

TRATAMENTOS TÉRMICOS PARA RECUPERAÇÃO DA TENACIDADE  
DE AÇO BAIXO CARBONO SUBMETIDO ANTERIORMENTE  
A UM PROCESSO DE LAMINAÇÃO CONTROLADA<sup>(1)</sup>.

FRANCISMAR RODRIGUES DE SOUSA<sup>(2)</sup>

JÚLIO TOSHIO NAKASHIMA<sup>(2)</sup>

VALMIR GALLI<sup>(3)</sup>

R E S U M O

No presente trabalho são descritos os efeitos dos tratamentos térmicos realizados às temperaturas de 650°C, 750°C, 850°C e 900°C a tempos de permanência variáveis, em aço contendo 0,10 ~ 0,14%C, 1,25 ~ 1,45%Mn, 0,03 ~ 0,05% Nb e 0,05% a 0,07% V. Esses tratamentos foram realizados com a finalidade principal de recuperação da tenacidade, pois os valores da energia de impacto obtidos diretamente da laminação controlada, encontraram-se abaixo da norma especificada.

A cinética da transformação é estudada através de análise microscópica das microestruturas resultantes dos tratamentos térmicos, os quais foram realizados a diferentes tempos de permanência.

- 
- (1) - Contribuição técnica apresentada no 1º Seminário da COMFIT; Belo Horizonte, MG; maio de 1980.
- (2) - Membros da ABM. Engenheiros Metalurgistas; Analistas Metalúrgicos da Unidade de Metalurgia da Laminação a Quente do Departamento de Metalurgia e Inspeção da Usiminas.
- (3) - Membro da ABM. Técnico Metalúrgico da Seção de Acabamento e Expedição de Chapas Grossas do Departamento de Laminação a Quente da Usiminas.

## 1.0 INTRODUÇÃO.

São múltiplos os parâmetros que têm influência nos aços que sofrem tratamentos termomecânicos de laminação controlada<sup>(1)</sup>: temperatura de reaquecimento, taxa de redução na laminação a quente, a maneira como é feita essa laminação, o modo como é realizado o resfriamento, assim como a temperatura de acabamento. E, as alterações sofridas por alguns desses fatores poderão afetar diretamente as propriedades mecânicas requeridas do aço que sofreu o citado tratamento termomecânico. Talvez o aço analisado nesse trabalho (0,10 ~ 0,14%C; 1,25 ~ 1,45%Mn; 0,03 ~ 0,05% Nb e 0,05 ~ 0,07%V) tenha sofrido alteração em alguns desses fatores, durante a laminação controlada, pois os valores da energia de impacto obtido no ensaio Charpy V - 2mm, não foram satisfatórios.

Pelo fato dos valores da energia de impacto, obtidos diretamente da laminação controlada, encontrarem-se abaixo da norma especificada, decidiu-se pela realização de tratamentos térmicos às temperaturas de 650°C, 750°C, 850°C e 900°C, a tempos de permanência, variáveis, com a finalidade de recuperação da tenacidade dessa qualidade de aço.

## 2.0 REVISÃO DA LITERATURA (1,2,3,4,5,7,8)

Na produção de aços de baixa liga e alta resistência, os metalúrgistas dispõem de várias maneiras para a obtenção de um limite de escoamento na faixa de 30 ~ 50 kg/mm<sup>2</sup>. Os meios mais comuns são através da adição de elementos de liga, pela realização de laminação controlada, por normalização, ou através da realização dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

A adição de elementos de liga aos aços, obviamente encarecem o produto, e, procurar-se-á sempre que possível, colocar a quantidade necessária para a obtenção das propriedades requeridas.

Um dos principais objetivos da normalização de aços é a obtenção de uma granulação ferrítica tão fina quanto possível. E essa granulação é obtida, primeiramente, pelo controle do tamanho de grão austenítico e, também, pela garantia

de que a transformação da austenita para ferrita toma lugar na faixa correta de temperatura.

