

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMT - 594 - TRABALHO DE FORMATURA II

***Estudo Comparativo dos Aços ASTM A-36 e ASTM A-572 Utilizados
para Laminação de Cantoneiras de 6" x 1/2" na Siderúrgica J.L.
Aliperti S.A.***

Aluno: Marcos Fernando Affonso De Donato

Orientador : Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut

Co - Orientador : Eng. Francisco Caprino Neto

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800004116

Aos meus pais

Aos meus irmãos

À Flávia

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Deus e ao Nosso Senhor Jesus Cristo por toda ajuda concedida ao longo deste curso e na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr Ronald Lesley Plaut e ao Eng. Francisco Caprino Neto pela valiosa orientação e pelo constante estímulo, atenção e consideração que tornaram possível a realização deste trabalho.

À Siderúrgica J.L. Aliperti S.A. pelo suporte técnico e pela realização da parte experimental deste trabalho.

À todos que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é o estudo comparativo das microestruturas dos aços ASTM A-36 e ASTM A-572 (que é um aço microligado ao nióbio), utilizados na laminação de cantoneiras de 6" na Siderúrgica J.L. Aliperti S.A..

Primeiramente, são apresentados alguns tópicos que versam sobre recristalização e crescimento de grão, laminação de cantoneiras, composição química e propriedades físicas dos aços ASTM A-36 e ASTM A-572, efeito dos elementos de liga nos aços e laminação controlada de aços microligados.

Logo após são descritas a aparelhagem e metodologia utilizadas e depois são mostrados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente.

As cantoneiras laminadas com aço ASTM A-572 apresentaram estrutura mais refinada e melhores propriedades mecânicas que as cantoneiras laminadas com aço ASTM A-36.

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1 Conceitos iniciais de laminação	1
1.2 Laminação à Quente - Recristalização e crescimento de grão	1
1.3 Cinética de recristalização estática	2
1.4 Tamanho de grão recristalizado	3
1.5 Crescimento de Grão	3
1.6 Transformação Austenita - Ferrita	4
1.7 Laminação de Cantoneiras	4
1.8 Aços A-36 e A-572 - Composição Química e Propriedades	7
1.9 Descrição do efeito de cada elemento de liga	7
1.10 Laminação controlada de aços microligados	10
2. Objetivos do trabalho	25
3. Descrição do processo, instalação e metodologia	26
3.1 Descrição do processo	26
3.2 Descrição sumária dos principais equipamentos da laminação	30
3.3 Metodologia	32
4. Resultados	35
4.1 Microestruturas obtidas através dos tratamentos de tempera realizadas com amostras de blocos a serem laminados	36
4.2 Microestruturas obtidas através dos diferentes tratamentos realizados com amostras de cantoneiras	38
4.3 Tamanhos de grão obtidos através dos diferentes tratamentos realizados com amostras de cantoneiras	51
4.4 Ensaios de tração	52
4.5 Ensaios de dureza	53
4.6 Estimativa dos tamanhos de grão austeníticos obtidos no final da laminação	57

5. Discussão	59
6. Conclusão	61
7. Sugestões	62
8. Referências	63
Anexo 1 - Marcha de Cálculo Utilizada na Laminação de 6" x 1/2"	64
Anexo 2 - Apresentação das normas ASTM A 36 - 81 a e	
ASTM A 572 - 82	73

1.INTRODUÇÃO

1.1 Conceitos Iniciais de Laminação

A laminação é um processo de conformação que consiste, essencialmente, na passagem de um corpo sólido entre dois cilindros, que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários. Desta forma, tendo o corpo da peça inicial, uma distância maior do que a distância entre as superfícies laterais dos cilindros, ele sofre uma deformação plástica na passagem entre os cilindros, que resulta na redução de sua seção transversal e no aumento de seu comprimento e largura. Para se obter então, uma determinada espessura do corpo, deve-se submeter a peça a sucessivos passes através dos cilindros, com as distâncias entre si decrescentes.(1)

A passagem da peça pelos cilindros ocorre através da ação da força de atrito que atua na superfície de contato entre a peça e os cilindros. Esta força é proporcional ao coeficiente de atrito entre a peça e o cilindro e à força normal na superfície de contato. A força normal dividida pela área da superfície de contato é a pressão exercida pelos cilindros que, por sua vez, resulta da resistência à deformação plástica do material da peça nas condições de processamento (temperatura e velocidade de trabalho).(1)

O processo de laminação pode ser conduzido à frio ou à quente, dependendo das dimensões e da estrutura do material da peça especificada para o início e final do processamento. (1)

1.2 Laminação à Quente - Recristalização e Crescimento de Grão

A temperatura de trabalho se situa acima da temperatura de recristalização do metal da peça, a fim de reduzir a resistência à deformação plástica em cada passagem e permitir a restauração (recuperação + recristalização) da estrutura do metal, evitando o encruamento para os passes subsequentes.(1)

A recuperação é um processo onde ocorre o rearranjo de discordâncias, que se anulam ou formam paredes de células dentro dos grãos. A recristalização consiste na

nucleação e no crescimento de novos grãos isentos de deformação plástica, que contém baixa densidade de discordâncias e baixa energia interna associada.(2)

A restauração pode ocorrer dinamicamente, quando atua juntamente com a deformação. Neste caso, a tensão atinge um estado estacionário, onde, para um aumento de deformação, não se verifica um aumento correspondente da tensão de deformação (tensão de regime).(2)

A recuperação dinâmica ocorre sempre em todas as ligas metálicas deformadas à quente, em diferentes graus de intensidade. Para ligas metálicas com alta energia de falha de empilhamento (p.ex. Alumínio), esse mecanismo é o predominante. Para ligas metálicas com baixa energia de falha de empilhamento (p.ex. Fe- γ), o processo de recristalização dinâmica pode ocorrer, desde que a deformação ultrapasse um valor mínimo, característico da liga.(2)

As microestruturas assim obtidas são metaestáveis e, se após a deformação, forem mantidas em altas temperaturas, podemos verificar os mecanismos estáticos de recuperação, recristalização e crescimento de grão.(2)

Os fenômenos da restauração estática assemelham-se aos que se desenvolvem durante o recozimento de um metal deformado à frio, muito embora a força motriz para o primeiro caso, seja inferior, devido à parte da energia ter sido consumida nos mecanismos de recuperação e, eventualmente, de recristalização dinâmica.(2)

1.3 Cinética de Recristalização Estática

Como no caso do recozimento de materiais deformados à frio, a evolução da fração recristalizada, em relação ao tempo também se ajusta à equação de Avrami.(2)

$$X = 1 - \{\exp(-C \cdot t^k)\} \text{ onde:}$$

$k = 1$ para recristalização dinâmica

$k = 2$ para recuperação dinâmica

C = parâmetro que depende dos seguintes fatores: Z (Parâmetro de Zener-Hollomon), Temp.Recríst., D_0 , deformação.

Sob o ponto de vista prático, é de grande interesse a determinação do tempo para a recristalização do material. Com base na equação de Avrami, estudou-se a influência dos

fatores Z , ε , T_r e D_0 , visando obter uma fórmula empírica de fácil aplicação na determinação do tempo para recristalização de x % do material, a qual é apresentada abaixo (2) :

$$T_x = K(Z^{-0,375})(\varepsilon^{-4})(D_0^2) \exp(Q_{rec}/(R \cdot T))$$

Onde Q_{rec} é a energia de ativação para recristalização do material e k depende da fração recristalizada.(2)

No caso de aço baixo carbono, $Q_{rec} = 480$ kJ/mol e $k = 3,54 \cdot 10^{-21} \text{ s}^{1,375} \mu\text{m}^{-2}$ para $X = 95\%$ de recristalização.(2)

Para aço com 0,04 % de nióbio, para determinação do tempo para recristalização de 50 % do material, temos:

$$T_{0,5} = 2,52 \cdot 10^{-19} \cdot D_0^2 (\varepsilon^{-4}) \exp(325000/R \cdot T) \quad (\varepsilon < \varepsilon_c \text{ e } T > 1004 \text{ C})$$

$$T_{0,5} = 5,94 \cdot 10^{-38} \cdot D_0^2 (\varepsilon^{-4}) \exp(780000/R \cdot T) \quad (\varepsilon < \varepsilon_c \text{ e } 891 \text{ C} < T < 1004 \text{ C})$$

$$T_{0,5} = 9,24 \cdot 10^{-9} \cdot D_0^2 (\varepsilon^{-4}) \exp(130000/R \cdot T) \quad (\varepsilon < \varepsilon_c \text{ e } T < 891 \text{ C})$$

1.4 Tamanho de Grão Recristalizado

O tamanho médio dos grãos após a recristalização estática, ou seja, o tamanho de grão recristalizado D_r , depende apenas da energia armazenada durante a deformação caracterizada pelos parâmetros Z e ε e da densidade de lugares possíveis de nucleação, a qual é maior quanto menor for D_0 , sem, no entanto, depender significativamente da temperatura de recristalização.

Assim, temos que:

$$D_r = k' \{ (1/n\alpha) \ln(Z/A) \}^{-0,67} \cdot \varepsilon^{-1} \cdot D_0^{0,5}$$

onde, para o aço de baixo carbono temos:

$$k' = 25 \text{ (m}^2/\text{Mn)}^{0,67} \mu\text{m}^{0,5}$$

$$n\alpha = 6,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{Mn}$$

$$A = 8,5 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$$

1.5 Crescimento de Grão

Se o material for mantido em temperaturas elevadas após o término da recristalização, poderá ocorrer subsequente crescimento de grão tendendo diminuir a área de contornos de grão por unidade de volume.(2)

A dependência do tamanho de grão para aços C-Mn com a temperatura e com o tempo, pode ser representada por uma expressão do tipo (2) :

$$D_{10} = D_{010} + A \cdot t \cdot \exp(Q_{CG}/R \cdot T)$$

onde t = tempo para crescimento de grão

$$T > 1000 \text{ C}$$

$$A = 3,87 \cdot 10^{32} \text{ m}^{10} \text{ s}^{-1}$$

$$Q_{CG} = 400000 \text{ J mol}^{-1} \text{ e}$$

$$T < 1000 \text{ C}$$

$$A = 5,02 \cdot 10^{53} \text{ m}^{10} \text{ s}^{-1}$$

$$Q_{CG} = 914000 \text{ J mol}^{-1}$$

1.6 Transformação Austenita-Ferrita

Na prática, é o tamanho de grão ferrítico, obtido após resfriamento na saída do laminador, que determina as propriedades mecânicas do material. Uma relação que expressa a variação do tamanho de grão ferrítico com o austenítico é dada por (2):

$$D\alpha = 11,7 + 0,14 \cdot D\gamma + 37,7 \cdot R^{-0,5}$$

onde R = velocidade de resfriamento na saída do laminador (C/min)

1.7 Laminação de Cantoneiras

As cantoneiras foram as primeiras formas estruturais a serem laminadas. Consistem de duas abas, iguais ou não, juntas a um ângulo de aproximadamente 90°.(3)

As cantoneiras podem ser classificadas por tamanho das abas e espessura ou por tamanho das abas e peso por metro linear, mas nunca por espessura e peso.(3)

As dimensões padrões para cantoneiras de abas iguais vão de 1x1/8 in a 8x7/8 in, onde a primeira dimensão indica os tamanhos das abas e a última indica a espessura da cantoneira.(3)

- Tipos Básicos de Passes:

Laminar uma cantoneira partindo de uma palanquilha de secção quadrada ou retangular requer que a forma de cantoneira seja atingida logo nos primeiros passes. Esta forma pode ser obtidas de várias maneiras:

Passe Gótico: o passe em ângulo gótico possui este nome porque, embora ele forme algo que lembre uma cantoneira, é convexo em dois lados adjacentes de maneira que quando laminado forme dois lados côncavos. Este passe pode ser utilizado para um, dois ou no máximo três passes, depois disto o material deve ser colocado em um passe de 90^0 . No resto da seqüência diminui-se a espessura da cantoneira em passes similares (ao de 90^0). Normalmente utiliza-se um passe controlador, para assegurar a uniformidade das abas, este passe permite controle do final da aba e normalmente é posicionado como líder (que antecede o canal acabador).(3)

Passe Borboleta (Figura 1): é denominado passe borboleta quando existe um vértice, à semelhança do passe a 90^0 , e duas abas curvas, às quais deve-se o nome borboleta.(3)

Uma seqüência de palanquilha à cantoneira pode utilizar passes deste tipo que começa com ângulos maiores que 90^0 e gradualmente se aproxima dos 90^0 perto do final da seqüência. Esta seqüência é boa para se controlar a largura das abas em cada passe.(3)

Passe Semi-Borboleta: é um misto de gótico com borboleta. Possui a vantagem de não solicitar o material tão severamente quanto o gótico, no entanto, requer cilindros de maior diâmetro.(3)

Passes em W: outro método de se obter a cantoneira é se utilizando o passe em W, seguido de passes em borboleta e um acabador de 90^0 .(3)

Na *Aliperti*, o tipo de passe utilizado é o passe borboleta. A tabela abaixo mostra, para cada passe, a redução de altura, a redução de área, a evolução da temperatura, a força de laminação e a potência de laminação, calculados conforme sugerido em literatura. Os cálculos estão ilustrados no Anexo 1.(4)

Passe	Red. Altura (%)	Temperatura (C)	Red. Área (%)	Força Lam. (ton.)	Potência (HP)
1	14.4	1140	10.4	306.29	1985.67
2	26.5	1120	27.1	422.68	3374.49
3	32.5	1100	33.0	464.47	3535.98
4	29.5	1090	31.1	424.78	2555.93
5	25.6	1060	26.2	393.16	1889.80
6	22.1	1030	24.6	330.20	1286.40
7	10.5	990	19.3	219.03	546.48

Tabela 1 - Redução de altura, redução de área, evolução da temperatura, força de laminação e potência de laminação para cada passe

Os passes intermediários da cantoneira de bitola 6" x 1/2" são esquematizados nas figuras 2-a até 2-h e suas dimensões são mostradas na tabela abaixo:

Passe	A	B	R	D	I	J	L	C	G	S
0	109,6	250,0								27412
1	93,0	262,0	117,3	37,8	38,3	45,6	45	132	3,5	24567
2	64,0	260,0	125,4	27,7	25,4	36,0	45	114	4,0	17913
3	46,5	258,0	132,5	20,1	12,7	28,8	44	103	4,5	12000
4	28,0	252,0	138,6	15,1	6,4	22,8	45	96	5,0	8270
5	21,5	250,0	146,1	12,6	2,5	18,0	45	92	5,5	6100
6	14,3	241,5	152,4	10,1	0,0	14,4	46	90	6,0	4600
7	12,6	218,1		6,3		12,0		90		3710

Tabela 2 - Dimensões dos passes intermediários de cantoneiras de bitola 6" x 1/2 "

Sendo:

- **A** a espessura da aba (mm)
- **B** a largura do canal (mm)
- **R** o raio superior da aba (mm)
- **D** o raio da extremidade (mm)

- **I** o raio do vértice (mm)
- **J** o raio interno da aba (mm)
- **L** a parte reta da aba (mm)
- **C** o ângulo do vértice (graus)
- **G** o ângulo da extremidade (graus)
- **S** a seção (mm²)

1.8 Aços A-36 e A-572 : Composição Química e Propriedades

Os aços A-36 e A-572 são utilizados na laminação de cantoneiras e apresentam a composição química ilustrada abaixo:

	C máx (%)	Mn máx (%)	P máx (%)	S máx (%)	Si máx (%)	Nb (%)
A-36	0,26	---	0,040	0,050	0,40	---
A-572	0,23	1,35	0,040	0,050	0,40	0,005 a 0,050

Tabela 3 - Composição Química dos aços ASTM A-36 e ASTM A-572

As propriedades mecânicas dos aços A-36 e A-572 são as ilustradas abaixo:

Aço	L.E. (MPa)	L.R. (MPa)	Along. (%)
A-36	250	400/550	20 % p/ Lo = 8"
A-572	345	450	18 % p/ Lo = 8"

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos aços ASTM A-36 e ASTM A-572 extraídas das normas ASTM A 36 - 81 a e ASTM A 572 -82, que estão no Anexo 2

A figura 3 mostra as curvas de resfriamento contínuo do aço A-36 e a figura 4 mostra as curvas de resfriamento contínuo de aço de composição próxima à do aço A-572.(5). Em ambas as curvas estão superpostas as curvas de resfriamento em ar.

1.9 Descrição do Efeito de Cada Elemento de Liga

Manganês: O manganês, quando dissolvido na ferrita, aumenta bastante sua dureza e resistência mecânica, reduzindo bem pouco a sua ductilidade. É, portanto, útil no aumento da resistência dos aços doces.(6)

A função principal do manganês é combinar-se com o enxofre, formando sulfeto de manganês (MnS), impedindo que se forme o sulfeto de ferro (FeS), que fragiliza o aço, principalmente à temperaturas mais altas. O sulfeto de manganês não contribui para a fragilização. Assim, o metal pode ser trabalhado à quente sem problemas. Teores de manganês de aproximadamente 0,5 % já são suficientes para esta finalidade.(6)

O manganês, quando em teores mais altos, tem também a capacidade de refinar o grão de perlita nos aços de baixo carbono pela diminuição da temperatura de transformação da austenita, aumentando a tenacidade do aço carbono.(6)

Nos aços de baixo carbono, o manganês é um dos elementos mais eficazes para abaixar a temperatura de transformação bainítica por sua alta solubilidade na austenita. Em teores de cerca de 1% , ele favorece a formação de bainita no resfriamento do estado austenítico.(6)

Em teores entre 1% e 1,35% , o manganês confere boas propriedades ao impacto, fazendo a temperatura de transição dúctil-frágil do aço diminuir, podendo assim o material ser empregado em temperaturas mais baixas.(6)

Silício: Nos teores utilizados para acalmar o aço, o silício contribui para aumentar a tenacidade. Assim, os aços acalmados são mais tenazes e dúcteis que os demais.(6)

Fósforo: O fósforo não é considerado elemento de liga, embora esteja sempre presente nos aços como elemento residual. Ele é estabilizador da ferrita, endurecendo-a bastante por entrar em solução nela em aços de baixo carbono. Com isso, ele fragiliza muito o material, entretanto, em teores baixos, o fósforo pode ser admitido.(6)

Enxofre: O enxofre está sempre presente nos aços como elemento residual em baixos teores. Ele é considerado elemento prejudicial às propriedades mecânicas do aço, pois pode ocasionar fragilidade à frio e à quente, ou seja, baixa resistência ao impacto, baixa ductilidade e baixa resistência à fadiga, pela formação do sulfeto de ferro, que se localiza nos contornos de grão da ferrita e da perlita.(6)

A dessulfuração do aço é feita principalmente pelo manganês, que forma o sulfeto de manganês, que fica uniformemente distribuído pela estrutura. O sulfeto de manganês

possui baixo ponto de fusão e grande plasticidade, e, eliminando o sulfeto de ferro, não causa os prejuízos citados.(6)

Carbono: O carbono é o elemento que mais influi nas propriedades dos aços de baixa, média e alta resistência.(6)

Em aços que contém menos de 0,03% C, a presença pequena de nódulos de perlita tem pouco efeito na tenacidade. À medida que o teor de carbono cresce, a perlita já começa a influir no decréscimo da tenacidade e da ductilidade, principalmente na posição da curva de transição dúctil-frágil. O teor crescente de perlita endurece o aço e aumenta sua resistência mecânica. O aumento da resistência mecânica é causado, por exemplo, porque o carbono abaixa a temperatura de transformação austenita-ferrita, promovendo a redução do tamanho de grão da ferrita, quanto mais se aumenta a velocidade de resfriamento da austenita. Entretanto, como a tenacidade é função do tamanho de grão, conforme o tratamento, mesmo com teores de carbono mais alto, se ocorrer refino de grão, a tenacidade fica invariável ou até aumenta.(6)

O carbono é o elemento que tem maior efeito na temperabilidade, especialmente quando se está na presença de elementos de liga, a fim de se atingir a máxima dureza. Entretanto, quanto maior for o teor de carbono, mais se aumenta a fragilidade do material.(6)

Nióbio: O nióbio é formador de carboneto e carbonitreto, além de ser refinador de grão. Como o nióbio não é desoxidante, pode aumentar a resistência dos aços semi-acalmados.(6)

Em quantidades bem pequenas (até 0,03%), ele tem uma grande influência na obtenção de aços de alta resistência. A adição de nióbio aos aços permite obter vantagens econômicas associadas com a possibilidade de manipulação para produzir refino de grão e alta resistência, dureza e tenacidade com teores de carbono suficientemente baixos (aços ferríticos) e que possuem, por isso, boa soldabilidade. A figura 5 mostra o efeito do nióbio sobre o limite de escoamento e a temperatura de transição.(6) (7)

A solubilidade do nióbio na austenita depende do teor de carbono: quanto maior for o teor de carbono, menor a solubilidade para uma determinada temperatura de

austenitização. Para que o nióbio atue no refino de grão durante o trabalho mecânico à quente, é preciso que ele fique em solução na austenita.(6)

O nióbio retarda a transformação austenita-ferrita, provocando assim o aumento da temperabilidade. O aumento da resistência da ferrita provém da precipitação dispersa de carboneto ou carbonitreto de nióbio, que se formam em altas temperaturas. Aços contendo nióbio, laminados e tratados termicamente exibem um grão mais fino tanto da austenita como da ferrita e perlita. Na austenita, o refino de grão é devido ao nióbio em solução, que retarda sua recristalização durante o trabalho mecânico ou à precipitação de carbonetos grandes não dissolvidos e formados pela precipitação durante o trabalho mecânico à quente, ou ainda ao coalescimento de precipitados finos durante a normalização, que bloqueiam os contornos de grão da austenita. Na ferrita e perlita, o refino de grão é devido ao precipitado na austenita, que detém o crescimento da ferrita e aumenta os lugares para sua nucleação. Assim, aços com nióbio normalizados possuem excelente tenacidade pelo refino do grão, com uma temperatura dúctil-frágil bem baixa.(6)

O nióbio aumenta a temperabilidade do aço quando a temperatura de austenitização for mais alta ($> 1050\text{ C}$). À temperaturas mais baixas de austenitização, o nióbio pode até diminuir a temperabilidade pela difícil solubilização dos carbonetos ou carbonitretos de nióbio na austenita.(6)

1.10 Laminação Controlada de Aços Microligados

O principal objetivo da laminação controlada é refinar a estrutura do aço e assim, aumentar a resistência e melhorar as propriedades de tenacidade.(8)(2)

Para que ocorra refino da estrutura, é necessária a introdução de uma alta quantidade de sítios de nucleação de ferrita na matriz austenítica durante o processo de laminação.(8)

O efeito dos elementos microligantes no processo de restauração durante ou após a deformação a quente é muito importante. Microadições de nióbio e titânio causam um notável efeito de retardamento da recristalização devido à supressão da migração dos

contornos de grão. A supressão da migração dos contornos de grão devida aos microligantes é causada por:

