

**RELACIONES MICROESTRUTURA-PROPIEDADES MECANICAS EM UM
ACO BIFASICO LAMINADO A QUENTE** ⁽¹⁾

Antonio Augusto Gorni⁽²⁾

Oswaldo L.G. Branchini⁽³⁾

RESUMO

Foram estudadas neste trabalho as relações entre microestrutura e propriedades mecânicas em um aço bifásico laminado a quente. Verificou-se que o limite de escoamento pode ser previsto a partir de uma relação de Hall-Petch utilizando-se a distância livre média ferrítica. Já o limite de resistência pode ser calculado a partir da distância livre média ferrítica e do quociente entre a fração volumétrica de constituinte bainítico-martensítico e seu tamanho de grão. Os alongamentos uniforme e total apresentaram relação com o caminho livre médio ferrítico, e com o limite de resistência.

- INTRODUÇÃO

Os aços bifásicos - ou seja, com microestrutura composta de matriz de ferrita poligonal mais 10 a 20% de uma mistura de bainita/martensita, de ora em diante designado como constituinte bainítico-martensítico - são um tipo de produto relativamente novo que, na forma de chapas, concilia alta resistência

(1) Trabalho a ser apresentado no 1º Seminário sobre Chapas Metálicas para a Indústria Automobilística, Associação Brasileira de Metais - Associação de Engenharia Automotiva, São Paulo, Setembro de 1992.

(2) Membro da A.B.M. Engenheiro de Materiais, M.Sc., Divisão de Pesquisa e Tecnologia da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

(3) Membro da A.B.M. Engenheiro Metalurgista, Divisão de Metalurgia e Qualidade da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

mecânica e boa conformabilidade. Suas principais características são⁽¹⁾:

- ausência de ponto de escoamento;
- limite de escoamento a 0,2% entre 300 e 380 MPa;
- alta taxa de encruamento ($n=0,2$ a $0,3$);
- limite de resistência entre 620 e 655 MPa;
- baixa relação limite de escoamento/limite de resistência (0,5 a 0,6);
- alongamento total igual ou superior a 27%.

Os efeitos marcantes da microestrutura sobre as propriedades mecânicas dos aços bifásicos originou uma série de estudos para se tentar compreender e quantificar essa influência⁽¹⁻⁶⁾. A fig. 1⁽⁶⁾ mostra, de forma esquemática, a influência de diversos parâmetros microestruturais sobre as propriedades mecânicas dos aços bifásicos obtidos por recozimento contínuo. Tais resultados podem ser estendidos aos aços bifásicos produzidos diretamente da laminação a quente.

A ocorrência de escoamento contínuo no ensaio de tração exige a presença de pelo menos 4 a 10% de martensita na microestrutura⁽⁶⁾. Este valor mínimo de fração de constituinte bainítico-martensítico coincide com um valor mínimo no limite de escoamento. A medida que se aumenta a fração de constituinte bainítico-martensítico, ao se ultrapassar a faixa de 4 a 10% o limite de escoamento passa a crescer. Assim, ao se elevar a fração de constituinte bainítico-martensítico, numa primeira etapa o escoamento

mento é facilitado por discordâncias móveis e/ou tensões residuais induzidas pela diferença de volume específico entre a mistura de martensita-bainita e a austenita que lhe deu origem. Para maiores frações de constituinte bainítico-martensítico presentes na microestrutura o limite de escoamento cresce, uma vez que a dureza da ferrita aumenta devido à elevação da densidade de discordâncias que nela ocorre⁽⁷⁾.

O refino do grão ferrítico também aumenta a magnitude dos limites de escoamento e resistência^(5,6). De fato, para uma fração constante de constituinte bainítico-martensítico observa-se dependência linear do limite de escoamento em relação ao inverso da raiz quadrada do diâmetro de grão ferrítico d_{α} , ou seja, a relação de Hall-Petch é obedecida.

Por outro lado, no caso de microestruturas bifásicas constituídas de grãos de martensita isolados em matriz ferrítica pode-se considerar que o caminho livre disponível para a movimentação de discordâncias é delimitado pelos contornos ferrita-martensita e não mais pelos contornos de grão ferríticos⁽⁶⁾. Assim, a relação de Hall-Petch deve ser modificada, adotando-se o inverso da raiz quadrada do caminho livre médio $L_{\alpha/\beta}$. A figura 2 mostra graficamente a diferença entre d_{α} e $L_{\alpha/\beta}$.

