



**Bernd Schulz Eglin**  
Ingeniero Civil Metalurgista  
Dr. (Ph.D.) en Metalurgia y  
Ciencia de Materiales  
Prof. Jornada Completa  
Departamento de Metalurgia

## METALURGIA FISICA DE LOS ACEROS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACION

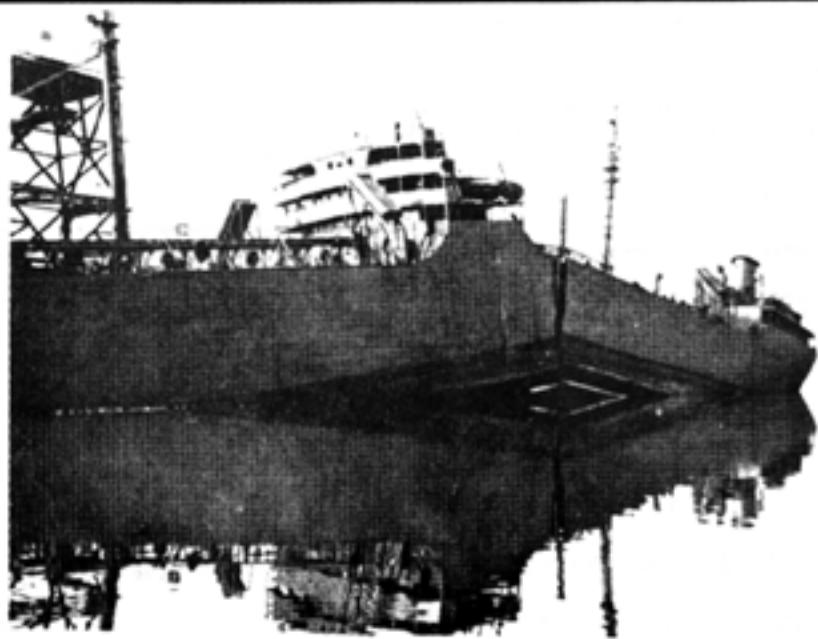
El interés por un artículo de esta naturaleza nació a raíz de una charla que tuvo oportunidad de dictar su autor durante el verano pasado en la Planta Siderúrgica Huachipato de CAP.

Hoy en día se define como acero de alta resistencia al acero que posee un esfuerzo de fluencia de por lo menos 30 Kg/mm<sup>2</sup>. Esto significa en Chile, aceros fabricados según norma INN A52-34ES y A63-42H. El primero es estructural de soldabilidad garantizada y por consiguiente con rango de composición restringida. Esencialmente son aceros de estructura ferrítico-perlítica que contienen carbono y manganeso además de muy pequeñas adiciones (algunas décimas o centésimas de %) ya sea de aluminio, vanadio, y/o niobio (columbio) para afinamiento de grano y/o endurecimiento por precipitación.

Hace aproximadamente 20 años atrás había

muy poco desarrollo en el campo de los aceros estructurales. El acero "dulce"; que corresponde al fabricado en mayor cantidad, se consideraba poseedor de una estructura metalúrgica más o menos simple, y como tal, capaz de muy poco mejoramiento. La desaparición repentina de los barcos "Liberty" de casco totalmente soldado durante la parte final de la segunda guerra mundial, y el hecho de que se quebraron en dos en el muelle (Fig. 1), alteró la total concepción de los requisitos exigidos a los aceros. El comportamiento a la fractura por impacto llegó a ser trascendental, como también la soldabilidad.

Fig. 1 Fotografía de un buque estanque "Liberty" que falló en el muelle (1).



La historia del desarrollo de los HSLA es interesante y pone en evidencia los cambios en los criterios con que son desarrollados los aceros. Originalmente se diseñaba basándose en la resistencia máxima de tracción, sin considerar el esfuerzo de fluencia, energía de impacto o la soldabilidad. Los aceros contenían relativamente alto carbono, como se puede apreciar en la tabla 1.

TABLA 1  
COMPOSICIÓN

AÑO	%C	%Si	%Mn
1907	0,27	1,2	0,72
1932	0,30	0,15	1,2
1934	0,27	0,25	1,5

Estos aceros eran baratos, ya que el carbono es el elemento de aleación más barato; se usaban en la condición de laminado con poco o ningún control sobre la temperatura de laminado. La figura 2 muestra el efecto del carbono sobre las propiedades mecánicas en aceros al carbono con menos de 1% Mn en planchas laminadas en caliente con espesores de 1/2 a 3/4 pulgadas.

La necesidad de usar planchas soldadas en vez de remachadas como un medio de unión requirió un contenido de carbono más bajo. La resistencia se mantenía aumentando el contenido de manganeso. La soldabilidad se garantizó con la relación empírica del carbono equivalente:

que no es otra cosa que el efecto de estos elementos sobre la disminución de la temperatura de comienzo de la martensita ( $M_s$ ) y que refleja la ventaja de reemplazar carbono por manganeso para mantener la resistencia con buena soldabilidad, si se considera que la resistencia está dada por las siguientes expresiones:

Resistencia a la tracción:

$$RT(\text{psi}) = 42.800 + 4.000 (\% \text{Mn}) + 12.000 (\% \text{Si}) + \\ + 567 (\% \text{Perlite}) + 224 (d^{-1/2})$$

Esfuerzo de fluencia:

$$Y(\text{psi}) = 15.000 + 4.730 (\% \text{Mn}) + 12.200 (\% \text{Si}) + \\ + 550 (d^{-1/2})$$

en que  $d$  es el tamaño de grano ferrítico medido en pulgadas. Estas relaciones están ilustradas en las Figs. 3 y 4.

La falla por fractura frágil de estructuras soldadas llevó al reconocimiento que la fracto-tenacidad o resistencia al impacto era esencial, y así la necesidad de una temperatura de transición de impacto baja se hizo obligatoria. También se hizo evidente que un mayor esfuerzo de fluencia era más importante que una gran resistencia a la tracción. Así el contenido de carbono fue bajado aún más, manteniéndose alto el manganeso. Las ventajas de razones altas de Mn/C sobre la tenacidad al impacto (Figs. 5, 6 y 7) y el efecto del tamaño del grano fueron establecidas al fin (Fig. 8).

$$\text{CE} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo}}{10} \leq 0.4 \text{ a } 0.45$$

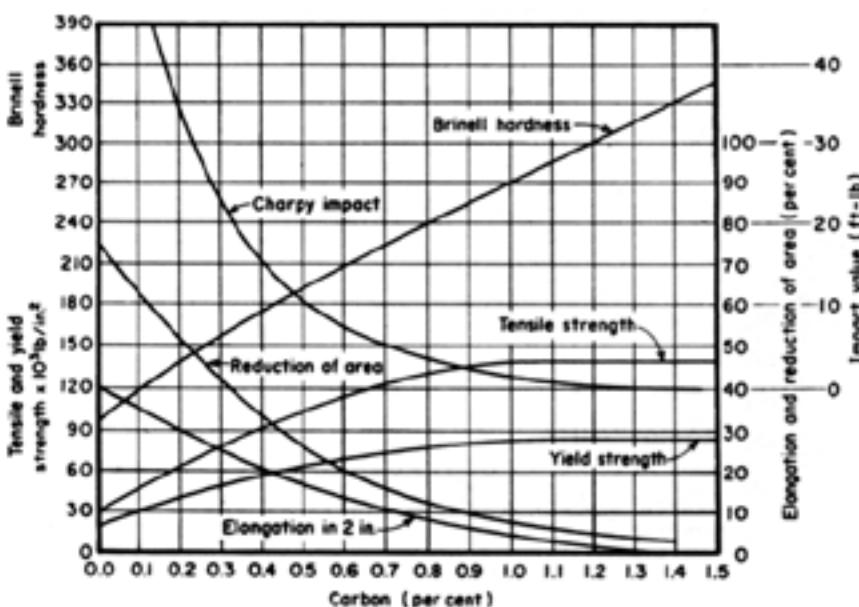


Fig. 2 Efecto del contenido de Carbono sobre las propiedades del acero laminado en caliente (2).