1 - O efeito do arrastamento de soluto devido à segregação dos elementos de liga para os contornos;(8)

2 - O efeito ancorador devido a precipitados de carbonitreto de elementos microligantes nos contornos de grão.(8)

Por exemplo, molibdênio nos contornos de grão da austenita resultam na supressão da migração dos contornos de grão. Nióbio e titânio precipitam como finas partículas de carbonitreto e estes precipitados suprimem a migração dos contornos de grão pelo efeito ancorador. Estes carbonitretos são formados pela precipitação induzida por conformação durante a laminação a quente ou durante a "espera" após a laminação à quente.(8)

A supressão mais efetiva da recristalização é obtida pela precipitação de carbonitretos finos formados durante ou após a laminação à quente entre aproximadamente 850 - 1000 C, após o tratamento de solubilização à altas temperaturas, nas quais os elementos microligantes como o nióbio ou o titânio estão em solução.(8)

A temperatura de reaquecimento das placas deve ser a menor possível, objetivando a solubilização dos microligantes e um tamanho de grão austenítico pequeno e uniforme. A quantidade de microligantes em solução na austenita pode ser calculada através do produto de solubilidade que é dado por (2)

$$\log ([C]^{0,87} * [Nb]) = -7529/T (K) + 3,11$$

onde [C] é a porcentagem em peso de carbono e [Nb] é o nióbio, dissolvidos na austenita na temperatura T (K).(2)

A figura 6 ilustra o efeito da temperatura de aquecimento sobre o tamanho de grão austenítico e a figura 7 mostra a influência da quantidade de nióbio sobre o tamanho de grão austenítico.(2) (7)

O processo de laminação controlada é geralmente dividido em três etapas:

1 - Deformação na temperatura de recristalização. O grão austenítico é refinado pela recristalização estática repetida. Um pequeno grão austenítico obtido pela recristalização nesta etapa leva a um refinamento dos grãos ferríticos. Em geral, o tamanho

de grão austenítico recristalizado diminui rapidamente com o aumento da quantidade da redução de laminação e alcança um valor limite, que limita o grau do refinamento dos grãos ferríticos obtido pela recristalização da austenita.(8)

Após esta etapa observa-se a "espera em determinada faixa de temperatura (800 - 1000 C), antes de se iniciar a sequência final de passes. Assim, acima desta faixa, nota-se a rápida recristalização estática da austenita enquanto que, abaixo desta faixa, observa-se a não recristalização estática da austenita. Nota-se que, quanto mais elevada for a quantidade de nióbio no aço, maior será a temperatura de retardamento da recristalização, devido ao fato que a solubilidade dos carbonetos na austenita será ultrapassada à temperaturas maiores. A figura 8 mostra o efeito da quantidade de nióbio sobre a temperatura de recristalização.(2) (7)

Como já foi citado anteriormente, durante a "espera" ocorre a precipitação de carbonitreto finos, responsável pelo efeito de retardamento da recristalização.(2)

É importante notar que, caso a sequência de passes inclua a faixa de 800 - 1000 C, a precipitação induzida propiciará a formação de estruturas mistas de grãos austeníticos que deterioram as propriedades mecânicas finais.(2)

2 - Deformação na temperatura de não-recristalização. Os grãos austeníticos são alongados e bandas de deformação são introduzidas no interior dos grãos, aumentando assim o número de sítios de nucleação da ferrita e conseqüentemente contribuindo para o refinamento dos grãos ferríticos.(8)

É importante notar que a densidade das bandas de deformação aumenta com o aumento da redução efetuada na zona de não recristalização como indica a figura 9.(2)

É necessária uma redução adequada na região de não recristalização para se obter uma microestrutura refinada e uniforme, com boas propriedades mecânicas. Caso contrário, alguns dos grãos alongados não recristalizados não irão conter bandas de deformação, resultando em uma estrutura mista de grãos ferríticos após a transformação, o que é prejudicial às propriedades do produto.(8)

3 - A deformação na região de fase dupla ($\alpha + \gamma$). Ocorre endurecimento da austenita e a deformação da ferrita produz subestruturas. A figura 10 ilustra os três estágios

do processo de laminação controlada e a mudança da microestrutura em cada estágio. A figura 11 mostra o efeito da temperatura de acabamento sobre o limite de escoamento e a temperatura de transição. Nota-se que o maior limite de escoamento e a menor temperatura de transição são obtidos à menor temperatura de acabamento.(7) (8)

Concluindo, pode se afirmar que a diferença fundamental entre a laminação convencional e a controlada reside no fato de que, na primeira, a ferrita nucleia exclusivamente nos contornos de grão da austenita enquanto que, na última, a ferrita nucleia tanto nos contornos de grão da austenita (achatada) como no seu interior (bandas de deformação), originando assim um refinamento substancial no tamanho de grão ferrítico.(2)

