

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

PROCESO DE LAMINACION CONTROLADA DE ACEROS ESTRUCTURALES

T E S I S
Que para obtener el título de:
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
p r e s e n t a
CARLOS TRUJILLO ARRIAGA

México, D. F.

307

1975



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

M-338

CLAS. Tesis
ADO. 1975
FECHA M-1
PROC. BH 338



QUÍMICA

Con estas líneas deseo expresar
mi agradecimiento a todas aquellas
personas que de alguna manera han con
tribuído en mi formación profesional,
haciendo mención especial de mis padres

HECTOR MIGUEL TRUJILLO ITURRIBARRIA
MA. DOLORES RUTH ARRIAGA DE TRUJILLO

A mi amigo y asesor

ALEJANDRO ESPRIU M.

A mi Gelos


JURADO ASIGNADO

Presidente	Prof. Kurt H. Nadler G.
Vocal	Ing. José Campos Caudillo
Secretario	Ing. Alejandro Espriú M.
1er. Suplente	Ing. Ma. Eugenia Noguéz
2do. Suplente	Ing. Humberto Malagón R.

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA

FACULTAD DE QUIMICA	U.N.A.M.
CIENCIAS QUIMICAS	U.A.Q.
IMPERIAL EASTMAN DE MEXICO,S.A.	

SUSTENTANTE



CARLOS TRUJILLO ARRIAGA

ASESOR DEL TEMA

ALEJANDRO ESPRIU MANRIQUE

I N D I C E

	Página
<u>RESUMEN</u>	6
<u>INTRODUCCION</u>	8
CAPITULO I	
<u>EFECTO DE LOS COMPONENTES EN PLACAS DE ACEROS ESTRUCTURALES CON ROLADO CONTROLADO</u>	13
1.1 Efecto de los constituyentes	13
a) Endurecimiento por precipitación	14
b) Impurezas	15
c) Estructuras duplex	15
1.2 Efecto de los elementos aleantes	16
a) Carbón	
b) Manganeso	
c) Fósforo	
d) Silicio	
e) Niobio	
CAPITULO II	
<u>PROCESO DE RECALENTAMIENTO</u>	23
2.1 Solubilidad del niobio durante el recalentamiento	23
2.2 Engrosamiento de precipitados	24
CAPITULO III	
<u>PROCESO DE TRABAJADO EN CALIENTE Y DE DEFORMACION DURANTE EL LAMINADO</u>	30
3.1 Trabajado en caliente	30
3.2 Deformación	33
3.2.1 Recristalización y creci-	

	miento de grano de la austenita	33
3.2.2	Efecto de la cantidad de deformación	38
3.2.3	Rango de temperatura sobre el que se efectúa la deformación	38
3.2.4	Efecto de la temperatura de acabado	40
3.3	Efecto de la interrupción de laminación	43
CAPITULO IV		
	<u>PROCESO DE ENFRIAMIENTO</u>	45
4.1	Velocidad de enfriamiento	46
4.2	Mecanismo de enfriamiento	48
4.3	Sistemas de enfriamiento	50
	4.3.1 Enfriamiento con esparadores	50
	4.3.2 Enfriamiento con sifones	53
4.4	Control de la temperatura	53
CAPITULO V		
	<u>PROGRAMA DE LAMINACION CONTROLADA</u>	56
5.1	Tiempos de laminación	57
	5.1.1 Tiempo optimo	57
	5.1.2 Tiempo práctico	57
5.2	Capacidad de carga de los molinos	59
	5.2.1 Características mecánicas	59
	5.2.2 Características geométricas	64
	5.2.2.1 Control de la forma de planos	64

	Página
5.2.2.2 Otras formas geométricas	65
5.3 Programa de laminación	66
<u>CONCLUSIONES</u>	70
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	74

R E S U M E N

La laminación o rolado controlado es un proceso aplicado a placas mediante el cual se obtiene un grano fino de ferrita equiaxial, lo que proporciona al acero una alta resistencia y ductilidad, flexibilidad, tenacidad y buenas características de soldabilidad.

En este trabajo se estudia inicialmente cómo se logra el refinamiento de grano, limitando la cristalización por medio de "elementos refinadores" que en forma de precipitados se fijan en las uniones del grano.

Posteriormente se define la temperatura requerida para mantener en solución la cantidad deseada del elemento refinador, y cómo puede estimarse ésta a partir de la relación Temperatura-Solubilidad, cuando el material se encuentra en la etapa de recalentamiento.

Debido a que la adición de aleantes refinadores no es suficiente para obtener un refinamiento máximo del grano, se analizan otros factores como son: proporcionar la máxima deformación posible al material a la menor temperatura práctica, además la velocidad de enfriamiento que es de gran importancia para aplicar con éxito esta nueva técnica. Finalmente, se discuten las posibilidades de combinar diferentes programas de laminación para obtener mayor productividad de los molinos.

INTRODUCCION

La industria metalúrgica se encuentra entre las consideradas estratégicas en el desarrollo económico de nuestro país, que tradicionalmente ha recurrido a importaciones de productos terminados básicos para satisfacer sus necesidades de consumo interno, debido, en muchos casos, a la falta de una adecuada técnica de producción. Aunque existe la tendencia continua a disminuir dichas importaciones, prevalece un déficit de acero en nuestro país, que se puede resolver económicamente, en parte, si las diversas industrias trabajan a una mayor capacidad y con la mayor eficiencia posible en cuanto se refiere a los procesos de productos terminados como son: planos, no planos, secciones pesadas y tuberías.

De acuerdo a las estadísticas se pronostica que, por lo menos durante los próximos 10 años, habrá una gran demanda de acero en nuestro país, destacando los productos planos

que serán los más solicitados. Para satisfacer esta demanda, toda la industria siderúrgica mexicana, desde hace tiempo, - ha iniciado sus programas de expansión, por lo que también - los antiguos trenes de laminación que seguirán en operación - deberán aumentar su capacidad.

Ante esas perspectivas se debe recurrir a estudiar -- sistemas de producción diferentes a los tradicionales, por - lo que es importante considerar nuevas técnicas, como por -- ejemplo "Rolado Controlado", que se puede establecer como un procedimiento en la elaboración de aceros de alta resisten-- cia, recomendados para usos estructurales.]

EL OBJETIVO DEL ROLADO CONTROLADO es obtener una es-- tructura fina de los granos austeníticos, para que en poste-- rior transformación a ferrita éste tenga granos de tamaño fi no.]

[Los aceros con estas características de grano tienen altos límites elásticos, buena resistencia, ductilidad, fle-- xibilidad, tenacidad, además de óptimas características de - soldabilidad, por lo que estos productos se recomiendan para usos estructurales.]

[El tamaño de grano fino que se logra por medio de es-- ta técnica equivale al que se obtiene con el normalizado; de

aquí que el rolado controlado presente además el atractivo - de no requerir tratamientos térmicos posteriores.

Esta técnica moderna de laminación usa la dispersión de pequeñas partículas de elementos refinadores de grano, como son: Al, V, Ti, Nb, siendo este último el que ha proporcionado mejores resultados. Estos elementos limitan el crecimiento del grano durante la austenitización, con lo que se logra un tamaño de grano fino en el grano de la ferrita.

Para aplicar con éxito esta técnica es necesario considerar las variables que intervienen en el proceso como son las siguientes:

1. La influencia de los componentes que forman el acero y sus diferentes comportamientos.
2. La temperatura de recalentamiento, que debe ser la adecuada para tener en solución la cantidad necesaria del elemento refinador en solución, para que - en el posterior trabajado en caliente disminuya la recristalización.
3. El trabajado en caliente, usado para tener buena - geometría del material a la vez que para conservar sus propiedades mecánicas.
4. El grado de deformación que se da al material que-

junto con una baja temperatura en este paso, es de gran ayuda para la obtención del grano fino de la ferrita.

5. La velocidad de enfriamiento, que es de primordial importancia, ya que el elemento refinador permanece en solución hasta el final del rolado, lo que provocaría mayor precipitación durante el enfriamiento.

Es obvio suponer que la adopción del rolado controlado por parte de la industria se vería limitado por las características del equipo actualmente disponible, ya que se requieren grandes deformaciones a temperaturas inferiores a las usadas en la práctica normal, lo que exige mayor demanda de los trenes de laminación, originalmente diseñados para menores esfuerzos. Sin embargo, es posible superar este problema por medio del diseño adecuado de un programa de laminación en el que es factible combinar simultáneamente el rolado controlado y el rolado normal, con lo que se obtendría un aumento en la productividad de los antiguos trenes de laminación que hasta la fecha se encuentran en operación en algunas siderúrgicas del país, además con el conocimiento de esta nueva técnica, se marcaría la pauta en la selección de nuevos trenes de laminación en proyectos de adquisición.

La utilización de esta técnica avanzada puede contribuir a que seamos autosuficientes en los productos antes mencionados de una manera adecuada y satisfactoria.

El propósito que se persigue con el desarrollo de este tema bibliográfico es revisar hasta la actualidad algunos aspectos importantes sobre el proceso de rolado controlado de aceros para usos estructurales, enfocado, como se mencionó anteriormente, a los productos planos en forma de placa.

A continuación se verán en más detalles cada uno de los incisos antes mencionados.

CAPITULO I

EFEECTO DE LOS COMPONENTES EN PLACAS DE ACEROS ESTRUCTURALES CON ROIADO CONTROLADO

1.1 EFEECTO DE LOS CONSTITUYENTES

El proceso del laminado controlado persigue obtener - un tamaño de grano fino de la ferrita para obtener al final - un producto con buenas propiedades mecánicas.

El material del que se parte para el proceso de laminación, tiene una estructura austenítica, la que a través de toda la secuencia y principalmente durante la etapa de enfriamiento, se transforma a ferrita. Además de la estructura inicial, se debe estudiar la influencia de los diferentes constituyentes del acero, relacionándolos a sus propiedades mecánicas en función del tamaño del grano que forman, con objeto de entender las ventajas de este proceso.

Dichos constituyentes, presentan diferentes comporta-

mientos, considerados como los mecanismos responsables para la obtención de altas resistencias:

a) Pueden precipitar en forma de pequeñas partículas. Cuando se da un tratamiento de disolución y se temple una -- aleación, cuya segunda fase se encuentra en solución sólida a elevadas temperaturas, pero que precipita después de en---friarla, se produce el fenómeno conocido como endurecimiento por precipitación (2). Para que este mecanismo sea posible, la segunda fase debe ser soluble a elevadas temperaturas, y perder solubilidad al disminuir la temperatura. Este es el mecanismo que favorece la resistencia después del trabajo en caliente del rolado controlado.

Se han estudiado las posibilidades de solubilidad en austenita (3) así como las características del precipitado - que se forma con diferentes elementos de aleación, y se ha observado lo siguiente:

El cromo, tungsteno y molibdeno favorecen el engrosa-
miento del precipitado, por lo que no se recomiendan.

El vanadio y el titanio presentan solubilidades rela-
tivamente altas, además de que presentan buenas característi-
cas de precipitación, debido a que inhiben el crecimiento --
del grano después de la recristalización. Sin embargo, se -
ha encontrado que tienen el inconveniente de que pierden con

sistencia en contenidos mayores de 0.1% (1).

El niobio posee buenas características de solubilidad y el precipitado que produce tiene las ventajas de que además de retardar efectivamente la recristalización, inhibe el crecimiento de grano después de ella.

b) Impurezas. A pesar de que existen soluciones endu-- recedoras muy eficientes, se deben evitar elementos como el fósforo, debido a su efecto nocivo sobre la ductilidad.

También son indeseables el azufre y el oxígeno, que - aunque se controlan por adiciones de aluminio, silicio y man-- ganeso, causan problemas formando inclusiones.

Se ha visto que para mejorar el acero, su limpieza se debe hacer de manera muy eficiente con la adición de zirco-- nio, cerio y otras "tierras raras", es posible controlar la-- forma del material después de que ha sido laminado, ya que - tiene un un control en la plasticidad de las inclusiones, ob-- teniéndose como resultado un aumento en la ductilidad.

c) Estructuras Duplex. Debido a la importancia de la técnica de "laminación controlada", se ha experimentado el - uso de varias composiciones, llegándose a obtener estructu-- ras finas por diferentes fenómenos. Un ejemplo de éstas son las estructuras duplex (4), que resultan de la interrelación

"proceso-estructura-composición", en las que se efectúa simultáneamente la recristalización y la transformación austenita a ferrita durante el trabajado en caliente. La presencia de la nueva fase formada en las uniones de grano retarda la recristalización, lo que da como resultado un grano muy fino, que proporciona al material excelentes propiedades mecánicas a temperatura ambiente y gran plasticidad a elevadas temperaturas.

1.2 EFFECTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN LAS PROPIEDADES MECANICAS

a) Contenido de Carbón. Los efectos del contenido de carbón en el tamaño de grano de la ferrita, límite elástico y temperatura de transición de impacto de un acero al carbón con 1.5% Mn y acero al Nb, se muestran en la fig. 1.

En aceros al carbón, un aumento en el contenido de carbón de 0.05 a 0.17% produce el refinamiento de grano de la ferrita, con el consecuente aumento del límite elástico, pero también se tiene un aumento en la temperatura de transición. Disminuyendo la temperatura de acabado por debajo de 750°C se obtiene una disminución en el tamaño de grano de la ferrita así como en la temperatura de transición.

