinz, Determination of heat transfer coefficients during water cooling of metals, Alemania, 1986.
- 27.- S. Yue, J.J. Jonas, The three critical temperatures of steel rolling and their experimental determination, Canada, 1990.

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
5.1	Comparación de flujos de agua de los cabezales de enfriamiento medidos contra los indicados en el manual de procesos.	43
5.2	Comparación de flujos de agua de los cabezales de enfriamiento, ajustados contra los indicados en el manual de procesos.	44
5.3	Ejemplo de la información obtenida de la planta de laminación, con valores de las variables de interés bajo las que se procesaron varios rollos de lámina.	47

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Esquema del defecto de ondulaciones al centro y a las orillas.	1
1.2	Esquema de una línea de laminación.	2
1.3	Esquema del enfriamiento por flujo laminar superior e inferior.	2
2.1	Línea de laminación ¹³ .	5
2.2	Esquema general de una planta de colada continua ¹² .	7
2.3	Vista general del tren de laminación o molino continuo, mostrando la unidad de descascarado anterior a la entrada del tren ³ .	8
2.4	Esta vista muestra la salida del molino continuo. También se observan rodillos de trabajo nuevos, alineados y listos para un cambio general de rodillos ³ .	9
2.5	Esta figura muestra el comienzo de la mesa de enfriamiento, observándose los primeros cabezales superiores aplicando agua sobre la cinta de acero en forma laminar. ³ .	10
2.6	Esta vista muestra desde arriba, el arreglo de cabezales y tuberías en la mesa de salida ³ .	10
2.7	Vista general del enrollador. Las líneas de laminación de alta producción cuentan con hasta tres enrolladores dispuestos de tal manera que cada uno se puede sacar de funcionamiento para fines de mantenimiento ³ .	11
2.8	Acercamiento de un enrollador que recibe un rollo completo de lámina ³ .	11
2.9	Esquema de las válvulas que controlan la mesa de enfriamiento.	13
2.10	Esquema de los cabezales para el enfriamiento por aspersión.	14
2.11	Esquema de los cabezales para el enfriamiento grueso y mediano.	14
2.12	Esquema de los cabezales para el enfriamiento fino.	15

3.1	Diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro ¹² .	19
3.2	Tamaños de grano ferrítico formados a partir de austenita recristalizada y no recristalizada a varios valores de ⁵ .	21
3.3	Efecto de algunos aleantes en la temperatura de fin de recristalización ⁵ .	21
3.4	Efecto del proceso de laminado sobre Sv en granos de austenita ⁵ .	22
3.5	Variación de Sv con la deformación por debajo de la temperatura de recristalización ⁴ .	23
3.6	Efecto del enfriamiento acelerado y contenido de Ni en el tamaño de grano ferrítico transformado a partir de austenita deformada no recristalizada ⁴ .	25
3.7	Ilustración esquemática de la interacción de varios parámetros que controlan el tamaño de grano ferrítico en aceros microaleados procesados termomecánicamente ⁴ .	26
3.8	Cambios de microestructura con la velocidad de enfriamiento después del laminado en un acero con 0.1%C-1.5%Mn-0.04%Nb-	29
4.1	0.09%V ⁵ .	33
4.2	Procedimiento usado en la elaboración de modelos de procesos ⁶ . Diagrama esquemático de la zona de golpe durante el enfriamiento	37
4.3	acelerado con flujo laminar.	39
6.1	División de un cuerpo en m elementos.	49
6.2	Primer pantalla del programa para la simulación del enfriamiento.	51
6.3	Segunda pantalla del programa para la simulación del enfriamiento.	52
6.4	Tercer pantalla del programa para la simulación del enfriamiento. Variación del coeficiente de transferencia de calor con respecto a la	54
6.5	velocidad. Correlación entre mediciones y predicciones de la temperatura de enrollado.	56