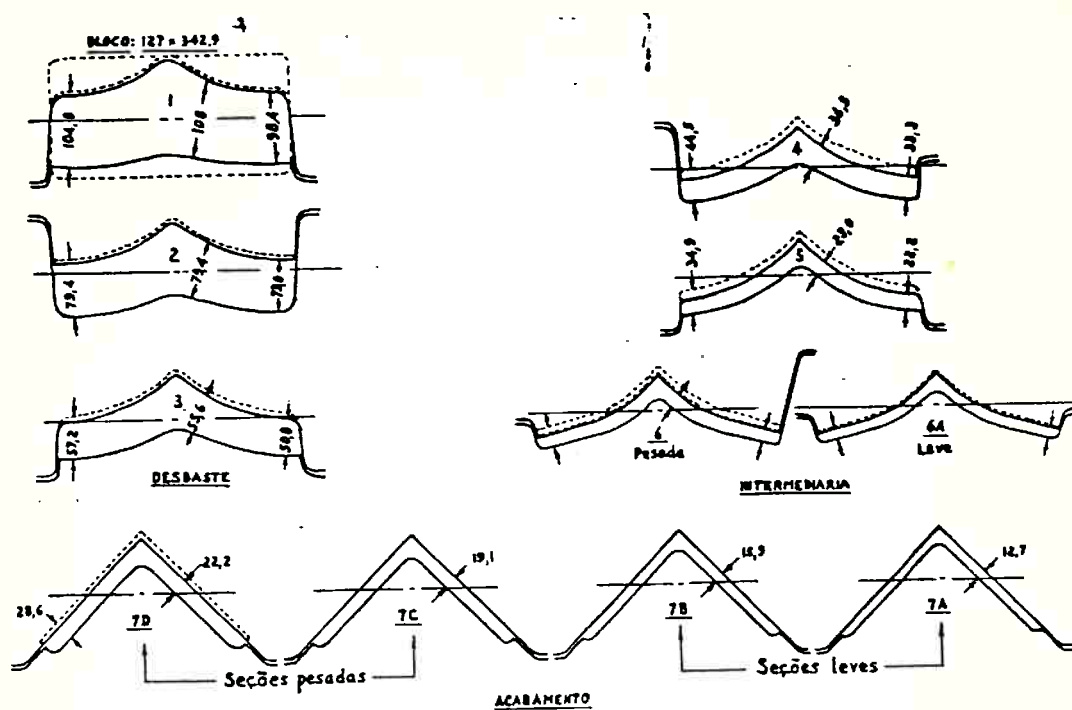


Fig. 1 - Projeto para uma cantoneira utilizando-se o método borboleta

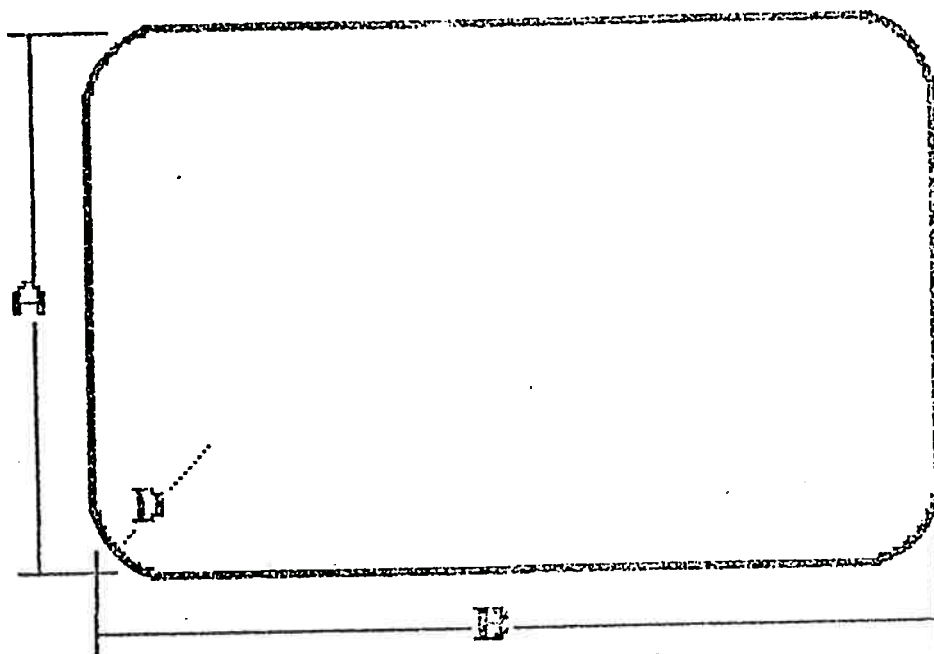


Fig 2-a - Desenho esquemático do bloco a ser laminado

PASSE 1

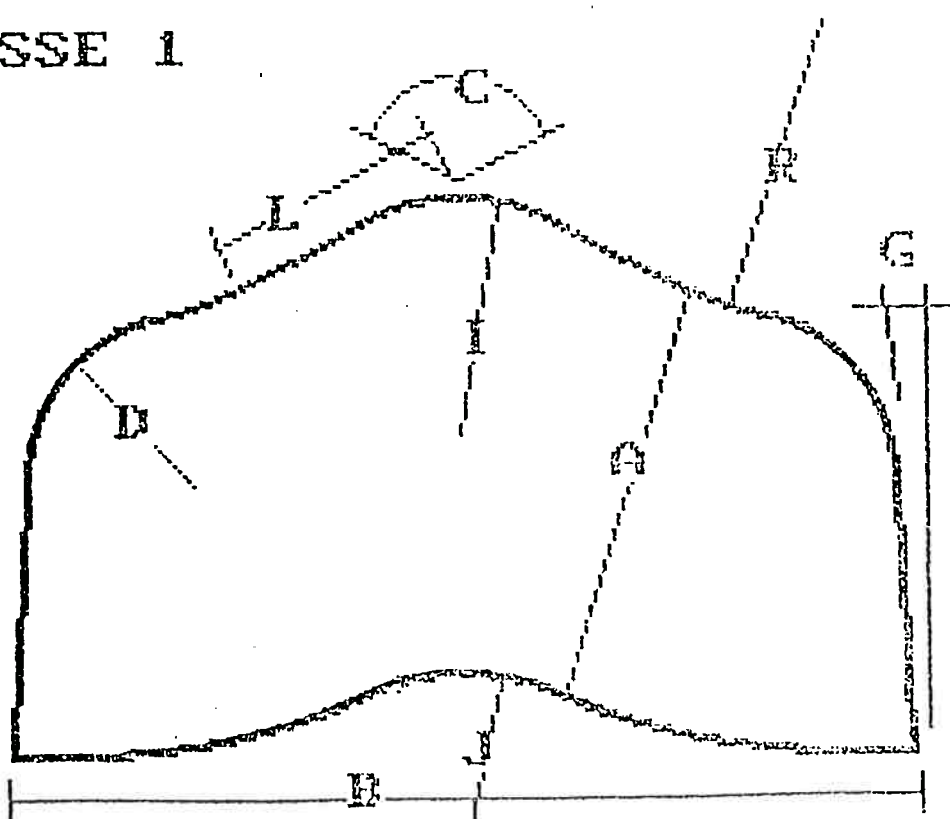


Fig 2-b - Desenho esquemático do primeiro passe de laminação

PASSE 2

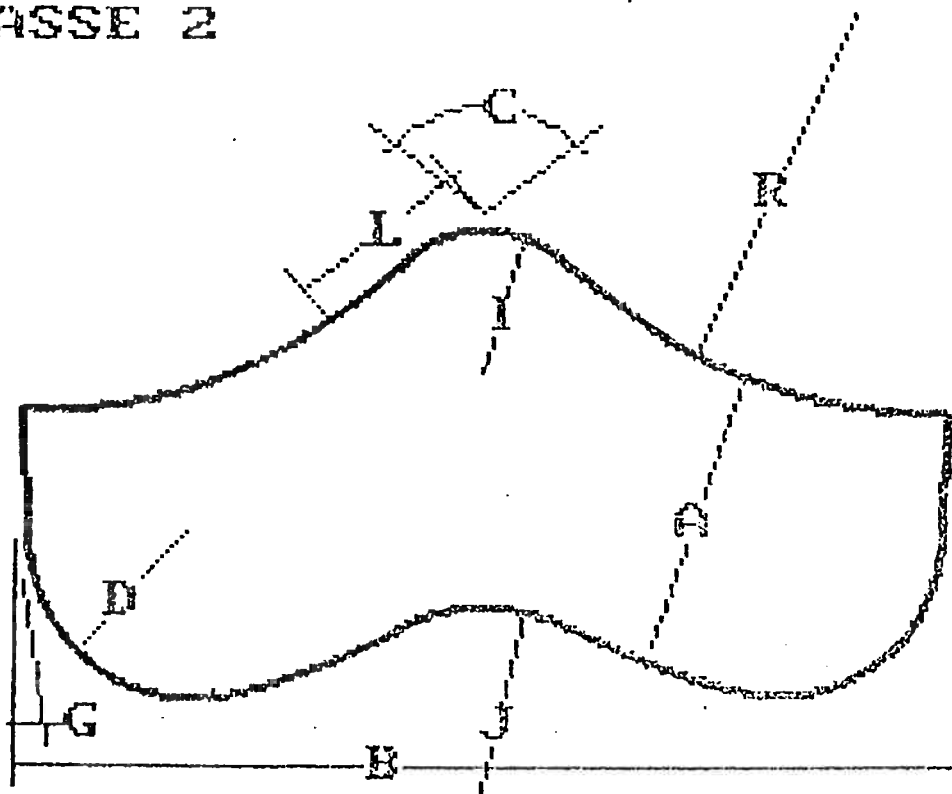


Fig 2-c - Desenho esquemático do segundo passe de laminação

PASSE 3

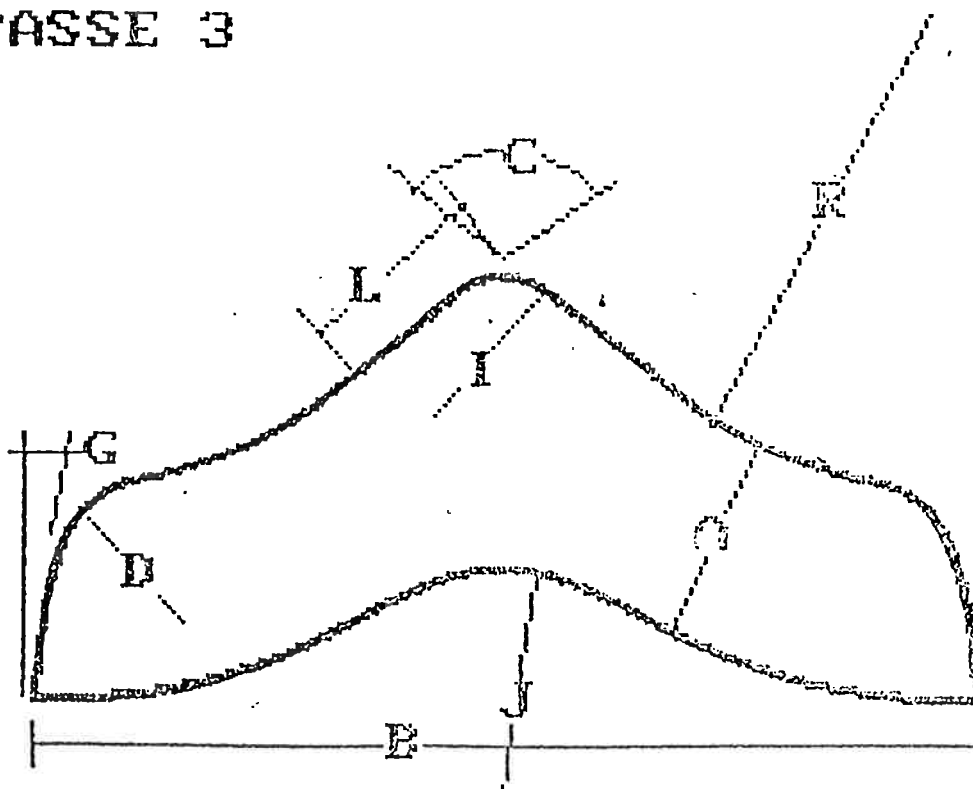


Fig 2-d - Desenho esquemático do terceiro passe de laminação

PASSE 4

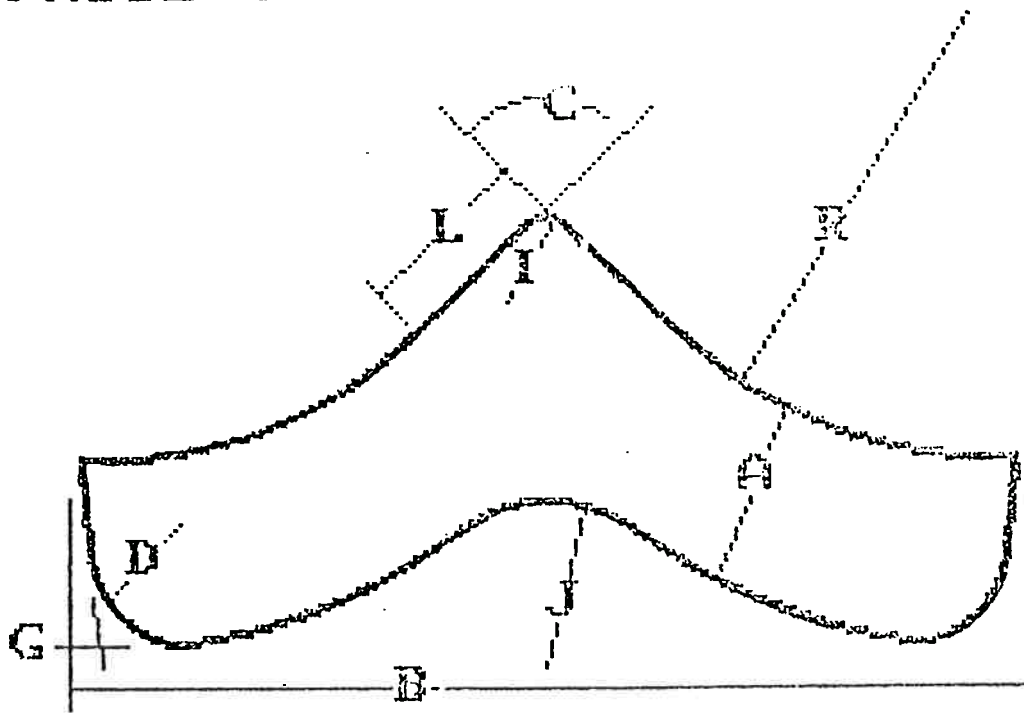


Fig 2-e - Desenho esquemático do quarto passe de laminação

PASSE 5

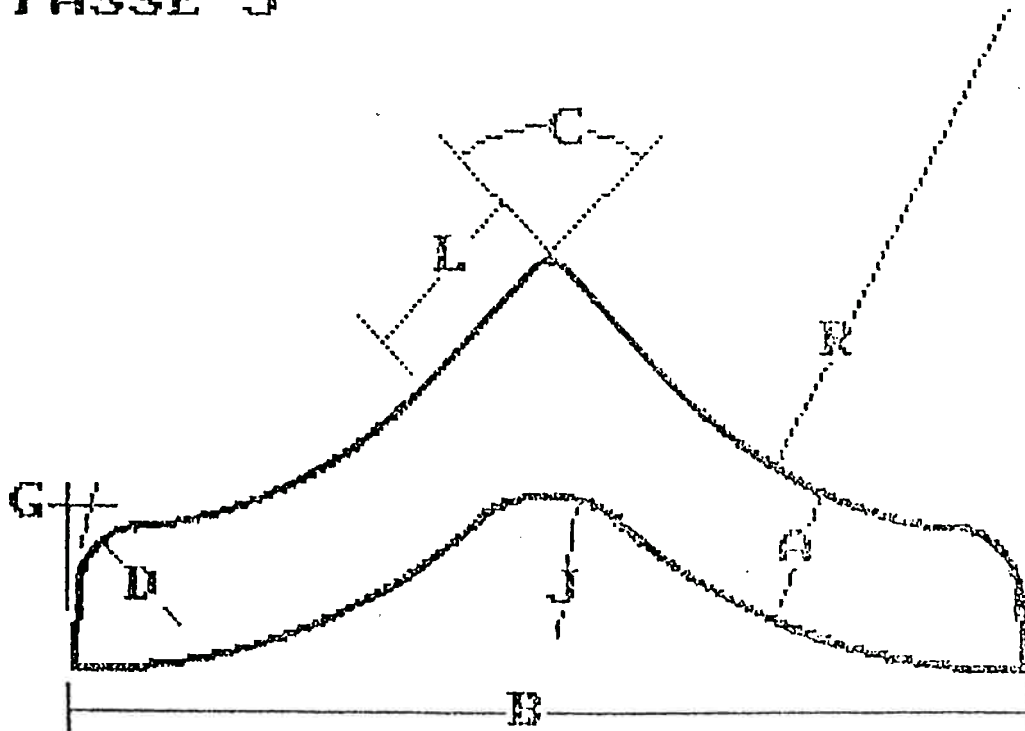


Fig 2-f - Desenho esquemático do quinto passe de laminação

PASSE 6

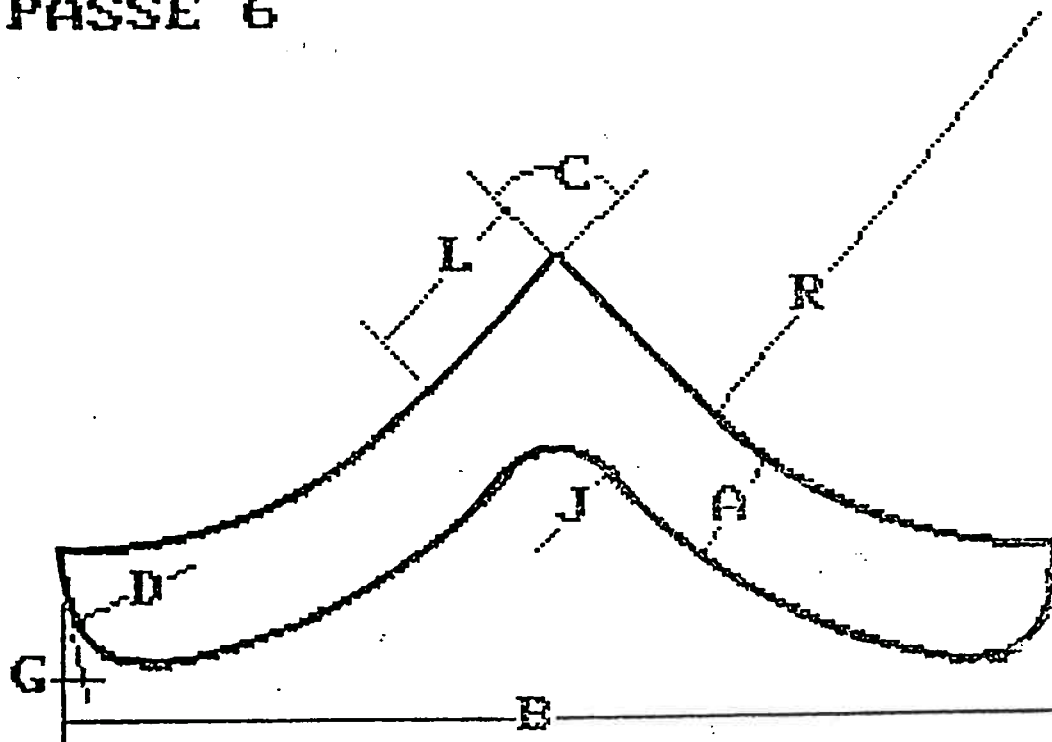


Fig 2-g - Desenho esquemático do sexto passe de laminação

PASSE 7

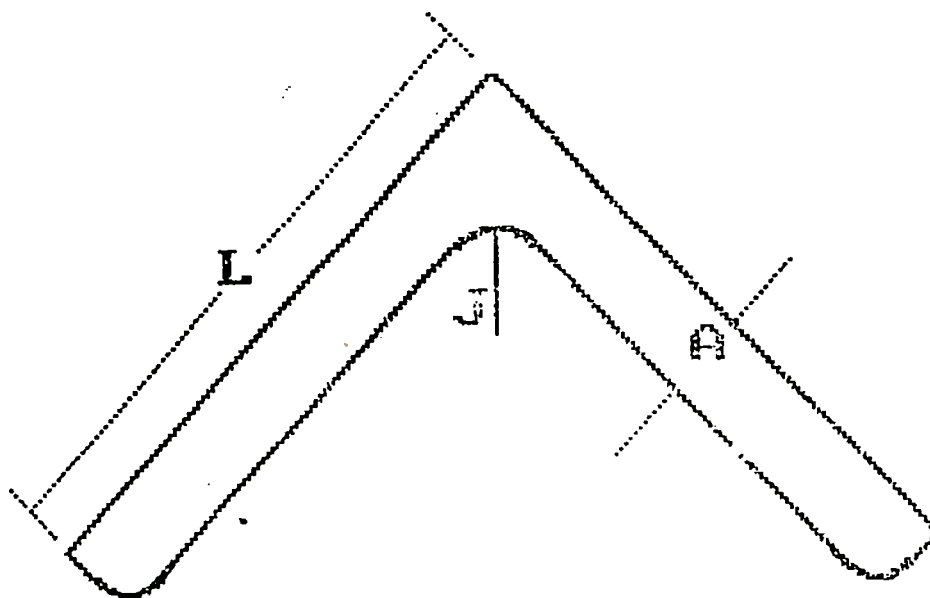


Fig 2-h - Desenho esquemático do sétimo passe de laminação

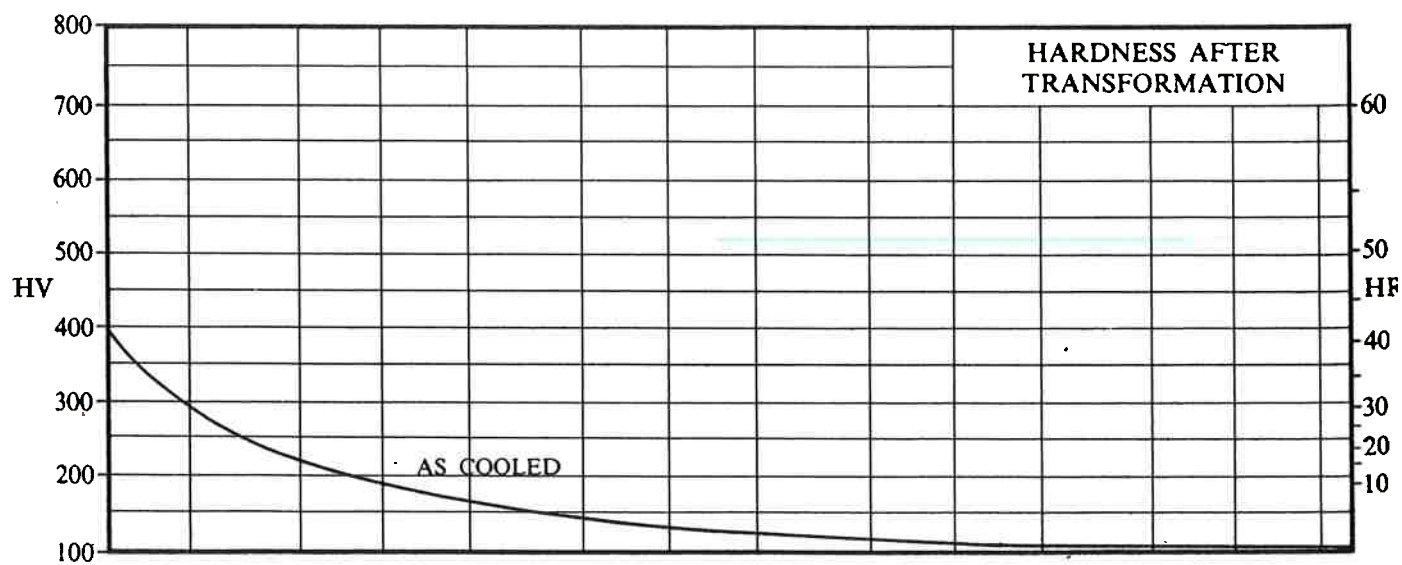
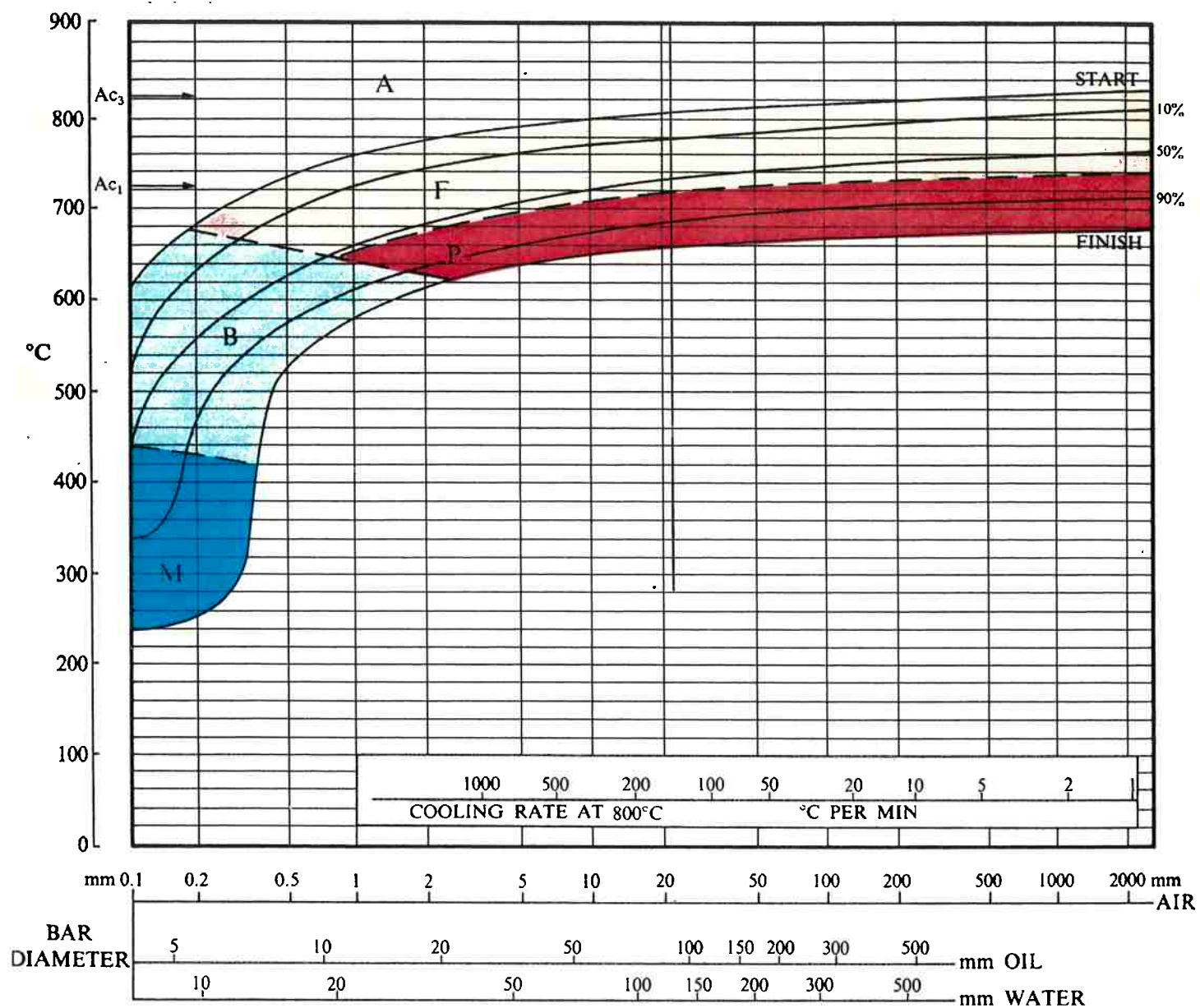


Fig.3 - Curvas CCT de aço com composição próxima à do aço A-36 com a correspondente curva de resfriamento em ar

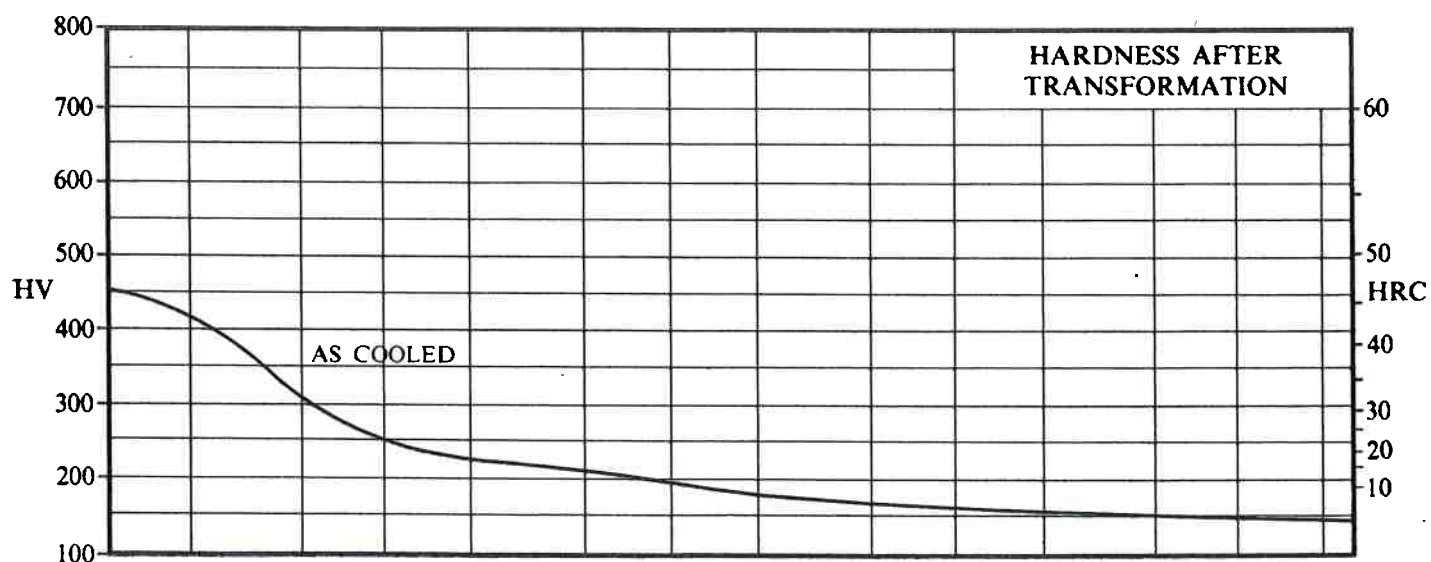
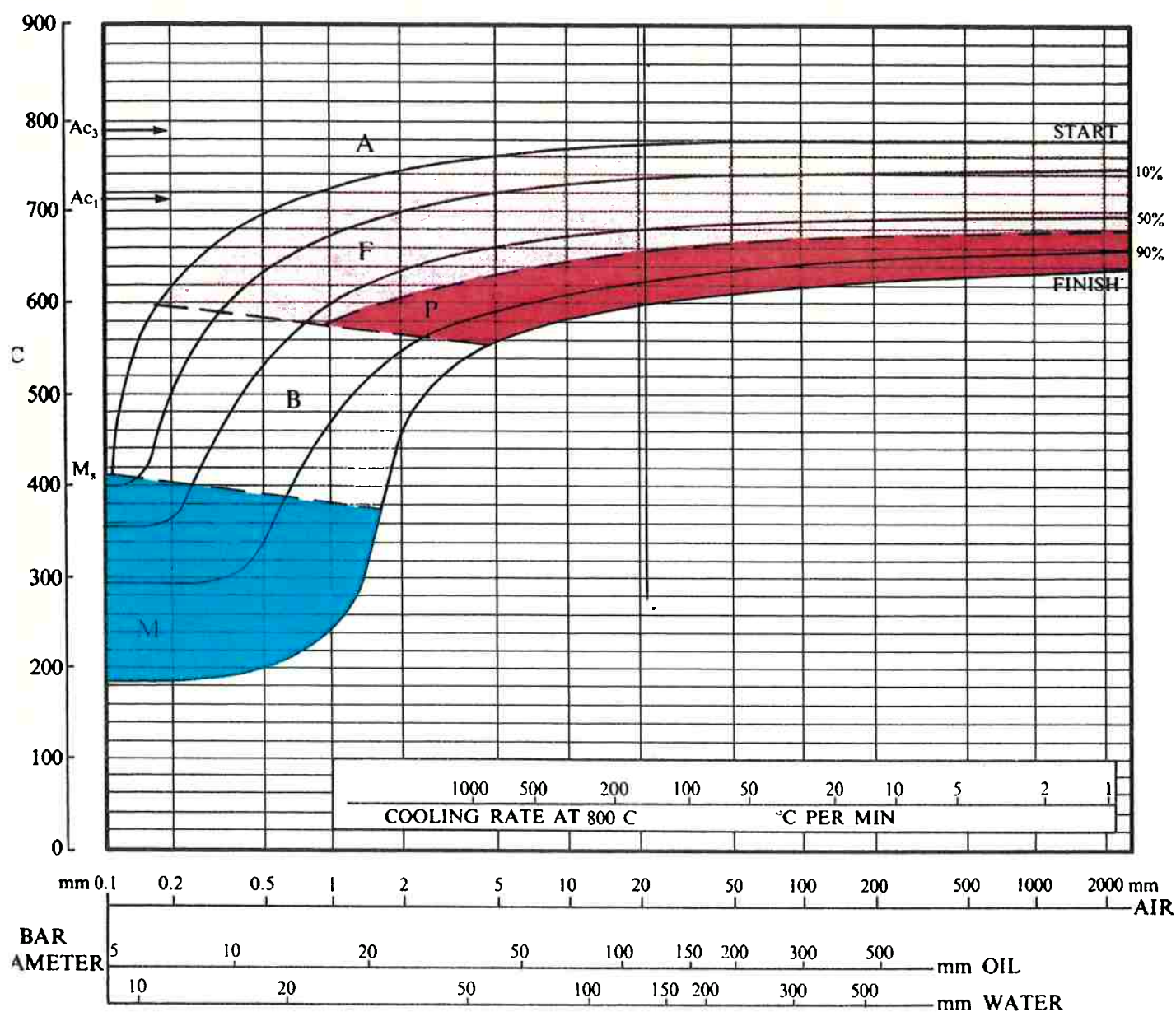
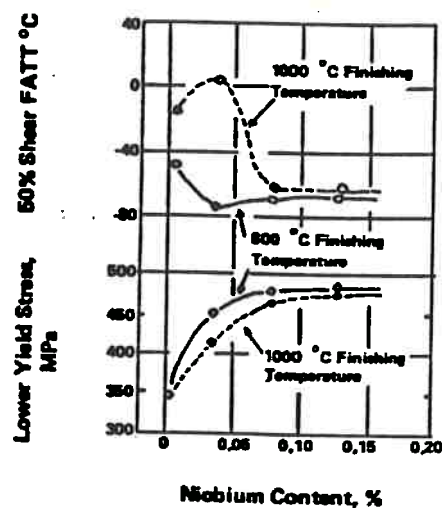


Fig.4 - Curvas CCT de aço com composição próxima à do aço A-572 com a correspondente curva de resfriamento em ar



Effect of Nb on yield strength and transition temperature (FATT)
 $d = 20\text{mm}$, 0,08%C, 1,5% Mn, 0,25% Si. reheating temperature 1250°C.



Fig. 5 - Efeito do Nióbio sobre o Limite de Escoamento e a Temperatura de Transição

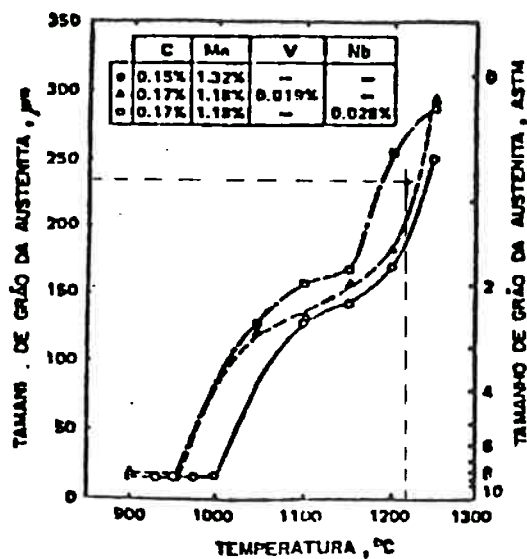
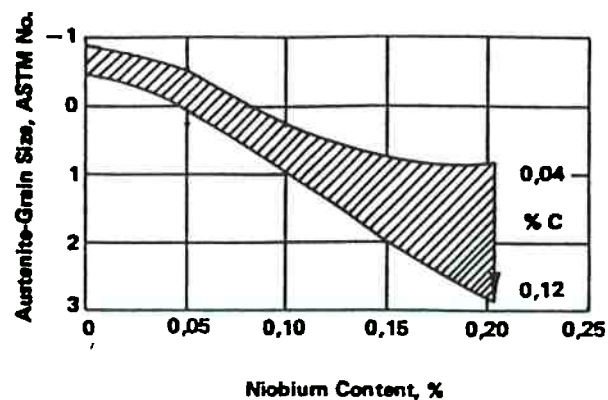


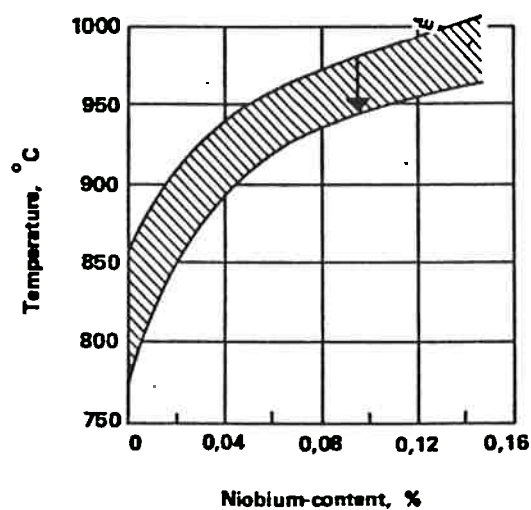
Fig. 6 - Efeito da temperatura de aquecimento sobre o tamanho de grão austenítico



Influence of Niobium on austenite grain size (1250°C, 1 h)



Fig. 7 - Influência da quantidade de Nióbio sobre o tamanho de grão austenítico



Effect of Niobium on temperature for 50% recrystallisation



Fig. 8 - Efeito do Nióbio sobre a temperatura de recristalização

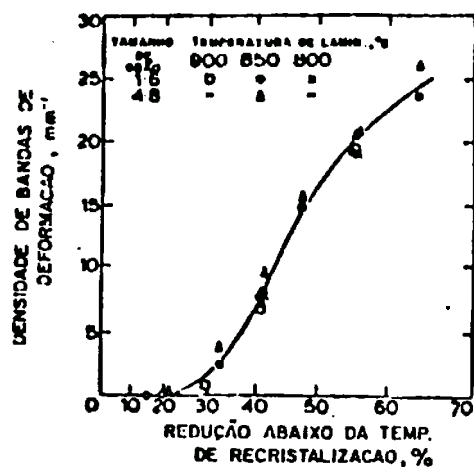


Fig. 9 - Aumento das bandas de deformação em função do aumento da deformação na região de não-recristalização

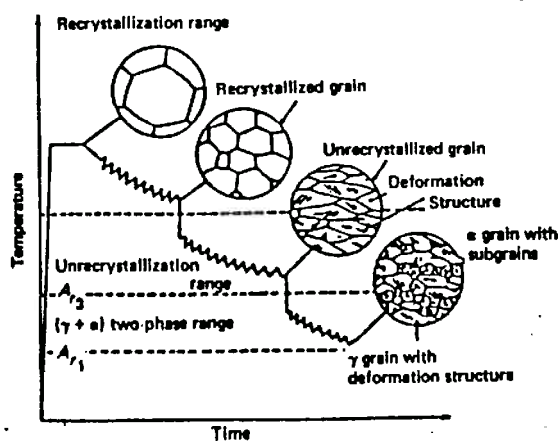
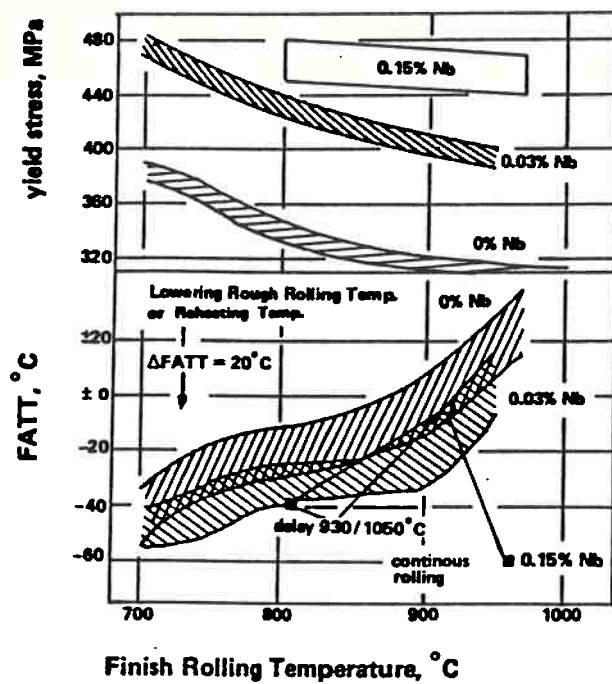


Fig. 10 - Os três estágios do processo de laminação controlada



Influence of finish rolling temperature
on yield stress and FATT of heavy plate.
Effect of Niobium content.