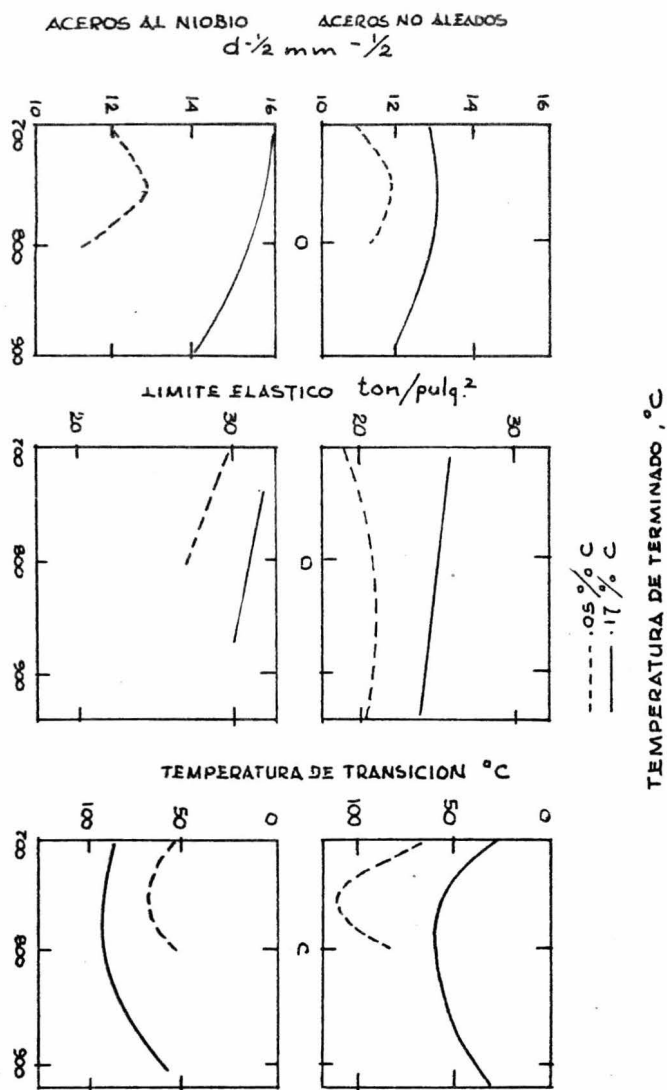


FIG. 1 EFECTO DEL CONTENIDO DE CARBONO SOBRE LAS ESTRUCTURAS Y PROPIEDADES DE ACEROS CON $1\frac{1}{2}\%$ Mn CON LAMINACION CONTROLADA.

b) Contenido de Manganeso. Aumentos en el contenido de Mn sin que haya formación de bainita, proporcionan un aumento en el límite elástico con tamaño de grano constante, disminuyendo el tamaño de grano de la ferrita, con lo que se tiene un aumento en la resistencia para un tiempo dado de ro lado. Debido al aumento que se tiene en el límite elástico, también se tienen mejoras sobre las propiedades de impacto. - El refinamiento del grano de la ferrita por el Mn disminuye la transformación austenita-ferrita, con lo que la velocidad de nucleación es mayor. Un aumento de este elemento mejora la dureza y con altas velocidades de enfriamiento se forma algo de bainita. Esto no afecta la temperatura de transi--- ción de impacto. En la fig. 2 se ve la comparación entre -- los aceros al carbón y los aceros al Nb con diferentes conte nidos de manganeso.

c) Contenido de Fósforo. Esta es una solución endurecedora sobre la ferrita, pero tiene un efecto nocivo sobre la tenacidad ya que da lugar a la formación de compuestos -- frágiles como son los óxidos y los fosfuros.

d) Contenido de Silicio. Este elemento proporciona un endurecimiento a la ferrita, pero cuando está presente en altos niveles puede causar fragilidad por la formación de -- carburos.

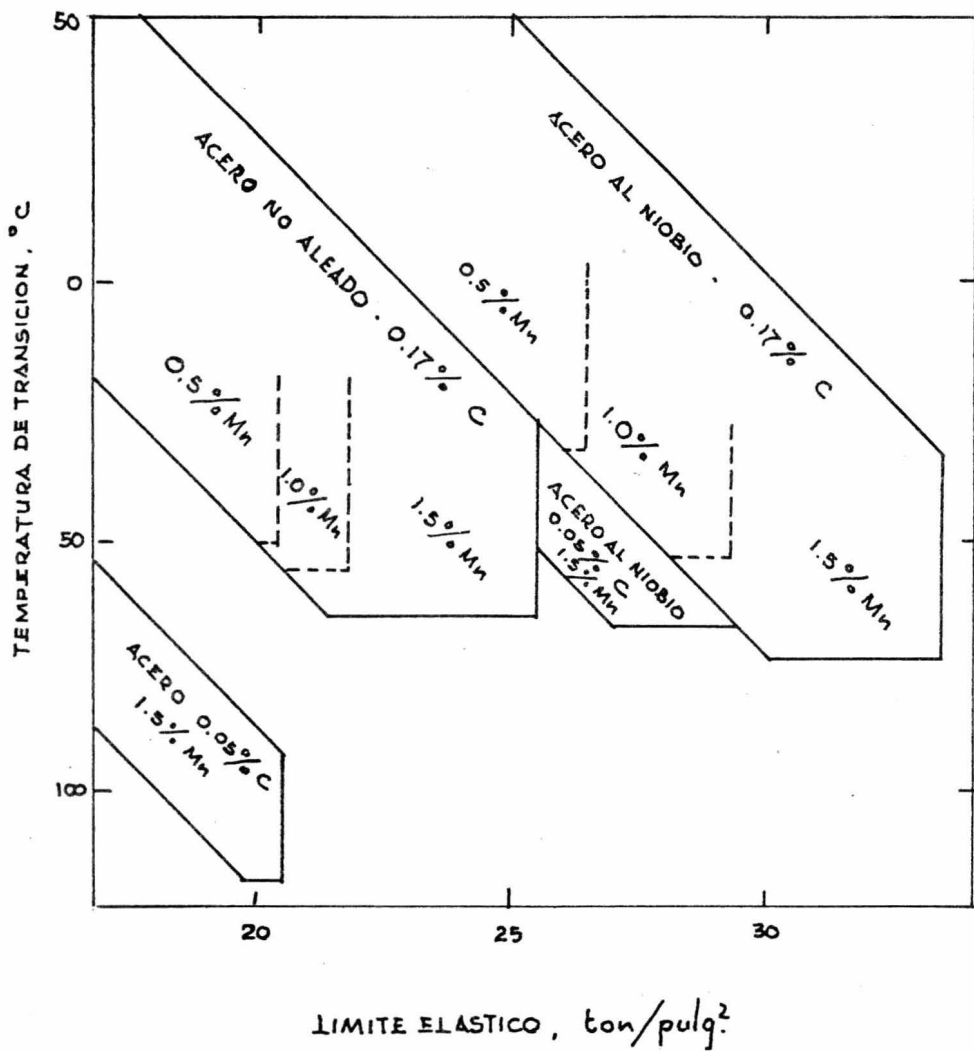


FIG. 2 PROPIEDADES DE ACEROS
CON LAMINADO CONTROLADO.

e) Efecto del Aluminio, Vanadio y Titanio. Los efectos que produce la adición de estos elementos refinadores en lo que se refiere a la relación del tamaño de grano con el límite elástico y la temperatura de transición se ve en la fig. 3.

El aluminio y el titanio tienen pequeño efecto en el límite elástico comparado al que se obtiene en aceros al carbón. Por otro lado, el vanadio no sólo produce un tamaño de grano fino de ferrita, sino además favorece el endurecimiento por precipitación.

Los aceros al aluminio tienen una temperatura de transición similar a la de los aceros no aleados. La razón es que el nitruro de aluminio es soluble a las temperaturas de recalentamiento y no precipita fácilmente, por lo que existe nitrógeno libre durante la laminación controlada.

Los aceros al titanio forman nitruros muy estables, lo que significa que en el acero se mantiene una pequeña cantidad de nitrógeno libre; como consecuencia, se tiene una baja temperatura de transición al comparar estos aceros con -- los no aleados del mismo tamaño de grano de ferrita.

f) Efecto del Niobio. El niobio tiene buenas características de solubilidad y de precipitación, con la ventaja adicional de que refina el tamaño del grano y limita la re--

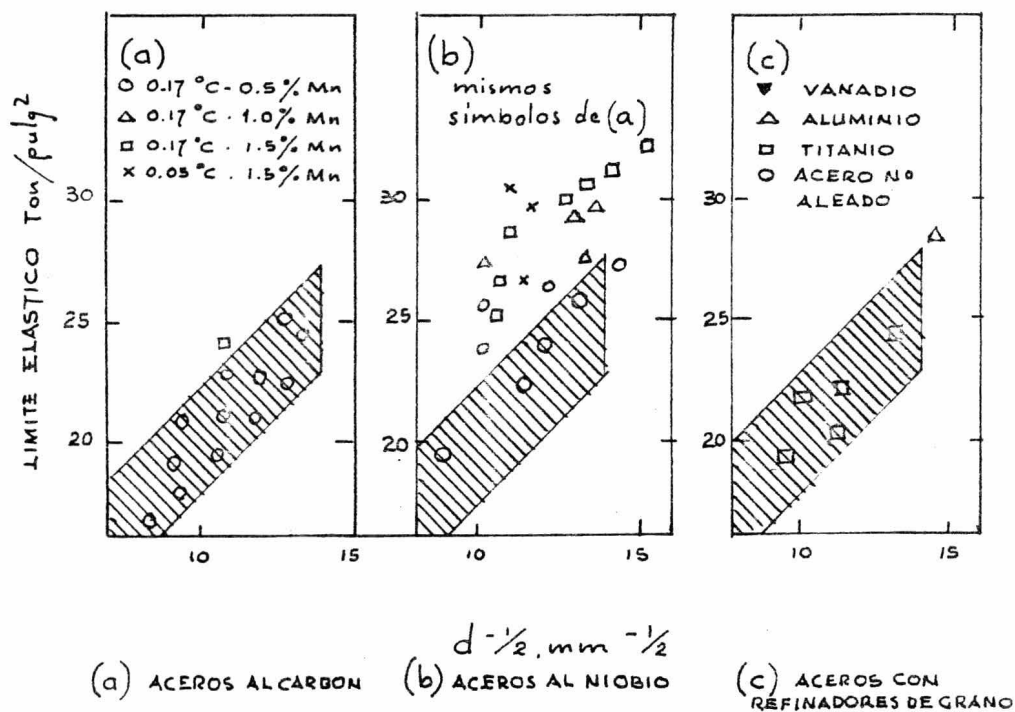


FIG. 5 DEPENDENCIA DEL TAMAÑO DE GRANO CON LIMITE ELASTICO.

cristalización después de que el material ha sido deformado. Este es el único elemento refinador que reúne estas características; debido a ello, se le considera como el elemento refinador más adecuado para el proceso de laminación controlada, y en este trabajo, al hablar del elemento refinador siempre se hará referencia al niobio.

Aunque más adelante se presenta un capítulo dedicado al enfriamiento del material, es necesario desde ahora establecer la relación que tiene con el niobio.

La velocidad de enfriamiento del material determina sus propiedades y está íntimamente relacionado a su espesor. Así, tenemos que el aumento de la temperatura de transición está en proporción directa al espesor del material (ya que el enfriamiento es más lento), y esto se debe a un mayor crecimiento del grano durante el enfriamiento. En estas condiciones, los precipitados de niobio se fijan en las uniones de grano, inhibiendo la recristalización y retardando el crecimiento del grano, lo que da como resultado final un tamaño de grano fino y excelentes propiedades mecánicas en el material que se trabaja (23).

En los capítulos siguientes se irán viendo las diferentes variables que intervienen para el mejor aprovechamiento del niobio en relación al laminado controlado.

CAPITULO II

PROCESO DE RECALENTAMIENTO

El éxito del laminado controlado depende de la poca -
recristalización durante el proceso para obtener un refina--
miento del grano, que se logra primero por la solubilidad --
del niobio a la temperatura de recalentamiento para que en -
posterior enfriamiento dé lugar al endurecimiento por preci-
pitación.

La etapa de recalentamiento antecede al proceso de la
minación. Esta etapa proporciona suficiente temperatura al-
material para que pueda ser deformado, además de que mantie-
ne al niobio en solución.