Outra alternativa para obtenção de uma granulação fina seria através da realização de laminação controlada em uma faixa de temperatura em que os grãos não se recristalizam entre um passe e outro, entretanto se isso ocorrer, o crescimento do grão deverá ser vagaroso o suficiente para garantir que uma granulação notavelmente grosseira não ocorra no tempo entre cada passe de redução. Portanto, no caso onde a recristalização da austenita se torna inibida, os grãos austeníticos variam, de grandes e exiaxiais com baixa relação entre área do contorno de grão sobre volume, para grãos mais finos e alongados com uma maior relação entre área/volume da superfície do contorno de grão. E, no caso em que a recristalização ocorre, entretanto, o crescimento é restringido, e a cada passe sucessivamente irá refinando o grão, e no final será obtido uma estrutura contendo pequenos grãos de austenita com uma alta relação entre área/volume da superfície dos contornos de grãos. E, um subsequente resfriamento, em ambos os casos, produz uma granulação ferrítica bastante fina. Na prática, o tamanho de grão ferrítico produzido pela transformação no resfriamento após laminação é que determina as propriedades do produto.

Aços temperados e revenidos têm comportamentos bastante diferente dos descritos anteriormente, assim como o fato que, nem todas as usinas siderúrgicas possuem instalações onde possam realizar esses tratamentos em chapas de aço, razão pela qual deixam de ser comentados nessa breve revisão, apesar da Usiminas estar inaugurando modernas instalações para temperar e revenir chapas grossas.

### 3.0 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.

#### 3.1 Tratamentos Térmicos Realizados.

O aço em estudo (0,10 ~ 0,14%C; 1,25 ~ 1,45%Mn; 0,20 ~ 0,30% Si; 0,015 ~ 0,040%Al; 0,03 ~ 0,05% Nb, 0,05 ~ 0,07%V), é microligado com V e Nb. Foi elaborado em conversor LD e acalmado ao Al - Si.

Os tratamentos térmicos foram realizados tanto em chapas de 12 m de comprimento em forno industrial, como em corpos de prova de 450 mm x 450 mm em forno de laboratório, às temperaturas de 650°C, 750°C, 850°C e 900°C, e resfriado naturalmente ao ar tranquilo. O material havia sido anteriormente laminado para obtenção de produtos nas espessuras de 12,70 mm e 15,88 mm.

### 3.1.1 Forno Industrial.

No forno da área industrial, para os tratamentos realizados nas chapas foram pré-fixadas as temperaturas de  $650^{\circ}\text{C}$  e  $900^{\circ}\text{C}$ , enquanto que os tempos totais de permanência a cada uma dessas temperaturas variam em função da espessura do material. No caso da temperatura de  $650^{\circ}\text{C}$ , para a chapa com 12,70 mm de espessura o tempo total situou-se por volta de 43 minutos, enquanto que, para a de 15,88 mm ficou em torno de 48 minutos. Para o tratamento a  $900^{\circ}\text{C}$ , os tempos situaram-se por volta de 32 e 28 minutos para as espessuras de 15,88 e 12,70 mm, respectivamente.

### 3.1.2 Forno de Laboratório.

Seis corpos de prova foram submetidos a outros tratamentos térmicos sob outras condições. Muito embora as condições de aquecimento tenha sido idêntica às verificadas no forno industrial, foram variáveis os tempos de homogeneização de temperatura.

Foram realizados tratamentos a  $650^{\circ}\text{C}$ , para uma amostra de cada espessura (12,70 mm e 15,88mm), com um tempo de encharque de 60 minutos. A  $750^{\circ}\text{C}$ , com tempo de encharque de 30 minutos. E, para duas amostras de 15,88 mm a temperatura empregada situou-se por volta de  $850^{\circ}\text{C}$  com um tempo de permanência nesta temperatura, de 30 minutos.

## 3.2 Ensaio Mecânicos e Metalográficos.

### 3.2.1 Ensaio de Tração.

Para a obtenção dos valores de limite de resistência, limite de escoamento, relação elástica e alongamento, foi realizado ensaio de tração no sentido transversal, em obediência a norma especificada, para esse aço. Esses valores obtidos estão colocados na tabela I.

### 3.2.2 Ensaio de Impacto

Para a determinação da energia de impacto foi realizado ensaio Charpy, em corpos de prova com seção de 10 x 10mm, entalhe em V - 2 mm, no sentido transversal, à temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$ . Na tabela I, podem ser vistos os valores obtidos nos ensaios realizados, os quais deveriam possuir um valor mínimo de 4,15 kgfm.

### 3.2.3 Metalografia Ótica.

Para correlacionamento das propriedades mecânicas com a microestrutura, foi feito um estudo cuidadoso através da microscopia ótica dos corpos de prova tratados a cada uma das temperaturas, anteriormente citadas.