Fig. 11 - Efeito da temperatura de acabamento sobre o limite de escoamento e a temperatura de transição

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo do presente trabalho é o estudo das microestruturas dos aços ASTM A-36 e ASTM A-572, utilizados na laminação de cantoneiras de 6" x 1/2" na Siderúrgica J.L.Aliperti S.A.. Objetivou-se avaliar o desempenho do nióbio, presente no aço ASTM A-572, como refinador de grão, nas condições de laminação da Siderúrgica J. L. Aliperti S.A.

3. DESCRIÇÃO DO PROCESSO, INSTALAÇÃO E METODOLOGIA

3.1 Descrição do processo:

O processo de laminação de cantoneiras de 6" x 1/2" tem início com o reaquecimento dos blocos no forno de empurre, cujas temperaturas são:

zona superior : 1250 C

zona inferior : 1300 C

zona frontal : 1300 C

Após reaquecimento, os blocos sofrem nove passes de desbaste na cadeira desbastadora.

Posteriormente, o material chega à primeira cadeira do Trem 650 (diâmetro do cilindro de trabalho), onde sofre quatro passes de laminação, cujos tempos e temperaturas de entrada de cada passe são tabelados abaixo:

Passe	Tempo (s)	Temperatura (C)
1	7	1140
2	9	1120
3	12	1100
4	15	1090

Tabela 5 - Tempo e temperatura dos passes da primeira cadeira do Trem 650

Os tempos de interpasse são os tabelados abaixo:

Passe	Tempo de interpasse (s)
1-2	6
2-3	9
3-4	5

Tabela 6 - Tempos de interpasse na primeira cadeira do Trem 650

Depois de passar pela primeira cadeira, o material parte para a segunda cadeira do trem 650, onde sofre três passes, cujos tempos e temperaturas de entrada de cada passe são tabelados abaixo:

Passe	Tempo (s)	Temperatura (C)
1	22	1060
2	26	1030
3	34	990

Tabela 7 - Tempo e temperatura dos passes da segunda cadeira do Trem 650

Os tempos de interpasse são os tabelados abaixo:

Passe	Tempo de Interpasse (s)
1-2	5
2-3	9

Tabela 8 - Tempos de interpasse na segunda cadeira do Trem 650

Após passar pela segunda cadeira do trem 650, o produto passa pela serra de perfis, onde é cortado no comprimento desejado (geralmente 12 metros) e depois é encaminhado ao leito de resfriamento de perfis, onde é resfriado ao ar.

Finalmente, após resfriamento, o produto é endireitado na endireitadeira de perfis e posteriormente embalado.

A Fig 12 mostra o *lay-out* da laminação de perfis médios da Siderúrgica J.L.Aliperti S.A.. A Fig. 13 mostra o esquema de passes de laminação da Siderúrgica J.L. Aliperti S.A.

SIDERURGICA J.L.ALIPERTI

LAMINAÇÃO - LAY-OUT LINHA MÉDIA

CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS

- FORNO CAPACIDADE=30 T/H CADA
- TREM 700 = 700 x 1800
- TREM 650 = 650 x 1800

LEGENDA

- LC= LEITO DE CARREGAMENTO
- PT= PRENSA DE TARUGOS
- SP= SERRA DE PERFIS
- MEP= MAQUINA DE ENDREITAR PERFIS

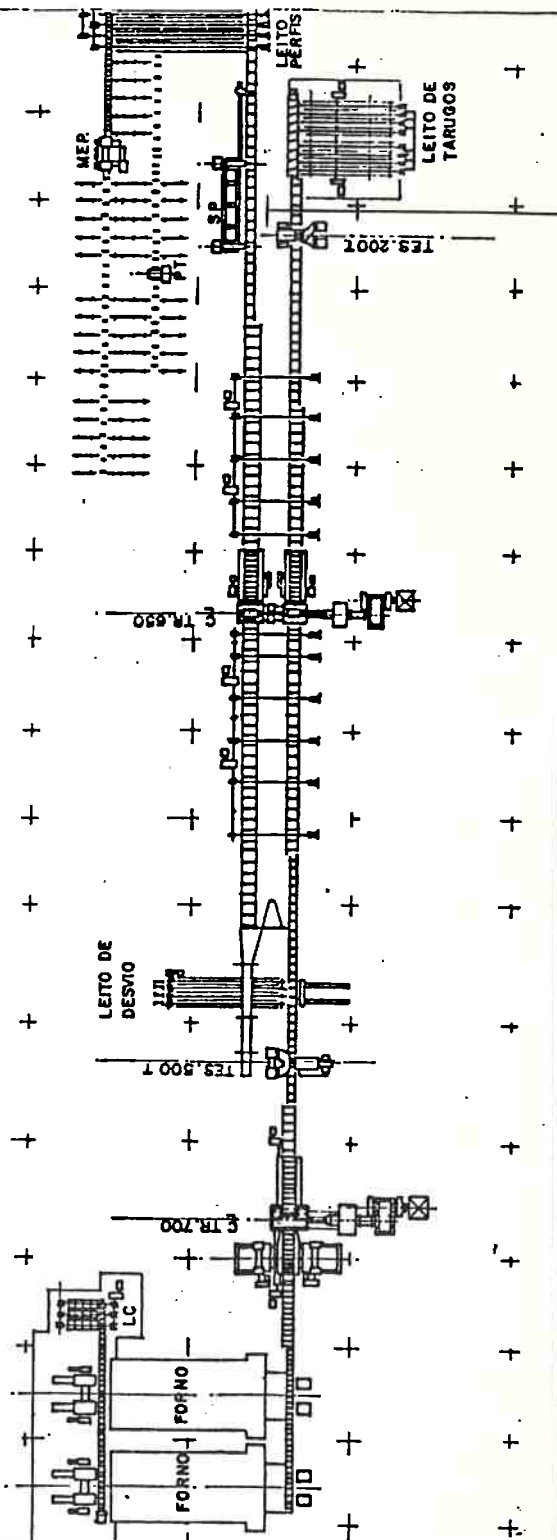


Fig 12- *Lay-out* da laminação de perfis médios da Siderúrgica J.L.Aliperti S.A..

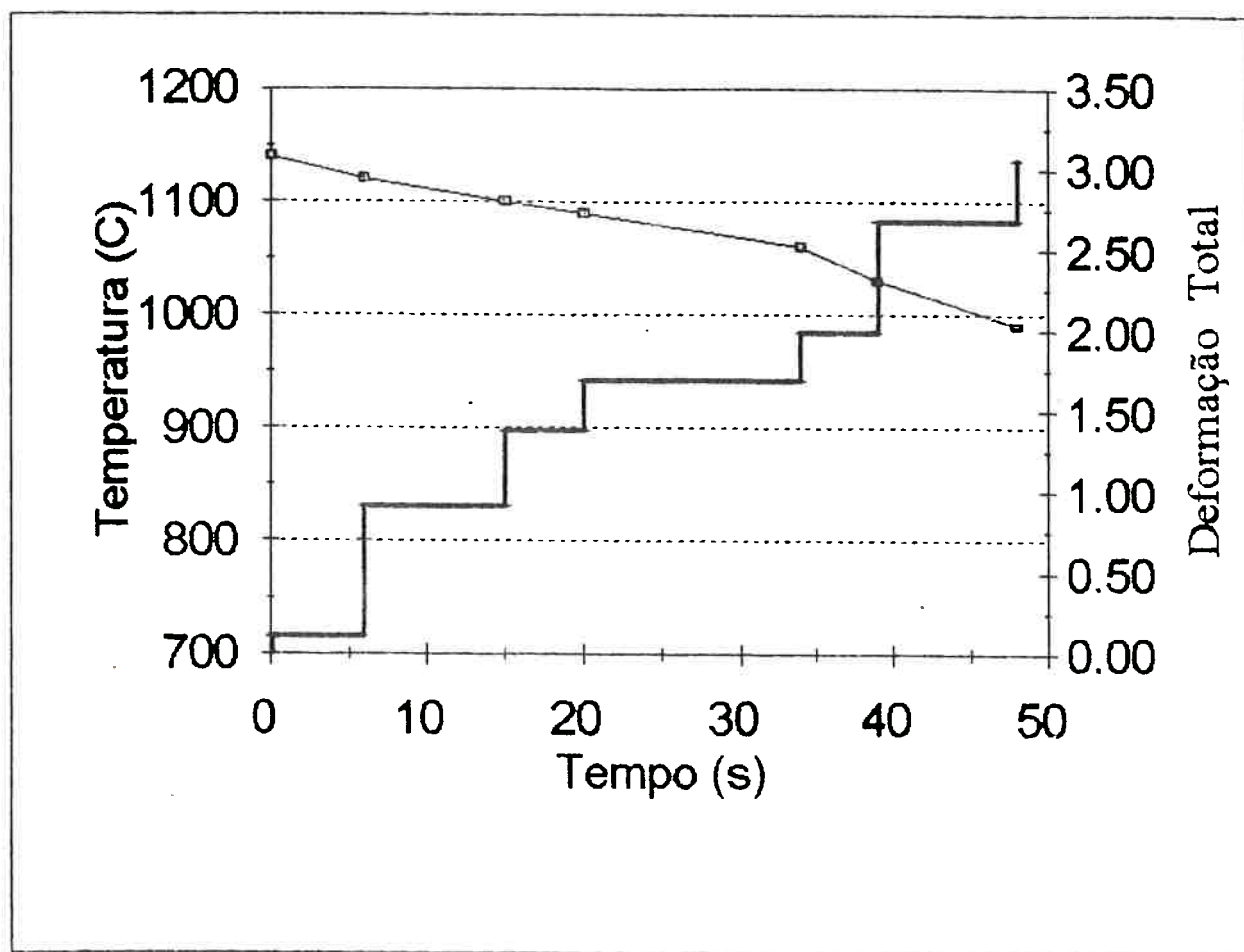


Fig. 13 - Esquema de passes de laminação da Siderúrgica J.L. Aliperti S.A.

3.2 Descrição Sumária dos Principais Equipamentos da Laminação (Aliperti)

- Forno de Reaquecimento de Blocos:

Capacidade : 30 ton/h

Tipo : Soleira fixa com empurrador mecânico

Quantidade de zonas de aquecimento : três (frontal, superior e inferior)

Fabricante : Stein Roubax

Data de Fabricação : 1966

- Cadeira desbastadora 700

Cadeira Trio com mesas basculantes (entrada/saída)

Réguas posicionadoras

Diâmetro cilindro x mesa : 700 x 1800 mm

Fabricante : SECIM

Motor : Alsthon

Potência : 2000 CV (C.A.)

Rotação : 3600 rpm

Data de Fabricação : 1966

- Transferidor de Blocos

Empurradeira com sistema de cremalheiras

Limitador fixo basculante

- Trem 650

02 cadeiras trio com mesa basculante e arrastador posicionador de canais

Diâmetro nominal x mesa : 650 X 1800 mm

Fabricante : SECIM

Motor : Alsthon

Potência : 2500 CV

Rotação : 375/630/720 rpm

Corrente : 3300 A

Tensão : 600 V

Data de Fabricação : 1966

- Serras de corte à quente

Duas serras circulares de corte à quente

Limitadores de comprimento mecanizados

Comprimento mínimo : 500 mm

Comprimento máximo : 12000 mm

Fabricante : SECIM

Data de Fabricação : 1966

- Leito de Resfriamento de Perfis

Dois Leitos

Capacidade : 12 metros de comprimento cada

Arrastador através de cabo de aço

Fabricante : SECIM

Data de Fabricação : 1966

- Endireitadeira de Perfis

Velocidade : 2,5 a 5,0 m/s

Fabricante : SECIM

Data de Fabricação : 1966

3.3 Metodologia

Na parte experimental, foram utilizadas amostras dos blocos a serem laminados e amostras de cantoneiras. As amostras dos blocos a serem laminados foram coletados no setor de oxi-corte da Siderúrgica J.L. Aliperti e receberam a seguinte identificação:

Amostra	Tipo de Aço
1	A-36
2	A-572

Tabela 9 - Identificação das amostras dos blocos a serem laminados.

Visando simular as condições do forno de reaquecimento de blocos da empresa, as amostras dos blocos a serem laminados foram austenitizadas por 40 minutos à temperatura de 1210 C. Após aquecimento, as mesmas foram temperadas em água.

As amostras de cantoneiras foram coletadas na serra de corte à quente, seguindo-se o procedimento descrito abaixo:

Após determinado tempo de saída do último passe da segunda cadeira do Trem 650, as amostras foram imersas em recipientes contendo água ou areia. Algumas amostras foram resfriadas ao ar.

De acordo com o tipo de aço e com o *delay time* entre a saída do laminador e a imersão no meio de resfriamento (água ou areia), as amostras receberam uma identificação, a qual é mostrada abaixo:

Número da Amostra	Aço	<i>Delay time</i>	Resfriamento
1	A-572	1'40"	água
2	A-572	2'00"	água
3	A-572	2'20"	água
4	A-572	2'40"	água
5	A-572	1'40"	areia
6	A-572	---	ar

7	A-36	1'40"	água
8	A-36	2'00"	água
9	A-36	2'20"	água
10	A-36	2'40"	água
11	A-36	1'40"	areia
12	A-36	---	ar

Tabela 10 - Identificação das amostras de cantoneiras

O *delay time* de 1'40" representa o tempo que a amostra leva para percorrer a distância entre o laminador e a serra de corte à quente. Os demais *delay time* representam que, além do tempo que a amostra leva para percorrer a distância entre o laminador e a serra de corte à quente, foi aguardado um tempo adicional antes da imersão da amostra no meio de resfriamento.

Depois de coletadas e resfriadas, as amostras sofreram uma série de cortes a fim de serem embutidas as regiões de maior interesse (centro e borda), as quais são ilustradas na figura 14.

Metalografia Óptica

Os corpos de prova para análise metalográfica foram embutidos em resina e preparados pelo processo normal de lixamento, até lixa d'água 600, seguido de polimento mecânico em pasta de diamante de 6, 3 e 1 micrometros. A microestrutura foi revelada com ataque de Nital 1%.

As observações metalográficas dos corpos de prova foram realizadas em microscópio óptico do tipo Universal Zeiss.

Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados numa máquina Universal de ensaios mecânicos de marca Shimadzu, à temperatura ambiente. Foram ensaiados corpos de prova resfriados ao ar. Os corpos de prova resfriados em água e em areia não foram ensaiados devido ao tamanho inadequado das amostras coletadas, para a realização deste ensaio.

Ensaio de Dureza

Os ensaios utilizando dureza Vickers foram realizados em máquina de microdureza do tipo Zwick 8212 com carga de 300 gramas. As leituras foram efetuadas em corpos de prova embutidos e polidos, porém sem ataque, para que fosse facilitada a leitura apenas na matriz.

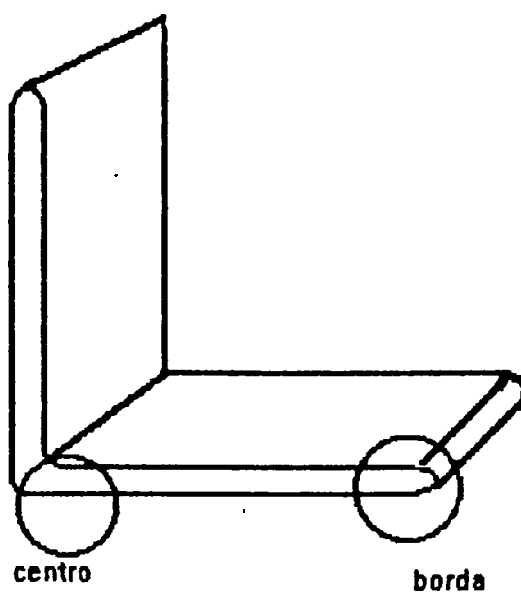


Fig. 14 - Regiões de maior interesse a serem embutidas (centro e borda).

4. RESULTADOS

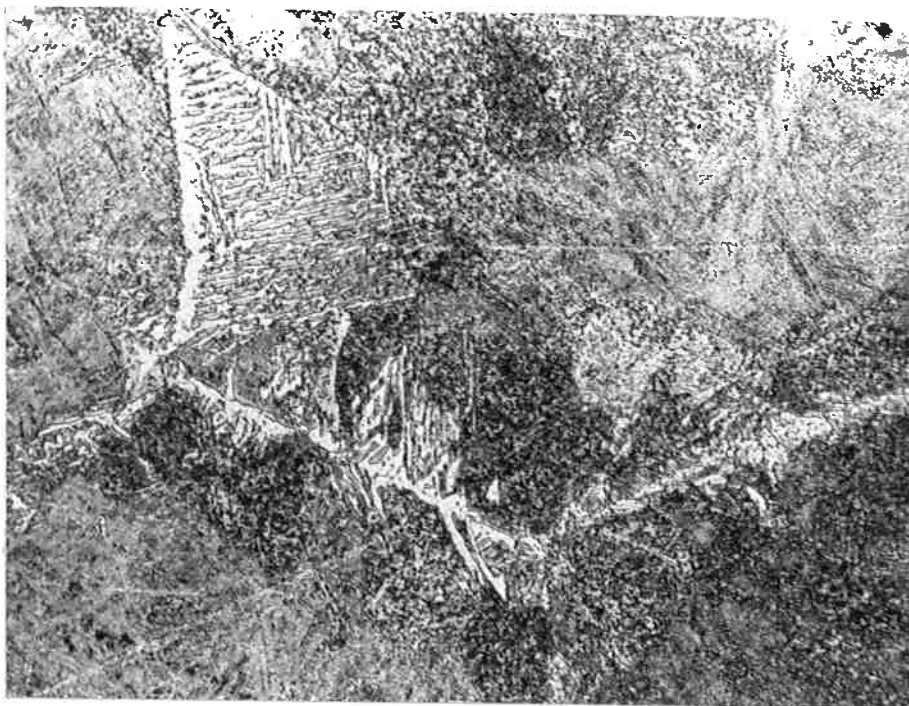
Os ensaios a seguir visam comparar o tamanho de grão obtido com o aço ASTM A-572 utilizado para laminação de cantoneiras de 6" x 1/2" na Siderúrgica J.L. Aliperti com o tamanho de grão obtido com o aço ASTM A-36 utilizado para a mesma finalidade.

Primeiramente, serão apresentadas as microestruturas obtidas através dos tratamentos de tempera em água realizadas com as amostras dos blocos a serem laminados e seus respectivos tamanhos de grão austeníticos.

Em seguida, serão apresentadas as microestruturas obtidas com os diferentes tratamentos realizados com as amostras de cantoneiras e seus respectivos tamanhos de grão ferríticos. Serão apresentados também os valores de limite de escoamento, limite de resistência e dureza Vickers obtidos para algumas amostras. Por fim, será apresentada uma estimativa do tamanho de grão austenítico obtido no final da laminação.

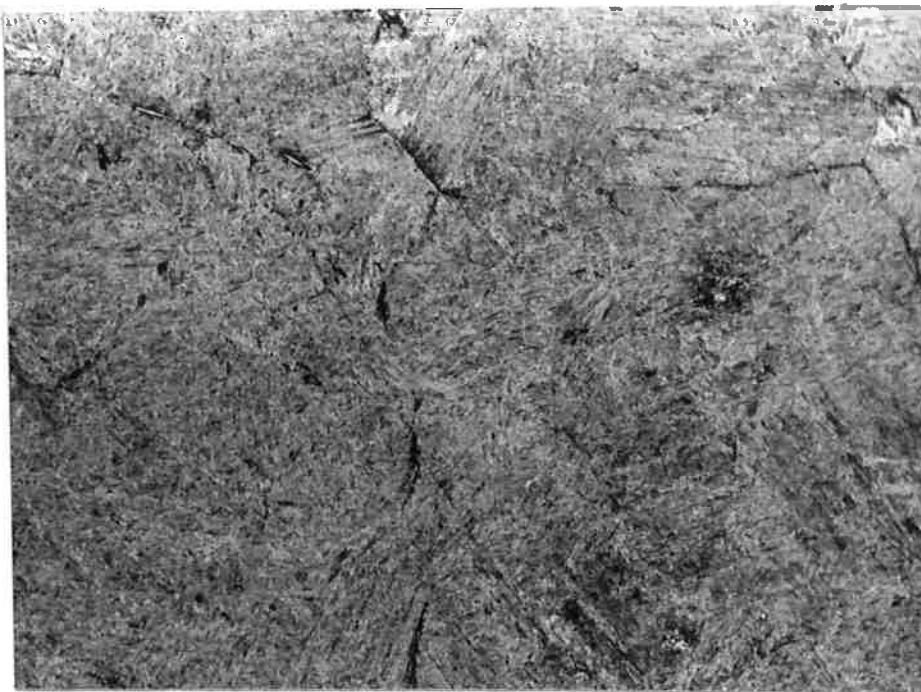
4.1 Microestruturas obtidas através dos tratamentos de tempera realizados com amostras de blocos a serem laminados.

Primeiramente, as amostras de 1 polegada de espessura foram austenitizadas à 1210 C durante 40 minutos e posteriormente resfriadas em água. As microestruturas observadas são ilustradas abaixo:



20 μm

Fig. 15 - Micrografia da amostra de bloco do aço ASTM A-36, austenitizada a 1210 C por 40 minutos e resfriada em água. Estrutura martensítica e ferrita acicular



50 μm

Fig. 16 - Micrografia da amostra de bloco do aço ASTM A-572, austenitizada a 1210 C por 40 minutos e resfriada em água. Estrutura martensítica e ferrita acicular

Como em algumas regiões das duas amostras foi observada a presença de ferrita acicular nos contornos de grão, podemos então obter a medida do tamanho de grão austenítico das mesmas. Utilizando-se linhas-teste de 75 mm de diâmetro acoplada à lente do microscópio óptico do tipo Universal Zeiss, obtivemos os seguintes resultados de tamanhos de grão austeníticos

Tipo de aço da amostra	Tamanho de grão austenítico (μm)
A-36	314,2
A-572	235,6

Tabela 11 - Tamanho de grão austenítico das amostras dos blocos a serem laminados

Os tamanhos de grão austeníticos obtidos acima são uma estimativa do tamanho de grão austenítico inicial de laminação. Observa-se que valor do tamanho de grão austenítico obtido para o aço ASTM A-572 é um valor próximo ao que está indicado na Fig. 5 (página 21), mostrando assim que há coerência no resultado obtido.