2.1 SOLUBILIDAD DEL NIOBIO DURANTE EL RECALENTAMIENTO

Los precipitados de Nb en aceros al carbono se presen

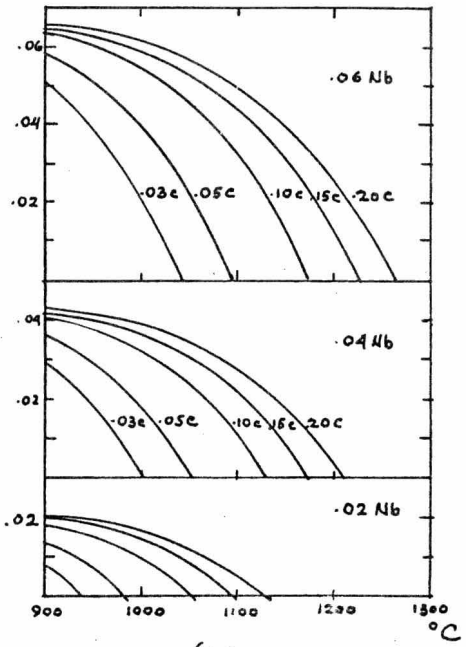
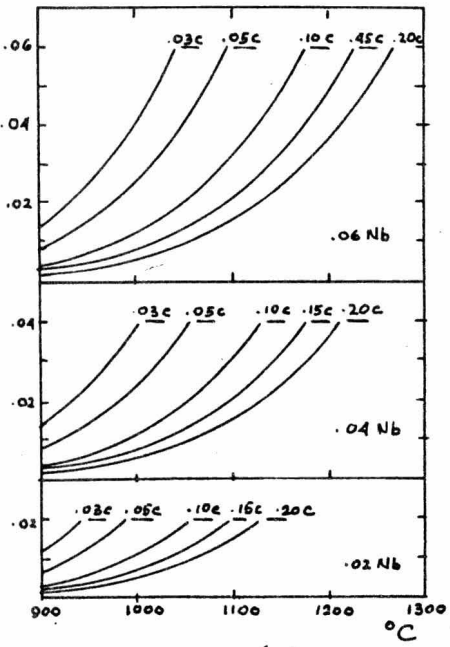
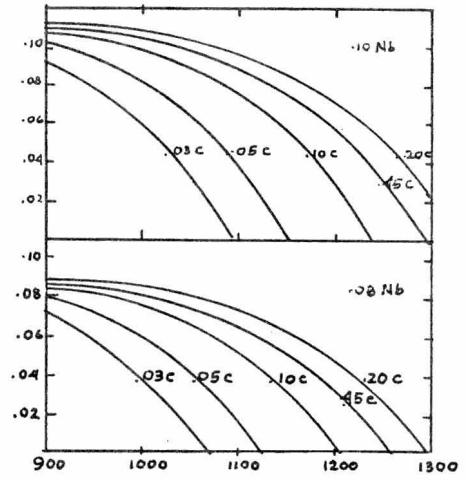
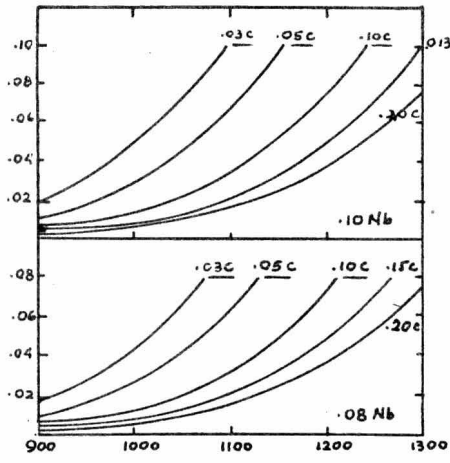
tan en forma de carburos y nitruros cuando está presente el nitrógeno, los que forman soluciones sólidas como carbonitruros. Su solubilidad se presenta en la fig. 4, en donde se ven las temperaturas adecuadas para la disolución de los precipitados en función de su contenido de Nb y C. La fig. 4a muestra la cantidad de Nb en solución en el rango normal de temperaturas en condiciones de equilibrio (5). La fig. 1b muestra la cantidad de Nb C que permanece sin disolverse bajo las mismas condiciones. De estas gráficas observamos lo siguiente:

1. Existe una relación entre Nb en solución y la temperatura de recalentamiento.
2. La temperatura requerida para tener la totalidad del Nb en solución debe ser alta, pero con esto se provoca el crecimiento del grano de la austenita; debido a ello se tiene que comprometer y aceptar que parte del Nb no esté en solución.

2.2 ENGROSAMIENTO DE PRECIPITADOS

De acuerdo a lo anterior, aunque es posible alcanzar una completa solución del niobio durante el recalentamiento, no es recomendable, ya que se tendría que elevar demasiado la temperatura, dando como resultado un crecimiento indesea-

% EN PESO DE Nb EN SOLUCION.



(a) (b)
FIG. 4 SOLUBILIDAD DE Nb Y NbC

ble de los granos austeníticos.

Las temperaturas y composiciones normalmente usadas - en el material permiten que permanezcan sin disolver cantidades considerables de precipitados, principalmente de carburo de niobio (6). El tamaño y distribución de estas partículas tienen gran influencia sobre el comportamiento y la recristalización del material durante el proceso (7). A mayor heterogeneidad del tamaño del grano, ocurre un crecimiento espontáneo del mismo, lo que afecta negativamente al material tanto durante la deformación como en la recristalización.

La fig. 5 muestra la distribución del grano en dos -- aceros al niobio después de varios tratamientos.

Se han estudiado los efectos de los precipitados del niobio sobre la recristalización de la ferrita, llegándose a las conclusiones siguientes:

- i) Partículas de 50 Å de diámetro retardan la recristalización debido a que se fijan en los bordes del grano, inhibiéndola.
- ii) Tamaños de aproximadamente 200 Å no tienen efectos significativo en la velocidad de recristalización.
- iii) Con partículas mayores de 1 micrón, la recrista-

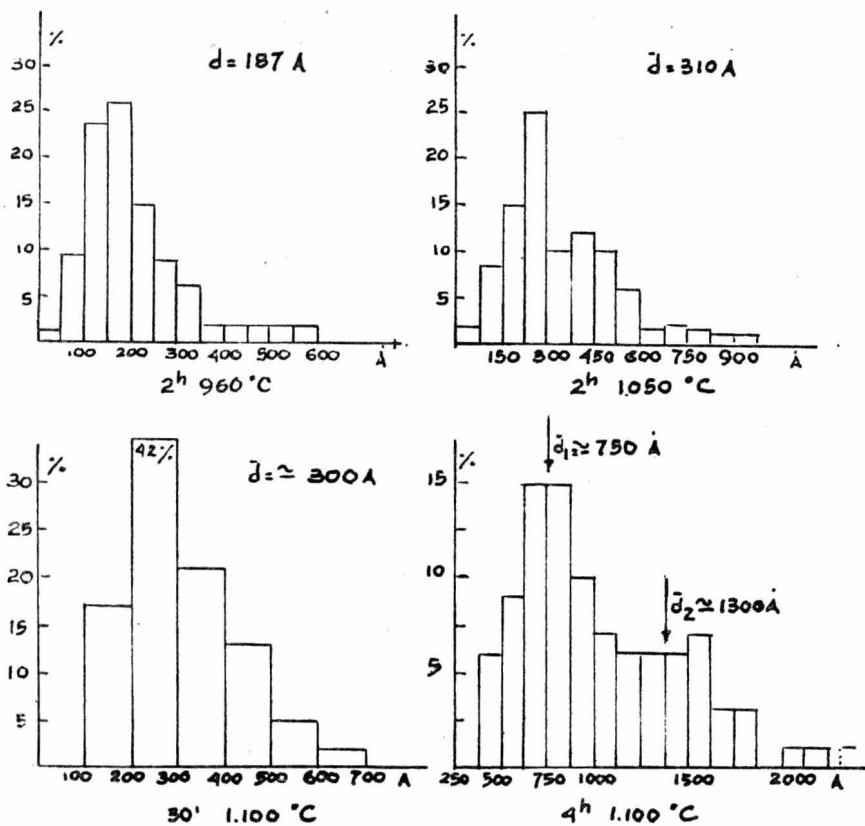
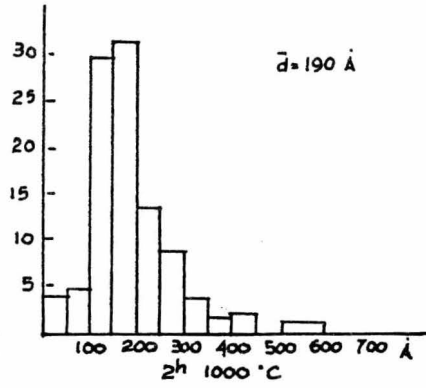
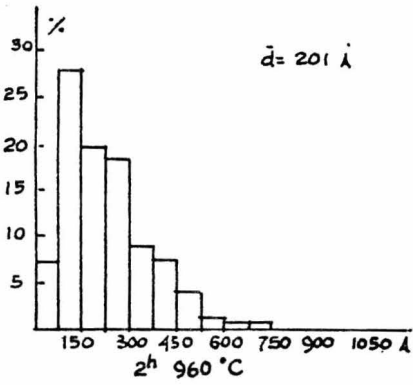


FIG 5 DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULA DESPUES DE LA AUSTENITIZACION

(a) 0.16 Nb
 (b) 0.06 Nb



(b)

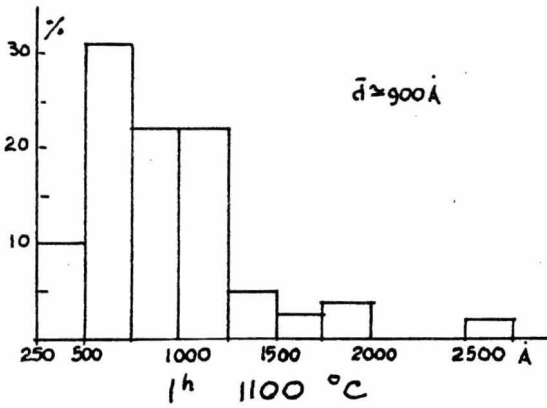


FIG. (b)

lización se acelera.

Así pues, la selección de temperatura y tiempo de recalentamiento tienen gran influencia en el tipo de estructura que se obtiene después del rolado.

Dependiendo del tipo de acero, una baja temperatura de recalentamiento puede ser benéfica o perjudicial sobre las propiedades mecánicas. Por ejemplo, en aceros que se endurecen por precipitación, si la temperatura y tiempo de recalentamiento son tales que únicamente permiten una solución parcial del precipitado, el endurecimiento por precipitación no se realiza completamente. Por otro lado, si se encuentran presentes elementos refinadores de grano, y si la temperatura de recalentamiento es menor a la temperatura de crecimiento del grano, se obtienen aceros de grano fino. Por lo tanto, un acero que presente combinación de dos precipitados, uno con solubilidad a alta temperatura y otro con solubilidad a baja temperatura, se pueden usar temperaturas intermedias de recalentamiento para así obtener aceros de grano fino de alta resistencia.

Desde el punto de vista práctico, el recalentamiento de aceros al Nb, no tiene mayores problemas que los que se presentan en aceros normales de bajo carbono, excepto que la temperatura requiere un control más exacto.

CAPITULO III

PROCESO DE TRABAJADO EN CALIENTE Y DE DEFORMACION DURANTE EL LAMINADO

La buena técnica del laminado controlado requiere proporcionar la mayor deformación posible, a la menor temperatura para tener un tamaño fino del grano de ferrita, además, se usan elementos refinadores de grano: vanadio, aluminio, titanio, niobio, que forman pequeños precipitados de carburos y/o nitruros, que se fijan en las uniones de grano de la austenita impidiendo su crecimiento cuando se ha efectuado la deformación.

3.1 TRABAJADO EN CALIENTE

El trabajado en caliente se usa en metalurgia para tener una buena geometría y valores convenientes de propiedades mecánicas. Para que un material se deforme, debe tener una temperatura superior a 0.6 de su temperatura absoluta de

fusión (8, 9). Para máxima eficiencia del rolado controlado, se debe hacer la mayor deformación posible a la menor temperatura posible, para lograr obtener una estructura de grano fino de ferrita.

Al aumentar la carga se tiene mayor deformación, en la que se tiene una estructura completamente recristalizada, con uniformidad de granos equiaxiales, siempre y cuando la deformación sea homogénea. La recristalización se inicia en las uniones de grano (fig. 6), los que actúan como centros preferenciales de nucleación, que son inestables y se destruyen fácilmente (10). Esto se explica considerando que los átomos en el estado líquido no tienen una distribución ordenada definida, sólo se agrupan ocupando posiciones muy similares a las que les corresponden en la red espacial que se forma al solidificar el líquido. Estas agrupaciones atómicas que se inician no son permanentes, sino que se destruyen rápidamente y se vuelven a formar en otros puntos, dependiendo su duración de la temperatura y de su tamaño; de manera que a mayor temperatura, mayor es la energía cinética de los átomos y más corta la vida de los grupos. A medida que se disminuye la temperatura, los átomos van perdiendo libertad de movimiento, lo que hace que las agrupaciones atómicas formadas sean más estables y aumenten, además de que actúan como-

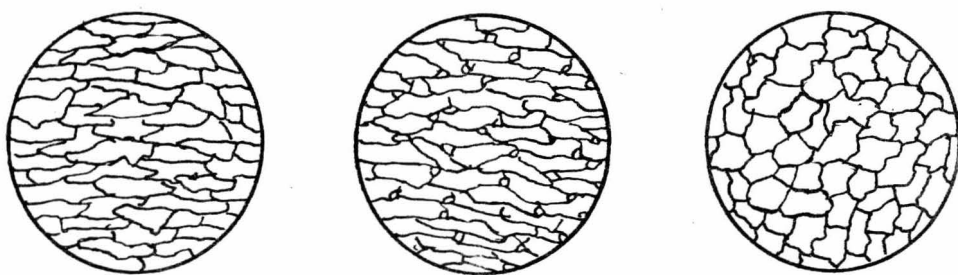


FIG. 6 LA RECRISTALIZACION SE INICIA
EN LOS LIMITES DE GRANO.

gérmenes de recristalización (10).