No exame metalográfico procurou-se analisar as inclusões presentes no aço, os tamanhos de grãos obtidos, tanto o tamanho de grão austenítico como o tamanho de grão ferrítico, assim como as microestruturas obtidas, tanto para o processo de laminação controlada como para os tratamentos térmicos realizados.

## 4.0 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO.

### 4.1 Ensaio de Impacto.

Apesar das condições de tensões e dimensões existentes nas estruturas de aços. Na grande maioria das vezes, diferentes totalmente das condições existentes no ensaio CHARPY, entretanto esse teste é muito usado industrialmente pela sua facilidade de execução, é economicamente acessível, além de fornecer uma razoável quantidade de informação tecnológica para cada aço: se o mesmo é propenso ou não à fratura frágil<sup>(9)</sup>, sendo por isso um ensaio bastante recomendado pelas normas internacionais.

Nos tratamentos realizados os valores de choque obtidos estiveram em conformidade com os apresentados na tabela I. Onde pode ser visto que, em determinados corpos de prova que sofreram um tratamento termomecânico de laminação controlada e apresentaram um valor considerado baixo da energia de impacto, entretanto, ao ser realizados os tratamentos térmicos, às temperaturas anteriormente citadas, verificou-se que, com o aumento de temperatura ocorreu um aumento na energia de impacto. Inclusive a 900°C, determinadas amostras apresentaram valores de energia acima de 5,0 kgm (-20°C), o que pode ser considerado muito bom pela composição química apresentada pelo aço.

Na figura 1, são mostrados os valores da energia absorvida no ensaio de impacto (-20°C) Charpy, em função da temperatura em que foi realizado o tratamento térmico. Os pontos assinalados resultaram da média de três ensaios para cada temperatura do tratamento. Nota-se claramente a influência da temperatu-

ra, pois, tratamentos térmicos realizados às temperaturas maiores, os valores da energia de impacto são maiores.

As razões da variação das propriedades de impacto em função da temperatura, devido ao nióbio e vanádio, podem ser imediatamente explicada. A temperatura de transição é reduzida pelo refinamento do grão e aumentada pelo endurecimento por precipitação. Conseqüentemente as melhores propriedades de impacto são obtidas quando o tamanho de grão for o mais fino e ocorre a mínima precipitação de carbonetos. Essa combinação é encontrada quando é feita o tratamento de normalização (900°C) <sup>16</sup>.

#### 4.2 Ensaio de Tração.

Os resultados obtidos no ensaio de tração são apresentados na tabela I. Verifica-se pela análise das figuras 2 e 3, que os limites de escoamento e resistência decrescem com o aumento de temperatura, em concordância com a literatura clássica. Enquanto que o alongamento cresce (figura 4) com o aumento da temperatura.

Na figura 5, faz-se um correlacionamento entre os limites de escoamento e resistência, onde nota-se perfeitamente, que existe uma certa correlação linear entre os valores apresentados.

Constatamos nesses tratamentos realizados, principalmente em tratamento de normalização que ocorre uma diminuição nos valores de escoamento e resistência com um subseqüente aumento no alongamento.

#### 4.3 Exame Metalográfico.

##### 4.3.1 Inclusões.

A figura 6 mostra foto das inclusões para o aço empregado nesse trabalho. Observa-se que há ocorrência de sulfeto e óxidos, muito embora a quantidade de sulfetos seja pequena e em espessura fina, a quantidade de óxidos apresenta-se um pouco elevada.

##### 4.3.2 Tamanho de Grão.

O refinamento do grão constitui-se em uma técnica interessante para aumentar a resistência, e isso é bastante importante para aços estruturais. Contornos de grão constituem-se em barreiras bem efetivas ao movimento das deslocções.



Quanto mais fino o grão, isto é, barreiras mais compactas, torna-se muito pouco provável que ocorra suficientes deslocações em algum grão para permitir a nucleação de trincas. Devido a isso, o refino do grão melhora a tenacidade e a resistência do aço<sup>(6)</sup>.

O tamanho de grão austenítico (figura 7-a) obtido no aço utilizado nessa experiência situou-se em torno de nº 6 (ASTM), enquanto que o tamanho de grão ferrítico para o aço submetido à laminação controlada situou-se por volta do nº 11 (figura 7-b). E, para os tratamentos térmico realizados, o tamanho de grão ferrítico obtido ficou em torno de 10,5 (figura 7-c,d,e,f).