O tamanho de grão e dureza do constituinte bainítico-martensítico praticamente não afeta os valores do limite de escoamento, pois ele se deformará muito pouco na faixa de alongamento em questão⁽⁶⁾.

Já o limite de resistência aumenta linearmente com a fração de martensita presente na microestrutura; outros fatores,

como o tamanho de grão ferrítico, precipitação na ferrita e teor de carbono na martensita têm importância secundária(1,3,8). Ele pode ser afetado pela dureza da ferrita, mas o efeito da dureza do constituinte bainítico-martensítico sobre ele é contraditório(6,8), podendo contribuir para o aumento da resistência do material ou não. Outros autores(6) verificaram por sua vez que a redução do tamanho de grão ferrítico também contribui para o aumento do limite de resistência. Além disso, foi verificado que durante os ensaios de tração os grãos do constituinte bainítico-martensítico somente se deformam muito além do alongamento uniforme máximo. Tal fato permite a aplicação da teoria de Ashby(9), a qual admite que o coeficiente de encruamento é proporcional a $(f_p / d_p)^{1/2}$, onde f_p é a fração de constituinte bainítico-martensítico e d_p seu tamanho de grão. Isto permite concluir que a redução do tamanho de grão do constituinte bainítico-martensítico leva a um aumento da resistência mecânica do material. Neste caso, esses grãos re-arranjam discordâncias, formando conjuntos que ao serem alongados levam ao surgimento de tensões extras na ferrita, o que aumenta a resistência mecânica através do corte dos sistemas de escorregamento nessa fase(3).

Tanto o alongamento total como o uniforme são abaixados a medida que se aumenta a fração de constituinte bainítico-martensítico presente na microestrutura e a dureza dos constituintes presentes. A diminuição do tamanho de grão dos constituintes leva a maiores valores de alongamento(6).

Assim, o objetivo deste trabalho é a determinação de correlações entre parâmetros quantitativos que descrevem a mi-

croestrutura e as propriedades mecânicas determinadas a partir do ensaio de tração para chapas de aço bifásico produzidas diretamente da laminação a quente, em escala de laboratório, para se verificar quais aspectos microestruturais são importantes na determinação das propriedades mecânicas.

- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O aço bifásico estudado no presente trabalho foi elaborado em forno de indução a vácuo. Sua composição química foi 0,063% C, 0,87% Mn, 1,46% Si, 0,41% Cr e 0,38% Mo. Foi obtido um lingote de aproximadamente 100 kg, o qual foi posteriormente forjado e laminado. Os corpos de prova para os ensaios de laminação foram usinados a partir das barras assim obtidas.

Esses corpos de prova foram aquecidos a 1200°C por 45 minutos e laminados em cinco passes, de acordo com o esquema mostrado na tab. I. Os dois primeiros passes constituíram a etapa de esboçamento e os demais a etapa de acabamento, com um período de espera intermediário que era função da temperatura de acabamento utilizada: 950, 900 ou 850°C. Após a laminação a quente o corpo de prova era resfriado em um dos vários meios de têmpera disponíveis: água, óleo, solução aquosa de poliacrilamida a 0,55%, ar ou vermiculita. Numa outra série de ensaios as amostras foram resfriadas em solução aquosa de poliacrilamida até uma temperatura de "bobinamento" de 650°C ou 550°C, ocasião em que o resfriamento

era interrompida e a amostra colocada num forno previamente aquecido a essa temperatura, lá permanecendo durante uma hora. A seguir, o forno era desligado e a amostra era resfriada dentro dele até a temperatura ambiente. Este esquema especial de resfriamento é muito semelhante ao observado no Laminador de Tiras a Quente.

Posteriormente foram retiradas amostras metalográficas do material laminado, as quais foram polidas e atacadas. Elas foram analisadas metalograficamente quanto a fração volumétrica, tamanho de grão, caminho livre médio, contiguidade (adjacência) e dureza Vickers com carga de 25 g dos diversos constituintes da microestrutura através de análise metalográfica quantitativa⁽²⁾. Foram utilizados os ataques de Le Pera⁽¹⁰⁾ ou Picral 5X para a determinação da fração volumétrica dos constituinte bainítico-martensítico e Nital 5X para a determinação do tamanho de grão e identificação dos constituintes para os ensaios de dureza Vickers.