Debe evitarse que la recristalización sea completa, - ya que da lugar a la restauración del grano original que --- existía antes de la deformación. Así, para la obtención de un grano fino, además de adiciones de elementos refinadores - siempre se procurarán las menores temperaturas posibles du-- rante todo el proceso.

3.2 DEFORMACION

Antes de estudiar en más detalle este proceso, es con- veniente estudiar la recristalización y crecimiento del gra- no de la austenita, ya que esta estructura está presente en- el material del que se parte, durante la deformación.

3.2.1 Recristalización y crecimiento de grano de la austenita

El cambio estructural que acompaña al rolado en ca--- liente es la deformación de los granos austeníticos, presen- tando una elongación en la dirección de la laminación (12) - (fig. 7). Sin embargo, antes de que se manifieste cualquier elongación en los granos, es necesario una reducción mínima- de 20% sobre el material (13). El proceso de laminación cau- sa la deformación de los cristales, en un principio temporal

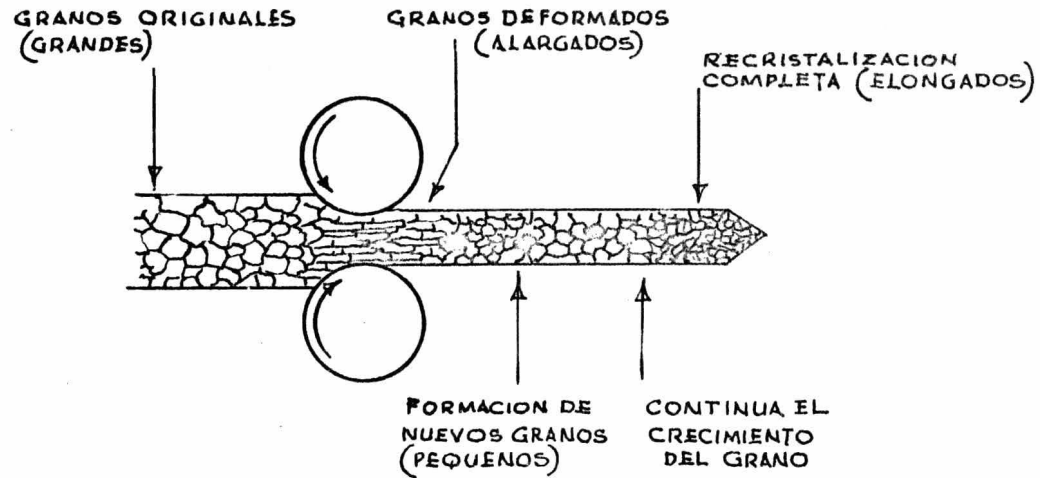


FIG. 7 EFECTO MECANICO DEL TRABAJO EN CALIENTE SOBRE CARACTERISTICAS DEL GRANO.

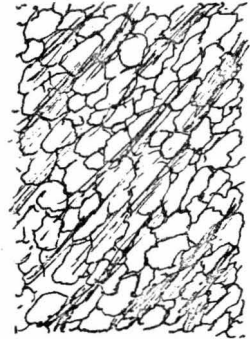
(cuando la fuerza aplicada proporciona una deformación menor al límite elástico del acero que se trabaja). Al aplicar -- una fuerza mayor el acero alcanza un estado de deformación - permanente, en este momento el cristal pierde sus dimensio-- nes originales y se deshace en una multitud de cristales más pequeños. La destrucción de los cristales originales da lugar a un cambio de las características da lugar a un cambio de las características físicas del material, como son: un aumento en el límite elástico y en dureza (22).

Posteriormente, debido a las temperaturas relativamente altas que existen en el proceso, los átomos aumentan su - energía cinética, notándose que en los sitios que tienen mayor energía acumulada, los bordes de grano, aparecen nuevos - granos pequeños, que rodean los granos de austenita deforma- da y los consumen, hasta que la totalidad de la estructura - queda recristalizada (fig. 8) (14). Una vez que se ha efec- tuado lo anterior, ocurre el crecimiento del grano, el que - está controlado por dos factores importantes que son:

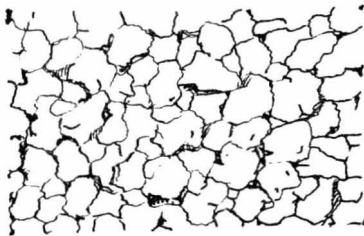
- a) La velocidad de recristalización, la cual se acelera al aumentar la temperatura.
- b) Velocidad de crecimiento de los granos de austeni- ta recristalizados, la que se favorece con el au-- mento de la temperatura y se inhibe por la presen- cia de pequeñas partículas de precipitado.



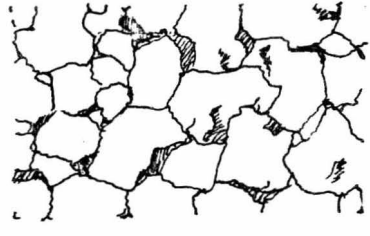
GRANOS CON DEFORMACION PLÁSTICA



EN LOS BORDES DE GRANO APARECEN NUEVOS PEQUEÑOS GRANOS EQUIAXIALES



LOS GRANOS PEQUEÑOS CRECEN A EXPENSAS DE LOS GRANOS DEFORMADOS.



ESTRUCTURA RECRISTALIZADA.

FIG. 8 RECRISTALIZACION Y CRECIMIENTO DE GRANO DE LA AUSTENITA .

Algunos experimentos realizados para investigar estos aspectos (1), usando diferentes elementos refinadores, muestran los siguientes resultados:

1. Adiciones al Al, V, Ti, tienen poco o ningún efecto sobre las características de recristalización, pero inhiben el crecimiento del grano después de la misma, debido a la presencia de pequeñas partículas de precipitados de nitruros de Al y carbonitruros de Ti y V.
2. Adiciones de Nb retardan la recristalización e inhiben el crecimiento del grano después de la misma con lo que se tiene un tamaño de grano fino de austenita, ya que como se mencionó antes, las partículas de pequeños precipitados de carbonitruros de Nb se fijan en los límites de grano impidiendo su crecimiento. Esto es posible cuando se trabaja -- dando la mayor deformación y menor temperatura posible.

Existe una relación entre la austenida y la ferrita, y es que, para obtener un tamaño de grano fino de la ferrita, es esencial tener un tamaño de grano fino de la austenita antes de su transformación.

3.2.2 Efecto de la cantidad de deformación

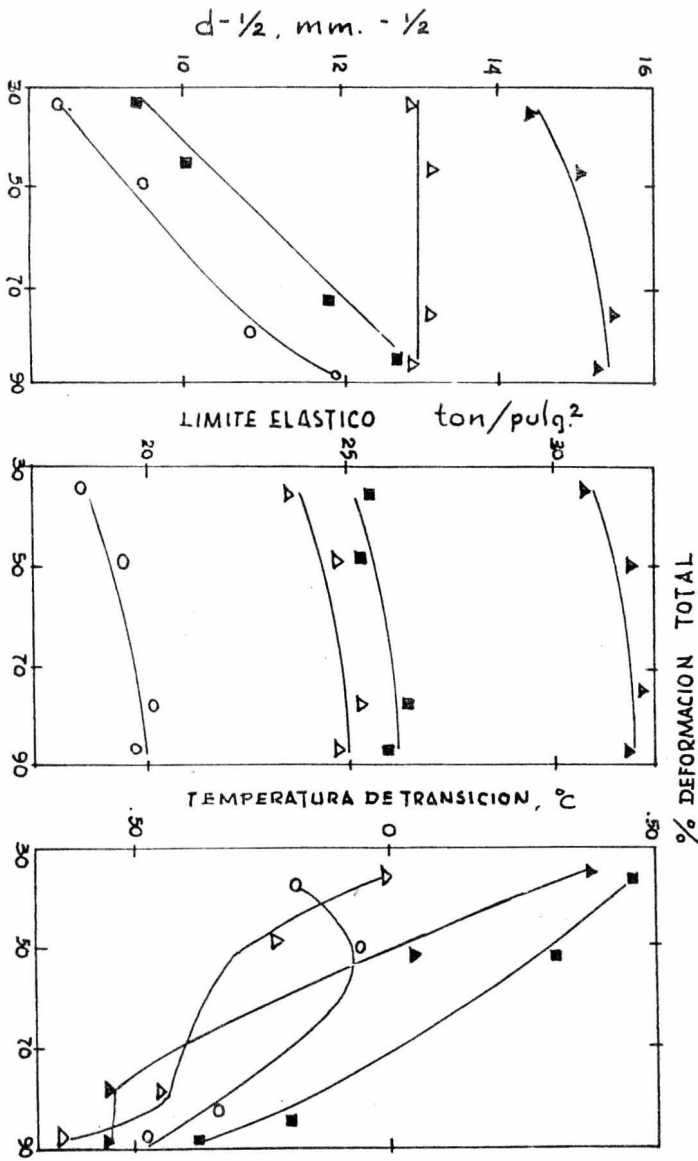
Los cambios en las propiedades mecánicas están muy relacionados a cambios en el tamaño de grano. En la fig. 9 se muestra el efecto del tamaño de grano de la ferrita, sobre el límite elástico y la temperatura de transición, variando las reducciones del material. Estos aceros contienen 0.17% C y 0.5 ó 1.5 % Mn.

En los aceros con 0.5% de manganeso, el tamaño de grano de la ferrita se hace fino al aumentar la deformación, y el acero al niobio tiene un tamaño de grano fino de mayor consistencia que en los aceros al carbón.

Este comportamiento no es notorio en aceros con 1.5% de manganeso. En la gráfica 9 es notorio que los tamaños muy finos en el grano de los aceros al niobio con 1.5% Mn proporciona límites elásticos de 31 a 32 toneladas/plg², además de que tiene baja temperatura de transición. Estas buenas propiedades se obtienen de un tamaño de grano fino que se logra proporcionando la máxima deformación al material.

3.2.3 Rango de temperatura sobre el que se efectúa la deformación

Experimentalmente se ha visto que a temperaturas superiores a 850°C se produce espontáneamente la recristalización entre los pases de deformación; la cantidad de estructu



- ▲ 0.17% C - 1.5% Mn - Nb
- △ 0.17% C - 1.5% Mn
- 0.17% C - 0.5% Mn - Nb
- 0.17% C - 0.5% Mn

FIG. 9 EFECTO DE LA DEFORMACION TOTAL SOBRE LAS PROPIEDADES Y EL TAMAÑO DE GRANO.

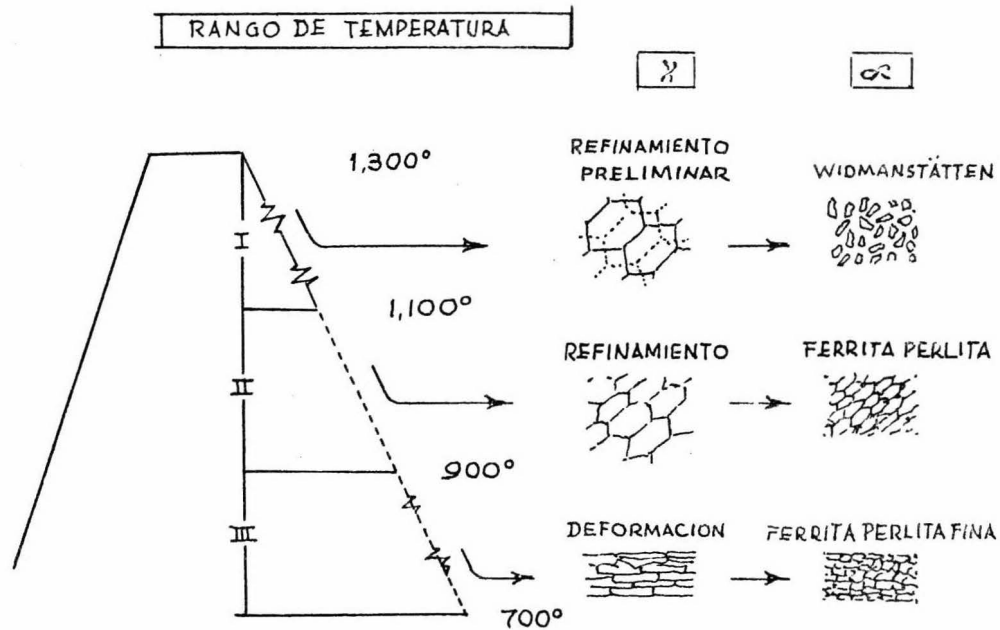
ra recristalizada dependerá del grado de deformación y de la temperatura de laminación.

Con temperaturas inferiores a 850°C, la recristalización es lenta, al igual que el crecimiento de grano. A temperaturas entre 700 - 800°C, hay poca o ninguna recristalización, con lo que se obtiene un grano de austenita muy deformado, y en consecuencia un grano de ferrita fino después de la transformación. Estos rangos de temperatura se ven en la fig. 10.

3.2.4 Efecto de la temperatura de acabado

Los efectos de esta temperatura sobre el límite elástico, tamaño de grano, y temperatura de transición se ven en la fig. 11. En este caso los aceros contienen 0.17% C, 0.5, 1 y 1.5% Mn, con y sin niobio. Al disminuir la temperatura de acabado de 950 a 800°C, disminuye el tamaño de grano de la austenita recristalizada en los aceros al carbón, por lo que se tiene un alto refinamiento del tamaño de grano de la ferrita.