A respeito do tamanho de grão ferrítico, o que pode ser notado nas observações microestruturais, é que os tratamentos térmicos não alteraram, praticamente, o tamanho de grão obtido na laminação controlada.

#### 4.3.3 Microestrutura.

O fato do aço possuir Nb(0,03 ~ 0,05%) e V(0,05 ~ 0,07%) permite um melhor controle dos grãos austeníticos, o que garante uma melhor eficácia da laminação controlada, de maneira que a estrutura final obtida é muito fina, razão pela qual os tratamentos térmicos realizados não tiveram muita influência no tamanho de grão obtido (figura 7).

As microestruturas obtidas são típicas de um aço hipoeutetóide somente ferrita e perlita, com leve presença de carbonitretos.

A estrutura metalográfica foi analisada utilizando-se de microscopia ótica convencional. Deixando de ser feita uma análise mais precisa da distribuição e tamanho dos precipitados de carbonitretos de vanádio e nióbio, devido ao fato desse discernimento se tornar possível somente com aumentos maiores.

#### 5.0 CONCLUSÕES.

Com os tratamentos realizados, em temperaturas de 750°C, 850°C e 900°C, houve uma recuperação do choque perdido. Entretanto, há necessidade de que seja rigorosamente analisado o tratamento realizado, pois, não obstante o choque seja recuperado às temperaturas maiores, os valores de escoamento e resistência tendem a diminuir com o aumento de temperatura.

A temperatura de 650°C deve ser evitada, principalmente para o caso de recuperação em forno industrial. Pois, nesta temperatura não houve melhoramento nas propriedades de impacto, todavia, ocorreu amolecimento de aço, sem contudo alterar essas propriedades.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Mitchell, P. S., Randerson, K., Roberts, J. E. "Alternative Routes For Production of Steels With a Yield Strength of About 450 N/mm<sup>2</sup> and Above", Metals Technology, MT/349, January 1977.
2. Sellars, C.M. e Whiteman, J.A. - "Recrystallization and Grain Growth in Hot Rolling", Metal Science, March - April 1979.
3. Irvine, J. e Baker, T. N. - "Effect of Rolling Deformation on Niobium Carbide Particle Size Distribution in Low-Carbon Steel; Metal Science, March-April 1979.
4. Messien, P. e Gredy T. - Réchauffage à basse Temperatura et Laminage Contrôle; Revue de Metalurgie, Mars 1979.
5. Watanabe, S. E Kunitake - "The influence of Reduction-ratio in The Hot Rolling on the Strength and Toughness of a Quenched and Tempered Steel", Transactions ISIJ, vol. 15, 1975.
6. Quarrell, A.G. - "Fundamental Concepts in Modern Metallurgy", Comision Nacional de Energia Atômica, Cuarto Curso Panamericano de Metalurgia, Buenos Aires, 1968. 52 p.
7. Hayden, H. W.; Moffatt, W.G. e Wulff, J. - "The Structure and Properties of Materials" - John Wiley & Sons. Inc. New York. 1965 . 250 p.
8. Terada et al.: "Efeito do Tratamento Térmico na Tenacidade de um aço AISI 4130" Metalurgia - ABM , vol. 36 - nº 267 - Fevereiro de 1980.
9. Mathy, H. e Greday , T. - "Interpretation of the Impact Strength Transition of Structural Steels By Means of Instrumented Charpy Tests", C.R.M. nº 52. May 1980.



TABELA I - Valores de Propriedades Mecânicas obtidos segundo os vários tratamentos realizados.

Nº Amostra	TRATAMENTO * °C - (MIN).	LE kg/mm <sup>2</sup>	LR kg/mm <sup>2</sup>	LE/LR (%)	ALONG. (%)	CHOQUE kgm - 20°C
1	LC	51,5	61,0	84	36	4,2
	650 °C - 20'	49,9	58,1	86	38	4,2
	750 °C - 30'	43,4	56,2	77	44	4,8
2	LC	48,8	58,7	83	35	4,2
	900 °C - 10'	41,6	53,2	78	43	5,1
3	LC	47,9	58,4	82	34	3,6
	900 °C - 10'	41,9	53,6	78	41	4,1
4	LC	47,4	57,3	82	34	3,9
	750 °C - 30'	44,2	56,2	78	39	4,4
5	LC	52,1	59,2	88	35	4,1
	650 °C - 20'	49,6	57,3	87	38	4,1
	650 °C - 60'	47,2	56,2	84	38	4,1
6	LC	46,3	57,1	81	38	4,2
	650 °C - 20'	48,0	56,8	85	39	4,1
	850 °C - 30'	39,7	52,4	76	43	4,9
7	LC	47,6	58,8	81	37	3,7
	650 °C - 20'	48,1	57,6	84	37	3,8
	850 °C - 30'	38,4	53,4	72	43	4,3
8	LC	47,7	58,4	82	35	4,2
	650 °C - 20'	49,5	58,0	85	37	4,1
	650 °C - 60'	47,0	57,2	82	39	4,2
9	LC	49,4	58,1	85	37	4,1
	900 °C - 10'	41,8	52,3	80	45	5,4
10	LC	49,6	60,2	82	37	4,1
	900 °C - 10'	42,5	54,5	78	43	5,2