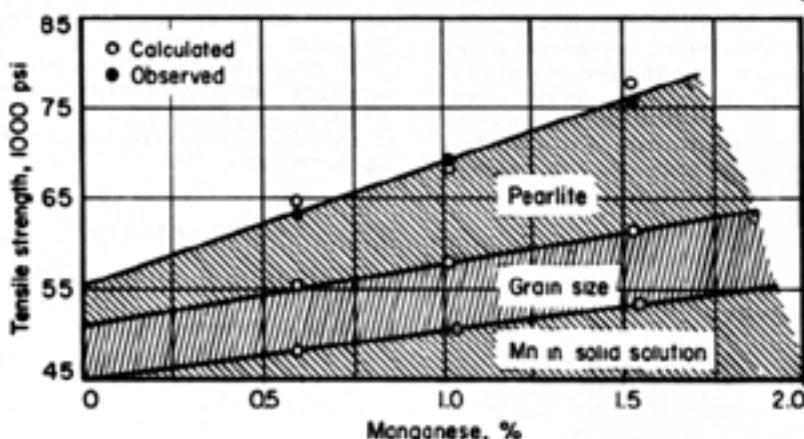


Fig. 3 Efecto del Mn sobre la resistencia (6).

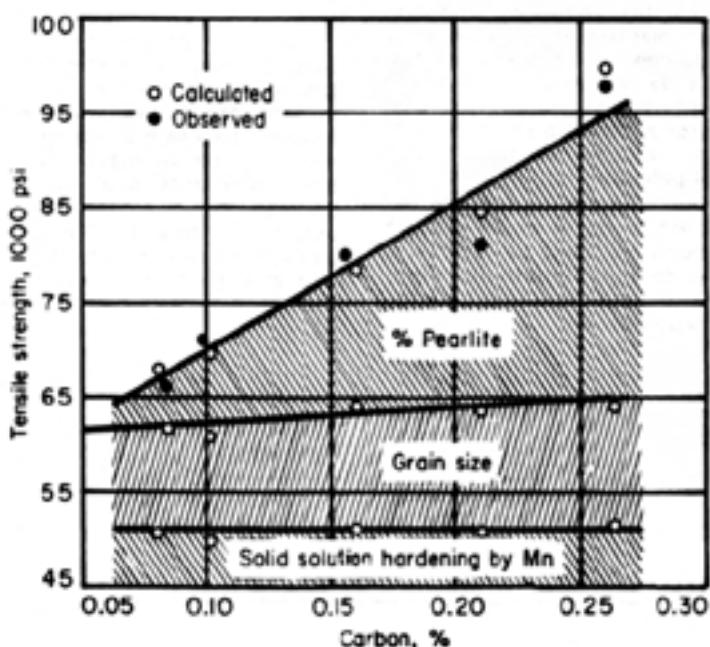


Fig. 4 Efecto del C sobre la resistencia (6).

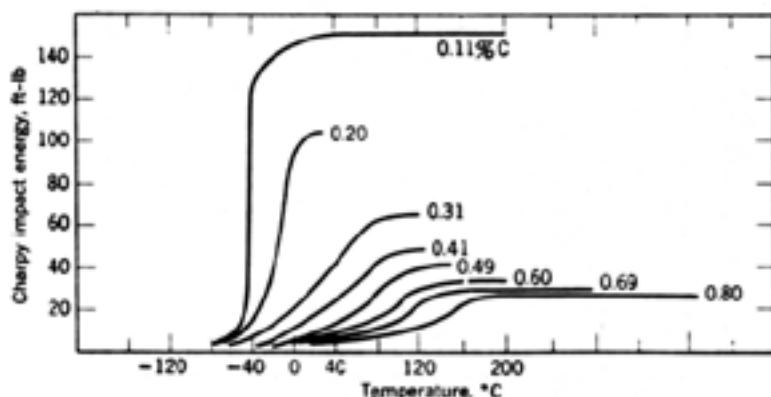


Fig. 5 Efecto del contenido de carbono sobre las curvas de energía de impacto (1).



PRODUCTOS MASISA LA NOBLEZA DE LA MADERA Y LA MÁS ALTA TECNICA DE LA INDUSTRIA AL SERVICIO DE LA MUEBLERIA Y LA CONSTRUCCION

GERENCIA DE VENTAS:  
Santiago - Ejecutivo 1256 - Fono 988111 - Casilla 983

GERENCIA GENERAL:  
Viña del Mar - Choncholi - Fono 4461 - Casilla 40-A

PLANTAS:  
Viña del Mar - Choncholi  
Manuel Rodríguez 1040 - Fono 81128 - Casilla 1957 Concepción.



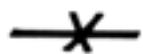
MADERAS Y SINTETICOS S.A.

# BARRACA PANAMERICANA

CLAUDIO VILLALTA PLANAS



CARROCERIAS PARA CAMIONES  
COLOSOS Y CAMIONETAS  
CASAS PREFABRICADAS  
GALPONES INDUSTRIALES  
MADERAS EN BRUTO Y ELABORADAS



CAMINO LONGITUDINAL NORTE S/N  
FONO 34638 - CASILLA 215

TALCA

**GLEISNER**

FERRETERIA INDUSTRIAL S.A.

FUNDADA EN 1856

SANTIAGO - TALCA - CAUQUENES  
CHILLAN - LOS ANGELES  
CONCEPCION

## FERRETEROS IMPORTADORES

Al servicio de la industria, Minería, Construcción, Agricultura, con la experiencia de sus 121 años de existencia.

- Artículos de Seguridad Industrial:  
Protector, "BATA" - "WILSON" - Guantes, Trajes de agua.
- Bombas de todo tipo Importadas y Nacionales:  
"SIH", "HALBERG", "YACUZZI", "CIC", "LEADER", "VOGT".  
Para agua, ácido, vacío, etc.
- Motores Eléctricos "CIC".
- Motores Bencina "BRIGGS" y "STRATTON".
- Motores Diesel.
- Herramientas Eléctricas: "BOSCH", "BLACK" y "DECKER".
- SERVICIO DE INSTALACION, MANTENCION Y REPUESTOS.
- DEPARTAMENTO ESPECIAL CON ASESORIA TECNICA:  
Rodamientos "SKF", Rehenes "STEFA".  
Surtidio completo en pernos "AMERICAN SCREW".  
Pinturas "CERESITA".  
"SIKA", "FERROBET".  
Tratamientos de aguas "AGUASIN", químico analista.

### DISTRIBUIDORES:

"GOD-YEAR", "LOCTITE", "MOLIKOTE", "CHESTERTON", "GEDORE", "SARCO", "FACTOMET", "STIHL", "BALFOUR", "STARRET", "CRESCENT", "HILTI", "HIDROSISTEMAS D-TROL" (FITTINGS PLASTICOS DE POLIPROPILENO), "PLASTICOS WARD", "AZULEJOS BRASILEÑOS KLABIN".

122 AÑOS AL SERVICIO

DEL PAÍS

Servicio de Encargos

Estacionamiento para clientes

BARRIOS ARANA 402 · CAS. 45-C

FONO 22335 - TELEX 60029

CONCEPCION

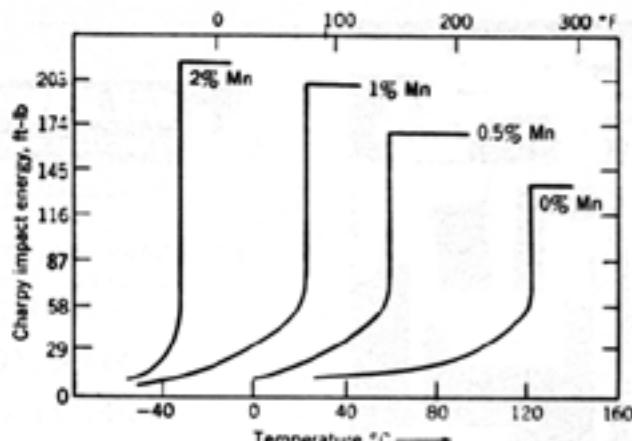


Fig. 6 Efecto del contenido de manganeso sobre las curvas de energía de impacto (1).