Los efectos de la temperatura de acabado sobre las propiedades mecánicas están estrechamente relacionados a los cambios estructurales y, como ya se vio, a menores temperaturas, se tendrán menores tamaños de grano y buenas propiedades mecánicas (1).



- RANGO I: REFINAMIENTO PRELIMINAR DE LA AUSTENITA
- RANGO II: SE REPITE EL REFINAMIENTO DE LA AUSTENITA
- RANGO III: DEFORMACION DE LA AUSTENITA SIN RECRISTALIZACION

FIG. 10 DIAGRAMA ESQUEMATICO QUE MUESTRA EL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE ROLADO SOBRE LA MICROESTRUCTURA DE LA AUSTENITA Y FERRITA EN VARIOS PASES DE ROLADO.

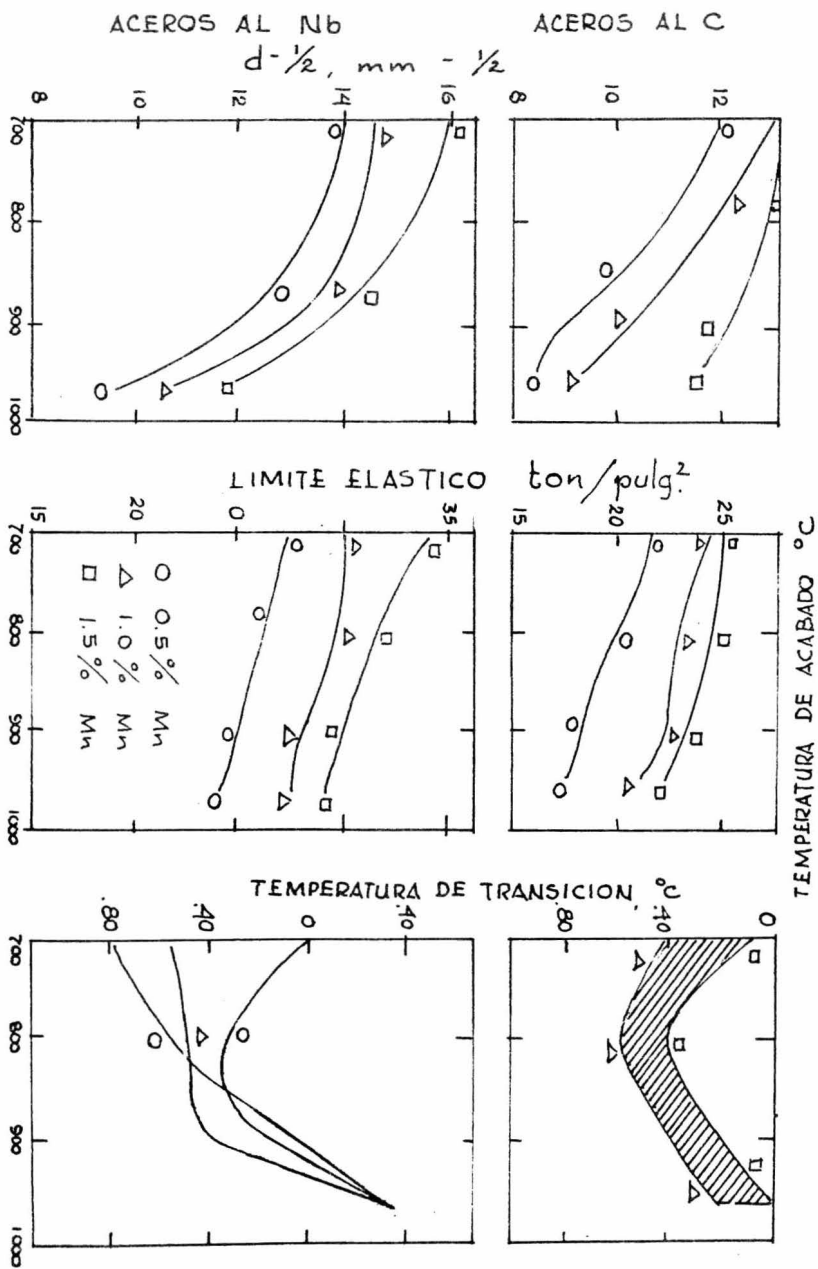


FIG. 11 EFECIO DE LA TEMPERATURA DE ACABADO SOBRE LAS PROPIEDADES Y TAMAÑO DE GRANO DE FERRITA.

3.3 EFECTO DE LA INTERRUPCION DE LA LAMINACION

El laminado controlado requiere que la temperatura -- del material sea uniformemente baja antes de hacer la reducción final. En operaciones comerciales de laminación, se recurre a un período de retención del material, con el propósito de alcanzar una baja temperatura de acabado del material, aunque debe tenerse cuidado en su tiempo de duración, ya que tiempos excesivos provocan el crecimiento del grano.

Algunas pruebas realizadas se muestran en la fig. 12, donde se observa que para aceros al carbón, un aumento en -- el tiempo de retención, da como resultado un engrosamiento -- en el tamaño de grano de la ferrita con la consecuente pérdida de límite elástico y aumento de la temperatura de transición.

Por otra parte, los aceros al niobio muestran poca -- evidencia de crecimiento del tamaño de grano de la ferrita.- Esto se debe a que el niobio disminuye la recristalización y el crecimiento del grano, cuando el período de retención es a 800°C, durante aproximadamente 5 minutos. Si este período se realizará a mayores temperaturas (950 - 1000°C), sería -- más rápida la recristalización y los efectos nocivos serían-- similares a los mostrados para aceros al carbón.

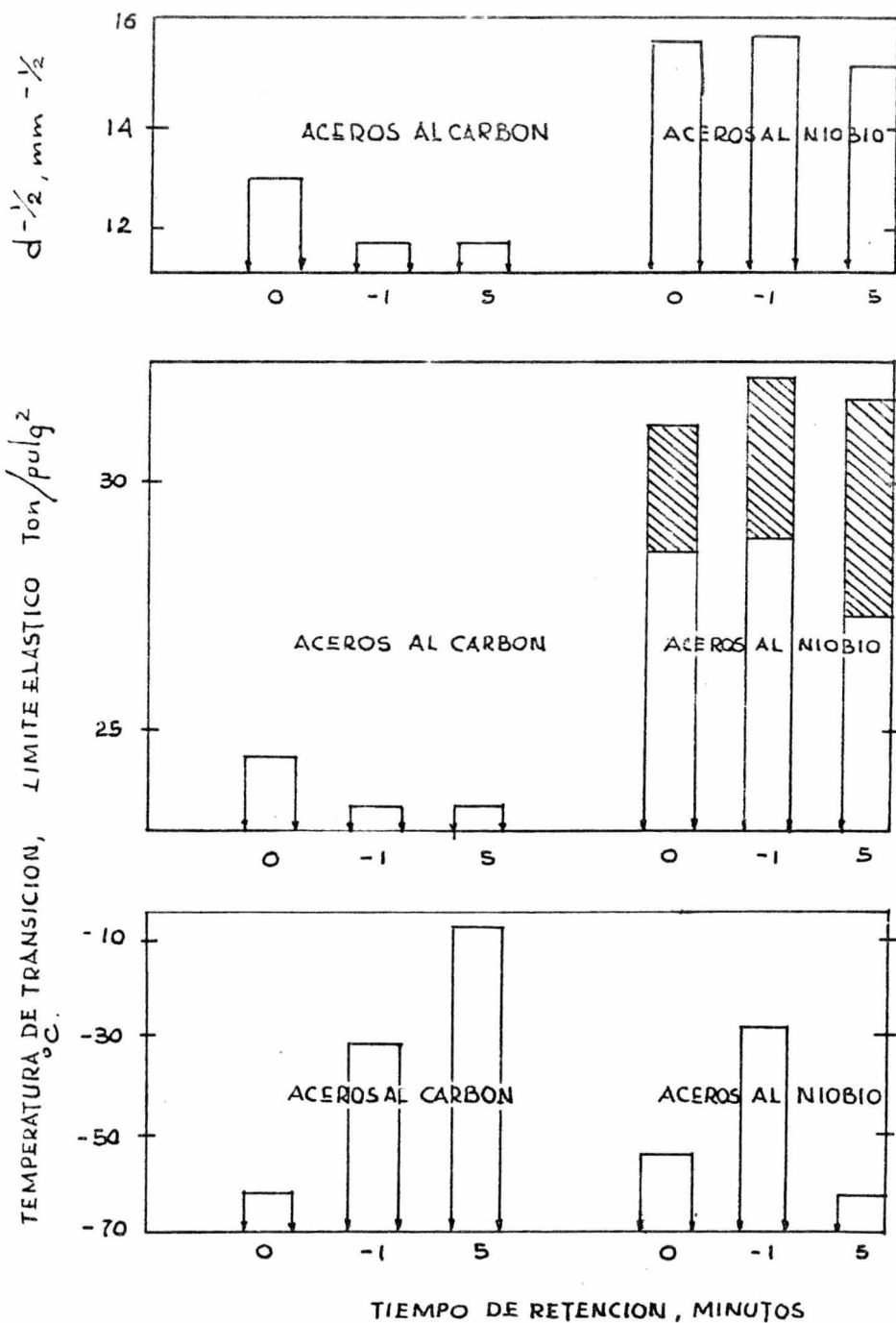


FIG.12 EFECTO DE LA INTERRUPCION SOBRE LA ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE ACEROS CON 1.5% Mn Y AL NIOBIO CON 1.5% Mn DESPUES DEL 87% DE DEFORMACION.

CAPITULO IV

PROCESO DE ENFRIAMIENTO

El laminado controlado tiene el objetivo de alcanzar un tamaño de grano fino de la ferrita al final de todo el -- proceso, sin necesidad de recurrir a tratamientos térmicos.- Para lograr esto, se han discutido las variables que inter-- vienen en el proceso, como son: la adición de elementos refi nadores de grano que quedan en solución a las temperaturas - de recalentamiento, para posteriormente dar lugar al endure- cimiento por precipitación; proporcionar la máxima deforma-- ción posible al material para obtener un tamaño de grano fi- no de la austenita recristalizada (esta variable se conside- ra como la más importante sobre todos los demás efectos); la temperatura de acabado, que en los aceros al carbón debe ser baja para impedir el crecimiento del grano, pero que en los- aceros al niobio la temperatura es menos limitada debido a -

que se retarda la recristalización; el período de retención- que se debe evitar en los aceros al carbón debido a que da-- ría lugar al crecimiento de grano de la austenita y que no - sería posible llevarla a un tamaño de grano fino en los sub- siguientes pases de deformación, y los aceros al niobio en - los que este período proporciona granos de austenita los su- ficientemente finos para facilitar el objetivo del laminado- controlado.

4.1 VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

Al igual que las variables anteriores, la velocidad - de enfriamiento está íntimamente ligada a las propiedades me- cánicas del material que se trabaja.

En la fig. 13 se muestra el efecto de la velocidad de enfriamiento. Una baja velocidad de enfriamiento produce un tamaño de grano grande de la ferrita que significa un valor- bajo del límite elástico, y alta temperatura de transición.- Es claro que para mejorar las propiedades mecánicas debemos- obtener un tamaño de grano fino por medio de una velocidad - de enfriamiento adecuada.

A las temperaturas de laminación, una buena parte del calor se pierde por radiación, siguiendo la ley de proporcio- nalidad a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (21).

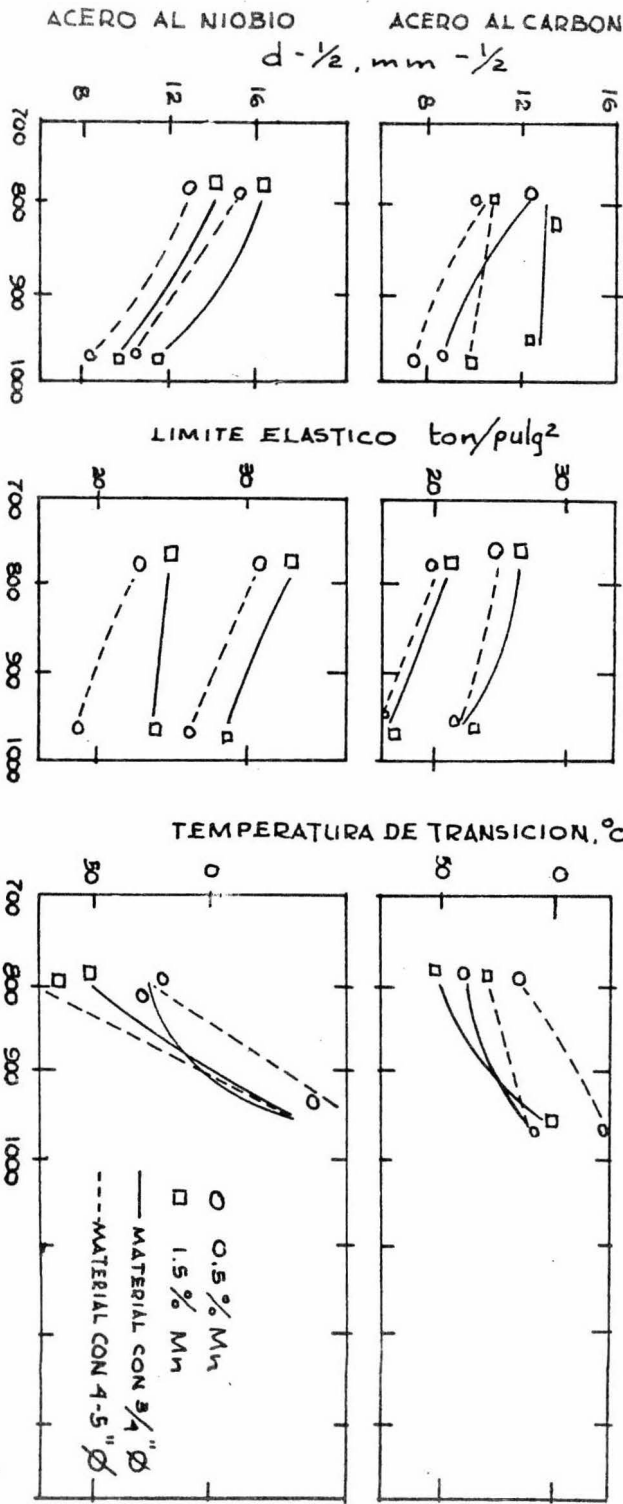


FIG. 13 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO SOBRE LAS PROPIEDADES Y EL TAMAÑO DE GRANO DE LA FERRITA.