4.2 Microestruturas obtidas através dos diferentes tratamentos realizados com amostras de cantoneiras.

As microestruturas obtidas através dos diferentes tratamentos realizados com amostras de cantoneiras, já descritos anteriormente são as seguintes:



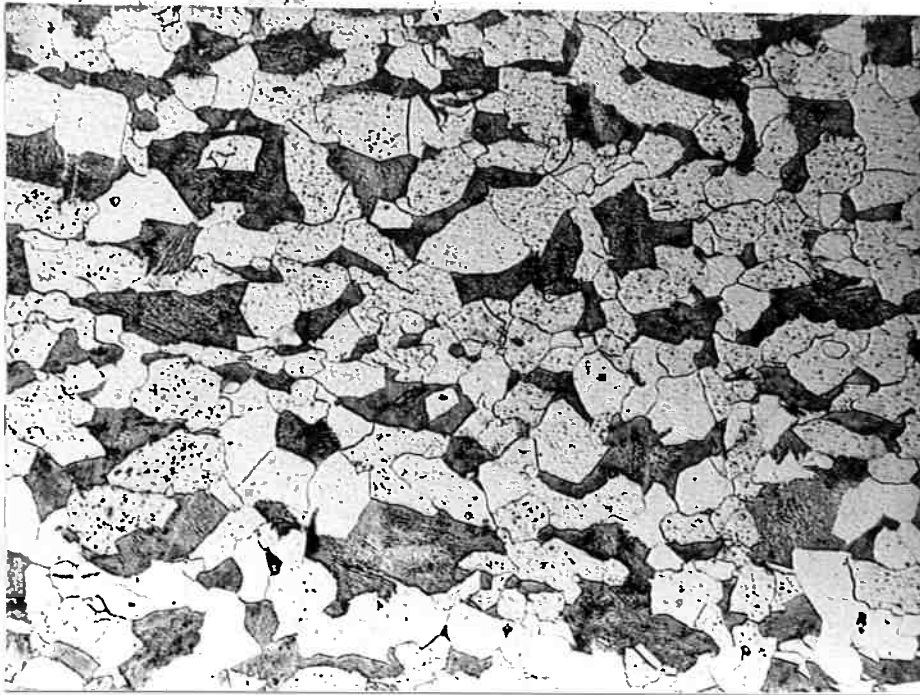
20 μm

Fig.17 - Amostra 01 - borda. Ferrita e perlita. Resfriamento em água. *Delay time* : 1'40"



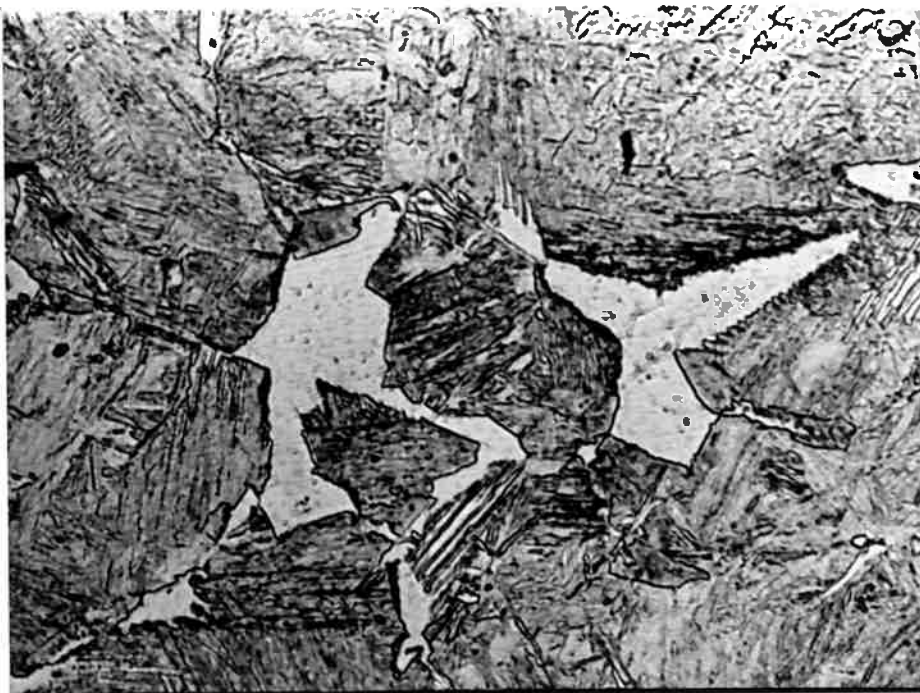
20 μm

Fig. 18 - Amostra 01 - centro. Ferrita acicular, bainita e constituinte fino, que é uma mistura de ferrita e carboneto, formado no resfriamento em água (provavelmente bainita) . Resfriamento em água. *Delay time* : 1'40"



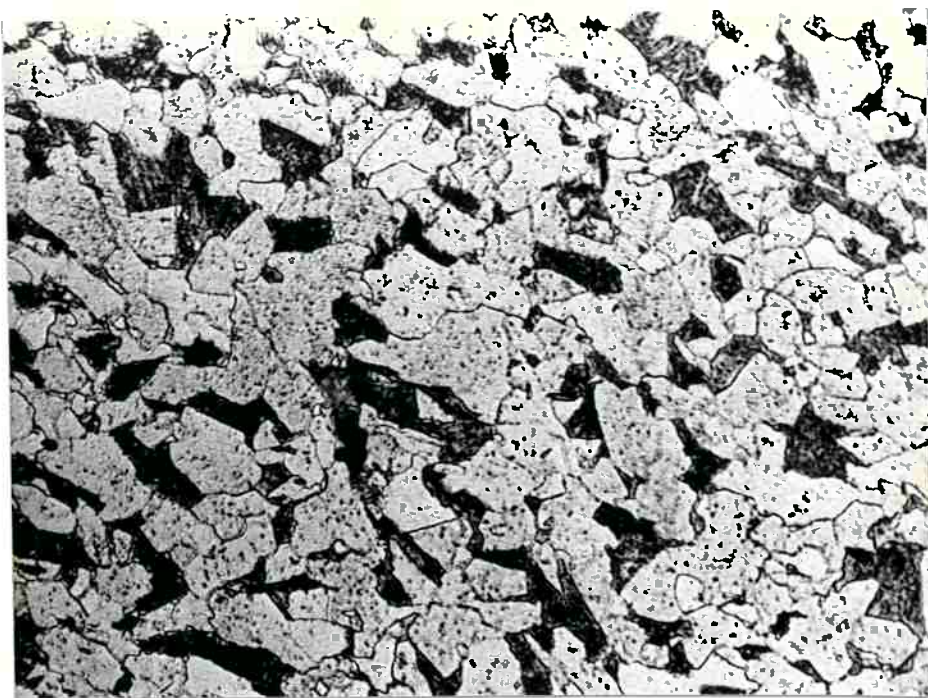
20 μm

Fig. 19 - Amostra 02 - borda. Ferrita e Perlita. Resfriamento em água. *Delay time* : 2'00"



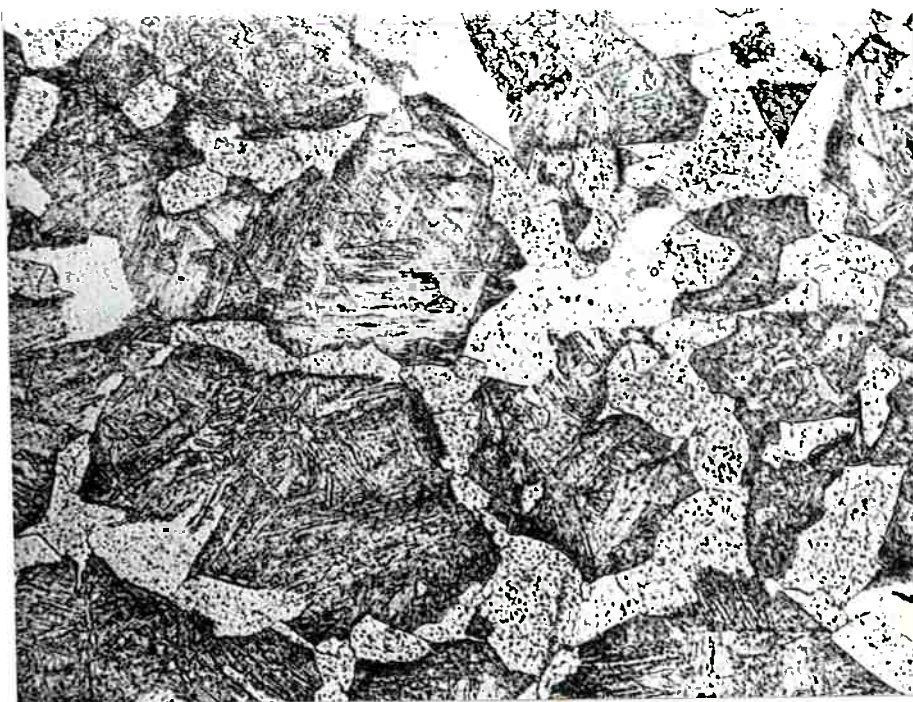
20 μm

Fig. 20 - Amostra 02 - centro. Ferrita e constituinte fino, que é uma mistura de ferrita e carboneto, formado no resfriamento em água (provavelmente bainita). Resfriamento em água. *Delay time* : 2'00"



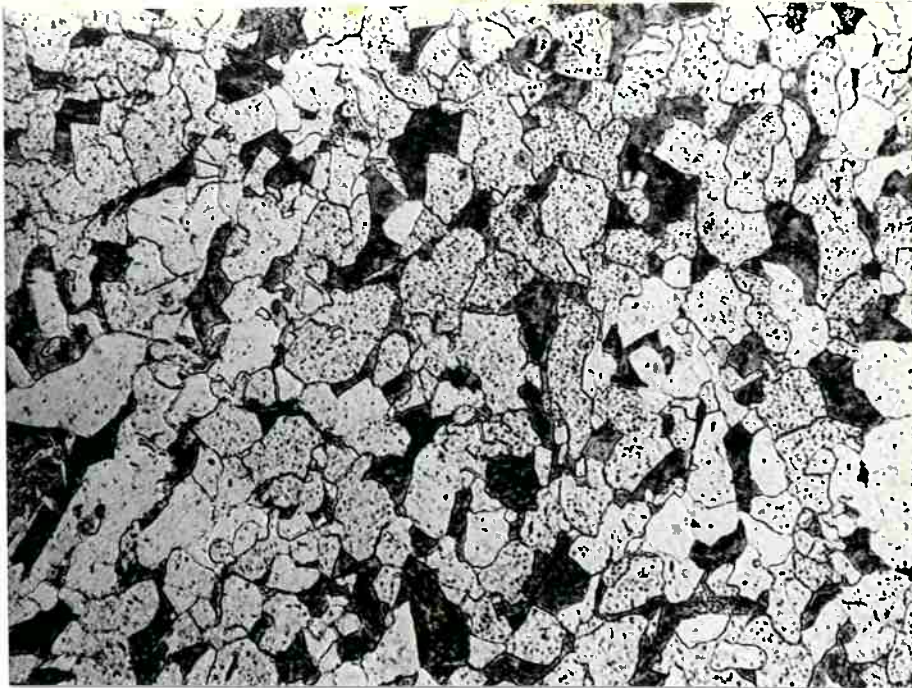
20 μm

Fig. 21 - Amostra 03 - borda. Ferrita e Perlita. Resfriamento em água. *Delay time* : 2'20"



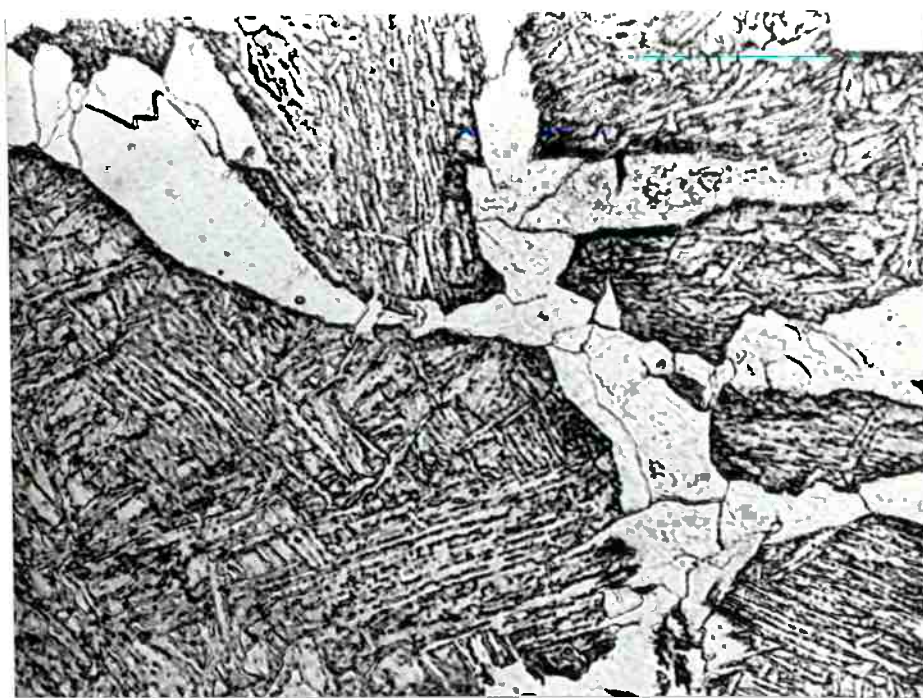
20 μm

Fig. 22 - Amostra 03 - centro. Ferrita, perlita e constituinte fino, que é uma mistura de ferrita e carboneto, formado no resfriamento em água (provavelmente bainita).
Resfriamento em água. *Delay time* : 2'20"



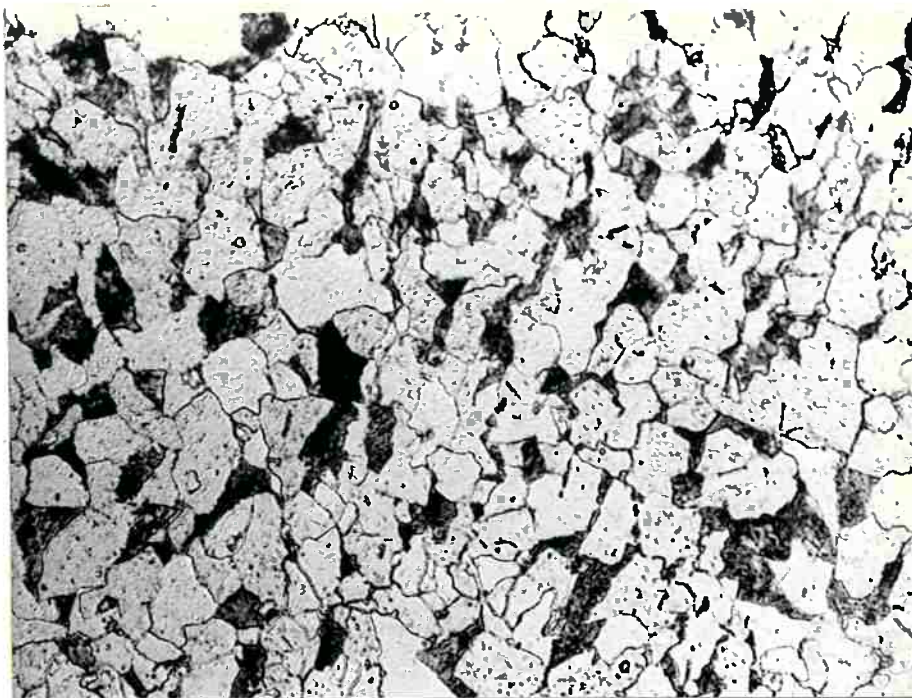
20 μm

Fig. 23 - Amostra 04 - borda. Ferrita e Perlita. Resfriamento em água. *Delay time* : 2'40"



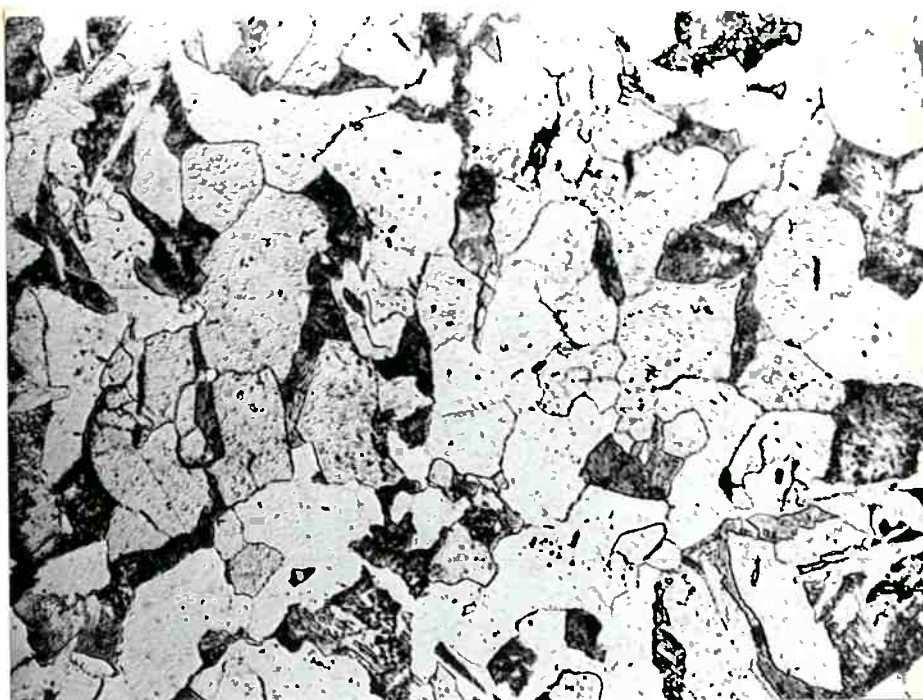
20 μm

Fig. 24 - Amostra 04 - centro. Ferrita, perlita e constituinte fino, que é uma mistura de ferrita e carboneto, formado no resfriamento em água (provavelmente bainita).
Resfriamento em água. *Delay time* : 2'40"



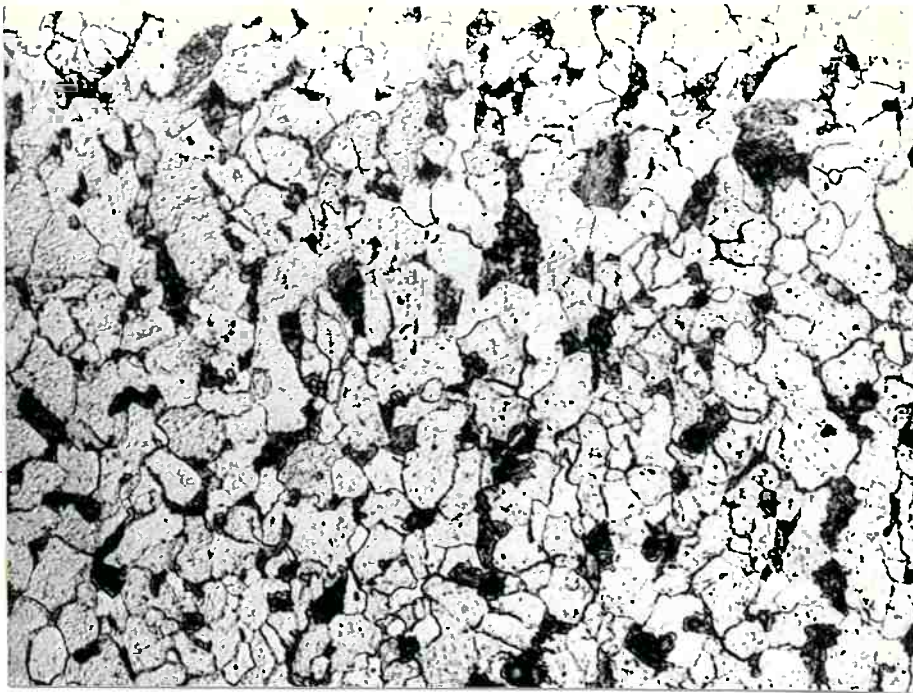
20 μm

Fig. 25 - Amostra 05 - borda. Ferrita e perlita. Resfriamento em areia. *Delay time* : 1'40"



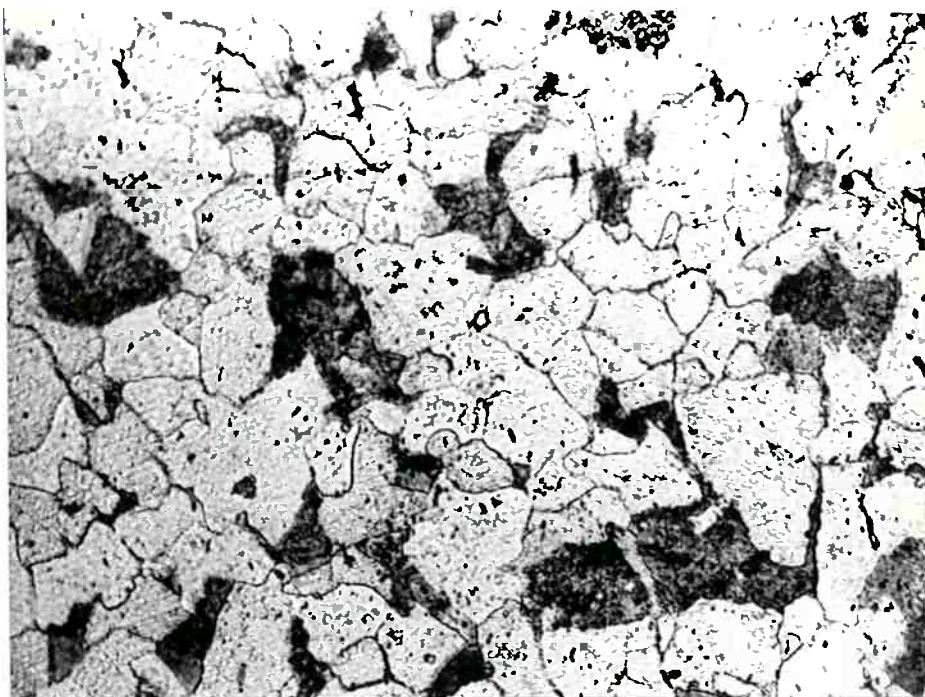
20 μm

Fig.26 - Amostra 05 - centro. Ferrita e perlita. Resfriamento em areia. *Delay time* : 1'40"



20 μm

Fig.27 - Amostra 06 - borda. Ferrita e perlita. Resfriamento em ar.



20 μm

Fig. 28 - Amostra 06 - centro. Ferrita e perlita. Resfriamento em ar.