(\* ) LC significa Laminção Controlada.

## LEGENDA DAS FIGURAS

Figura 1 - Valores da energia de impacto em função da temperatura

Figura 2 - Variação do limite de escoamento com a temperatura.

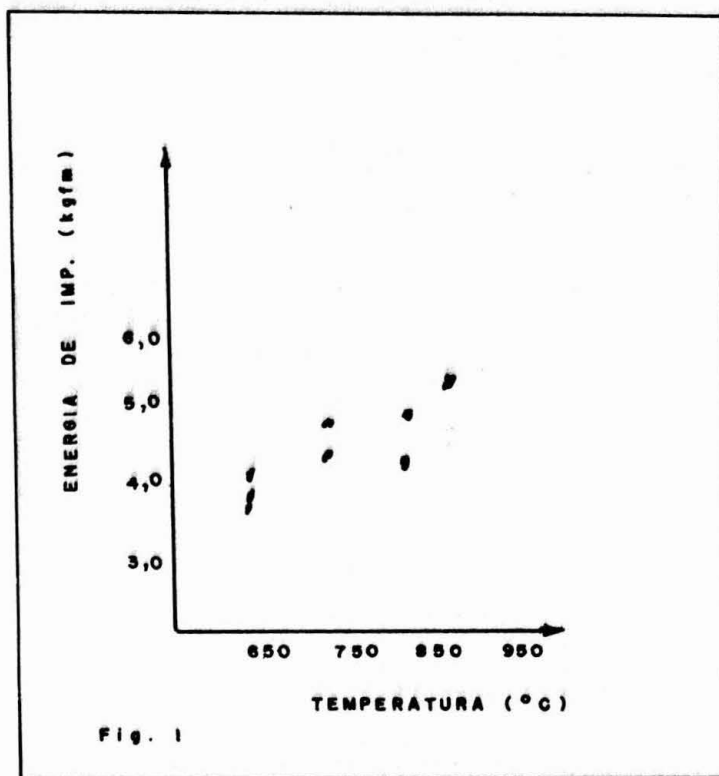
Figura 3 - Limite de resistência versus temperatura.

Figura 4 - Alongamento em função da temperatura de tratamento térmico.

Figura 5 - Resistência versus escoamento

Figura 6 - Aspectos das inclusões existentes no aço sem ataque.

Figura 7 - Aspecto micrográfico dos grãos.



