

COMPORTAMENTO DE AÇOS MICROLIGADOS AO NIÓBIO E TITÂNIO, LAMINADOS A FRIO, TENDO EM VISTA AS PROPRIEDADE DE ESTAMPAGEM.

Ivanoé Rossi Filho (2)

RESUMO

Através de ensaios de tração, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, estudou-se o comportamento de aços microligados com nióbio ou com titânio, após laminação a frio com redução de 50% na espessura e recozimento a 700 C por duas horas, tendo em vista a estampabilidade dos materiais em termos de R e n.

Verificou-se que o aço microligado com titânio apresentou valores de R e n mais elevados, aliados a valores de resistência mecânica também mais elevados que o aço com nióbio.

SUMMARY

Trough tensile strength tests, optical and electron scanning microscopy, we studied the performance of high-strength low alloy steels with niobium and with titanium, after cold rolling, with 50% reduction in thickness and annealed in 700°C for two hours, taking on account the drawability of materials in relation to R and n.

It was observed that the steel microalloyed with titanium presented R, n and mechanical resistance values higher than the steel microalloyed with niobium.

(1) Trabalho apresentado no 1º Seminário sobre Chapas Metálicas para Indústria Automobilística, setembro de 1971,

(2) Engº Metalurgista e Mestre em Metalurgia, Departamento de Produção da Mangels São Bernardo S/A e Chefe Departamento de Metalurgia da Faculdade de Engenharia Industrial.

I. OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho teve por objetivo analisar o comportamento, após laminação a frio e recozimento em caixa, de dois aços de alta resistência disponíveis no mercado nacional, no estado laminado a quente, procurando explicar as propriedades de resistência e estampabilidade através de análises da microestrutura e propondo mecanismos que possam estar influenciando tais propriedades. (1)

II - MATERIAL E TÉCNICA EXPERIMENTAL

Os materiais utilizados apresentam a seguinte composição em peso

IDENTIF.	% C	% MN	% Si	% AL	% P	% S	% N	% Ti	% Nb
0	0,08	0,65	0,01	0,023	0,010	0,015	0,006	-	0,033
1	0,08	0,71	0,17	0,041	0,014	0,009	0,006	0,113	-

As amostras foram retiradas de bobinas laminadas a quente, com espessura de 4,25 mm, disponíveis no mercado.

O aço com nióbio foi laminado a quente, com uma temperatura de acabamento que variou de 860 a 890 C. A temperatura de acabamento do aço com titânio não estava disponível.

As amostras foram deformadas à temperatura ambiente por laminação para 2,25 mm de espessura.

O tratamento térmico consistiu de aquecimento lento até 700 C, permanência por duas horas nesta temperatura e resfriamento lento até a temperatura ambiente.

III - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

III - 1 - Material laminado a quente

Os resultados do ensaio de tração dos materiais no estado laminado a quente são dados nas tabelas I e II.

Os dois materiais, apesar dos níveis de resistência e alongamento total relativamente próximos, apresentaram valores de n muito diferentes.

O aço com titânio apresentou um valor de n ~29% mais elevado. Este resultado pode ser explicado pelo teor de intersticiais que permaneceram em solução em cada um dos aços.

Os solutos intersticiais diminuem o alongamento uniforme e o efeito do nitrogênio é o mais acentuado, como mostrado por Pickering (2) através de uma equação para aços de baixo carbono :

$$E_u = 0,28 - 0,2\%C - 0,25\%Mn - 0,044\%Si - 0,39\%Sn - \frac{1,2\%N}{f}$$

Os dois aços continham os mesmos teores de carbono e nitrogênio. No aço com titânio ocorre a formação do nitreto de titânio (TiN) desde o aço no estado líquido, de modo que pode-se supôr que praticamente todo o nitrogênio foi retirado de solução (3,4)

No aço com nióbio ocorre a formação do nitreto de nióbio, em temperaturas equivalentes as da formação do carboneto de nióbio (NbC), não havendo uma maior afinidade do nióbio por carbono ou nitrogênio. A relação atômica [Nb/(C+N)] foi calculada com base na composição química e deu como resultado 0,050, ou seja apenas 5% dos intersticiais poderiam estar na forma de carboneto e nitreto de nióbio, se todo o nióbio tivesse reagido.

Os dados obtidos através da determinação do tamanho do grão pelo método dos interceptos, encontram-se na tabela III.

As figuras 01 e 02 mostram a microestrutura e as figuras 03 e 04 mostram a distribuição dos precipitados no estado laminado a quente.