La velocidad de pérdida del calor es mayor en los estados finales de laminación, puesto que el material tiene la máxima-deformación y, en consecuencia, mayor superficie radiante; - sin embargo, el material sigue con una alta temperatura, por lo que se hace necesario proporcionar un enfriamiento por medio de una técnica conveniente. Antes de ver las técnicas - de enfriamiento, es conveniente describir el mecanismo que - lo rige (15).

4.2 MECANISMO DE ENFRIAMIENTO

Cuando una pieza de acero caliente al rojo es sumergida en agua, la velocidad de calor eliminado sigue la rela---ción mostrada en la fig. 14. En el contacto inicial la gran diferencia de temperatura entre el acero y el agua conduce a una rápida transferencia de calor, por lo que se forma rápi-damente una capa de vapor alrededor del acero caliente, dis-minuyendo así la transferencia de calor.

Gradualmente se va enfriando el acero hasta que la capa de vapor pierde su estabilidad y de esta manera se resta-blece el contacto entre acero y agua, favoreciéndose una buena transferencia de calor, de este modo el acero se ha en---friado relativamente.

Si se mantiene la capa de vapor, el agua sólo se des-

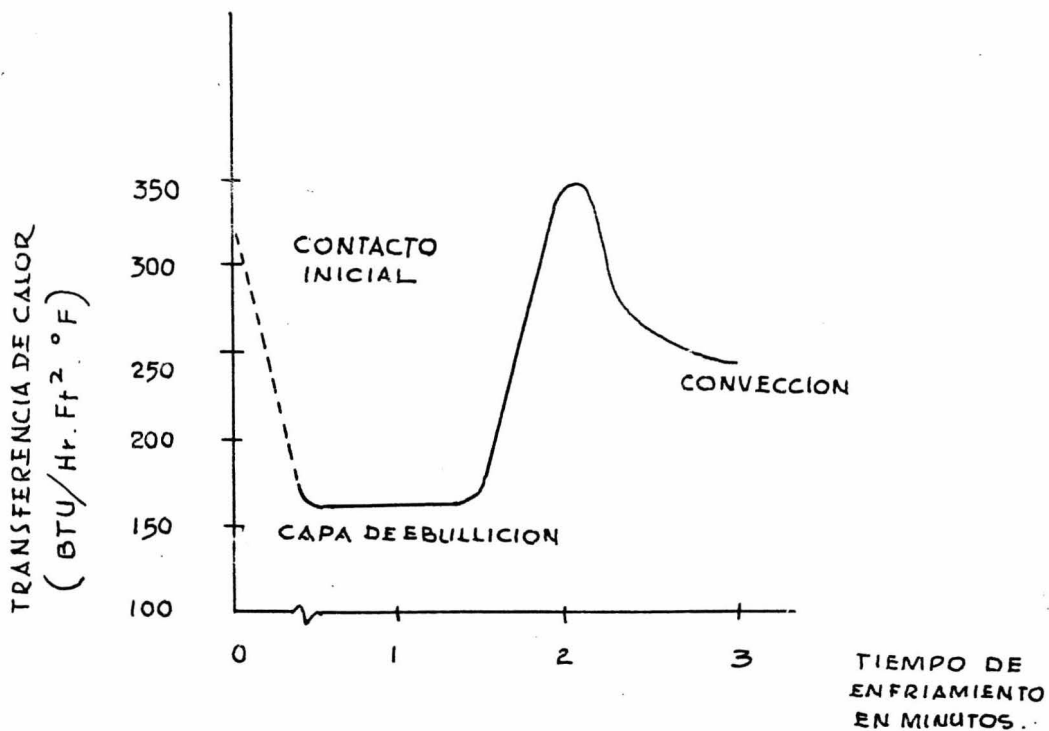


FIG. 14 VELOCIDAD DE ELIMINACION DE CALOR EN AGUA QUIETA

lizará sobre esta película sin que se manifieste un enfriamiento aparente.

Debido a que los sistemas de enfriamiento se basan en la transferencia de calor, es de interés señalar su definición:

$$\text{Desprendimiento de calor: } \text{Log} \frac{T. \text{ inicial}}{T. \text{ final}} = KHT$$

donde:

T. inicial = temperatura antes del enfriamiento

T. final = temperatura después del enfriamiento

H = coeficiente de transferencia de calor

T = tiempo de enfriamiento

K = coeficiente que depende de las dimensiones y propiedades térmicas del acero

4.3 SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

4.3.1 Enfriamiento con espreadores

Para obtener un enfriamiento del material, los molinos de laminación usan espreadores, distribuidos de acuerdo a las necesidades de operación. Estos deben tener una altura mínima de 1.50 m, con respecto al tren de laminación, para evitar salpicaduras de partículas calientes que los pueden dañar.

Con este sistema, las gotas iniciales que hacen contacto con la superficie caliente del material provocan una rápida expansión de la capa de vapor del material (fig. 15), por lo que las gotas siguientes son repelidas por esta película de vapor, y sólo llegarán a la superficie del metal --- aquellas que tengan la energía cinética suficiente para penetrar dicha capa.

Debido a la altura que deben tener, las pequeñas gotas que producen no tienen la energía suficiente para romper la capa de vapor que se forma junto a la superficie del material caliente (fig. 15).

Los espreadores sólo se recomiendan para su uso cuando son bajas las velocidades de laminación en materiales muy delgados. Se han experimentado posiciones diferentes a la vertical, y son:

- a) Espreadores inferiores. Se colocan entre los rodillos de la mesa de enfriamiento, por lo que tienen mayor proximidad a la superficie caliente del material y un enfriamiento efectivo, pero con la desventaja de que se pueden dañar por salpicaduras.
- b) Espreadores inclinados. No se recomiendan debido a que no producen un enfriamiento uniforme.

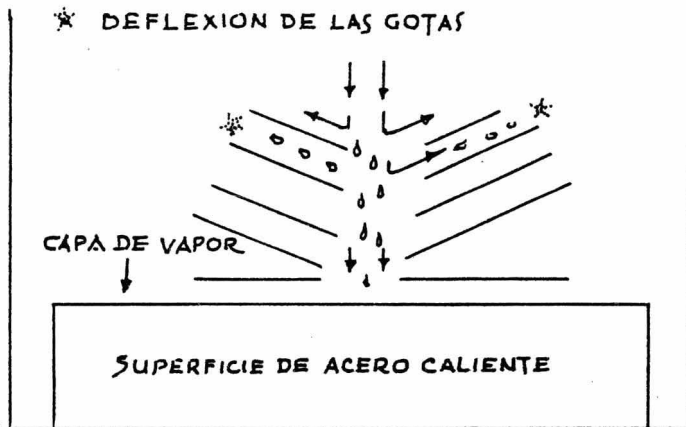


FIG. 15 DEFLEXION DE LAS GOTAS DE AGUA DE UNA CAPA DE VAPOR

4.3.2 Enfriamiento con sifones

Un sistema de enfriamiento más eficiente que el re---cientemente visto se obtiene cuando se usan sifones, aún --- cuando se usan bajas presiones de descarga de agua (15), lo que produce un flujo laminar conocido como columna coherente, y mientras se mantenga este flujo, no importa la altura a la que se usa el sifón para buena eficiencia del enfriamiento - (fig. 16).

La columna coherente rompe la película de vapor, con lo que se logra el contacto entre el metal y el líquido, te---niéndose por lo tanto una mejora en la transferencia de ca---lor.

Los sistemas de flujo laminar proporcionan la tempera---tura de enfriamiento necesario y la velocidad óptima de en---friamiento, lo que mejora el tamaño del grano, inclusive en los materiales que tienen gruesos espesores que en otras con---diciones resultarían pérdidas en las propiedades mecánicas,--- debido a las bajas velocidades de enfriamiento.

4.4 CONTROL DE LA TEMPERATURA

Predecir la temperatura de acabado en condiciones --- prácticas representa muchas dificultades, debido a las varia

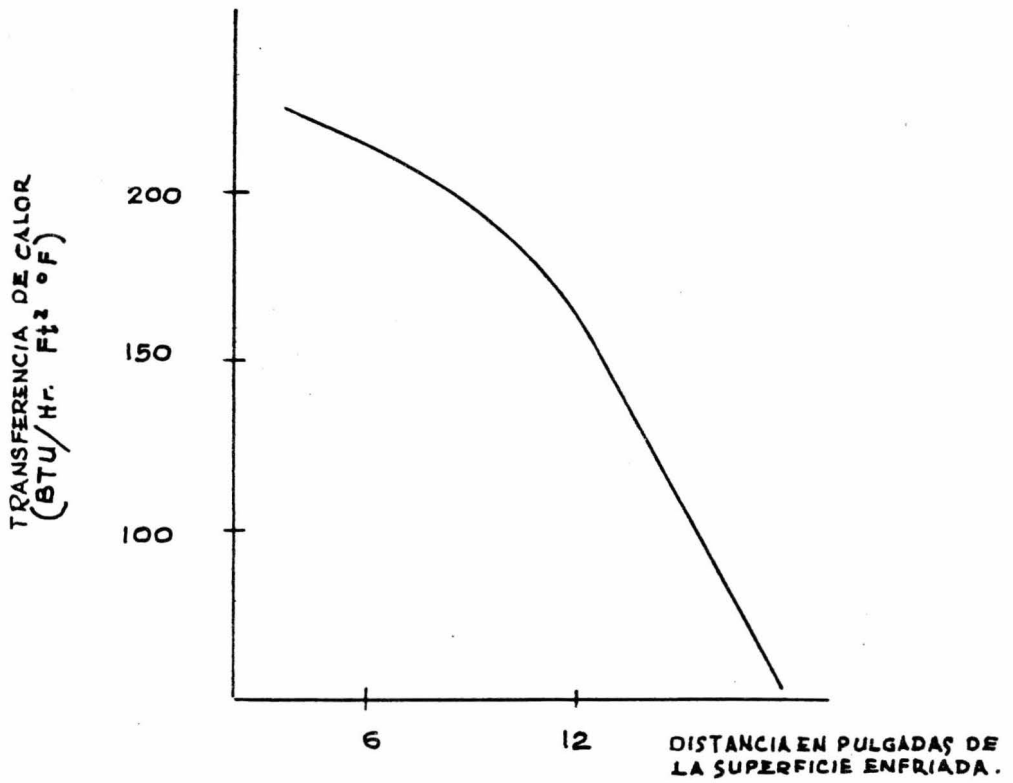


FIG. 16 .TRANSFERENCIA DE CALOR VS. DISTANCIA DEL ENFRIADOR

ciones que se tienen bajo diferentes circunstancias durante el proceso del material.

En el caso del acero, uno de los factores principales es la diferencia resultante en las capas de óxido debidas a variaciones en la temperatura, composiciones químicas, atmósferas protectoras, etc.

En condiciones prácticas, sólo es posible realizar la medición de la temperatura en la superficie. La distribución real de temperaturas internas, gradientes entre el centro y la superficie, sólo pueden estimarse. Durante los últimos años se han mejorado los equipos para medir la temperatura, los que han mejorado la rapidez y exactitud de operación. El más importante de estos es el pirómetro de radiación automático, actualmente esencial en la mayor parte de las plantas de laminación.

También se han mejorado los termopares (16), lo que ha dado mayor exactitud en la medición de temperaturas internas durante el rolado.

CAPITULO V

PROGRAMA DE LAMINACION

La laminación controlada normalmente hace uso de una programación de pases de laminación. Todo el proceso está diseñado para proporcionar un refinamiento sustancial al tamaño de grano fino de la estructura final, como se ha visto en los capítulos anteriores que se han enfocado principalmente a las variables que intervienen en el material que se procesa.

En este capítulo se estudiará, en parte, las características del equipo con que se trabaja el material, como son las capacidades de carga de los molinos. Además, se revisarán los tiempos de laminación múltiple, que es de gran utilidad para obtener mayor productividad de los trenes de laminación, principalmente en equipos antiguos que aún operan en algunas siderúrgicas del norte del país.