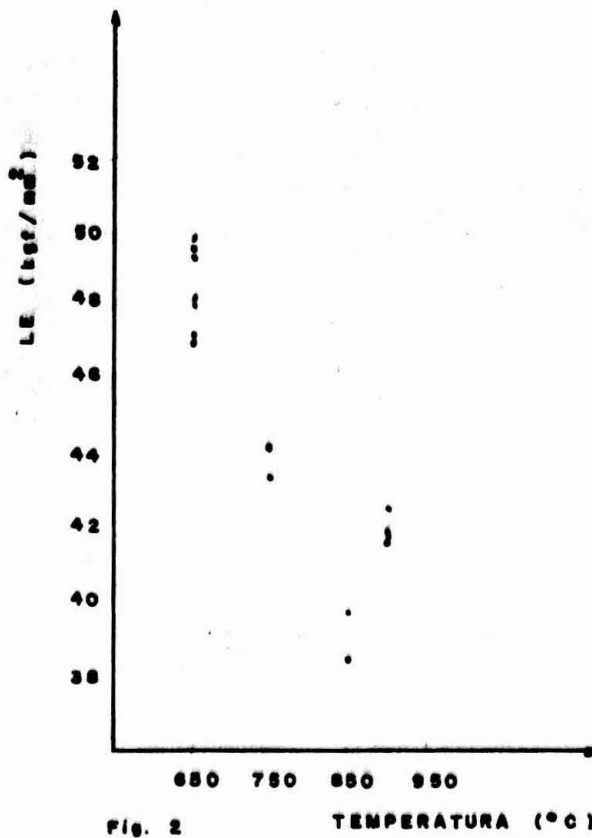


FIG. 2

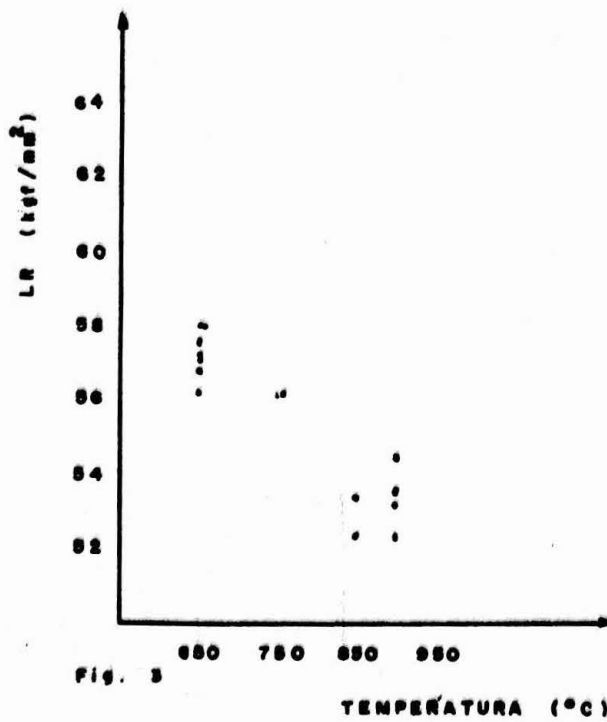


FIG. 3

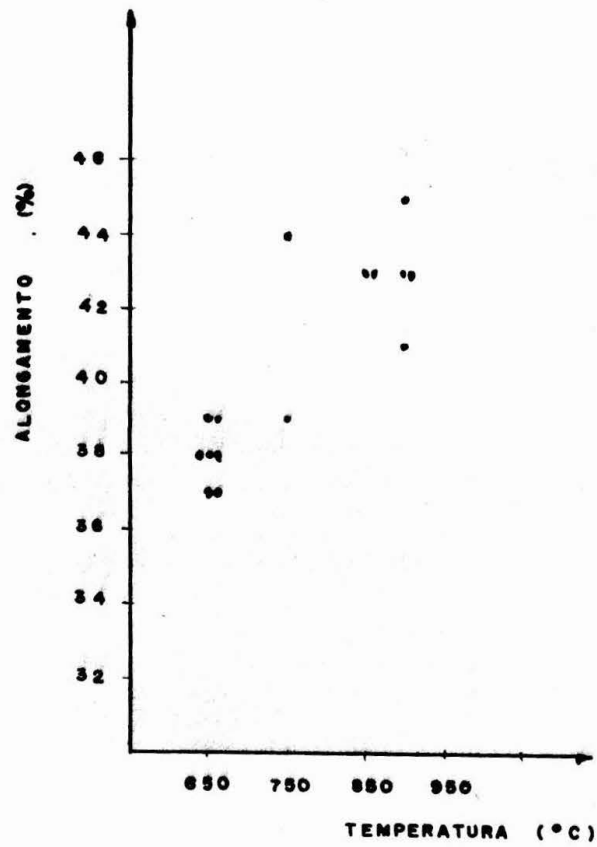


Fig. 4

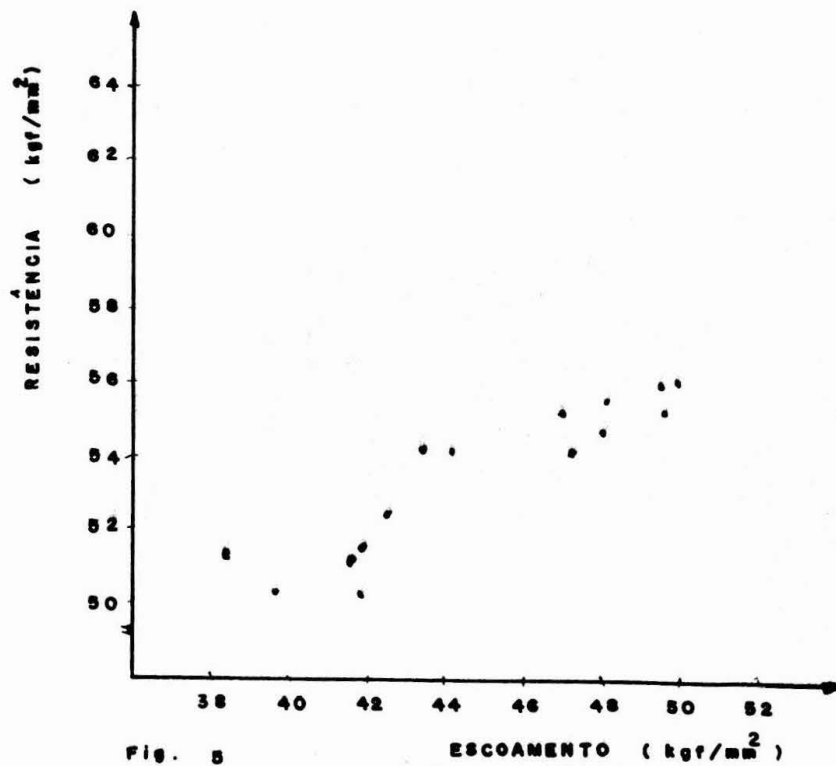