O cálculo dos diversos parâmetros topológicos a partir dos dados provenientes dos campos observados ao microscópio ótico foi efetuado através de programas desenvolvidos em microcomputador da linha Apple II+⁽¹¹⁾. Todos os parâmetros foram determinados com uma precisão mínima de $\pm 5\%$.

Além disso, foram efetuados ensaios de tração a partir das amostras obtidas, utilizando-se corpos de prova reduzidos de acordo com a Norma ASTM A-370. Foram determinados assim os limites de escoamento e resistência, relação de escoamento, alongamentos uniforme e total.

Os resultados provenientes dos ensaios metalográficos e mecânicos foram processados estatisticamente em um micro-computador da linha Apple II+ para que se pudesse desenvolver e avaliar as equações de correlação entre a microestrutura e propriedades mecânicas. A análise estatística foi feita utilizando-se programas de correlação linear simples e múltipla, "stepwise" e não-linear(12).

- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados completos dos ensaios de laminação, metalográficos e mecânicos podem ser encontrados em outra referência(13). Um exemplo das microestruturas obtidas pode ser visto na figura 3.

Aplicando-se a equação original de Hall-Petch

$$L.E. = \sigma_0 + K_y d^{-1/2} \quad (1)$$

para se relacionar o limite de escoamento com o tamanho de grão ferrítico obteve-se a seguinte expressão, que pode ser vista graficamente na figura 4a:

$$L.E. [MPa] = -41 + 1120 d_w^{-1/2} \quad (2)$$

$r^2 = 0,65 \quad E.P.E. = 31 \quad 99\% \text{ Confiança}$

onde d_{α} é o tamanho de grão ferrítico, em microns.

Deve-se observar em primeiro lugar que o coeficiente de correlação r^2 dessa equação foi muito baixo, indicando que sua capacidade preditiva é deficiente. Além disso, ela é fisicamente incorreta, uma vez que ζ_0 é negativo, e na equação original de Hall-Petch esse termo representa a resistência intrínseca do material proporcionada pela fricção que impede a migração das discordâncias⁽¹⁴⁾. Logo, ele deve ter valor positivo.

Este resultado desfavorável pode ser explicado pelo fato de que em materiais com microestrutura bifásica a caracterização do tamanho de grão a ser utilizado na equação de Hall-Petch é mais difícil⁽¹⁵⁾. Outra causa pode ser as diferentes frações de constituinte bainítico-martensítico presentes nas diversas amostras de aço bifásico.

A partir destas constatações resolveu-se adotar a premissa de que os contornos de fase $\alpha - \beta$ são barreiras mais eficazes no bloqueio das discordâncias do que os contornos de grão ferríticos em aços com microestrutura bifásica. Obteve-se desse modo a equação

$$\begin{aligned} \text{L.E. [MPa]} &= 203 + 855 L_{\alpha\alpha}^{-1/2} & (3) \\ r^2 &= 0,88 & \text{E.P.E.} = 19 & \text{99\% Confiança} \end{aligned}$$

que está representada graficamente na figura 4b. Neste caso, $L_{\alpha\alpha}$ é o caminho livre médio da ferrita, em microns.

O coeficiente de correlação r^2 desta equação foi bem mais alto e seu grau de ajuste com os dados experimentais é bem

melhor do que o verificado para a equação (2). É interessante notar que o valor do termo K_y foi igual a $27 \text{ N/mm}^{-3/2}$ ($855 \text{ N/mm}^{-3/2}$), que é próximo aos valores obtidos na literatura para aços bifásicos obtidos por recozimento contínuo em escala laboratorial⁽²⁾: $25 \text{ N/mm}^{-3/2}$. Convém notar ainda que em ambos os casos a dureza do constituinte bainítico-martensítico foi similar, da ordem de 400 HV.

O fato da utilização do caminho livre médio ferrítico ter levado a uma equação de previsão do limite de escoamento mais precisa do que a que empregou o tamanho de grão aparentemente indica que nos aços bifásicos o constituinte bainítico-martensítico afeta a magnitude do limite de escoamento, fato que não ocorre de forma marcante nos aços ferrítico-perlíticos⁽¹⁶⁾.