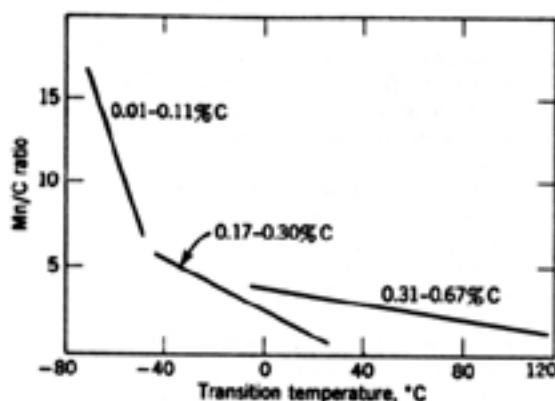


Fig. 7 Efecto de la razón Mn/C sobre la temperatura de transición dúctil-frágil (1).

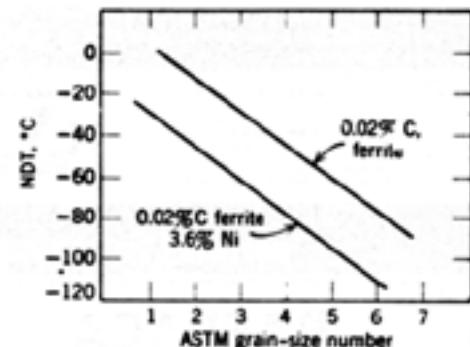


Fig. 8 Efecto del tamaño de grano sobre la temperatura de transición dúctil-frágil para acero sin y con níquel (1).

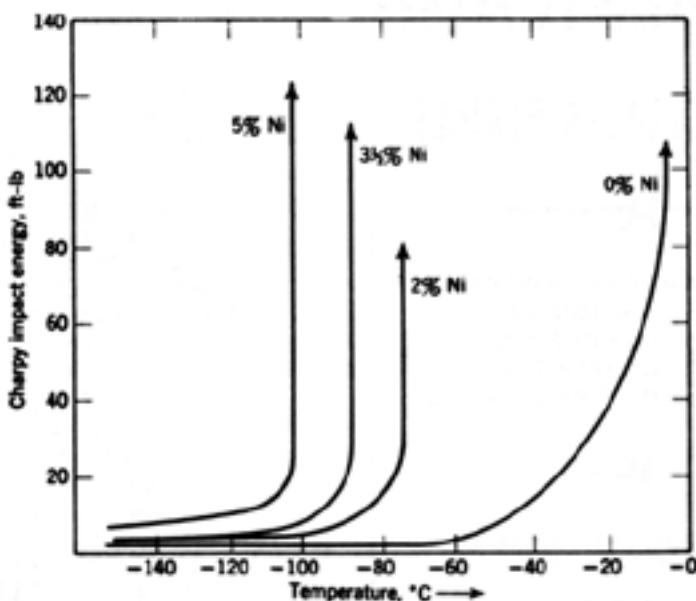


Fig. 9 Efecto del contenido de níquel sobre las curvas de energía de impacto (1).

El único otro cambio composicional que resulta en aumento de la tenacidad del acero es la adición de níquel, que no es usado extensamente por el costo que involucra (Figs. 8 y 9).

El siguiente paso, entonces, fue producir aceros con grano ferrítico fino. Cabe destacar aquí que el afinamiento de grano es la única variable metalúrgica que junto con aumentar el esfuerzo de fluencia también aumenta la tenacidad (Fig. 10) y sin disminuir la soldabilidad. La Fig. 11 muestra el efecto del tamaño de grano sobre el esfuerzo de fluencia, que sigue la conocida ecuación de Hall-Petch:

$$Y = Y_0 + K_y d^{-1/2} \quad \text{en que el } K_y \text{ Kgmm}^{-3/2}$$

aceptado hoy en día está comprendido entre 1.43 y 2.35  $\text{Kgmm}^{-3/2}$  cuando el diámetro del grano ferrítico se mide en mm.

Fig. 10 Efecto del afinamiento de grano sobre la tenacidad y resistencia (9).

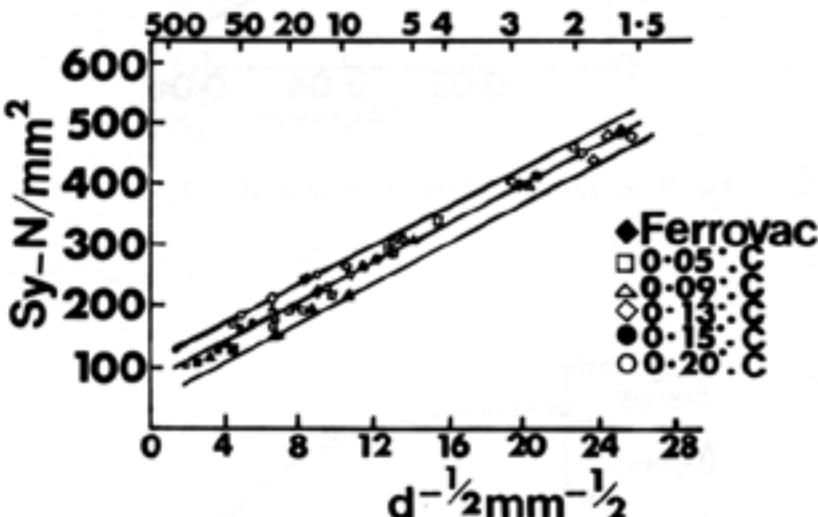
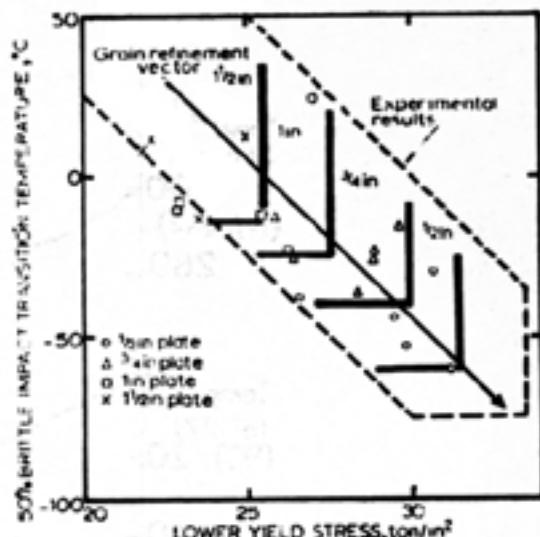


Fig. 11 Tamaño de grano ferrítico versus esfuerzo de fluencia (3).

El primer modo de afinar el grano en los aceros fue con adiciones de aluminio. La precipitación de AlN interfiere con el crecimiento austenítico que entonces a su vez se transforma en ferrita con un tamaño de grano menor. Este efecto es aprovechado al máximo en aceros normalizados, pues el AlN precipita finamente en el rango 600-800°C, retardando así efectivamente el crecimiento de grano austenítico durante el normalizado. El resultado fue un aumento en el esfuerzo de fluencia y una baja en la temperatura de transición de impacto por debajo de 0°C (Fig. 12). Uno de los inconvenientes con esta práctica es que requiere un acero totalmente desoxidado o calmado antes de proceder a la adición del aluminio, pero la mayor desventaja con este acero está asociada a la imposibilidad de producirlo con grano fino en calidad de planchas de soldabilidad garantizada, o

sea, bajo C y Mn, ya que el bajo C y Mn, aumentan la temperatura  $A_3$ , de transformación austenita-ferrita, obligando a normalizar a más alta temperatura con el consiguiente engrosamiento y disolución del AlN y pérdida de su efecto afinador de grano.

Un aún mayor aumento en el esfuerzo de fluencia se logró por endurecimiento por precipitación, manteniendo bajo el carbono y el manganeso, usando adiciones de niobio, vanadio y titanio. La adición principal es el niobio ya que permite un aumento de resistencia en la condición de laminado, lo que tiene ventajas económicas, pero la tenacidad de impacto no fue buena debido a que el tamaño de grano en la condición de laminado fue grueso. Esto condujo a usar una temperatura final de laminado baja, que produce un tamaño de grano fino (Fig. 13) y mantiene algún grado de endurecimiento por precipitación.