Fig. 5

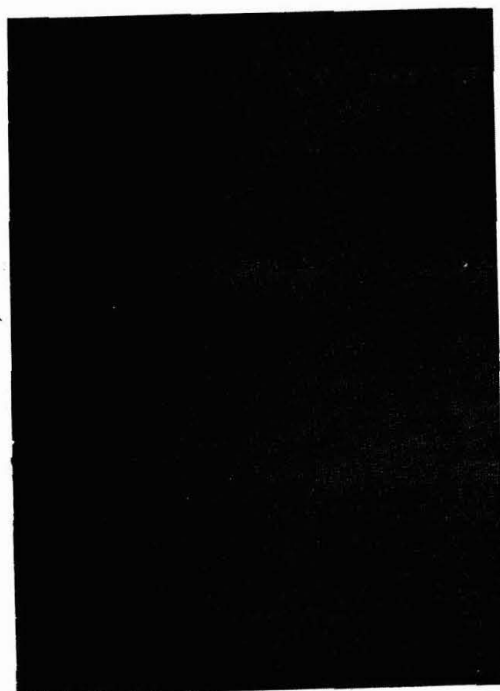
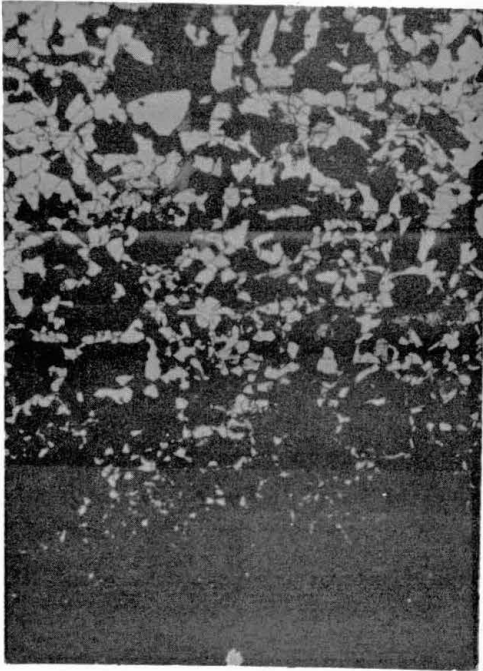


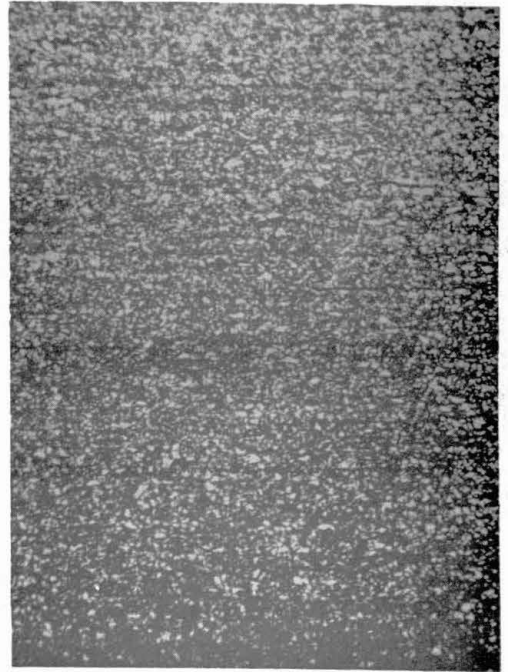
Figura 6 - Aspecto das inclusões existentes no aço sem ataque.