No tocante ao limite de resistência, a análise estatística "stepwise" revelou que duas variáveis são efetivamente importantes: o caminho livre médio ferrítico, na forma $L_{\text{fm}}^{-1/2}$, analogamente à equação de Hall-Petch, e a razão $(f_p/d_p)^{1/2}$, onde f_p é a fração volumétrica de constituinte bainítico-martensítico e d_p é o seu tamanho de grão. A inclusão deste último parâmetro indica que o encruamento do material obedece à teoria de Ashby. Desse modo, foram obtidas as seguintes equações:

$$\begin{aligned} \text{L.R. [MPa]} &= 414 + 1214 L_{\text{fm}}^{-1/2} & (4) \\ r^2 &= 0,77 & \text{E.P.E.} = 37 & \text{99\% Confiança} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{L.R. [MPa]} &= 199 + 2810 (f_p/d_p)^{1/2} & (5) \\ r^2 &= 0,81 & \text{E.P.E.} = 33 & \text{99\% Confiança} \end{aligned}$$

As representações gráficas dessas duas equações podem ser vistas na figura 5.

Agrupando-se esses dois parâmetros na mesma equação chega-se a um resultado ainda melhor:

$$\begin{aligned} \text{L.R. [MPa]} &= 266 + 548 L_{ud}^{-1/2} + 1741 \left(\frac{r_p}{d_p} \right)^{1/2} & (6) \\ r^2 &= 0,87 & \text{E.P.E.} = 31 & \text{99\% Confiança} \end{aligned}$$

A dependência do limite de resistência em relação ao caminho livre médio ferrítico e ao encruamento predito pela teoria de Ashby já era previsível dado o grande efeito da presença do constituinte bainítico-martensítico da microestrutura sobre ele⁽¹⁻⁹⁾.

Não foi encontrada na literatura nenhuma relação funcional entre o alongamento dos aços bifásicos durante o ensaio de tração e seus parâmetros microestruturais. A análise estatística efetuada no presente trabalho indicou uma relação assintótica entre a distância livre média da ferrita e os alongamentos uniforme e total, como mostram as equações (7) e (8), respectivamente:

$$\begin{aligned} a_u [\%] &= 26,8 - 22,5 \cdot 0,96^{L_{ud}} & (7) \\ r^2 &= 0,85 & \text{E.P.E.} = 2,1 & \text{99\% Confiança} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_t [\%] &= 41,2 - 31,5 \cdot 0,98^{L_{ud}} & (8) \\ r^2 &= 0,83 & \text{E.P.E.} = 3,1 & \text{99\% Confiança} \end{aligned}$$

A figura 6 mostra graficamente estas duas equações.

Os dois tipos de alongamento ainda apresentaram correlação linear como o limite de resistência:

$$a_u [\%] = 51,0 - 0,05 \text{ L.R. [MPa]} \quad (9)$$
$$r^2 = 0,83 \quad \text{E.P.E.} = 1,8 \quad 99\% \text{ Confiança}$$

$$a_t [\%] = 71,7 - 0,07 \text{ L.R. [MPa]} \quad (10)$$
$$r^2 = 0,89 \quad \text{E.P.E.} = 1,9 \quad 99\% \text{ Confiança}$$

As representações gráficas das equações 9 e 10 podem ser vistas na figuras 7a e 7b, respectivamente.

Contudo, vale notar que as equações de previsão dos alongamentos são empíricas e não têm fundamento explícito em mecanismos teóricos, embora elas sejam intuitivamente corretas: menor distância livre média ferrítica -> aumento de obstáculos para a migração de discordâncias -> menor distância disponível para deslocamento das discordâncias -> aumento da resistência mecânica -> diminuição da capacidade de alongamento.

Finalmente, vale ressaltar que os demais parâmetros microestruturais determinados mas não citados nesta discussão - como tamanho de grão, dureza e adjacência dos constituintes - foram incluídos na análise de correlação estatística "stepwise", a qual mostrou que eles são grandezas secundárias na determinação das propriedades mecânicas, pelo menos nas condições do presente estudo. Contudo, a eliminação progressiva das variáveis mais importantes levou ao desenvolvimento de fórmulas alternativas incluindo as variáveis secundárias. Estas fórmulas, apesar de apre-

sentarem bom grau de correlação estatística, são empíricas e sem embasamento teórico explícito. Isto mostrou que as variáveis microestruturais incluídas não são independentes entre si, ou seja, há correlações entre elas. A aplicação da análise estatística "stepwise" permitiu que fossem selecionadas apenas as variáveis realmente significativas, de modo a se determinar equações preditivas efetivamente precisas a partir de um número mínimo de parâmetros, contribuindo para sua simplicidade e evitando os efeitos deletérios da colinearidade em seu significado físico.