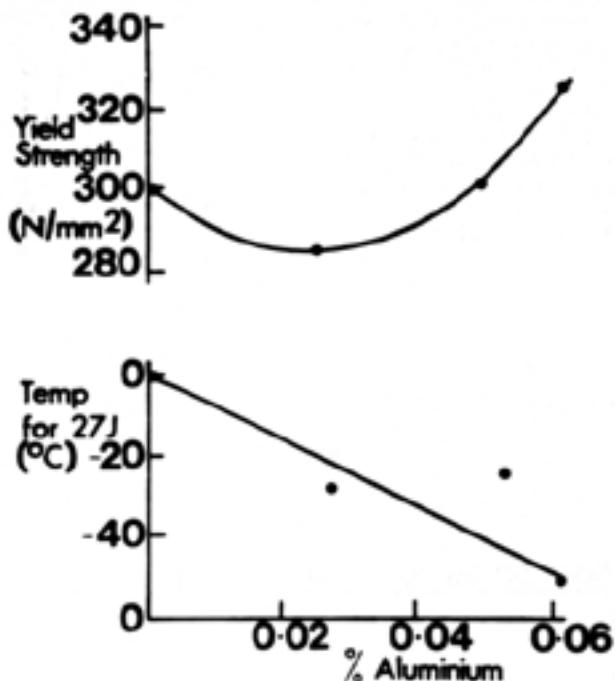


Fig. 12 Efecto del contenido de aluminio (3).

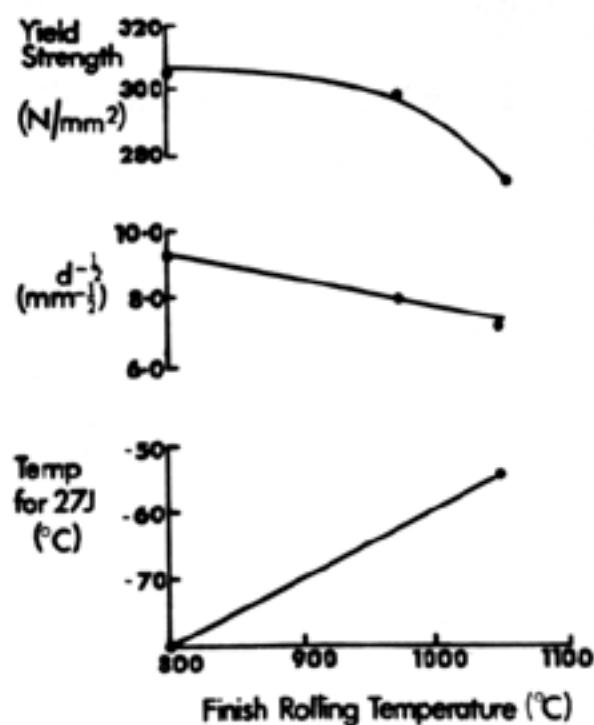


Fig. 13 Influencia de la temperatura final de laminado (3).

El esfuerzo de fluencia alcanzado aumentó hasta 45.7-53.3 Kg/mm<sup>2</sup> con una temperatura de transición dúctil-frágil de impacto tan baja como -80°C. Estos aceros de alta resistencia y baja aleación, grano afinado, endurecidos por precipitación y laminados, controladamente, al ser obtenidos por niobio tienen la ventaja económica que se producen en la calidad de aceros semi-calmados, lo que significa un mayor rendimiento del lingote.

La Fig. 14 es un cuadro esquemático que resume el efecto de las distintas variables sobre la resistencia y la tenacidad, se puede observar que el modo más económico y efectivo de aumentar la resistencia y la tenacidad simultáneamente en aceros de estructura ferrítico perlítica es por adición de Mn y afinamiento de grano.

No debe pensarse que este desarrollo fue casual o al azar. De hecho, es un logro sólidamente basado en bastante investigación metalúrgica sistemática, y como tal, puede ser considerada como un buen ejemplo de como los desarrollos están basados, y en verdad muchas veces no llegan hasta que se disponga de un conocimiento básico de las relaciones estructura-propiedades y sus transformaciones.

## MICROALEACION

La formación de precipitados en la estructura de los aceros permite aumentar marcadamente la resistencia pero con una pérdida en la tenacidad. Sin embargo, trabajos más recientes han podido combinar el endurecimiento por precipitación con afinamiento de grano, usando adiciones de Nb, V o Ti. La efectividad de estos elementos depende de su solubilidad en la austenita, lo que controla cuánto puede ser disuelto y así estar disponible para la precipitación posterior.

La solubilidad ha sido determinada para los casos de interés. El niobio forma carbonitruros:

$$\log [Nb] [C] + \frac{12N}{14} = -\frac{6770}{T} + 2.26$$

y para el caso del vanadio:

$$\log [V] [N] = -\frac{8330}{T} + 3.46$$

ya que el carburo de vanadio  $V_4C_3$  está totalmente disuelto a los 900°C en el caso del titanio ocurre que el nitrógeno TiN es insoluble hasta 1.350°C, luego

$$\log [Ti] [C] = -\frac{7000}{T} + 2.75$$

con las cantidades usadas 0.03% Nb o 0.01% V siempre hay invariablemente algunas partículas sin disolver a temperaturas convencionales de normalizado (900 a 950°C) que permiten mantener un grano austenítico fino y así, después de la transformación a ferrita obtener un grano ferrítico fino. Estas mismas partículas no son las que producen endurecimiento por ser demasiado pocas y gruesas. Durante el enfriamiento precipita  $V_4C_3$  o Nb(CN) en la interfase ferrita-austenita durante la transformación, que forma líneas de finos precipi-

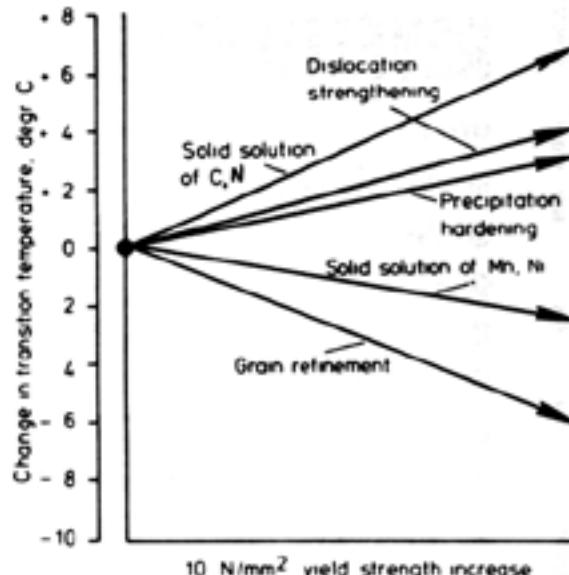


Fig. 14 Diferentes mecanismos de endurecimiento y su efecto sobre la temperatura de transición (4).

tados responsables del endurecimiento (Fig. 15). Debido a la mayor solubilidad del  $V_4C_3$  comparado con el NbC, los aceros al vanadio se endurecen por precipitación incluso después del normalizado convencional, mientras que en el acero al niobio sólo se logra afinamiento de grano pues la solubilidad del NbC a 950°C es demasiado pequeña.