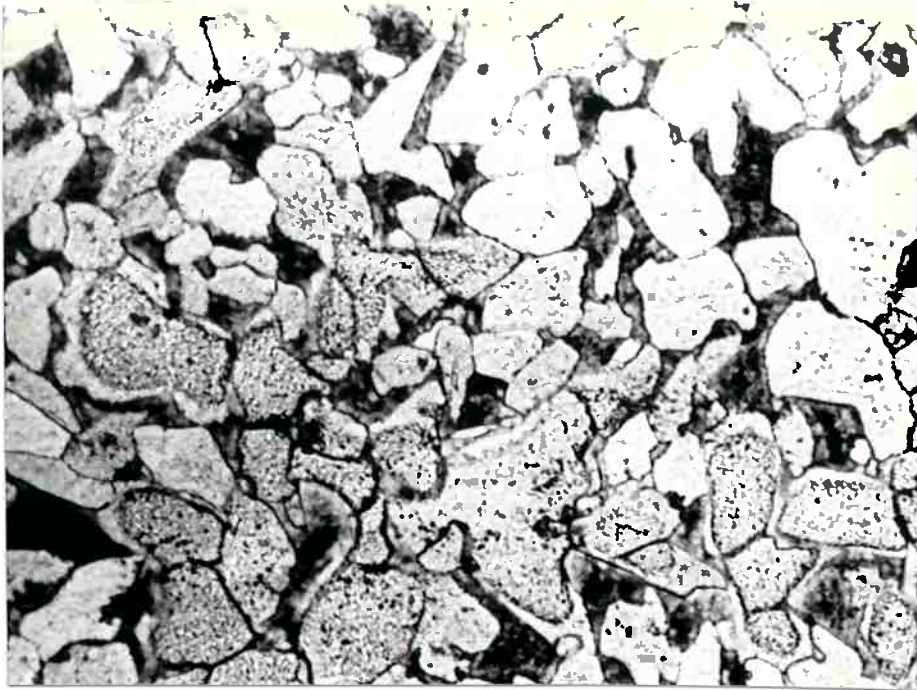
20 μm

Fig. 29 - Amostra 07 - borda. Ferrita e perlita. Resfriamento em água. *Delay time* : 1'40"



20 μm

Fig. 30 - Amostra 7 - centro. Ferrita, perlita e constituinte fino, que é uma mistura de ferrita e carboneto, formado no resfriamento em água (provavelmente bainita). Resfriamento em água. *Delay time* : 1'40"



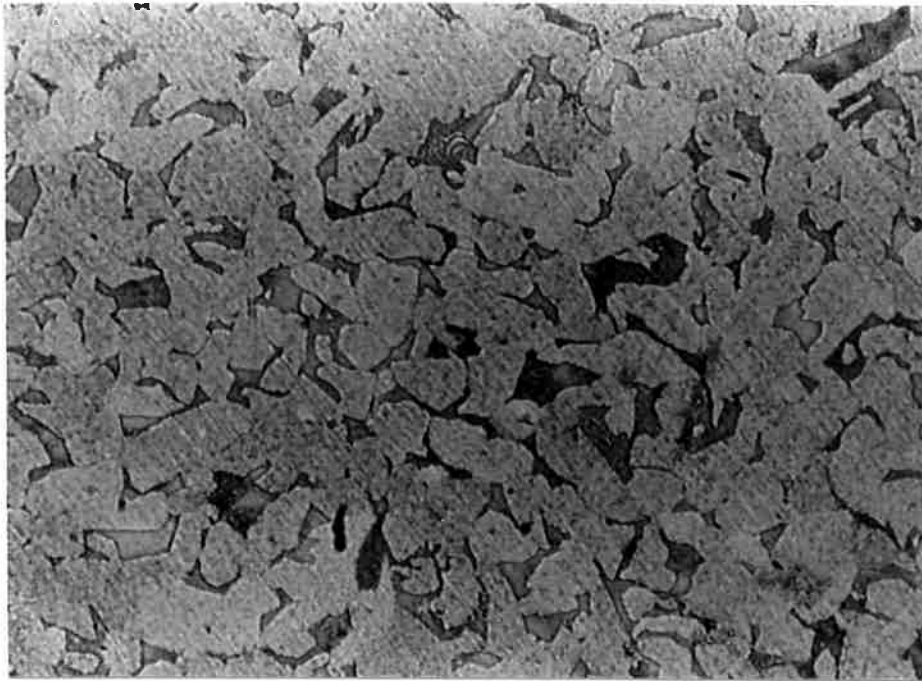
20 μm

Fig. 31 - Amostra 08 - borda. Ferrita e perlita. Resfriamento em água. *Delay time* : 2'00"



20 μm

Fig. 32 - Amostra 8 - centro. Ferrita, perlita e constituinte fino, que é uma mistura de ferrita e carboneto, formado no resfriamento em água (provavelmente bainita). Resfriamento em água. *Delay time* : 2'00"



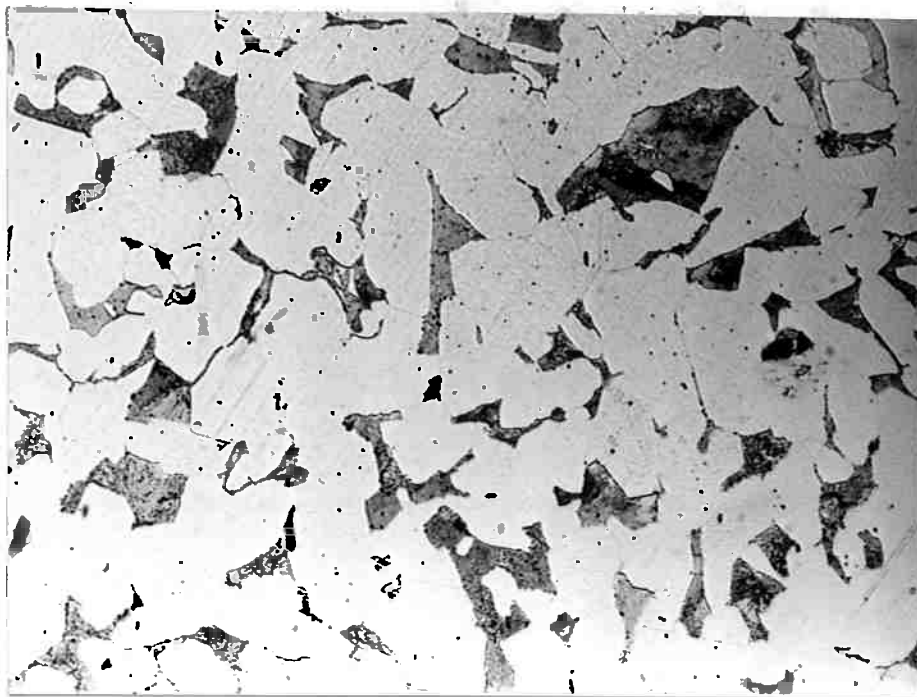
20 μm

Fig.33 - Amostra 09 - borda. Ferrita e perlita. Resfriamento em água. *Delay time* : 2'20"



20 μm

Fig. 34 - Amostra 09 - centro. Ferrita e perlita. Resfriamento em água. *Delay time* : 2'20"



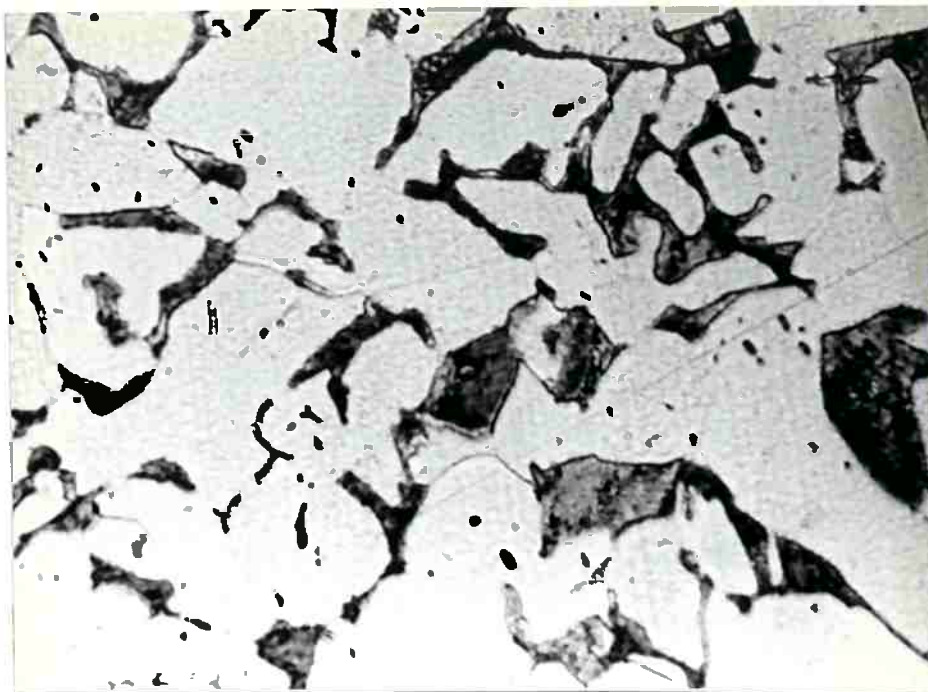
20 μm

Fig. 35 - Amostra 10 - borda. Ferrita e perlita. Resfriamento em água. *Delay time* : 2'40"



20 μm

Fig.36 - Amostra 10 - centro. Ferrita e perlita. Resfriamento em água. *Delay time* : 2'40"



20 μm

Fig. 37 - Amostra 11 - borda. Ferrita e perlita. Resfriamento em areia. *Delay time* : 1'40"



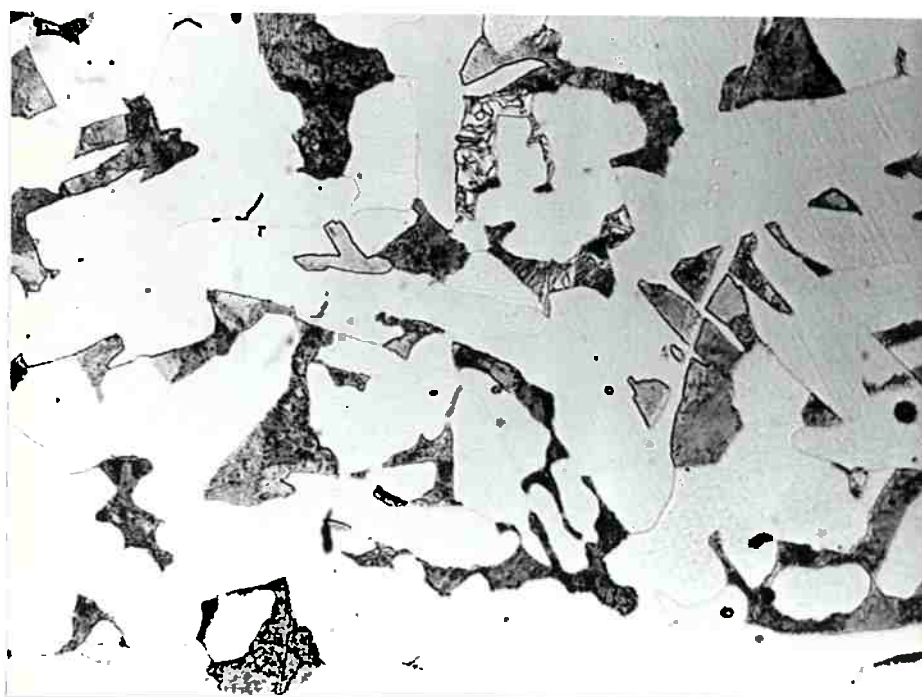
20 μm

Fig.38 - Amostra 11 -centro. Ferrita e perlita. Resfriamento em areia. *Delay time* : 1'40"



20 μm

Fig.39 - Amostra 12 - borda. Ferrita e perlita. Resfriamento em ar.



20 μm

Fig. 40 - Amostra 12 - centro. Ferrita e perlita. Resfriamento em ar.

Podemos observar que, para o mesmo *delay time* entre a saída do laminador e a imersão em água, obtivemos uma variação microestrutural entre as regiões centrais dos aços ASTM A-36 e ASTM A-572. Como exemplo, podemos citar a amostra 4 - centro e a amostra 10 - centro. Enquanto a amostra 4 apresenta ferrita, perlita e constituinte fino em sua microestrutura (provavelmente bainita), a amostra 10 já se apresenta ferrítico-perlítica.

Podemos observar também que, mesmo com resfriamento em água, as bordas das amostras de cantoneiras apresentaram-se com microestrutura constituída por ferrita e perlita, devido a temperatura na borda da cantoneira ser inferior à temperatura na região central da mesma.

4.3 Tamanhos de grão obtidos através dos diferentes tratamentos realizados com amostras de cantoneiras.

Utilizando-se linhas-teste de 75 mm de diâmetro acoplada à lente do microscópio óptico do tipo Universal Zeiss, obtivemos os seguintes resultados de tamanhos de grão ferrítico

Amostra	Tamanho de Grão (μm)	Amostra	Tamanho de Grão (μm)
1-borda (água; 1'40")	14,9	7-borda (água; 1'40")	22,3
2-borda (água; 2'00")	16,7	8-borda (água; 2'00")	21,1
3-borda (água; 2'20")	16,5	9-borda (água; 2'20")	20,2
4-borda (água; 2'40")	16,2	10-borda (água; 2'40")	20,6
5-borda (areia; 1'40")	16,7	11-borda (areia; 1'40")	28,3
5-centro (areia; 1'40")	21,3	11-centro (areia; 1'40")	33,8
6-borda (ar)	16,1	12-borda (ar)	23,8
6-centro (ar)	20,2	12-centro (ar)	26,4

Tabela 12 - Tamanho de grão ferrítico de algumas amostras. O meio de resfriamento e o *delay time* estão indicados entre parêntesis.

De acordo com os resultados obtidos acima, podemos notar que o produto laminado com o aço ASTM A-572 apresentou microestrutura mais refinada que o produto laminado com o aço A-36.

Devido à variação microestrutural observada entre as regiões centrais dos aços ASTM A-36 e ASTM A-572 para o mesmo *delay time* entre a saída do laminador e a imersão em água, não foi do nosso interesse obter o tamanho de grão ferrítico destas amostras.

No caso da amostra 1-centro, devido à presença de ferrita acicular e bainita em algumas regiões, pudemos obter uma estimativa do tamanho de grão austenítico final de laminação.

Utilizando a linha teste de 75 mm de diâmetro acoplada no microscópio Universal Zeiss, obtivemos um tamanho de grão austenítico de 32,9 μm , para as amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-572.

4.4 Ensaios de Tração

Foram realizados ensaios de tração à temperatura ambiente utilizando amostras de cantoneiras laminadas com os aços ASTM A-36 e ASTM A-572 e resfriadas ao ar. As amostras resfriadas em água e em areia não foram ensaiadas devido aos motivos já citados anteriormente.

Os resultados obtidos utilizando-se amostras de cantoneiras laminadas com o aço A-36 são os seguintes:

Número do Ensaio	L.E. (MPa)	L.R. (MPa)	A (%)
1	325 (250)	453 (400)	23,0 (20,0)
2	281 (250)	450 (400)	23,0 (20,0)
3	298 (250)	469 (400)	22,0 (20,0)

Tabela 13 - Ensaios de tração realizado com amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-36. Os valores entre parêntesis indicam os valores mínimos exigidos pela norma ASTM A 36 - 81 a, que é mostrada no Anexo 2

Os resultados obtidos utilizando-se amostras de cantoneiras laminadas com o aço A-572 são os seguintes:

Número do Ensaio	L.E. (MPa)	L.R. (MPa)	A (%)
1	419 (345)	546 (450)	23,0 (18,0)
2	415 (345)	548 (450)	22,5 (18,0)
3	401 (345)	534 (450)	23,5 (18,0)

Tabela 14 - Ensaio de tração realizado com amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-572. Os valores entre parêntesis indicam os valores mínimos exigidos pela norma ASTM A 572 - 82, que é mostrada no Anexo 2

Como podemos observar, foram obtidos maiores valores de limite de escoamento e limite de resistência para as amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-572.

As figuras 41 e 42 mostram os boletins de ensaios de tração realizados com as amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-36 e ASTM A-572, respectivamente.

4.5 Ensaio de Dureza

Foram realizados ensaios de microdureza utilizando-se amostras da região central de cantoneiras laminadas com os aços ASTM A-36 e com os aços ASTM A-572. Os resultados obtidos são os tabelados abaixo:

Amostra	Microdureza (HV)	Amostra	Microdureza (HV)
1-centro (água; 1'40")	214,2	7-centro (água; 1'40")	190,0
2-centro (água; 2'00")	199,5	8-centro (água; 2'00")	171,2
3-centro (água; 2'20")	170,5	9-centro (água; 2'20")	158,2
4-centro (água; 2'40")	154,5	10-centro (água; 2'40")	138,5
5-centro (areia; 1'40")	118,2	11-centro (areia 1'40")	104,8
6-centro (ar)	132,3	12-centro (ar)	123,2

Tabela 15 - Ensaio de microdureza realizados com amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-36 e ASTM A-572. O meio de resfriamento e o *delay time* estão indicados entre parêntesis.

Pela tabela acima, podemos observar que, para as mesmas condições de resfriamento, foram obtidos maiores valores de durezas para as amostras de cantoneira laminadas com aço ASTM A-572.

Minerti										Boletim de Ensaios Mecânicos										Nº
Identificação		Material		Bitola		Análise Química								C		Si		Cr		
Seção Nominal		LR/LE		Lo		C		Mn		P		S		Nb		Al				
Seção Nominal		LR/LE		Lo		Ni		Cu		Sn		Nb		Al						
ASTM A-36		X-6x1/2"		203,2mm																
Resultado dos Ensaios																				
Nº do Feixe	Massa (g.)	Compr. (mm.)	Massa Linear (g/mm)	So (mm²)	Debr. (%)	C. Esc. (Kg)	C. Rupt. (Kg)	LE MPa	LR MPa	LI (mm)	A (%)	Dobr.								
8946	508	554	921	1141		3800	5320	325	453	240	270									
8938	454	511	889	1135		3180	5100	281	450	240	230									
8953	439	521	842	1036		3200	5040	298	469	248	220									
Obs.:																				
Data													Emissão							
Calculado por													Conferido por							

Fig.41 - Boletim de ensaio de tração das amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-36 e resfriadas ao ar.

Atiperti
 Boletim de Ensaios Mecânicos

No

Identificação	Material	Bitola
Seção Nominal	LR/LE	Lo
	ASTM-A-572	X-6x1/2"
		2032 mm

Análise Química					
C	Mn	P	S	Si	Cr
Ni	Cu	Sn	Nb	Al	

Resultado dos Ensaios												
No do Folha	Massa (g)	Compr. (mm)	Massa Linear (g/mm)	Se (mm ²)	Desb. (%)	C. Esc. (Kg/l)	C. Rupt. (Kg/l)	LE MPa	LR MPa	Lf (mm)	A (%)	Dobr.
195	4564	553	8289	1055.9		44200	51600	419	546	200	230	
1003	4588	512	8961	1141.5		41400	62600	415	548	249	225	
9401	5588	556	10050	1280.3		51400	68400	401	534	201	231	

Escala:	No

Data	Calculado por	Emissão	Conferido por

Obs.:	
-------	--

Fig.42 - Boletim de ensaio de tração das amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-572 e resfriadas ao ar.

4.6 Estimativa dos tamanhos de grão austeníticos obtidos no final da laminação.

Utilizando-se a relação $D\alpha = 11,7 + 0,14 D\gamma + 37,7 \cdot R^{0,5}$ já mostrada anteriormente, onde R = velocidade de resfriamento na saída do laminador (C/min), podemos estimar os tamanhos de grão austeníticos obtidos no final da laminação das amostras de cantoneiras laminadas com os aços A-36 e A-572.

Como o tamanho de grão austenítico final das amostras de cantoneiras laminadas com o aço A-572 já foi obtido experimentalmente, vamos inicialmente calcular o tamanho de grão austenítico final para o mesmo, a fim de observarmos a precisão da relação dada acima.

Para os cálculos a seguir, serão utilizadas amostras resfriadas ao ar, para obtermos maior precisão no cálculo da velocidade de resfriamento na saída do laminador.

Primeiramente, vamos obter o diâmetro equivalente da aba da cantoneira em questão.

Sendo a largura da cantoneira igual a 152,4 mm e a espessura da mesma, igual a 12,7 mm, obtemos, pela tabela abaixo, um diâmetro equivalente de aproximadamente 22 mm.(5)

Width (mm)	Thickness (mm)										
	10	12	16	20	25	30	40	50	60	80	100
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10	10										
12	11	12									
16	12	14	16								
20	13	15	18	20							
25	14	16	19	22	25						
30	15	17	21	24	27	30					
40	16	18	23	27	31	34	40				
50	17	19	24	29	33	38	45	50			
60	17	20	26	30	36	41	48	55	60		
80	18	21	27	33	38	44	54	62	69	80	
100	18	22	28	34	41	47	58	67	76	90	100
120	19	22	28	35	42	49	61	72	82	98	110
160	19	22	29	36	44	52	65	78	89	110	125
200	19	23	30	37	45	53	69	82	95	115	135
250	19	23	30	37	46	54	71	86	100	125	145
300	19	23	30	38	46	55	72	89	105	130	155
400	19	23	31	38	47	56	73	91	105	140	170
500	20	23	31	39	48	57	74	92	110	145	175
600	20	23	31	39	48	57	75	93	110	145	180
∞	20	23	31	39	49	59	78	97	115	155	190

Tabela 15 - Diâmetros equivalentes para seções retangulares resfriadas ao ar.