Todos os precipitados observados na figura 03 são cementita, visto que nas análises com a microsonda, não foi possível identificar os carbonitretos de nióbio, os mesmos devem es-

tar muito finos só sendo possível localizá-los com microscópio eletrônico de transmissão. (5,6)

Nota-se também a presença de perlita no aço com nióbio.

O cálculo da temperatura de início de precipitação dos carbonitretos de nióbio, para os teores de 0,033% Nb; 0,08%C e 0,006%N, utilizando-se a relação de Irvine(7), deu como resultado 850 C, e como a temperatura de acabamento utilizada no aço com nióbio variou de 860 a 890 C, os carbonitretos de nióbio devem ter se formado durante o resfriamento, sendo desta forma muito finos.

No aço com titânio foi possível localizar os carbonetos de titânio, e a figura 05 mostra um carboneto de titânio observado com microscópio eletrônico de varredura, que apresenta um tamanho de 9000 Å.

III 2. MATERIAL LAMINADO A FRIO E RECOZIDO

As tabelas IV e V nos mostram os resultados das propriedades mecânicas dos materiais, no estado laminado a frio e recozido.

As variações percentuais das propriedades do estado laminado a quente para o estado laminado a frio e recozido, encontram-se na tabela VI.

A tabela VII nos mostra os dados obtidos através da determinação do tamanho do grão pelo método dos interceptos, para o estado laminado a frio e recozido.

Como podemos observar na tabela VI, os dois aços tiveram os valores de LE e LR diminuídos em relação ao estado laminado a quente, após laminação a frio e recozimento. O aço com nióbio apresentou uma diminuição mais elevada do que o aço com titânio.

Os tamanhos de grão similares apresentados pelos dois aços no estado laminado a quente, não se alteraram significativamente, após laminação a frio e recozimento. Desta forma, pode-se supor que a perda de resistência, após laminação a frio e recozimento foi devida, principalmente a uma diminuição no efeito do endurecimento por precipitação.

Ambos os aços tiveram o valor de n aumentado, após laminação a frio e recozimento, sendo que o aço com nióbio teve percentualmente um aumento superior ao do aço com titânio. Provavelmente a diminuição de intersticiais em solução, através da precipitação durante o recozimento, pode explicar este comportamento.

O nitrogênio do aço com nióbio pode ter sido retirado de solução pelo alumínio, formando nitreto de alumínio durante o recozimento.

As figuras 06 e 07 mostram a microestrutura e as figuras 08 e 09 mostram a distribuição dos precipitados no estado laminado a frio e recozido.

Também no estado laminado a frio e recozido, não foi possível com microscópio eletrônico de varredura, localizar e identificar os carbonitretos de nióbio, provavelmente por não haver crescimento significativo destes precipitados durante o recozimento.

A figura 10 nos mostra um carboneto de titânio analisado através da microsonda, os tamanhos encontrados variaram de 4000 a 9000 Å.

A diferença na distribuição dos precipitados, após laminação a frio e recozimento entre os dois aços, foi muito acentuada.

O aço com titânio apresentou uma dispersão fina e homogênea, enquanto que o aço com nióbio, uma dispersão grosseira e heterogênea.

Houve um efeito bastante diferenciado entre os dois aços, com relação à distribuição da cementita redissolvida durante o recozimento. Provavelmente os carbonetos de titânio possam ter agido como núcleos para a reprecipitação da cementita.

No aço com nióbio, a quantidade de carbonitretos de nióbio era menor que a quantidade de carbonetos de titânio, tendo em vista as relações atômicas $[Nb/(C+N)]$ igual a 0,050 e $[Ti/C]$ igual a 0,214, e os carbonitretos de nióbio eram pequenos, possivelmente coerentes com a matriz, não apresentando condições de servir como núcleo para a reprecipitação da cementita (8). Desta forma, a distribuição fina e homogênea obtida no aço com titânio, não foi possível de ser obtida no aço com nióbio.

A diferença na dispersão dos precipitados pode explicar a menor perda de resistência do aço com titânio, após laminação a frio e recozimento (9).

A figura 07 nos mostra que o aço com titânio ficou com uma estrutura de grãos alongados na direção de laminação, e não recristalizou completamente.

A estrutura de grãos alongados após recristalização, foi devida à dispersão fina e homogênea dos precipitados, e o valor de R foi aumentado em 26%, em relação ao valor de R do estado laminado a quente.

A dispersão dos precipitados pode ter influenciado na textura, durante o recozimento, propiciando um valor de R mais elevado (10,11,12).

O fato do aço com titânio não ter recristalizado completamente, pode explicar a diminuição da porcentagem de alongamento total, após laminação a frio e recozimento, em relação ao estado laminado a quente.