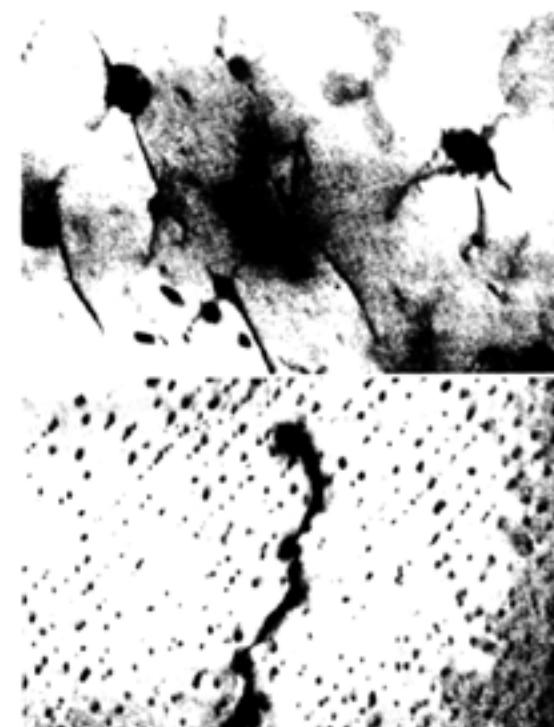


Fig. 15 Precipitados de niobio, note que aparecen finamente después de recocido a 1.250°C, mientras que a 950°C están engrosados (10).

# REVESTIMIENTOS DE GOMA SKEGA

para:

- MOLINOS
- MALLAS DE HARNEROS
- CHUTES
- TOLVAS DE CAMION
- BOMBAS
- CELDAS DE FLOTACION
- PARTES MOLDEADAS
- CAÑERIAS

fabricados en:

**SKEGA  
CHILENA  
S.A.**

Fono 355  
CONCON  
Casilla 277  
VIÑA DEL MAR

**REMA LTDA.**

INGENIERIA  
ASESORIA TECNICA  
VENTAS  
Ramón Carnicer 7  
Fonos 226247  
227514  
SANTIAGO



## SUPERMERCADO LISTO

15 AÑOS AL SERVICIO DE LA XII REGION  
CON SUS DOS LOCALES DE VENTAS

1º PISO: SUPERMERCADO  
2º PISO: SUPERTIENDA

21 de Mayo 1133 – Fonos: 22721 – 22621  
PUNTA ARENAS

INDUSTRIA MADERERA  
MONTE ALTO  
RIO RUBENS

EL ASERRADERO MECANIZADO  
MAS AUSTRAL DEL MUNDO

Bories 462 – Fonos: 21607 – 23674  
Casilla 9 – PUNTA ARENAS

## SERVICIOS Y LEASING SUD AMERICANOS LTDA. CPA.

OFRECE SUS SERVICIOS  
DE LEASING EN EQUIPOS  
Y VEHICULOS APOYADOS  
EN LA EXPERIENCIA  
INTERNACIONAL Y NACIONAL  
AL ENCONTRARSE  
A LA FECHA  
OPERANDO EN CHILE  
MAS DE 600 UNIDADES

Costanera 1436 – Fonos: 24023/24706  
Casilla 111 D – PUNTA ARENAS  
Providencia 1072 – Of. 703 – Fono 253812  
Casilla 9223 – SANTIAGO

Los aceros al Nb pueden endurecerse por precipitación si se usan las temperaturas de austenitización más altas (Fig. 16), temperaturas a las cuales se logra disolver más NbC, pero con esto también se disuelven o engruesan los precipitados que permiten mantener el pequeño tamaño de grano, así aunque se logra un aumento de la resistencia, esto perjudica la tenacidad. Los aceros al niobio, entonces, logran endurecimiento por precipitación en la condición de laminado y se verá como la laminación controlada se utiliza para mantener un tamaño de grano ferrítico fino para lograr la tenacidad requerida (Fig. 17b)

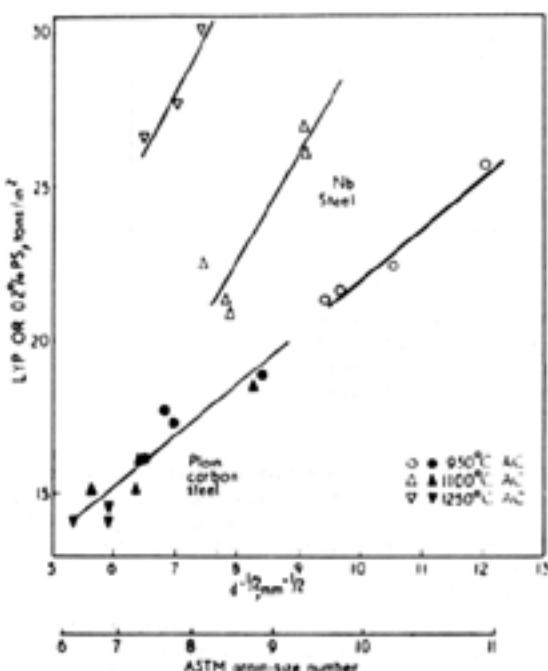


Fig. 16 Efecto de la temperatura de austenitización sobre el endurecimiento por precipitación (8).

La velocidad de enfriamiento también afecta la intensidad del endurecimiento por precipitación. Con velocidades de enfriamiento rápidas, pero aún manteniendo la estructura ferrítico-perlítica, puede evitarse la precipitación (curva 5 y 4, en Fig. 18). Velocidades intermedias producen el máximo de endurecimiento, ya que enfriamientos más lentos llegan a producir sobreenviejamiento, junto a un tamaño de grano más grueso producto de la más alta temperatura de transformación, obteniéndose así menos resistencia y menor tenacidad. Si la precipitación ha sido evitada por enfriamiento rápido, puede posteriormente ser inducida al revenir a 650°C, lo que aumenta la resistencia pero disminuye la tenacidad. Para un acero con aprox. 0,03% Nb, el máximo aumento de resistencia debido a la precipitación de Nb (CN) es 12 Kg/mm<sup>2</sup>.

En la Fig. 17 se ilustra el efecto de las distintas microaleaciones sobre la temperatura de transición. Para cada elemento se muestran tres casos,

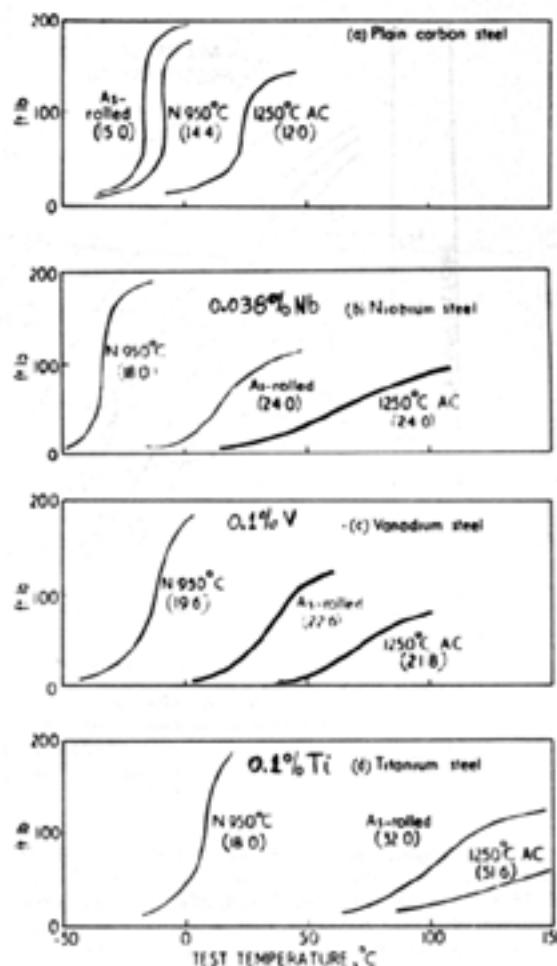


Fig. 17 Curvas de energía de impacto (tenacidad), tres condiciones (ver texto) y distintos microaleantes (10).

normalizado a 950°C, a 1.250°C, y condición de laminado después de calentado a 1.250°C y con una temperatura de término de laminación a 850°C. Se puede apreciar que la mejor combinación de resistencia (el esfuerzo de fluencia se indica entre paréntesis) y temperatura de transición se logra en la condición de laminado controlado, pues por ejemplo el Nb aumenta la resistencia por precipitación (12 a 24 tsi) y el control del tamaño de grano se logra por la más baja temperatura de término de laminación. El efecto más marcado de endurecimiento por precipitación se logra con Ti y por ello también la temperatura de transición es la más alta, mientras que el Nb y V son similares y con efectos menos marcados, obteniéndose temperaturas de transición razonables. Una ventaja del niobio sobre el vanadio es que requiere una cantidad de adición menos de la mitad. Los efectos descritos son apreciados en aceros de relativamente bajo carbono, aprox. 0,15% C, no por eso no se ha intentado adiciones de estos elementos a aceros de mayor contenido de carbono, por ejemplo, 0,5% C. Los resultados se muestran en la Fig. 18, en la cual se observa que el único elemento que produce un endurecimiento, es el vanadio. Esto se explica por la solubilidad