5.1 TIEMPOS DE LAMINACION

Debido a que el rolado controlado es una técnica reciente y no está completamente desarrollada, es necesario seguir estudiando y experimentando sobre la práctica para tener suficiente información y así establecer de manera definida, entre otras variables, los tiempos adecuados de laminación, para lo cual es necesario considerar los factores que intervienen en el material que se trabaja, como veremos a continuación.

5.1.1 Tiempo óptimo de laminación

Para tener un criterio sobre los tiempos de laminación controlado debemos considerar todos aquellos factores que intervienen en la obtención de un tamaño de grano fino de la ferrita en el producto final, como son la temperatura de recalentamiento, la cantidad de deformación y la temperatura a que se hace, velocidad de enfriamiento, etc.

5.1.2 Tiempos prácticos de laminación

Para tener una idea más aproximada de los tiempos de laminación, es necesario considerar lo que se ha discutido en la literatura (17, 18, 19), cuyos factores principales se muestran en la tabla 1. Además, se deben considerar las ca-

RANGO DE TEMPERATURA



EFFECTO

T1. SOLUCION DE Nb (CN)

T2. RECRISTALIZACION RAPIDA Y CRECIMIENTO DE GRANO

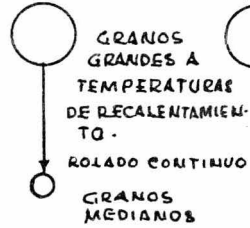
T3. RECRISTALIZACION LENTA SIN CRECIMIENTO DE GRANO

ABAJO DE T3 NO HAY CRISTALIZACION

T4. CALENTAMIENTO DE LA FERRITA.

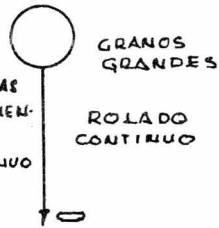
ABAJO DE T4 LA DEFORMACION DE GRAN AUMENTO DE LA RESISTENCIA

PLANCHA NORMAL



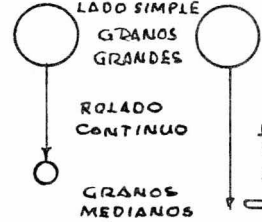
MALAS PROPIEDADES DE IMPACTO DESPUES DE LA TRANSFORMACION.

PLANCHA DELGADA.

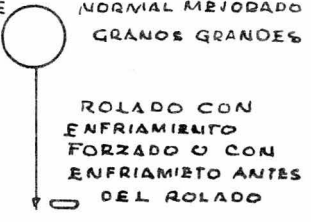


GRANOS FINOS NO COMPETAMENTE CRISTALIZADOS

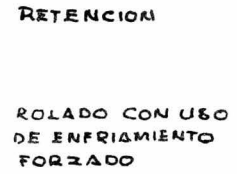
ROLADO CONTROLADO SIMPLE



ROLADO CONTROLADO NORMAL MEJORADO



GRANOS FINOS NO COMPETAMENTE CRISTALIZADOS.



AUSTENITA COMPLETAMENTE DEFORMADA QUE SE TRANSFORMA A FERRITA FINA, CON BUENAS PROPIEDADES DE IMPACTO, LIMITE ELASTICO.

TABLA. I PRESENTACION DE UN PROGRAMA DE ROLADO CONTROLADO

pacidades de carga de los molinos.

5.2 CAPACIDAD DE CARGA DE LOS MOLINOS

La capacidad de un molino, ya sea que se amplíe uno existente o se diseñe uno nuevo, tiene tres limitaciones controladas que son: térmicas, mecánicas y geométricas.

En lo que se refiere a características térmicas, ya se discutió en el capítulo anterior la importancia de la velocidad de enfriamiento del material que se trabaja.

5.2.1 Características mecánicas

Las características mecánicas de mayor interés para este proceso se relacionan a las cargas o capacidades de deformación de los molinos, ya que como se ha discutido anteriormente, la laminación de aceros al niobio requiere bajas temperaturas y, por lo tanto, grandes reducciones, por lo que se deben aplicar grandes cargas (20). En la fig. 17 se observa que después de una deformación, se tiene un gran aumento en la carga del molino para aceros al niobio (21), --- mientras que para aceros carentes de niobio muestran una disminución de la carga, lo que también sucede si el material es tomado directamente a bajas temperaturas de terminado, -- sin previa solubilización. Esto significa que se ha realizau

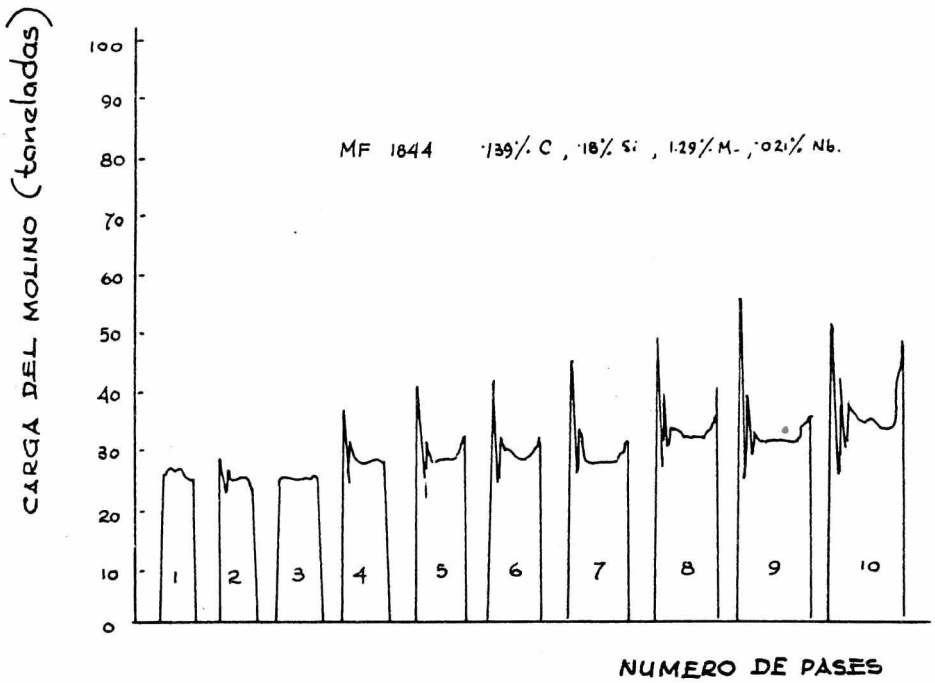


FIG. 17. REGISTRO TIPICO DE UNA CARGA DE MOLINO.

do la precipitación, por lo que se explica el aumento de la carga. Este efecto presenta la importante implicación práctica, de que cuando son estimadas las cargas de pases particulares, no dependen de la temperatura y reducción relacionadas al paso, sino del efecto acumulado en la deformación y precipitación durante los pases previos.

Las mediciones realizadas en los molinos actuales reflejan todos estos defectos. La fabricación de molinos depende de los datos de ensayo.

Se hace evidente que las fluctuaciones de carga pueden dificultar la definición de ciertas cargas de molino. El aumento de la carga final probablemente es causado por el enfriamiento final, la forma del extremo frontal además de un aumento extra debido a los efectos inerciales almacenados en los rollos que vienen del almacén.

La fig. 18 muestra los valores de la presión específica del rolado, obtenida en aceros de un contenido aumentado de Nb, usando 10% de reducción en los pases. Las cargas son muy similares a las observadas en aceros carentes de Nb durante los primeros pases a alta temperatura, y comienzan a diverger aumentándose con el total de la temperatura y aumentando el número de pases. Esto confirma el efecto acumulativo del esfuerzo en el acero al Nb. También es evidente que la velocidad relativa de aumento en las cargas se hace mucho

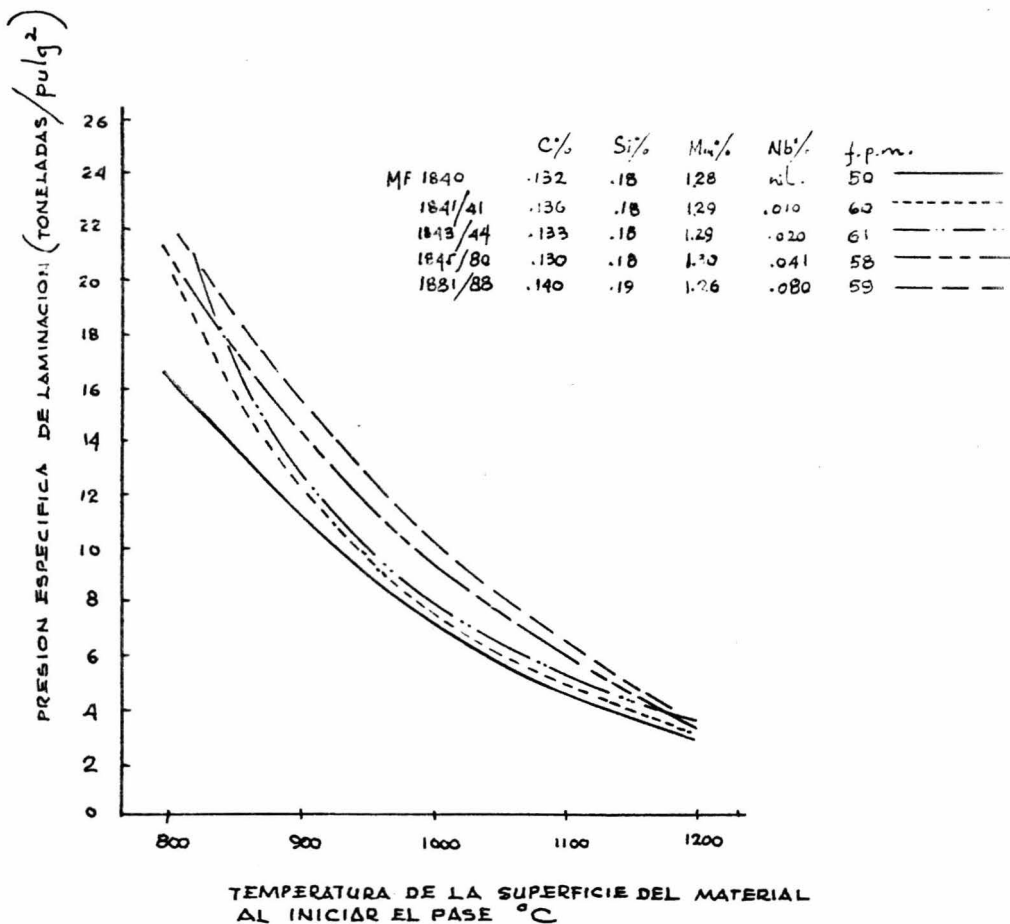


FIG. 18 EFECTO DEL CONTENIDO DE NI
SOBRE LA CARGA DE UN MOLINO.

mayor a altas temperaturas para aceros con alto contenido de Nb. La temperatura a la cual se observa la primera divergencia se aproxima a aquella en que puede iniciarse la precipitación; ésta, como ya se mencionó, es el mecanismo responsable de la inhibición de la recristalización.

A ambas temperaturas, e independientemente de la cantidad de niobio, todos los aceros alcanzan prácticamente los mismos niveles de carga.

Se recordará que los niveles de carga tienen gran influencia en la determinación de la estructura, lo que significa que se obtendrían efectos equivalentes con bajos contenidos de Nb si se realiza con deformación alta a bajas temperaturas.

El mecanismo de restauración mecánica normalmente opera durante el rolado en caliente, es limitado en aceros al Nb, lo que aumenta el efecto de la velocidad de deformación. La fig. 19 muestra que este es el caso en que un aumento en la velocidad de rolado produce un gran aumento en la carga tanto en aceros al Nb como en aceros al C. El rolado de aceros al Nb requiere de grandes cargas, no sólo porque se requieren bajas temperaturas y grandes reducciones, sino que es debido a la diferencia estructural en el comportamiento del material.

5.2.2 Características geométricas

5.2.2.1 Control de la forma de planos. Son tres los factores principales que determinan la calidad geométrica de los planchones: espesor, corona y planeidad. La falta de esta última aumenta cuando las elongaciones no han sido uniformes a través del ancho de la placa, por lo que son relacionadas a la evolución durante el proceso de las temperaturas locales.

La corona es la diferencia entre el espesor central y los bordes de la plancha; aumenta con la flexibilidad debido a las cargas del rolado y cambios en la forma del rollo debidos a expansiones térmicas. El reciente desarrollo de rodillos curvos alteran la corona y planeidad de la plancha. Regulando el grado de flexión del rodillo se tiene un medio -- efectivo para mejorar el control de la forma. El uso excesivo del rodillo curvado resulta en una disminución de su vida útil de trabajo. No es aceptable aplicarlo en todos los pases y una carga máxima admisible del programa del rolado puede no ser posible si la forma es llevada bajo control.

Para resultados más exactos del espesor, se puede hacer necesario un pase final de corrección, sobre todo para impedir la deformación a bajas temperaturas.

Esto puede ser más relevante si el rolado en caliente

es practicado durante la temperatura de transformación donde serían cambiadas las resistencias relativas en regiones diferentes de temperatura, así, los bordes de grano enfriados -- pueden ablandarse cuando sucede la transformación a ferrita, lo que puede causar algún efecto en la corona y el esfuerzo-residual, los que son responsables de la mala forma.