As figuras 11 e 12 mostram o aspecto da fratura, em cada um dos aços sob tensão biaxial, obtida através do ensaio de embutimento Erichsen. A região fotografada foi uma região que não rompeu por cisalhamento.

As figuras 13 e 14 mostram o aspecto da fratura, em cada um dos aços sob tensão uniaxial, obtida do ensaio de tração. A região fotografada corresponde a uma região que não rompeu por cisalhamento.

As fotografias das fraturas tanto sob tensão biaxial como sob tensão uniaxial, nos mostram uma morfologia distinta entre os dois aços. No aço com nióbio pode-se notar alvéolos de maior tamanho rodeado por alvéolos pequenos, enquanto que essa mesma morfologia não é observada no aço com titânio.

Esta diferença de morfologia da fratura é devida à diferença na dispersão e no tamanho dos precipitados, ocorrida entre os dois aços, após laminação a frio e recozimento. No aço com nióbio tivemos uma dispersão heterogênea e mais grosseira dos precipitados, gerando os alvéolos de maior tamanho na fratura, e no aço com titânio a dispersão fina e homogênea propiciou uma fratura com aspecto mais homogêneo no que diz respeito ao tamanho dos alvéolos.

Estes resultados comprovam a diferença no tamanho dos precipitados entre os dois aços.

Em resumo o aço com titânio na condição de laminado a frio e recozido apresentou uma melhor combinação de propriedades de resistência e ductilidade, comparada às do aço com nióbio.

Apesar do nível de resistência mais elevado no aço com titânio, os valores de R e n também foram mais elevados, o que indica que o aço com titânio possui melhor estampabilidade mesmo com um nível de resistência mais elevado.

Dois fatores principais foram responsáveis por esta melhor combinação de propriedades no aço com titânio :

- 1.) Teor mais baixo de intersticiais em solução, com a utilização da relação $[Ti^*/C]$ igual a 0,21 para 0,08% em peso de carbono, e a fixação do nitrogênio pelo titânio
- 2.) A distribuição fina e homogênea dos carbonetos estáveis de titânio, que propiciaram uma distribuição também fina e homogênea da cementita durante o recozimento, influíram na textura do material elevando o valor de R , e impediram uma queda de resistência maior após o recozimento.

V - CONCLUSÕES

- 1.) O aço com nióbio apresentou, no estado laminado a quente e no estado laminado a frio e recozido, valores de alongamento uniforme inferiores aos do aço com titânio, possivelmente pela maior quantidade de intersticiais em solução, principalmente nitrogênio.

- 2.) O aço com nióbio e o aço com titânio aumentaram os valores, de alongamento uniforme após laminação e recozimento. A diminuição do teor de intersticiais em solução, através de precipitação durante o recozimento, pode explicar este resultado.

- 3.) O aço com titânio após laminação a frio e recozimento, apresentou uma menor perda de resistência em relação à condição de laminado a quente, do que o aço com nióbio, por causa da dispersão fina e homogênea dos precipitados.

- 4.) A dispersão fina e homogênea dos precipitados após laminação a frio e recozimento, aumentou o valor de R do aço com titânio, provavelmente por ter influido na textura durante o recozimento.

- 5.) O aço com titânio apresentou propriedades de resistência (LE, LR) e parâmetros de estampabilidade (n, R) mais elevados que o aço com nióbio, possivelmente pela menor quantidade de intersticiais em solução e pela dispersão mais fina e homogênea dos precipitados após laminação a frio e recozimento.

TABELA I - Valores médios nas direções 0,45 e 90 da direção de laminação.

IDENTIF.	LE	LR	λ_{eT}	λ_{-T}
0	460,4	532,7	29,2	25,8
1	590,7	608,0	24,8	22,0

TABELA II - Valores de n, R e R no estado laminado a quente.

IDENTIF.	n	R	R
0	0,156	0,925	-0,201
1	0,201	0,925	-0,006

TABELA III - Tamanho de grão e distância média de interceptação no estado laminado a quente.