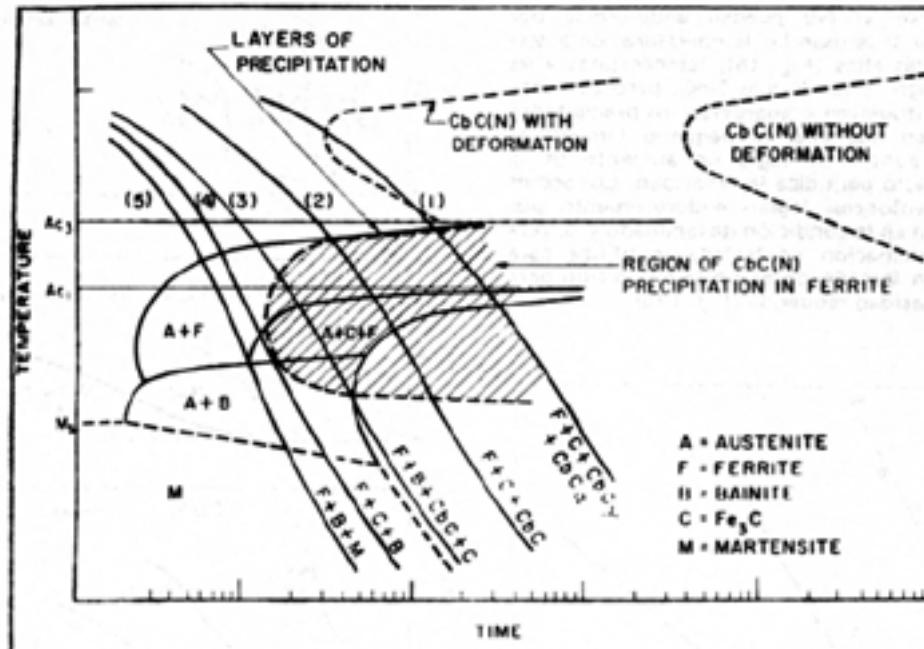


Fig. 18 Diagrama esquemático de enfriamiento continuo que ilustra el efecto de distintas velocidades de enfriamiento sobre la precipitación de carbonitruros de niobio (11).

muy restringida que tiene por ejemplo el Nb en presencia de mayor carbono, a  $1.250^{\circ}\text{C}$  con 0,45% C apenas disuelve 0,01% Nb mientras que el vanadio disuelve bastante más, aunque el endurecimiento logrado es menor que en el caso de aceros de más bajo carbono.

#### LAMINACION CONTROLADA

Es posible obtener un tamaño de grano más fino en la condición de laminado que con el normalizado convencional. Este tamaño de grano disminuye a medida que se baja la temperatura de término de laminación (Fig. 13).

En aceros al Nb el efecto de precipitación se puede lograr en la condición de laminado, así que es necesario combinar este endurecimiento por precipitación con el tamaño de grano más fino posible.

Para lograr un grano más fino de ferrita es esencial partir de un grano de austenita pequeño previo a la transformación de fierro gama a fierro alfa. Esto se logra de las siguientes maneras:

- Composición y velocidad de enfriamiento adecuado para obtener la temperatura de transformación lo más baja posible dentro del rango de estructuras ferrítico-perlíticas. Enfriamientos demasiados bruscos o muy alta templabilidad (alto C y Mn, o tamaño de grano austenítico grande) conducen a la formación de bainita.
- Evitando el crecimiento de grano de la austenita después de la recristalización. Este crecimiento es muy rápido a altas temperaturas, pero puede ser controlado por partículas precipitadas (AlN, Nb(CN), etc.).
- Que el tamaño de grano recristalizado de la

austenita sea lo más fino posible. Esto se logra con una fuerte deformación que produce una alta velocidad de recristalización, pero esta puede ser retardada por átomos extraños a la matriz de fierro (Nb) o por partículas precipitadas, Nb (CN).

En aceros al carbono, la recristalización es prácticamente instantánea a temperaturas de laminación sobre  $800^{\circ}\text{C}$ , pero disminuye debajo de  $800^{\circ}\text{C}$ , temperatura a la cual a menudo la formación de ferrita es anterior a la total recristalización de la austenita deformada (Fig. 20). Adiciones de Al, V, Ti retardan solo levemente la recristalización pero su precipitación en forma de partículas inhibe marcadamente el crecimiento de grano después de la recristalización. Sin embargo, el niobio, tal como se ve en la Fig. 20, retarda marcadamente la recristalización, además, que las partículas de Nb(CN) inhiben el crecimiento de grano. Parece que durante el laminado ocurre precipitación de NbC inducida por deformación. Estas no producen endurecimiento por precipitación, todo lo contrario, restan disponibilidad de Nb para la posterior precipitación a más bajas temperaturas que si endurece.

Este retardo de la recristalización por parte del Nb podría conservar granos grandes de austenita no-recristalizados con efectos perjudiciales. Sin embargo, si la temperatura de término de laminado es baja y la deformación usada es alta se forman granos de ferrita fina aunque la austenita no haya recristalizado (Fig. 21).

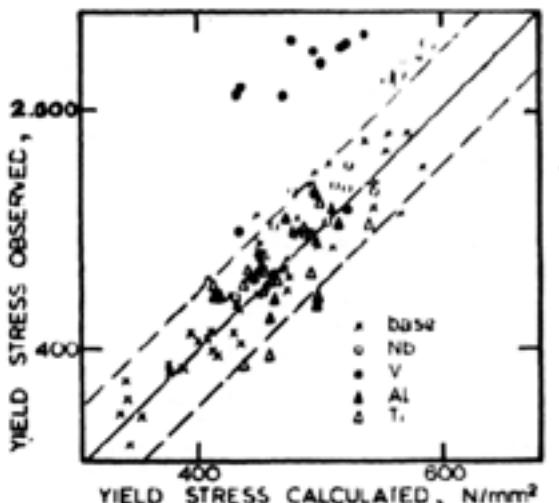


Fig. 19 Aumento de resistencia en aceros con 0,45% C debido a precipitación de partículas de  $V_3C_4$ , ver texto (7).

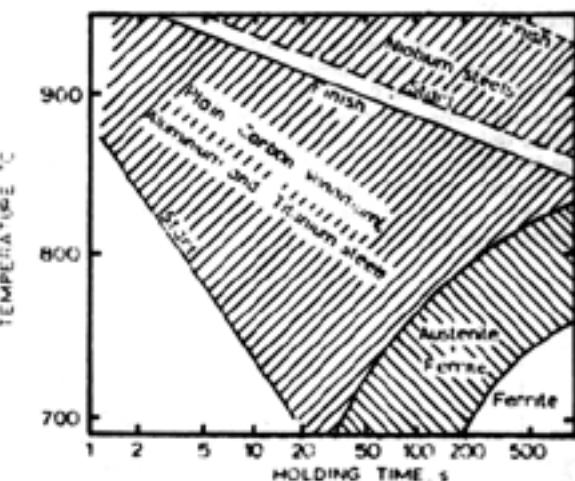


Fig. 20 Diagrama de recristalización de la austenita después de deformado en un 50% (9).