Após obter o diâmetro equivalente, vamos entrar com o valor do mesmo no gráfico da figura 43, a fim de se obter a velocidade de resfriamento.(5)

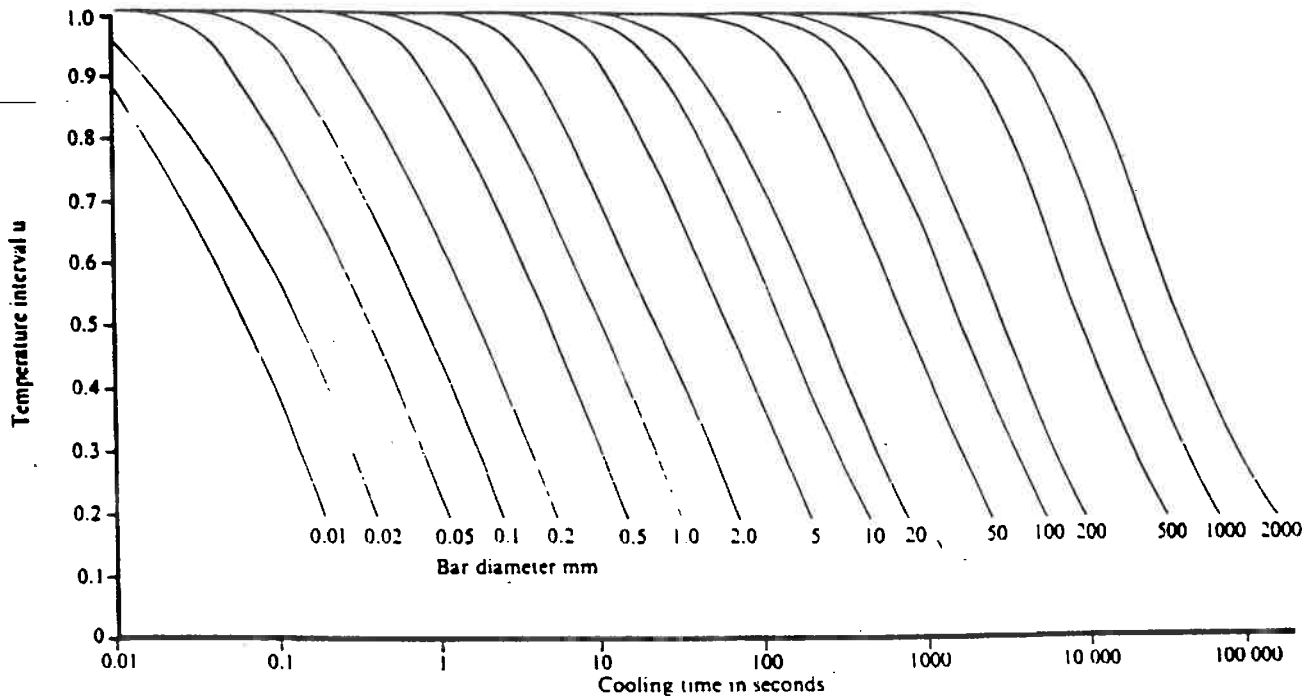


Fig. 43 - Gráfico que relaciona temperatura, tempo de resfriamento e diâmetro equivalente para resfriamento em ar.

Sendo o parâmetro "u" do gráfico acima igual a 980 C (onde o parâmetro "u" é a temperatura inicial da barra, ou seja, a temperatura da barra no final da laminação), obtemos, para um diâmetro equivalente de 22 mm, uma velocidade de resfriamento igual a 73,54 C/min. Sendo o tamanho de grão ferrítico da amostra 6-centro igual a 20,2 μm , podemos substituir os valores acima na equação dada e obter o tamanho de grão austenítico.

Substituindo-se os valores acima na equação dada, obtemos um tamanho de grão austenítico de 29,4 μm , que é um valor próximo ao obtido experimentalmente (32,9 μm).

O próximo passo é o cálculo do tamanho de grão austenítico final das amostras de cantoneiras laminadas com o aço A-36. Sendo a velocidade de resfriamento igual a 73,54 C/min (resfriamento ao ar), o tamanho de grão ferrítico da amostra 12-centro igual a 26,4 μm e substituindo os valores acima na equação dada, obtemos um tamanho de grão austenítico de 73,60 μm . O valor experimental não foi obtido.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na observação das microestruturas obtidas através de tratamentos de tempera realizados com amostras de blocos a serem laminados, foi possível notar que a amostra proveniente do aço ASTM A-572 apresentou um tamanho de grão menor que a amostra proveniente do aço ASTM A-36, devido à presença de carbonetos e carbonitretos de nióbio não dissolvidos, que dificultam o crescimento de grão da austenita.

Já, ao observarmos as microestruturas obtidas através dos diferentes tratamentos realizados com amostras de cantoneiras, pudemos observar que, para o mesmo *delay time* entre a saída do laminador e a imersão em água, obtivemos uma variação microestrutural entre as regiões centrais dos aços ASTM A-36 e ASTM A-572. Ou seja, enquanto a amostra 1-centro apresentou em sua microestrutura ferrita acicular, bainita e constituinte fino (provavelmente bainita), a amostra 7-centro apresentou ferrita perlita e constituinte fino (provavelmente bainita) em sua microestrutura. Já, enquanto a amostra 2-centro apresentou em sua microestrutura ferrita e constituinte fino (provavelmente bainita), a amostra 8-centro apresentou ferrita, perlita e pequena quantidade de constituinte fino (provavelmente bainita). E enquanto as amostras 3-centro e 4-centro apresentaram em suas microestruturas ferrita, perlita e constituinte fino (provavelmente bainita), as amostras 9-centro e 10-centro já se apresentaram com estrutura ferrítico-perlítica.

Este fenômeno ocorre devido ao fato de o aço ASTM A-572 apresentar curvas de resfriamento contínuo mais à "direita" que o aço ASTM A-36. Ou seja o nióbio retarda a transformação austenita - ferrita, provocando assim o aumento da temperabilidade.

Na observação do tamanho de grão ferrítico, foi notado que as amostras de cantoneiras laminadas com o aço ASTM A-572 apresentaram tamanho de grão ferrítico menor que as amostras de cantoneiras laminadas com o aço ASTM A-36. Com a observação do tamanho de grão ferrítico e com a obtenção da velocidade de resfriamento para amostras de cantoneiras resfriadas ao ar, pudemos estimar o tamanho de grão austenítico das amostras de cantoneiras laminadas com o aço ASTM A-36 e com o aço ASTM A-572 e notamos que as amostras de cantoneiras laminadas com o aço ASTM A-

572 apresentaram tamanho de grão austenítico menor que as amostras laminadas com o aço ASTM A-36. Isto ocorre devido à precipitação de carbonetos e carbonitretos de nióbio, que são responsáveis pela supressão da migração dos contornos de grão da austenita através do efeito ancorador. Este fenômeno leva à obtenção de um menor tamanho de grão austenítico e, conseqüentemente à obtenção de um menor tamanho de grão ferrítico.

Porém, o refino de grão poderia ser mais significativo caso fosse realizada a laminação controlada do aço ASTM A-572. Ou seja, caso ocorresse a "espera" em determinada faixa de temperatura (800 - 1000 C) e realizasse a sequência final de passes na temperatura de não recristalização, os grãos austeníticos seriam alongados e bandas de deformação seriam introduzidas no interior dos grãos, aumentando assim o número de sítios de nucleação da ferrita e conseqüentemente contribuindo para o refinamento dos grãos ferríticos.

Nos ensaios de tração realizados, foram obtidos maiores valores de limite de escoamento e limite de resistência para as amostras de cantoneiras laminadas com o aço ASTM A-572, devido ao menor tamanho de grão ferrítico e devido à presença de carbonetos e carbonitretos de nióbio presentes, que provocam o aumento da resistência da ferrita.

Já, nos ensaios de dureza foram observados, para as mesmas condições de resfriamento, maiores valores de dureza para as amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-572, devido à maior temperabilidade do mesmo e devido à presença de carbonetos e carbonitretos de nióbio, que causam endurecimento por precipitação.

6. CONCLUSÃO

1- Através da observação das microestruturas das amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-36 e com o aço ASTM A-572, foi possível observar que o nióbio retarda a transformação austenita-ferrita, provocando assim o aumento da temperabilidade.

2- As amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-572 apresentaram estrutura mais refinada que as amostras de cantoneiras laminadas com aço ASTM A-36, devido à precipitação de carbonetos e carbonitretos de nióbio, que suprimem a migração dos contornos de grão da austenita através do efeito ancorador resultando num menor tamanho de grão austenítico e, conseqüentemente, num menor tamanho de grão ferrítico.

3- A precipitação de carbonetos e carbonitretos e o conseqüente refino de grão levaram à obtenção de melhores propriedades mecânicas das amostras de cantoneiras laminadas com o aço ASTM A-572.

7. SUGESTÕES

1- Para a obtenção de um refino de grão mais significativo e consequentemente para a obtenção de melhores propriedades mecânicas, sugere-se a prática da laminação controlada, ou seja, a "espera" em determinada faixa de temperatura (800 - 1000 C) e a realização da sequência final de passes na temperatura de não recristalização, para que os grãos austeníticos sejam alongados e bandas de deformação sejam introduzidas no interior dos grãos, aumentando assim o número de sítios de nucleação da ferrita e consequentemente contribuindo para o refinamento dos grãos ferríticos e para a obtenção de melhores propriedades mecânicas.

2- A sugestão acima só é válida caso seja verificado que o laminador suporta os novos valores de força e potência de laminação, que serão superiores àqueles obtidos para a laminação convencional, devido à menor temperatura dos passes de acabamento.

8. REFERÊNCIAS

(1) BRESCIANI

FILHO,E.;ZAVAGLIA,C.A.Z.;BUTTON,S.T.;GOMES,E;NERY, F.A.C. Conformação Plástica dos Metais.4 ed., Campinas, Editora da Unicamp, 1991, p 25 - 26.

(2) PLAUT,R.L. Laminação dos Aços - Tópicos Avançados.São Paulo, ABM, 1984, p.94 - 107, p.135 - 148

(3) FERRAZ,M.J.O. Curso Sobre Laminação do Aço. São Paulo, ABM , 1973, p. II.4.67 - II.4.69

(4) FERRAZ,M.J.O. Calibração de Produtos Não Planos. São Paulo, ABM, 1976, p. 2.1 - 2.44

(5) ATKINS,M. Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels.American Society for Metals, 1980, p. 8,27,231,239,248

(6) SOUZA,S.A. Composição Química dos Aços. São Paulo, Edgard Blücher, 1989, p. 27 - 52

(7) HEISTERKAMP,F. Optimized Rolling Schedules for Plate,Strip,Beams and Other Microalloyed Products . The Tecnology and Usage of Ferroniobium in High-Strenght Low-Alloy Steels, CBMM, 1978, p. 27 - 44

(8) TAMURA,I;SEKINE,H;TANAKA,T.;OUCHI,C. Thermomechanical Processing of High-Strenght Low-Alloy Steels.Butterworth & Co. Ltd.,1988, cap. II e III.

ANEXO 1

Marcha de Cálculo utilizada na Laminação de Cantoneiras de 6"x 1/2"

Para a realização dos cálculos abaixo, foi utilizada a marcha de cálculo proposta no livro *Calibração de Produtos não Planos* (Referência 4), que é ilustrada a seguir.

1- Inicialmente, calcula-se a altura média na entrada e saída dos passes. Tem-se:

$Hm0 = F0/B0$ e $Hm1 = F1/B1$, onde $Hm0$ é a altura média de entrada, $Hm1$ é a altura média de saída, $F0$ é a seção transversal de entrada, $F1$ é a seção transversal de saída, $B0$ é a largura média de entrada e $B1$ é a largura média de saída.

Para o primeiro passe temos:

$F0 = 27412 \text{ mm}^2$; $F1 = 24567 \text{ mm}^2$; $B0 = 250 \text{ mm}$; $B1 = 262 \text{ mm}$. (Tabela 2 página 6)

Logo, $Hm0 = 109,65 \text{ mm}$ e $Hm1 = 93,77 \text{ mm}$.

Assim repete-se para os demais passes.

2- Calcula-se agora o diâmetro efetivo, utilizando-se as fórmulas ilustradas na figura 44.

$Def = B - Hm1$, onde Def é o diâmetro efetivo e B é a distância entre os centros dos cilindros.

Para o primeiro passe temos:

$B = 695 \text{ mm}$; $Hm1 = 93,77 \text{ mm}$

Logo, $Def = 601,23 \text{ mm}$

Da mesma maneira calculamos para os passes subsequentes.

3- Cálculo do arco médio de contato.

$Ldm = ((0,5 * Def * (Hm0 - Hm1))^{0,5})$, onde Ldm é o arco médio de contato.

Para o primeiro passe temos:

$Def = 601,23 \text{ mm}$; $Hm0 = 109,65 \text{ mm}$; $Hm1 = 93,77 \text{ mm}$

Logo, $Ldm = 69,09 \text{ mm}$

Para os outros passes, repete-se os cálculos.

4- Cálculo da área de contato.

Utilizam-se as expressões:

$B_m = 0,5 \cdot (B_0 + B_1)$; $F_d = B_m \cdot L_{dm}$, onde B_m é a largura média, e F_d é a área de contato.

Para o primeiro passe, temos:

$$B_0 = 250 \text{ mm} ; B_1 = 262 \text{ mm} ; L_{dm} = 69,09 \text{ mm}$$

$$\text{Logo, } B_m = 256 \text{ mm e } F_d = 17688,13 \text{ mm}^2$$

Faz-se o mesmo para os demais passes.

5- Cálculo da resistência à deformação ($K'w$)

Utiliza-se o diagrama da figura 45. Determina-se no eixo das abcissas o valor da relação $H_{m1} \cdot 100 / \text{Def}$ e, trabalhando com a temperatura correspondente à temperatura e à redução relativa média no passe ($(H_{m0} - H_{m1}) \cdot 100 / H_{m0}$), determina-se, no eixo das ordenadas, o valor $K'w$. Para o primeiro passe, temos:

$$H_{m1} \cdot 100 / \text{Def} = 15,60 \% ; \text{ Temperatura} = 1140 \text{ C} ; \text{ Redução relativa média no passe} = 14,48 \% \text{ (tabela 1 pág. 6)}$$

Logo, determina-se no eixo das ordenadas $K'w = 7,20$, o que é feito para os demais passes.

Valores acima e abaixo de 40% e 20 % e entre faixas de temperatura são extrapolados e estimados dentro das precisões aproximadas destes cálculos.

6- Cálculo do coeficiente de velocidade a_1 .

Utiliza-se o diagrama da figura 46. Entra-se no eixo das abcissas com o valor da velocidade relativa e trabalhando-se com a temperatura referente ao passe, determina-se, no eixo das ordenadas, o valor do coeficiente a_1 .

Para o primeiro passe, com uma velocidade relativa de 40 m/s/m e uma temperatura de 1140 C, obtém-se:

$$a_1 = 1,85$$

Semelhantemente, calculamos os outros valores dos coeficientes para os outros passes.

7- Cálculo do coeficiente de atrito a_2

Utiliza-se a figura 47. No caso, estamos trabalhando com canais de passe aberto e nesse primeiro passe ele é um passe de conformação. Temos então, para o primeiro passe, $a_2 = 1,3$. Tomamos valor igual para todos os passes, com exceção do passe 7, acabador, no qual considera-se $a_2 = 1,5$.

8- Cálculo do valor da resistência total de deformação (K_w)

$$K_w = K'_w \cdot a_1 \cdot a_2$$

Temos, para o primeiro passe:

$$K'_w = 7,20 ; a_1 = 1,85 ; a_2 = 1,30$$

$$\text{Logo, } K_w = 17,32 \text{ kg/mm}^2$$

o mesmo calculamos para os demais passes.

9- Cálculo da força de laminação (P)

$$P = F_d \cdot K_w$$

Temos, para o primeiro passe:

$$F_d = 17688,13 \text{ mm}^2 ; K_w = 17,32 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{Logo, } P = 306,29 \text{ t}$$

o mesmo calculamos para os demais passes.

10- Cálculo da expressão $P/(B_m \cdot (H_{m0} - H_{m1}))$ que será utilizado no gráfico da figura 48.

Para o primeiro passe, temos:

$$P = 306290 \text{ kg} ; B_m = 256 \text{ mm} ; H_{m0} - H_{m1} = 15,88 \text{ mm}$$

$$\text{Logo, a expressão vale } 75,34 \text{ kg/mm}^2$$

11- Cálculo da relação entre os diâmetros dos cilindros deformados e indeformados d'/d , utilizando o diagrama da figura 48. Entrando no eixo das abcissas com o valor da expressão $P/(B_m \cdot (H_{m0} - H_{m1}))$, e tomando a curva referente aos cilindros de ferro fundido, obtemos, no eixo das ordenadas, o valor da relação d'/d , que para o primeiro passe vale 1,0.

Calcula-se assim os demais valores.

12- Cálculo do coeficiente de correção do braço de alavanca.

Utiliza-se o gráfico da figura 49, onde entra-se com o valor da redução relativa média no passe $((Hm_0 - Hm_1) * 100 / Hm_0)$ e utilizando a curva correspondente ao acabamento superficial dos cilindros, determina-se, no eixo das ordenadas, o valor de c' .

Para o primeiro passe, considerando cilindros ásperos e redução relativa média igual a 14,48 % (Tabela 1 pág. 6), temos, no eixo das ordenadas, o valor $c' = 0,42$.

Do mesmo modo, calculamos para os outros passes.

13- Cálculo do coeficiente c do braço de alavanca.

Utiliza-se a expressão $c = 0,5 * ((1/(d'/d))^{0,5}) - (0,5 - c) * ((d'/d)^{0,5})$, o que para o primeiro passe nos dá $c = 0,42$.

Identicamente calculamos para os demais passes.

14- Cálculo do braço de alavanca A .

Utiliza-se a expressão $A = c * L_{dm}$, onde $c = 0,42$ e $L_{dm} = 69,09$ mm para o primeiro passe.

Logo, $A = 29,02$ mm.

Assim, calculamos para os demais passes.

15- Cálculo do torque (T).

Utiliza-se a expressão $T = 2 * P * A$.

Para o primeiro passe, temos $P = 306,29$ t e $A = 29,02$ mm

Logo, $T = 17776,67$ mkg.

Para os outros passes, calculamos semelhantemente.

16- Cálculo da potência de laminação (N).

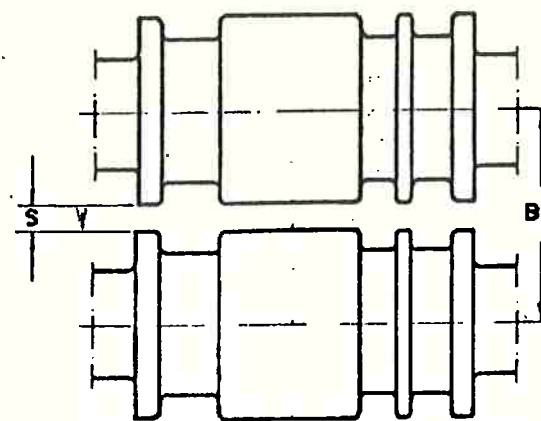
Utiliza-se a expressão $N = T * n / 716,2$, onde n = rpm do cilindro.

Para o primeiro passe, $T = 17776,67$ mkg e $n = 80$ rpm

Logo, $N = 1985,67$ HP.

Da mesma maneira, calculamos para os demais passes as respectivas potências de laminação.

Todos os cálculos aqui desenvolvidos apresentam-se tabulados na tabela 16.



$$d_e = B - h_m$$

$$B = d_n + S$$

Fig.44 - Obtenção do diâmetro efetivo

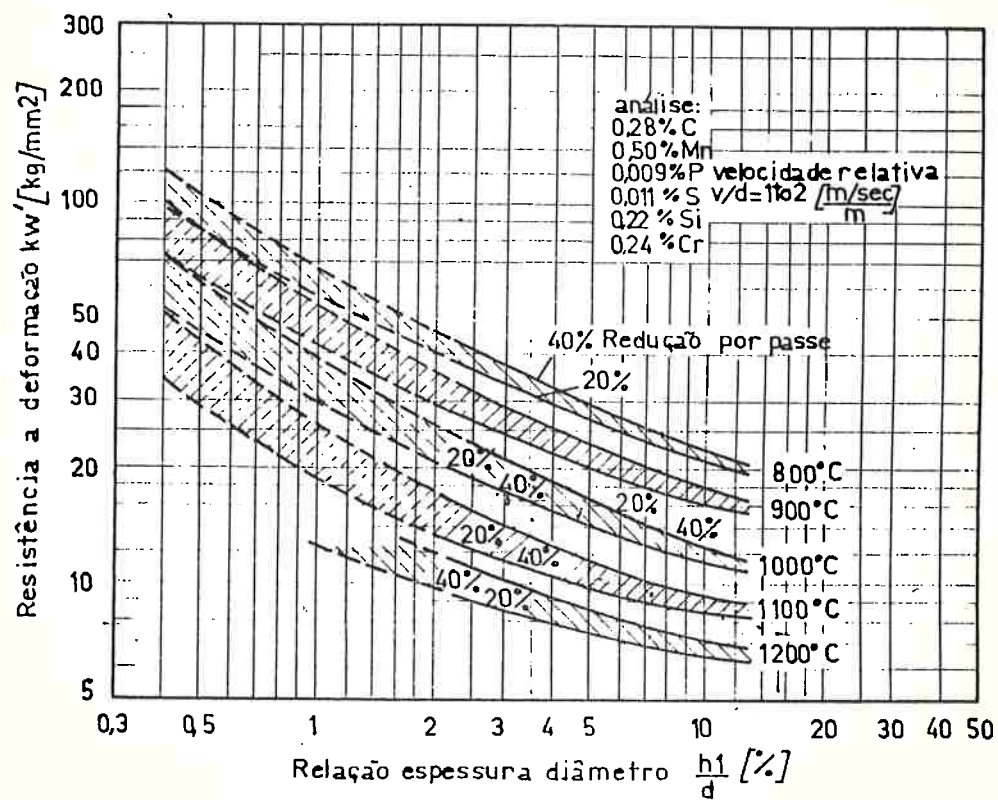


Fig. 45 - Obtenção da resistência à deformação $K'w$

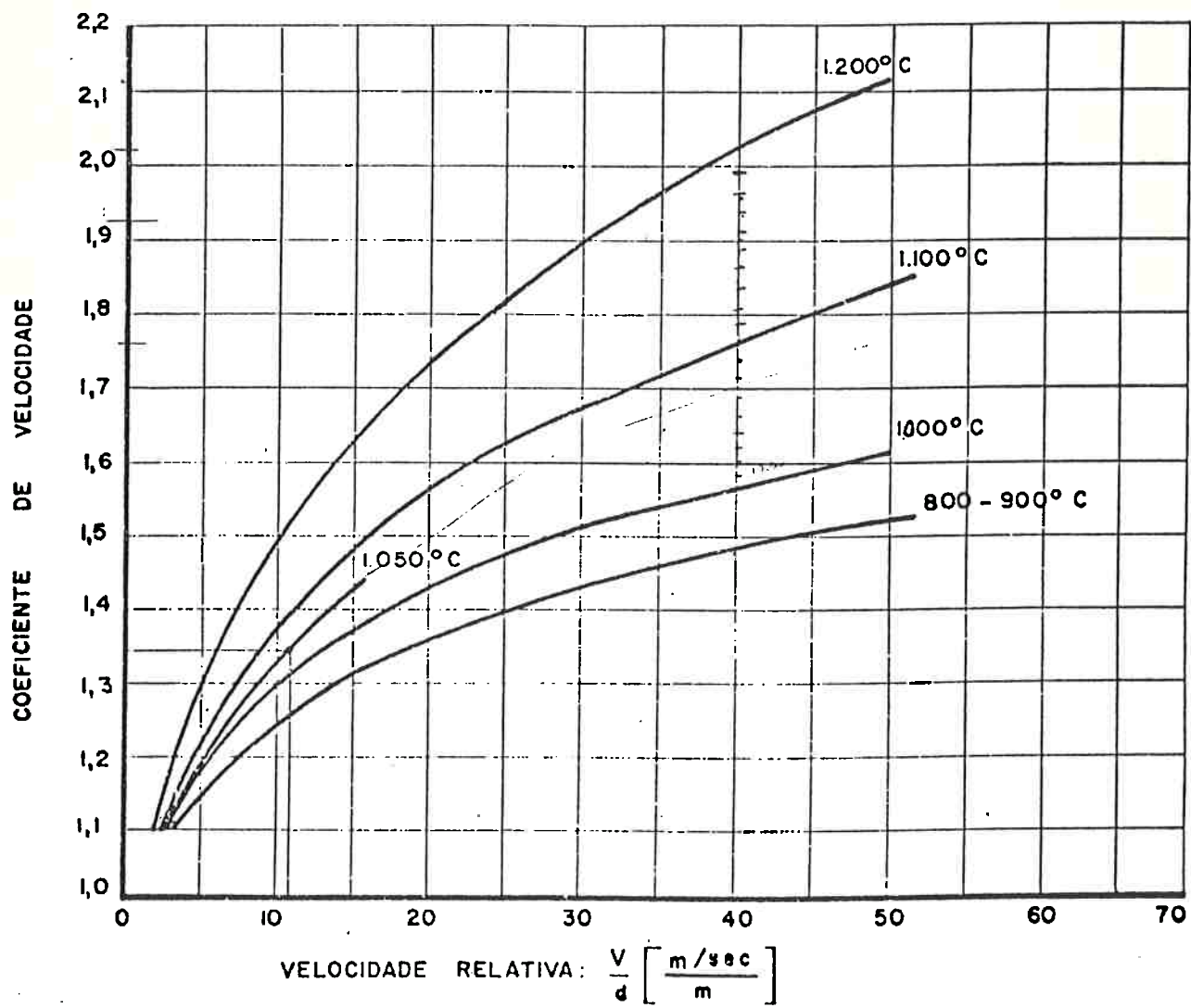


Fig. 46 - Obtenção do coeficiente de velocidade a l

a) CANAIS ABERTOS			b) CANAIS FECHADOS		
DESCRIÇÃO	FORMA	COEFICIENTE DE PERDA α_2	DESCRIÇÃO	FORMA	COEFICIENTE DE PERDA α_2
RETANGULAR		1,1 - 1,2	BARRA CHATA		1,2 - 1,3
GOTICO		1,2 - 1,3	TIRA		1,2 - 1,3
DIAMANTE		1,2 - 1,3	PASSE DE DESBRAS-TE.		1,3 - 1,5
OVAL DO QUADRADO		1,2 - 1,3	PASSE ACABADOR		1,5 - 2,0
QUADRADO DO OVAL		1,2 - 1,3			
PASSE DE CONFORMAÇÃO. (PASSE DE DESBASTE)		1,2 - 1,5			