- CONCLUSÕES

O estudo das relações microestrutura-propriedades mecânicas de um aço bifásico laminado a quente levou às seguintes conclusões:

- O limite de escoamento apresentou maior dependência em relação ao caminho livre médio ferrítico do que ao tamanho de grão. Isto indica a ação mais efetiva dos contornos de fase na restrição à movimentação das discordâncias do que dos contornos de grão ferríticos;
- O limite de resistência parece ser determinado tanto pelos contornos de fase como pelo efeito endurecedor dos grãos do constituinte bainítico-martensítico;

- Os alongamentos uniforme e total apresentaram dependência assintótica em relação ao caminho livre médio ferrítico e foram inversamente proporcionais ao limite de resistência;
- A distância livre média ferrítica revelou-se o parâmetro microestrutural mais importante, uma vez que influenciou todas as características mecânicas estudadas.

- AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração de Miguel Torres Neto e sua equipe, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - I.P.T., nos ensaios de laminação; de Benedito Dias Chivites, do Centro de Testes da COSIPA, na usinagem dos corpos de prova de laminação e tração; e dos técnicos Jair João Menegon e Airton R.M. Leal, do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica da U.S.P., nos ensaios de tração e preparação de amostras para o exame metalográfico.

- BIBLIOGRAFIA

- (1) RIGSBEE, J.M. et alii. In: STRUCTURE AND PROPERTIES OF DUAL PHASE STEELS. Proceedings. TMS-AIME, New Orleans, 1979, p. 304-329.
- (2) UGGOWITZER, P. & STUWE, H.P. Zeitschrift für Metallkunde, 73(5):277-285, Mai 1982.
- (3) BALLIGER, N.K. & GLADMAN, T. Metal Science, 15(3):95-108, March 1981.
- (4) LANZILOTTO, C.A.N. & PICKERING, F.B. Metal Science, 16(8):371-382, Aug. 1982.
- (5) MATLOCK, D.K. et alii. In: DEFORMATION, PROCESSING AND STRUCTURE. ASM Materials Science Seminar, Metals Park, 1982, p. 47-87.
- (6) MAID, O. et alii. Stahl und Eisen, 108(8):355-364, 18 Apr. 1988.
- (7) SHEN, H.P. & LEI, T.C. Metal Science, 18(5):257-264, May 1984.
- (8) DAVIES, R.G. Metallurgical Transactions A, 9A(1):41-52, Jan. 1978.
- (9) ASHBY, M. Zeitschrift für Metallkunde, 55(1):5-17, Jan. 1964.
- (10) LE PERA, F.S. Journal of Metals, 32(3):38-39, March 1980.
- (11) BRANCHINI, D.L.G. & GORNI, A.A. Mineração e Metalurgia, 508, Set. 1989.
- (12) SPIEGEL, M.R. Estatística. Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., São Paulo, 1976. 580 p.
- (13) GORNI, A.A. Efeito da Temperatura de Acabamento e Velocidade de Resfriamento sobre a Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço Bifásico. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 1989.
- (14) DIETER, G.E. Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, 1976. 774 p.
- (15) MEYERS, M.A. & CHAWLA, K.K. Princípios de Metalurgia Mecânica. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1982. 505 p.
- (16) MINTZ, B. Metals Technology, 11(7):265-272, July 1984.