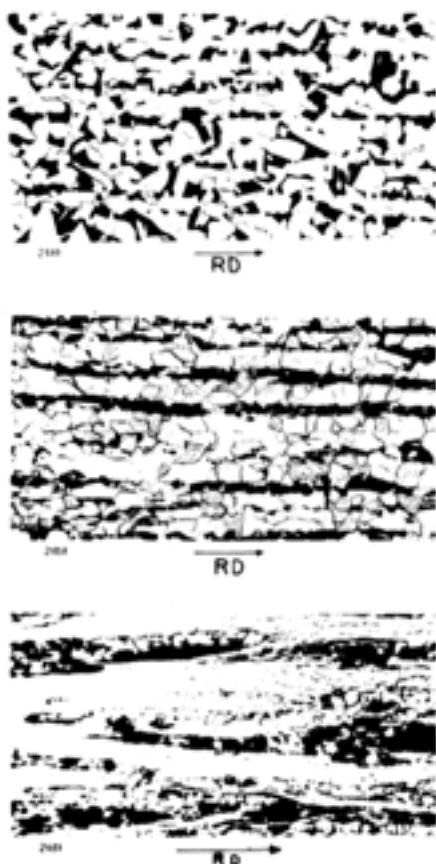


Fig. 21 Micrografías de aceros laminados a diferentes temperaturas: a) 1.200°C; b) 880°C y d) 800°C (5).

Esto se debe a que se producen granos de austenita muy delgados y alargados, luego nuclea la ferrita en los bordes de grano y estos son finos debido a que no puede crecer más allá de la mitad del espesor del grano delgado de austenita pues ahí se encuentran ambos granos de ferrita nucleados en lados opuestos. Si la deformación es demasiado poca, los granos de austenita no serán adelgazados y el resultado es granos de ferrita gruesos o bainita con la consiguiente pérdida de tenacidad. Luego, fuerte deformación y suficientemente baja temperatura de final de laminación son esenciales para lograr un grano ferrítico fino. Una temperatura demasiado baja permite la formación de ferrita durante el laminado, que al deformarse no alcanza a recristalizar, lo que disminuye enormemente la tenacidad.

En práctica industrial para aceros C-Mn sin adiciones de refinadores de grano, la baja temperatura de fin de laminación de 850°C se obtiene por interrupción del ciclo de laminación por uno o más períodos de espera, particularmente para productos finales más gruesos. Esto puede conducir a recristalización y grano grueso que después no sufre suficiente deformación para obtener recristalización a un grano austenítico fino durante el laminado después de la interrupción. Entonces, es esencial que se aplique una cantidad adecuada de deformación después de la interrupción y a una temperatura menor de 950°C, para poder lograr un grano austenítico recristalizado fino.

Debido al retardo en la recristalización en aceros al Nb, también es posible usar laminación interrumpida para lograr el requisito de baja temperatura de finalizado, siempre que los granos no recristalizados de austenita después del laminado sean suficientemente delgados, o sea, recibieron una deformación adecuadamente alta después de la interrupción en el laminado. Si el laminado es interrumpido a una temperatura demasiado alta en un acero al Nb puede ocurrir recristalización a un grano austenítico grueso y si la deformación posterior a la interrupción es insuficiente, se obtienen propiedades deficientes.

Una temperatura final de laminación baja también se puede lograr comenzando con un espesor

mayor tal que se necesite un tiempo más largo de laminación y así se tiene un tiempo más largo de laminación y teniéndose más tiempo de enfriamiento antes que se alcance el espesor final deseado. Una temperatura menor de "empape" antes del laminado también dará una temperatura de finalizado menor, pero esto también conducirá a menor endurecimiento ya que no se habrá disuelto suficiente NbC y así estar disponible para posterior precipitación (Fig. 22).

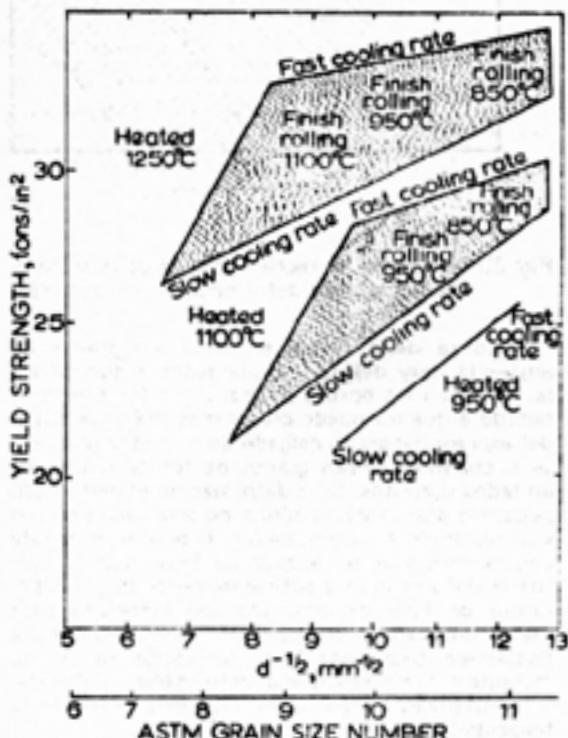


Fig. 22 Efecto de las variables de laminación sobre la relación (9) resistencia-tamaño de grano.

Todos estos métodos tienen sus desventajas, no siendo el menor el aumento en el tiempo de laminación asociado ya sea con las interrupciones o con el material inicialmente más grueso.

Todo el objetivo de la laminación controlada, particularmente en los aceros al niobio, es producir en un acero semicalmado, que es económicamente atractivo, un grano ferrítico muy fino y aún lograr una cierta cantidad de endurecimiento por dispersión de NbC. El Nb en solución sólida y el NbC precipitado inducido por deformación retardan la recristalización y este último además retarda el crecimiento del grano austenítico, quitando potencial al endurecimiento por precipitación.

Resumiendo, la laminación controlada requiere que se produzca un grano fino recristalizado de austenita o un grano austenítico fuertemente deformado para luego terminar con un grano ferrítico muy fino en tamaño. Esto requiere fuerte deformación a temperaturas por debajo de los 1.000°C., que debe continuarse durante el laminado hasta que esté por debajo de 900°C.

Los aceros semicalmados, de tamaño de grano

muy fino y endurecidos con precipitación de NbC son económicamente ventajosos, particularmente asociados con el hecho que un nivel dado de resistencia se puede lograr con menor contenido de C y Mn o sea, menor carbono equivalente, que confiere mejor soldabilidad y conformabilidad. (Fig. 25).

#### CONTROL DE LA FORMA DE LAS INCLUSIONES

Un serio problema en algunos aceros HSLA es su falta de ductilidad que produce quebraduras durante el doblado, rajadura laminar o ausencia de ductilidad en la dirección transversal en planchas soldadas, o malas propiedades de tenacidad al impacto en esa dirección. La ductilidad disminuye exponencialmente con el incremento de la fracción de volumen de partículas, particularmente inclusiones no-metálicas. El efecto perjudicial mayor es producido cuando las inclusiones están alargadas, el caso de inclusiones blandas como los sulfuros (MnS), como después de una fuerte laminación a bajas temperaturas, en la laminación controlada.

Un modo de combatir este problema es usar aceros muy limpios, bajos en azufre o haciendo adiciones que disminuyan la plasticidad de las inclusiones con el resultado que las inclusiones quedan como globulos redondeados y no se alargan durante el laminado.

La tenacidad o ductilidad transversal es entonces mejorada sustancialmente, ya que el material no posee un plano de fácil fractura. (Fig. 26).

La adición de calcio globulariza a los óxidos y sulfuros, pero tiene el inconveniente que es difícil de incorporar al acero por su baja solubilidad y gran reactividad. El Circonio, que se combina con el N además del S, entra en el sulfuro disminuyendo la plasticidad de éste, o a veces reemplaza al MnS formando ZrS, que es prácticamente indeformable. También se puede agregar Cerio con el mismo propósito, pero tiene el inconveniente de tener que agregarse en mayores cantidades Ce/S aprox. 1,5 con el agravante que es más caro.

Este artículo está parcialmente basado en apuntes del 10º Curso Panamericano de Metalurgia del Programa Multinacional de Metalurgia, dictado en Buenos Aires, Argentina 1974, titulado Aplicaciones de Metalurgia Física al Desarrollo de Aceros por F.B. Pickering del Sheffield Polytechnic, Inglaterra.