100 x.

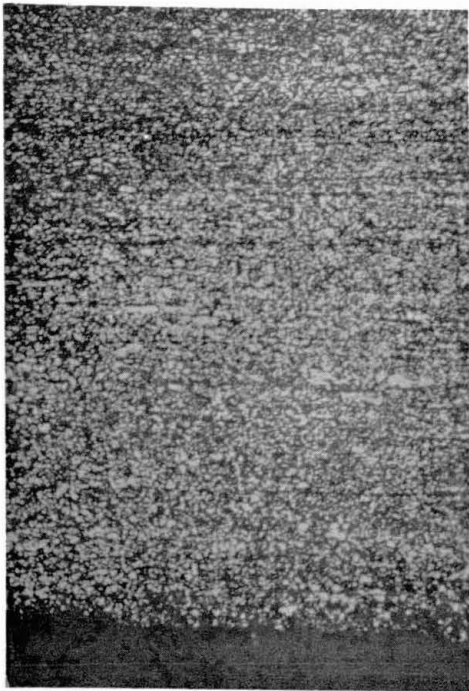




a



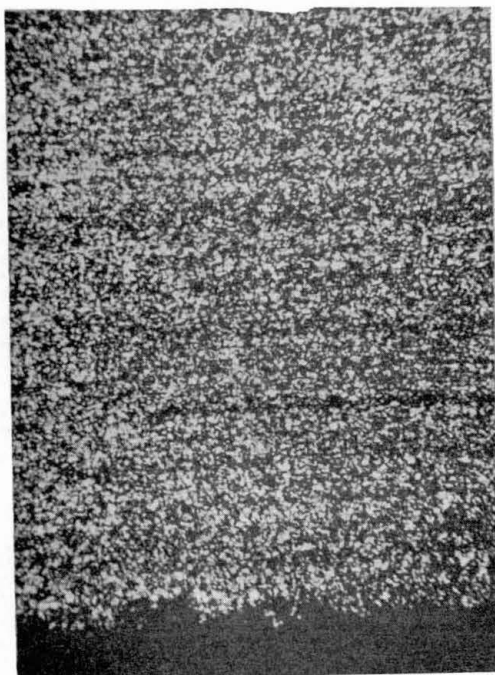
b



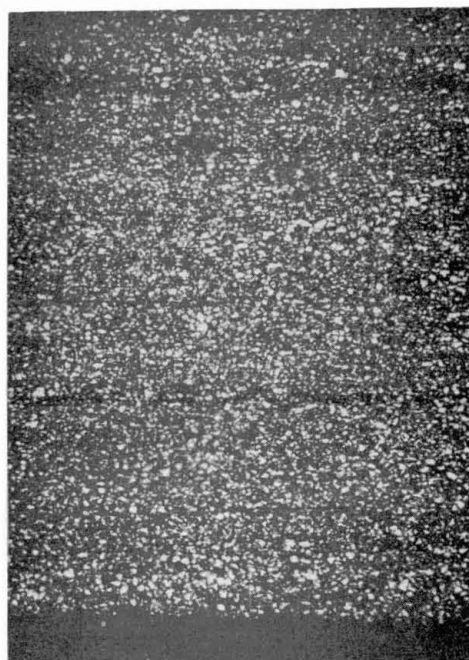
c



d



e



f

Figura 7 - Aspecto micrográfico do tamanho de grão:

- a - Tamanho de grão austenítico ASTM TGA = 6
  - b - Grão ferrítico obtido na laminação controlada, TGF = 11
  - c - Tamanho de grão ferrítico, TGF = 10,5, obtido no tratamento térmico a 650<sup>o</sup>C.
  - d - Tratamento térmico a 750<sup>o</sup>C, TGF = 11
  - e - TGF = 11, tratamento térmico a 900<sup>o</sup>C
  - f - Tratamento térmico a 850<sup>o</sup>C, TGF = 11.
- Aumento: 100 x, ataque: NITAL.