FIGURAS

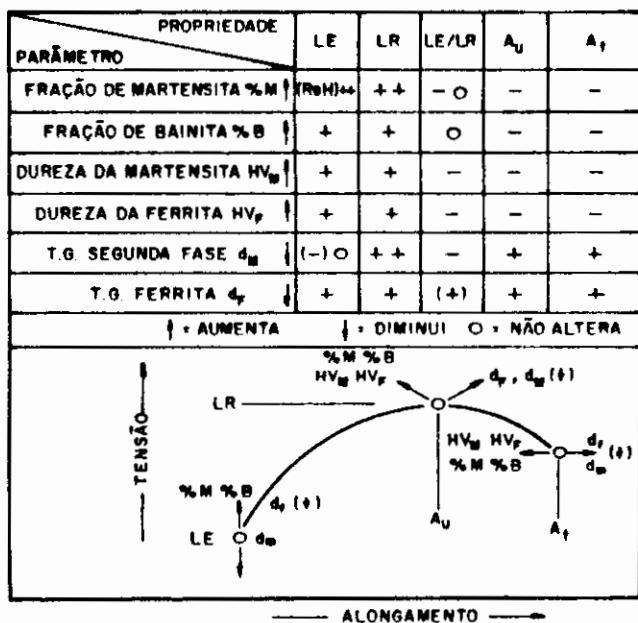


Figura 1: Esquema do efeito dos diversos parâmetros microestruturais sobre as propriedades mecânicas dos aços bifásicos (6).

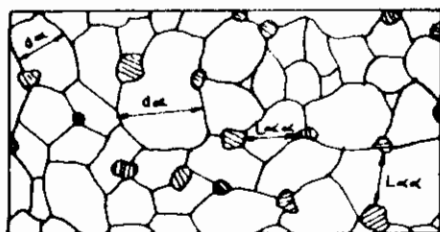


Figura 2: Representação gráfica do contorno de grão d_{gr} e do caminho livre médio L_{gr} de ferrita numa microestrutura bifásica.

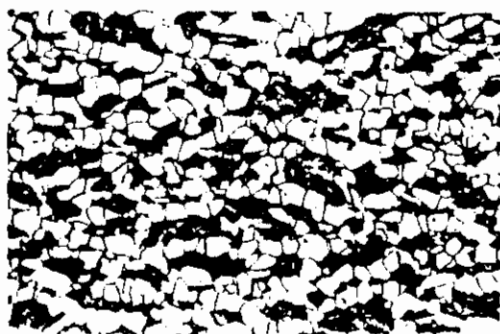


Figura 3: Microestrutura bifásica do aço ao Mn-Si-Cr-Mo laminado a quente, submetido à temperatura de acabamento de 950°C e resfriado em óleo. Ataque: Nital 5%. Aumento: 400 \times .

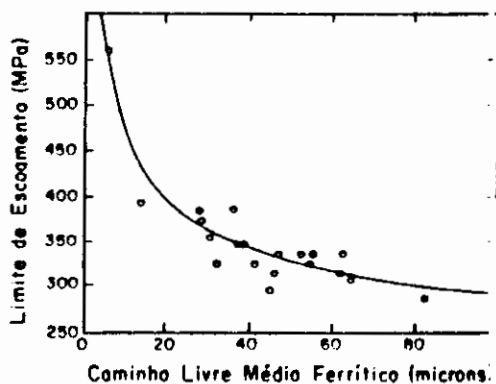
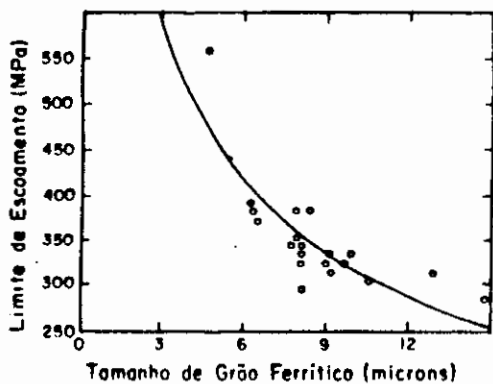


Figura 4: Representação gráfica da relação entre o limite de escoamento e a) tamanho de grão ferrítico e b) caminho livre médio ferrítico.

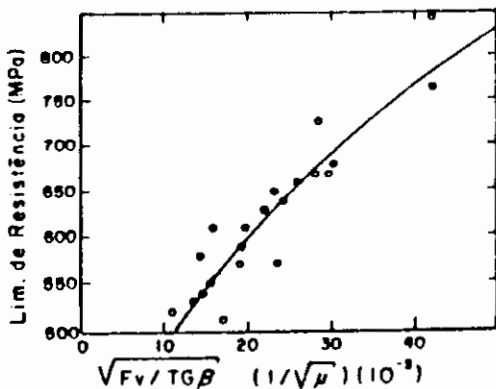
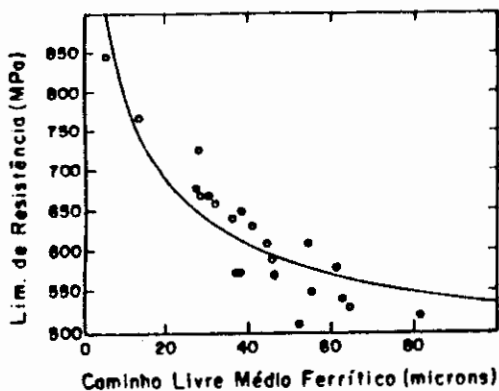


Figura 5: Representação gráfica da relação entre o limite de resistência e a) distância livre média da ferrita e b) razão $(l_p / d_p)^{1/2}$.