EFEITO DO ATRITO ADICIONAL QUANDO LAMINADO EM CANAIS

Fig. 47 - Obtenção do coeficiente de atrito α_2

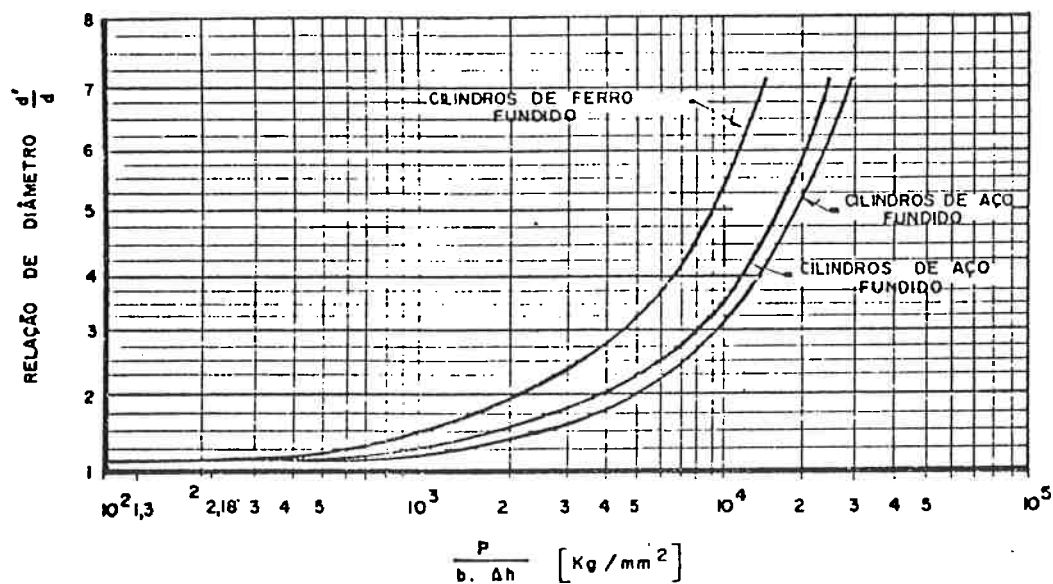


Fig. 48 - Obtenção da relação de diâmetro d'/d

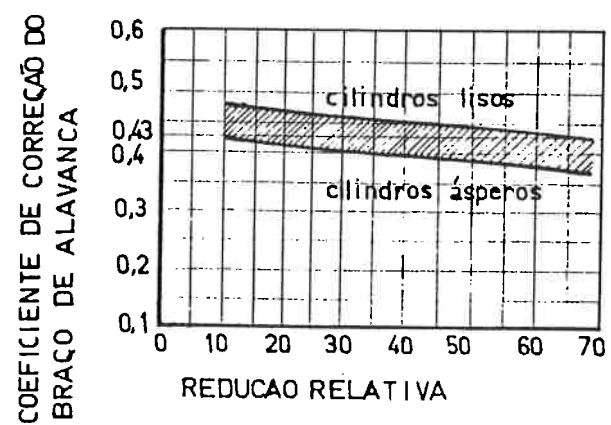


Fig. 49 - Obtenção do coeficiente de correção do braço de alavanca

Passe	F0	B0	Hm0	F1	B1	Hm1	Def	Ldm	Bm	Fd	Kw
1	27412.00	250.00	109.65	24567.00	262.00	93.77	601.23	69.09	256.00	17688.13	7.20
2	24567.00	262.00	93.77	17913.00	260.00	68.90	626.10	88.24	261.00	23030.08	7.80
3	17913.00	260.00	68.90	12000.00	258.00	46.51	648.49	85.19	259.00	22065.31	9.20
4	12000.00	258.00	46.51	8270.00	252.00	32.82	662.18	67.33	255.00	17170.42	11.00
5	8270.00	252.00	32.82	6100.00	250.00	24.40	670.60	53.13	251.00	13334.63	13.50
6	6100.00	250.00	24.40	4600.00	241.50	19.05	676.00	42.53	245.75	10452.63	15.00
7	4600.00	241.50	19.05	3710.00	218.10	17.01	677.99	26.28	229.80	6038.79	15.50

a1	a2	Kw	P (t)	C1	d/d	RRm	C'	C	A	T (mkg)	N (HP)
1.85	1.30	17.32	306.29	75.34	1.00	14.48	0.42	0.42	29.02	17776.67	1985.67
1.81	1.30	18.35	422.68	65.11	1.00	26.52	0.41	0.41	35.74	30210.09	3374.49
1.76	1.30	21.05	464.47	80.11	1.00	32.49	0.40	0.40	34.08	31655.86	3535.98
1.73	1.30	24.74	424.78	121.64	1.00	29.44	0.40	0.40	26.93	22882.00	2555.93
1.68	1.30	29.48	393.16	186.09	1.00	25.65	0.41	0.41	21.52	16918.42	1889.80
1.62	1.30	31.59	330.20	251.04	1.00	21.94	0.41	0.41	17.44	11516.51	1286.40
1.56	1.50	36.27	219.03	467.89	1.00	10.69	0.43	0.43	11.17	4892.34	546.48

Tabela 16 - Tabulação dos resultados obtidos

ANEXO 2

Apresentação das normas ASTM A 36 - 81 a e ASTM A 572 - 82

A seguir, são apresentadas as normas ASTM A 36 - 81 a e ASTM A 572 - 82, utilizadas na obtenção dos valores mínimos exigidos para as propriedades mecânicas dos aços ASTM A-36 e ASTM A-572, respectivamente.



Standard Specification for STRUCTURAL STEEL¹

This standard is issued under the fixed designation A 36; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscripted epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This specification has been approved for use by agencies of the Department of Defense and for listing in the DoD Index of Specifications and Standards.

1. Scope

1.1 This specification² covers carbon steel shapes, plates, and bars of structural quality for use in riveted, bolted, or welded construction of bridges and buildings, and for general structural purposes. When the steel is used in welded construction, welding procedure shall be suitable for the steel and the intended service.

1.2 Supplemental requirements are provided where improved notch toughness is important. These shall apply only when specified by the purchaser in the order.

1.3 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

2. Applicable Documents

2.1 *ASTM Standards:*

A 6 Specification for General Requirements for Rolled Steel Plates, Shapes, Sheet Piling, and Bars for Structural Use³

A 27 Specification for Mild- to Medium-Strength Carbon-Steel Castings for General Application⁴

A 283 Specification for Low and Intermediate Tensile Strength Carbon Steel Plates, Shapes, and Bars⁵

A 307 Specification for Carbon Steel Externally Threaded Standard Fasteners⁶

A 325 Specification for High-Strength Bolts for Structural Steel Joints^{6a}

A 500 Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes⁷

A 501 Specification for Hot-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing⁸

A 502 Specification for Steel Structural Rivets⁹

A 563 Specification for Carbon and Alloy Steel Nuts³

A 570 Specification for Hot-Rolled Carbon Steel Sheet and Strip⁶

A 668 Specification for Steel Forgings, Carbon and Alloy, for General Industrial Use¹⁰

3. Appurtenant Materials

3.1 Unless otherwise provided in the order, the current edition of the specifications of the American Society for Testing and Materials listed in Table 1 shall govern the delivery of otherwise unspecified materials not available in the product forms covered by this specification when included with material purchased under this specification. Unless otherwise specified, all plain and threaded bars used for anchorage purposes shall be subjected to mechanical tests and shall conform to the tensile requirements of Section 8; headed bolts used for

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee A-1 on Steel, Stainless Steel and Related Alloys, and the direct responsibility of Subcommittee A01.02 on Structural Steel.

Current edition approved July 31 and Oct. 30, 1981. Published January 1982. Originally published as A 36 - 60 T. Last previous edition A 36 - 77.

² For ASME Boiler and Pressure Vessel Code Applications see related Specifications SA-36 in Section II of that Code.

³ 1983 Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.04.

⁴ 1983 Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02.

⁵ 1983 Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.01 and 01.04.

⁶ 1983 Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.05.

^{6a} 1983 Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.03 and 01.04.

⁷ 1983 Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.05.

anchorage purposes shall conform to Specification A 307; and all nuts shall conform to the requirements of Specification A 563, Grade A.

4. General Requirements for Delivery

4.1 Material furnished under this specification shall conform to the applicable requirements of the current edition of Specification A 6.

5. Bearing Plates

5.1 Unless otherwise specified, plates used as bearing plates for bridges shall be subjected to mechanical tests and shall conform to the tensile requirements of Section 8.

5.2 Unless otherwise specified, mechanical tests shall not be required for plates over 1½ in. (38 mm) in thickness used as bearing plates in structures other than bridges, subject to the requirement that they shall contain 0.20 to 0.33% carbon by heat analysis, that the chemical composition shall conform to the requirements of Table 2 in phosphorus and sulfur content, and that a sufficient discard shall be made from each ingot to secure sound plates.

6. Process

6.1 The steel shall be made by one or more of the following processes: open-hearth, basic-oxygen, or electric-furnace.

6.2 No rimmed or capped steel shall be used for plates and bars over ½ in. (13 mm) thick or for shapes other than Group 1.

7. Chemical Requirements

7.1 The heat analysis shall conform to the requirements prescribed in Table 2, except as specified in 5.2.

7.2 The steel shall conform on product analysis to the requirements prescribed in Table 2, subject to the product analysis tolerances in Specification A 6, except as specified in 7.3.

7.3 Product analysis is not applicable for bar-size shapes or flat bars ½ in. (13 mm) and under in thickness.

7.4 When tension tests are waived in accordance with 8.2, chemistry consistent with the requirements in Table 2, and with the mechanical properties desired must be applied.

8. Tensile Requirements

8.1 The material as represented by the test specimen, except as specified in 5.2 and 8.2, shall conform to the requirements as to the tensile properties prescribed in Table 3.

8.2 Shapes less than 1 in. (25 mm) in cross section and bars, other than flats, less than ½ in. (13 mm) in thickness or diameter need not be subjected to tension tests by the manufacturer.

X 8.3 For material under ¾ in. (8 mm) in thickness or diameter, a deduction from the percentage of elongation in 8 in. (203 mm), specified in Table 3, of 1.25% shall be made for each decrease of ¼ in. (6.3 mm) of the specified thickness or diameter below ¾ in.

SUPPLEMENTARY REQUIREMENTS

These requirements shall not apply unless specified in the order.

Standardized supplementary requirements for use at the option of the purchaser are listed in Specification A 6. Those which are considered suitable for use with this specification are listed below by title.

S5: Charpy V-Notch Impact Test.

S14: Bend Test.

ADDED SUPPLEMENTARY REQUIREMENTS

In addition, the following optional supplementary requirements are also suitable for use with this specification.

S1: The material supplied shall be other than rimmed or capped steel.

S2: The material to be supplied shall be silicon-killed fine-grain practice.

TABLE 1 Material Specifications

NOTE—The specifier should be satisfied of the suitability of these materials for the intended application.

Material	ASTM Designation
Plate to be bent or formed cold	A 233, Grade C ^a
Steel rivets	A 302, Grade 1 ^a
Bolts	A 307 ^a
High-strength bolts	A 325
Steel nuts	A 563
Cast steel	A 27, Grade 65-35 ^a
Forgings (carbon steel)	A 668, Class D
Hot-rolled sheets and strip	A 570, Grade 36
Cold-formed tubing	A 500, Grade B
Hot-formed tubing	A 501

^a These have lower yield point than A 36 steel.

TABLE 2 Chemical Requirements

Product	Shape ^a	Plates					Bars		
		To 1/2 in. (19), incl.	Over 1/2 to 1 1/2 in. (19 to 38), incl.	Over 1 1/2 to 2 1/2 in. (38 to 64), incl.	Over 2 1/2 to 4 in. (64 to 102), incl.	To 1/2 in. (19), incl.	Over 1/2 to 1 1/2 in. (19 to 38), incl.	Over 1 1/2 to 4 in. (102), incl.	Over 4 in. (102)
Carbon, max. %	0.26	0.25	0.25	0.26	0.27	0.26	0.27	0.28	0.29
Manganese, %	...	...	0.80-	0.80-	0.80-	...	0.60-	0.60-	0.60-
Phosphorus, max. %	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Sulfur, max. %	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicon, %	...	...	...	0.15-	0.15-	...	...	...	...
Copper, min. % when copper steel is specified	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

^a Manganese content of 0.85-1.35 % and silicon content of 0.15-0.40 % is required for shapes over 426 lb/l.

TABLE 3 Tensile Requirements^a

Plates, Shapes, ^b and Bars	Tensile strength, ksi (MPa)
Yield point, min. ksi (MPa)	58-80 (400-550)
Plates and Bars ^{c,d}	36 (250) ^e
Elongation in 8 in. or 200 mm, min. %	20 ^f
Elongation in 2 in. or 50 mm, min. %	23
Shapes ^g	20 ^h
Elongation in 8 in. or 200 mm, min. %	21 ⁱ
Elongation in 2 in. or 50 mm, min. %	21 ^j

^a For plates wider than 24 in. (610 mm), the test specimen is taken in the transverse direction. See 11.2 of Specification A 6.

^b For wide flange shapes over 426 lb/l tensile strength minimum of 58 ksi (400 MPa) only and elongation in 2 in. or 19 % minimum applies.

^c Yield point 32 ksi (220 MPa) for plates over 8 in. in thickness.

^d See 8.3.

^e Elongation not required to be determined for floor plate.

^f For plates wider than 24 in. (610 mm), the elongation requirement is reduced two percentage points.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing, you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, Pa. 19103.



Standard Specification for HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY COLUMBIUM-VANADIUM STEELS OF STRUCTURAL QUALITY¹

This standard is issued under the fixed designation A 572; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This specification has been approved for use by agencies of the Department of Defense and for listing in the DoD Index of Specifications and Standards.

1. Scope

1.1 This specification covers four grades of high-strength low-alloy structural steel shapes, plates, sheet piling, and bars. Grades 42 and 50 are intended for riveted, bolted, or welded construction of bridges, buildings, and other structures. Grades 60 and 65 are intended for riveted or bolted construction of bridges, or for riveted, bolted, or welded construction in other applications. When the steel is used in welded construction, welding procedure shall be suitable for the steel and the intended service.

1.2 For welded bridge construction notch toughness is an important requirement. For this or other applications where notch-toughness requirements are indicated, they shall be negotiated between the purchaser and the producer.

1.3 The use of columbium, vanadium, and nitrogen, or combinations thereof, within the limitations noted in Section 5, shall be at the option of the producer unless otherwise specified. Where designation of one of these elements or combination of elements is desired, reference is made to Supplementary Requirement S1 in which these elements and their common combinations are listed as to type. When such a designation is desired, both the grade and type must be specified.

1.4 The maximum thicknesses available in the grades and products covered by this specification are shown in Table 1.

1.5 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

2. Applicable Document

2.1 ASTM Standard

A 6 Specification for General Requirements for Rolled Steel Plates, Shapes, Sheet Piling, and Bars for Structural Use²

3. General Requirements for Delivery

3.1 Material furnished under this specification shall conform to the applicable requirements of the current edition of Specification A 6.

4. Process

4.1 The steel shall be made by one or more of the following processes: open-hearth, basic-oxygen, or electric-furnace.

5. Chemical Requirements

5.1 The heat analysis shall conform to the requirements prescribed in Table 2 and in 5.3.

5.2 The steel shall conform on product analysis to the requirements prescribed in Table 2 and 5.3 subject to the product analysis tolerances in Specification A 6.

5.3 Alloy content shall be in accordance with one of the following types:

¹This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee A-1 on Steel, Stainless Steel and Related Alloys, and is the direct responsibility of Subcommittee A01.02 on Structural Steel for Bridges, Rolling Stock, and Ships. Current edition approved May 28, 1982. Published July 1982. Originally published as A 572 - 66. Last previous edition A 572 - 81a.

²1983 Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.04

TABLE 2 Chemical Requirements^a

Diameter Thickness or Distance Between Parallel Faces, in. (mm)	Grade	Carbon, max. %	Manganese, max. %	Phosphorus, max. %	Sulfur, max. %	Silicon ^b	
						Test ^c	range, %
Plates 1½ in. (38.1 mm) Thick Shapes to 426 lb/ft (63.4 kg/m) Sheet Piling Bars, Zees, and Rolled							
6 (152)	42	0.21	1.35	0.04	0.05		0.40
2 (51)	50	0.23	1.35	0.04	0.05		0.15-0.40
1½ (31.8)	60	0.26	1.35	0.04	0.05		0.40
> 1½-1½ (12.7-31.8)	65	0.23	1.65	0.04	0.05		...
≤ 1½ (12.7)	65	0.26	1.35	0.04	0.05		...

^a Copper when specified shall have a minimum content of 0.20 % by heat analysis (0.18 % product analysis).

^b Manganese, minimum by heat analysis of 0.80 % (0.75 % product analysis) shall be required for all plates over ½ in. (9.5 mm) in thickness; a minimum of 0.50 % (0.45 % product analysis) shall be required for plates ½ in. and less in thickness, and for all other products. The manganese to carbon ratio shall not be less than 2 to 1.

^c Silicon content in excess of 0.40 % by heat analysis must be negotiated.

^d Bars over 1½ in. (38.1 mm) in diameter, thickness, or distance between parallel faces, shall be made by a killed steel practice.

^e An alternative chemical requirement with a maximum carbon of 0.21 % and a maximum manganese of 1.65 % is permissible with the balance of the elements as shown in Table 2.

TABLE 3 Tensile Requirements^a

Grade	Yield Point, min		Tensile Strength, min		Minimum Elongation, % ^b	
	ksi	MPa	ksi	MPa	in 8 in. or 200 mm	in 2 in. or 50 mm
42	42	290	60	415	20	24
50	50	345	65	450	18	21
60	60	415	75	520	16	18
65	65	450	80	550	15	17

^a For plates wider than 24 in. (610 mm), the test specimen in the transverse direction. See 11.2 of Specification A 6.

^b Elongation not required to be determined for floor plate.

^c For wide flange shapes over 426 lb/ft elongation in 2 in. (50 mm) of 19 % minimum applies.

^d For plates wider than 24 in. (610 mm), the elongation requirement is reduced two percentage points for Grades 42 and 50, and three percentage points for Grades 60 and 65.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing, you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, Pa. 19103.

^a Product analysis limits = 0.01 to 0.16 when columbium and vanadium are used in combination.

^b Nitrogen (0.015 max %) when added as a supplement to vanadium shall be reported, and the minimum ratio of vanadium to nitrogen shall be 4 to 1.

6. Mechanical Requirements

6.1 Tensile Properties:

6.1.1 The material as represented by the test specimens shall conform to the tensile properties given in Table 3.

6.1.2 For material under ½ in. (12.5 mm) in thickness or diameter, a deduction from the percentage of elongation in 8 in. (200 mm), specified in Table 3, of 1.25 % shall be made for each decrease of ½ in. (12.5 mm) of the specified thickness or diameter below ½ in. specified thickness or diameter below ½ in.

SUPPLEMENTARY REQUIREMENTS

The following supplementary requirement shall apply when specified in the order or contract:

S1. Types

S1.1 When a purchaser prefers to designate the specific elements (columbium, vanadium, nitrogen, or combinations thereof), one of the types listed below shall be specified. The type in addition to the grade must be shown on the order.

Standardized supplementary requirements for use at the option of the purchaser are listed in Specification A 6. Those which are considered suitable for use with this specification are listed below by title.

S14. Bend Test

S18. Maximum Tensile Strength.

TABLE 1 Maximum Product Thickness

Grade	Yield Point, min		Maximum Thickness or Size		Zees and Rolled Ties
	ksi	MPa	Plates and Bars, in.	Structural Shapes Group ^a	
42	42	290	6	all	all
50	50	345	4	all	all
60	60	415	1½	1 and 2	all
65	65	450	1½	1	not available

^a In the above tabulation, Grades 42, 50, and 60 are the yield point levels most closely approximating a geometric progression pattern between 36 ksi, min. yield point steel covered by Specification A 36, for Structural Steel, and 100 ksi, min. yield strength steel covered by Specification A 314, for High-Yield-Strength, Quenched and Tempered Alloy Steel Plate, Suitable for Welding.

^b See Specification A 6.