# Habit

**RODOLFO HABIT Y CIA. LTDA.**

Fabricantes de Equipos y Maquinarias  
Agrícolas • Maestranza y Fundición

R. Siegle 889 - 895-901 - Fones: 216/365/733  
Cas. 165 - Telegramas "ALBERT" - LA UNION

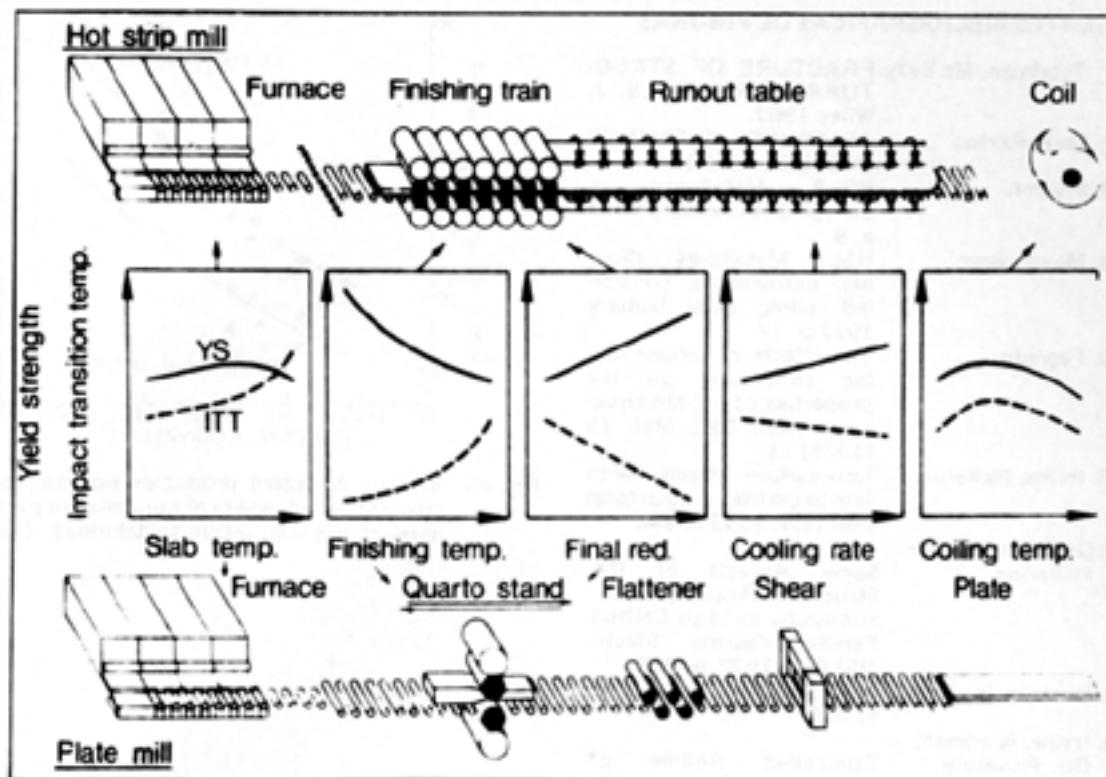


Fig. 23 Parámetros de laminación y su efecto sobre las propiedades mecánicas. (4).

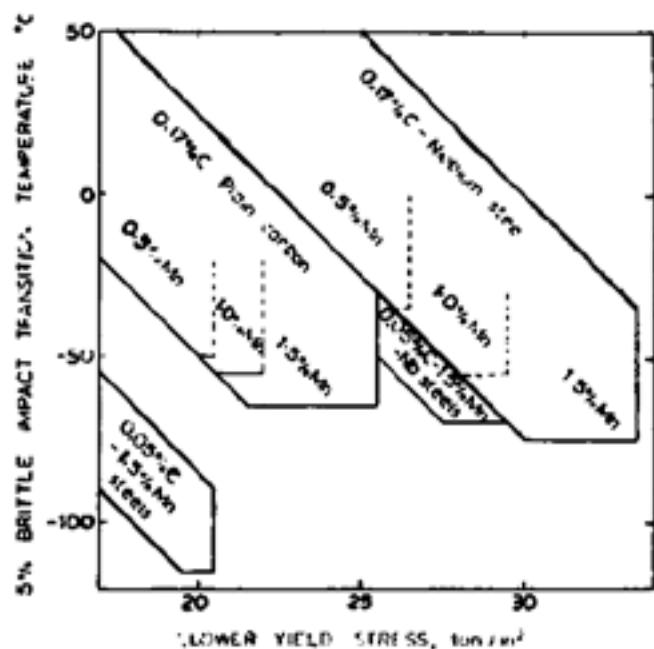


Fig. 24 Influencia de la composición sobre la relación tenacidad-resistencia. (9).

## FUENTES BIBLIOGRAFICAS DE FIGURAS

1. Teteleman, Mc Evily FRACTURE OF STRUCTURAL MATERIALS, J. Wiley 1967.
2. Bain, Paxton ALLOYING ELEMENTS IN STEEL ASM 1966
3. Preston HSLA Metallurgy in Europe JOM January 1977 p. 9
4. Meyer, Boer HSLA Metallurgy: alloying, normalizing, controlled rolling, JOM January 1977 p. 17
5. Fegredo The effects of various rolling conditions on the properties of a C-Mn structural steel. Can. Met. 15 (1976) 21
6. Irvine, Pickering Low-carbon steels with ferrite-perlite structures JISI Nov. 1963 n. 944
7. Gladman, Mc Iver Pickering Some Aspects of the Structure - Property Relationships in High Carbon Ferrite -Pearlite Steels. JISI Dec. 1972. p. 916
8. Duckworth, Baird Mild Steels JISI June 1969 p. 854
9. Irvine, Gladman, Orr, Pickering Controlled Rolling of Structural Steels JISI August 1970 p. 717.

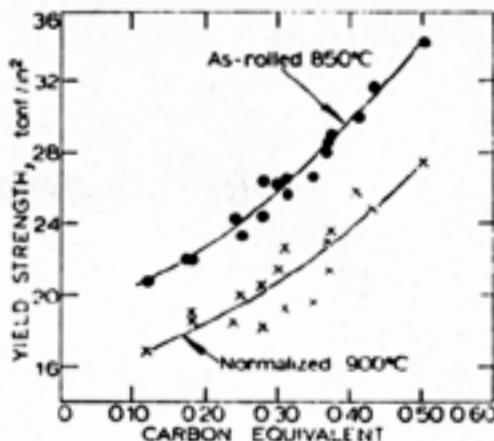


Fig. 25 Ventaja del acero producido por laminación controlada sobre el normalizado para igual resistencia versus soldabilidad. (8).

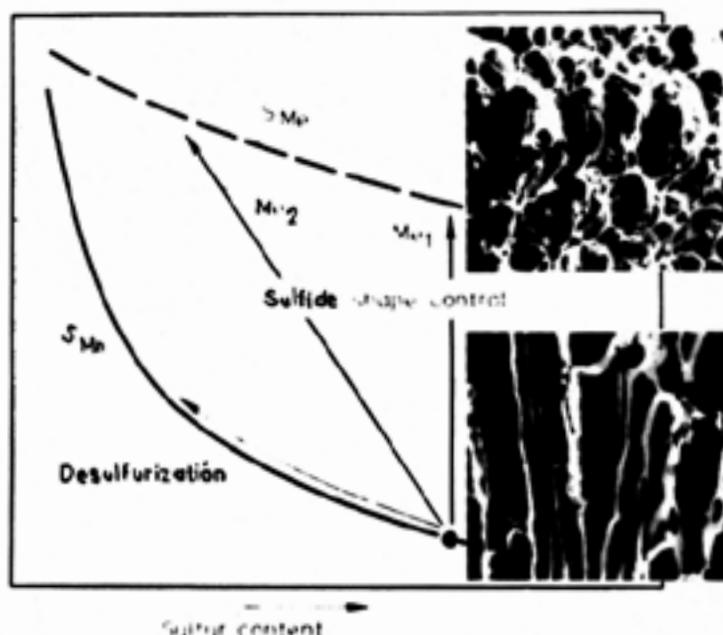


Fig. 26 Efecto de la forma de las inclusiones sobre la ductilidad (4).