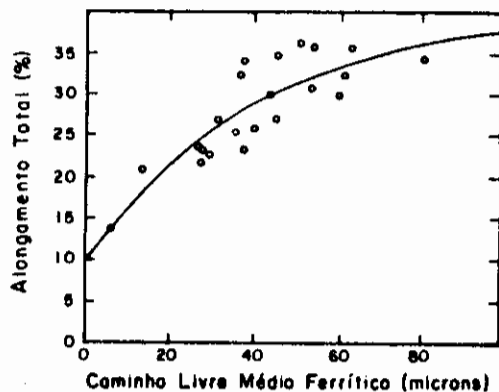
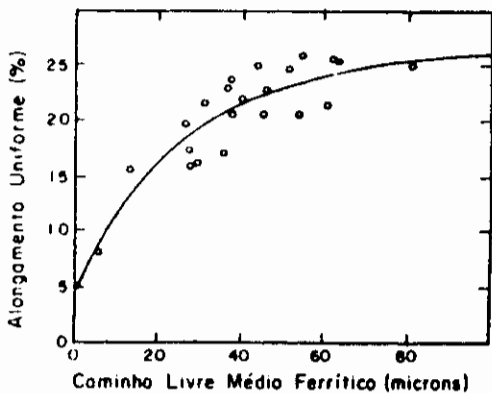


Figura 6: Representação gráfica da relação entre o a) alongamento uniforme e b) alongamento total, em função da distância média livre da ferrita.

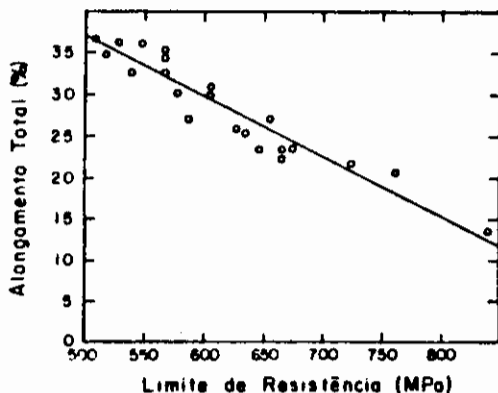
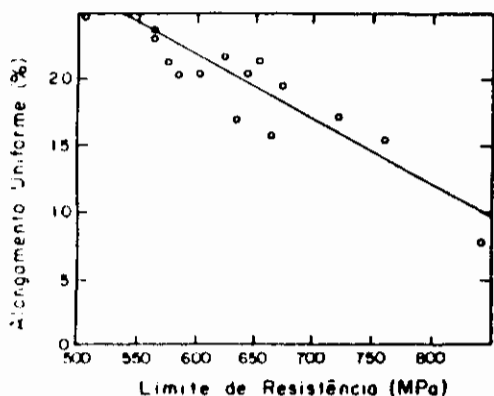


Figura 7: Representação gráfica da relação entre o a) alongamento uniforme e b) alongamento total, em função do limite de resistência.

- TABELAS

	PASSE	TEMPO (s)	TEMPERATURA (°C)	ESPESSURA (mm)	REDUÇÃO (%)
ESBOÇAMENTO	1	7	1174	19,5	22
	2	18	1120	14,5	26
ACABAMENTO $T_a = 950^{\circ}\text{C}$ espera: 0s	3	29	1074	10,0	31
	4	37	999	7,5	25
	5	44	948	5,0	33
ACABAMENTO $T_a = 900^{\circ}\text{C}$ espera: 8s	3	37	1022	10,0	31
	4	44	968	7,5	25
	5	52	902	5,0	33
ACABAMENTO $T_a = 850^{\circ}\text{C}$ espera: 18s	3	47	947	10,0	31
	4	58	900	7,5	25
	5	67	853	5,0	33

Tab. 1: Dados nominais dos esquemas de laminação utilizados.