5.2.2.2 Otras formas geométricas. La discusión anterior se ha limitado a lo relacionado con la fabricación de planchón. Los otros campos de posible aplicación son barras, secciones, en los que las bajas temperaturas requeridas disminuyen las altas velocidades de producción; las ganancias de material producido en molinos reversibles requiere un estricto control de la forma, lo cual se hace por reducciones en los dos últimos pases.

La ductibilidad inherente al grano fino compensa en parte los problemas que se crean al aumentar el límite elástico, en las operaciones de formación en frío a las que este tipo de producto está sujeto.

Siendo una forma geométrica simple, las barras redondas son fáciles de ajustar al rolado controlado, realmente -- los primeros progresos se hicieron en molinos relativamente lentos.

En molinos relativamente lentos la técnica es de uso extendido, pero los molinos modernos tienen altas velocidades de rolado en que son esenciales muy altas temperaturas y las ganancias de temperatura debidas a la deformación son -- muy importantes. Entonces, en este tipo de molinos se requieren interpasos intensivos de enfriamiento para que sea posible el rolado controlado. Los usos estructurales, tales como barras corrugadas, son recomendables para el rolado controlado y evitar así el endurecimiento por deformación. Muy pequeñas deformaciones son dadas en los últimos pases, los que meramente son dedicados a dar al material forma y tamaño correctos.

Altas velocidades de productividad requieren de altas temperaturas, lo que afecta al rolado controlado, pero es de esperarse en esto, como en las otras formas mencionadas, la indudable ganancia en resistencia.

5.3 PROGRAMA DE LAMINACION MULTIPLE

Aquí se discutirá un programa de laminación múltiple que puede ser de utilidad en aquellas siderúrgicas que aún operan con viejos trenes de laminación, en los que se obtendría una mayor productividad al considerar esta secuencia -- que veremos a continuación.

Si las velocidades de enfriamiento son lineales con el tiempo, puede hacerse una representación gráfica como en la figura 19. El pase primero representa el laminado continuo que arriba fue considerado como el más efectivo para propósitos de rolado controlado, lo que también suministra máxima utilización del molino. Puede completarse por un período de retención de prerrolado, el cual también es posible en todos los demás pases. Debido a las limitaciones térmicas puede ser necesario introducir un período de retención (pase segundo), lo que provocaría una sensible disminución en la utilización del molino.

Si el período de retención es lo suficientemente grande, se puede rolar otro planchón de manera normal (pase tercero), mientras la plancha controlada es retenida en la cuna. La máxima utilización del molino se tiene cuando el rolado normal requiere tanto tiempo como la retención. Esta práctica puede limitarse por posibles diferencias en temperaturas específicas de recalentamiento, a menos que estuvieran disponibles dos recalentadores. Alternativamente (pase cuarto), dos planchones pueden tener rolado controlado simultáneamente y su utilización máxima requerirá tiempos iguales para --desbaste y terminado como para retención.

Para materiales gruesos, cuando la retención es mayor que el tiempo de rolado total, es posible el quinto pase. -

TEMPERATURA

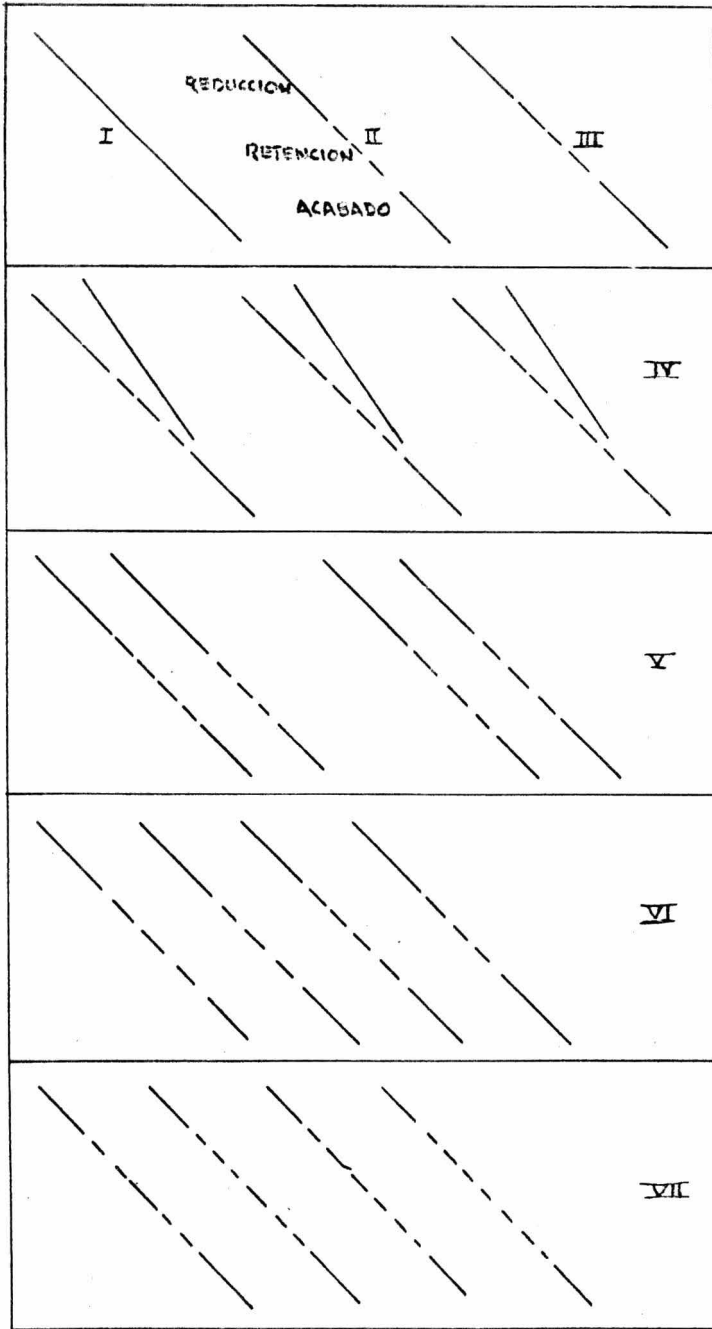


FIG. 19.-PROGRAMAS DE ROLADO CONTROLADO

Tres planchones son rolados, el primero es terminado, el ter cero reducido, mientras el segundo es retenido. La utilización máxima requiere tiempo total de laminación igual al de retenición. Una variación de esto es el pase sexto (18); el rolado del segundo planchón es continuo por un corto tiempo después del terminado del primero, éste es retenido otra vez, mientras el tercero es desbastado.

Una explicación posible de esta práctica puede ser -- que, debido a la carencia de una cuna, el planchón es retenido en la mesa de rolado. Después de terminado el primero y en orden para llevar a desbaste el tercero, el segundo necesita transferirse de dentro hacia afuera del molino y se da un pase extra mientras dicha transferencia se efectúa.

Ajustando la amplitud de retención del planchón, los tiempos de retención pueden ser complementados con la condición de máxima utilización, o sea, que la primera retenición iguala a la final y la segunda iguala al tiempo de desbaste. También, si son fuertes las reducciones intermedias y la primera retención es suficientemente corta para permitir que -- sea complementada la recristalización, el crecimiento del -- grano puede suspenderse y conservarse una estructura homogénea, y permitiendo la amplitud de la retención, puede ser posible controlar las velocidades de pérdidas de calor, permitiendo así una máxima utilización.

CONCLUSIONES

EFFECTO DE LOS COMPONENTES DE LOS ACEROS ESTRUCTURALES

1. Para obtener un tamaño de grano fino de la ferrita se -- usan aleantes refinadores, siendo el niobio el más efectivo, ya que además de que retarda la recristalización, - inhibe el crecimiento del grano.
2. Para conservar la ductilidad, es necesario controlar el contenido de impurezas.
3. El mecanismo principal que favorece la obtención de al-- tas resistencias en aceros al niobio es el endurecimien- to por precipitación.

PROCESO DE RECALENTAMIENTO

4. La etapa de recalentamiento proporciona suficiente tempe- ratura al material para que pueda ser deformado en el -- proceso de laminación, y para mantener al niobio en solu

ción que en posterior enfriamiento dará lugar a la precipitación; estas pequeñas partículas se fijan en los bordes de grano y de esta manera se obtiene un tamaño de -- grano fino, ya que se impide su crecimiento.

5. La temperatura requerida para disolver una cierta cantidad de niobio se estima a partir de la relación que existe entre los datos de solubilidad y temperatura.
6. El tamaño y distribución de las partículas del precipitado tienen gran influencia sobre el comportamiento del material. A mayor heterogenicidad de las partículas, ocurre un crecimiento espontáneo del grano, lo que afecta al material durante la deformación y recristalización. - Tamaños diferentes muestran estos efectos:
 - a) Partículas de 50 \AA \varnothing retardan la cristalización debido a que se fijan en los bordes de grano.
 - b) Partículas de 200 \AA \varnothing no tienen efecto significativo en la velocidad de recristalización.
 - c) Partículas mayores de 1 micrón, la recristalización se acelera.

PROCESO DE TRABAJADO EN CALIENTE Y DE DEFORMACION DURANTE EL LAMINADO

7. El trabajado en caliente se usa en metalurgia para tener una buena geometría y valores adecuados en las propieda-

des mecánicas del material. Para que éste se deforme, - debe tener una temperatura superior a 0.6 de su temperatura absoluta de fusión.

8. Antes que se manifieste cualquier deformación en los granos del material, se necesita una reducción mínima del - 20%. Una vez que se ha reducido el material ocurre el - crecimiento del grano que está controlado por la velocidad de recristalización y la velocidad de crecimiento de los granos recristalizados. Estas características aumentan linealmente con la temperatura y disminuyen con la - presencia de pequeñas partículas de precipitados de nio- bio.
9. La deformación favorece el fenómeno de precipitación, -- para que se fije efectivamente en las uniones de grano - esta precipitación se requieren bajas temperaturas duran- te la deformación. Por lo tanto, se le deberá dar la má- xima deformación posible, a la menor temperatura posible, - al material.

PROCESO DE ENFRIAMIENTO

10. Las propiedades mecánicas del material están muy ligadas al tamaño del grano, y éste a su vez dé la velocidad de enfriamiento. Para impedir el crecimiento del grano se - recurre al enfriamiento forzado con el uso de distribui-

dores de agua de flujo laminar.

PROGRAMA DE LAMINACION

11. La laminación controlada, además de que se aplica a productos planos, es posible utilizarla para no planos.
12. Una manera de aumentar la productividad de un tren de laminación es rolar varios materiales a la vez, y así, --- mientras unos materiales se laminan de manera normal, -- otros se trabajan por laminado controlado.

Se puede ver que esta es una técnica conveniente de - adaptar a nuestro país para satisfacer, principalmente, la - demanda de productos planos de manera adecuada y con buena - calidad del producto.

De todos nosotros es sabido que siempre hay diferen-- cias entre la teoría y la práctica, y es muy probable que al aplicar esta nueva técnica se encuentren dificultades que se irán superando con la experiencia que se adquiere principal- mente cuando se vencen los problemas que se van presentando.

BIBLIOGRAFIA

1. K. J. Irvine, T. Gladman, J. Orr and F. B. --- Pickering, J.I.S.I., 1970, 208, 717.
2. Dieter, G. E. Metalurgia Mecánica, 148. Ed. -- Aguilar.
3. R. W. K. Honeycombe. Effect of Second Phase -- Particles on the Mechanical Properties of ---- Steel, I.S.I. London, 1971.
4. E. Snape and N. L. Church. Journal of Metals, - 1972, 24, 23.
5. J. H. Woodhead. A ser publicado.
6. R. C. Hudd, A. Jones and M. N. Kale, J.I.S.I., 1971, 209, 121.
7. C. Antonie and G. Delta Gatta. Mem. Sci. Rev.- Met. 1968, 65, 315.
8. J. J. Jonas, C. M. Sellars and W. J. McG. Te-- gart, Met. Rev., 1969, 14, 130.
9. C. M. Sellars and W. J. Mc. Tegart, Met. Rev., 1972, 17.
10. Avner, S. H. Introducción a la Metalurgia Físi ca, 81, McGraw Hill.
11. C. Rossard. Rev. Met. 1968, 65, 181.
12. R. A. P. Djaic and J. J. Jonas, J.I.S.I., 1972, 210, 256.
13. Bacha Ch. P. Elementos de Materiales de Inge-- niería, 190, Harper & Brothers Pub. N. Y.
14. Lindenvald N. La Estructura de los Metales, 24, P.U.A.
15. E. R. Morgan, T. E. Dancy and M. Korchynsky, - Journal of Metals, 1965, 17, 829.

16. C. R. MacKenzie, J.I.S.I., 1971, 210, 918.
17. Strong Tough Structural Steels, I.S.I. Sp. Rep. 104, 1967.
18. M. Civallero and C. Parrini. Proc. ICSTIS. --- 1971, ISIJ, 758.
19. M Pettifor, Ph.D. Thesis, University of Nottingham, 1969.
20. P. M. Cook and A. W. McCrum. The Calculation of load and torque in Hot Flat Rolling, BIRSA-pub.
21. McAdams. Heat Transmission, 55.
22. Chamorro Díaz, M. A. Principios Básicos del -- Proceso de Laminación, Monografía, 1974.
23. J. M. Gray, D. Webster, and J. H. Woodhead, -- J.I.S.I., 1965, 203, 812.
24. W. B. Morrison and J. H. Woodhead, J.I.S.I., - 1963, 201, 43.