IDENTIF.	TAMANHO DE GRÃO ASIM	DISTÂNCIA MÉDIA DE INTERCEPTAÇÃO CAQ (μ)
0	16,92 +/- 0,08	0,98 +/- 0,02
1	17,22 +/- 0,11	0,82 +/- 0,03

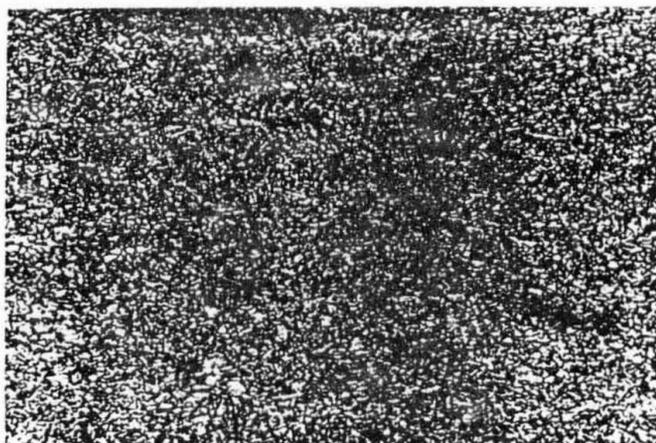


FIG.01 - Microestrutura do aço com nióbio no estado laminado a quente. Ataque Nital 3%. Aumento 100x
Aumento 200x. Foto ampliada 3,3 vezes.

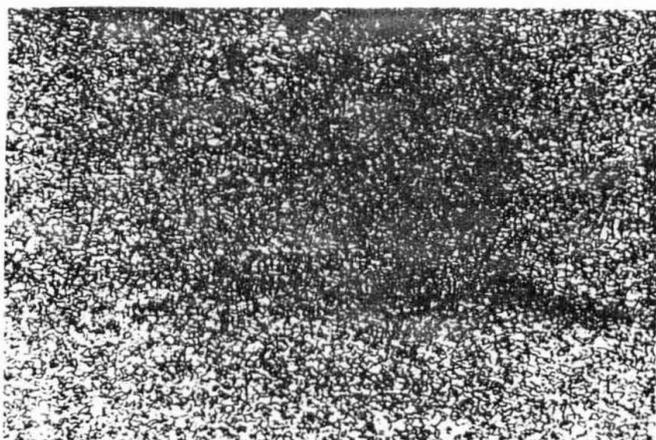


FIG.02 - Microestrutura do aço com titânio no estado laminado a quente. Ataque Nital 3%. Aumento 100x.
Foto ampliada 3,3 vezes

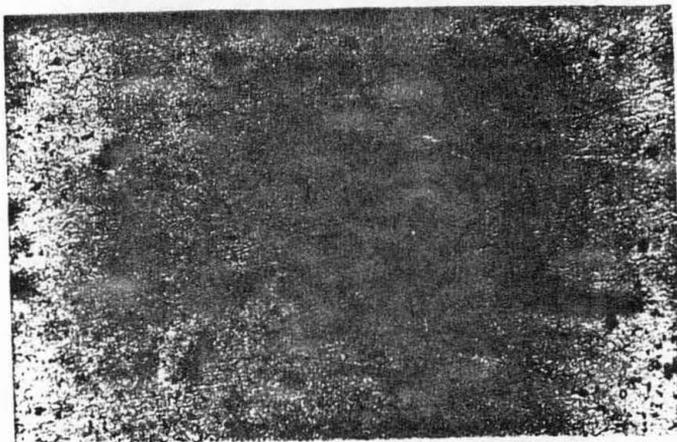


FIG.03 - Distribuição dos precipitados no aço com nióbio no estado laminado a quente. Ataque Picral 1%.
Aumento 200x.Foto ampliada 3,3 vezes.



FIG.04 - Distribuição dos precipitados no aço com titânio no estado laminado a quente. Ataque Picral 1%.
Aumento 200x.Foto ampliada 3,3 vezes.

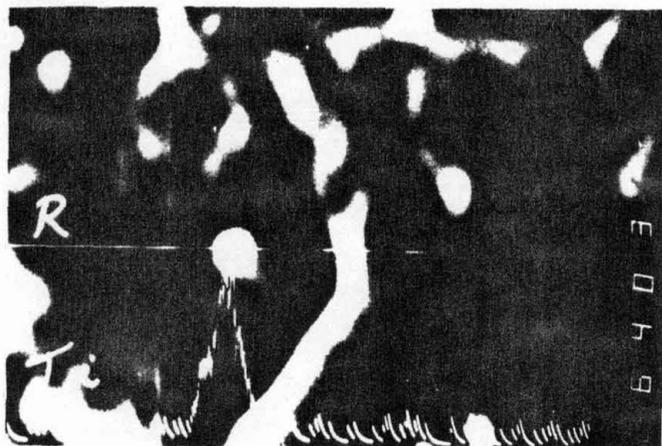


FIG.05 - Imagem de eletrons secundários da microestrutura do aço com titânio, mostrando um carboneto de titânio
Aumento 5000 X.

TABELA IV - Valores médios nas direções 0,45 e 90 da direção de laminação.

Identif.	LE	LR	%E T	%E T
0	353,2	396,7	33,7	29,0
1	434,9	503,8	20,5	18,7

TABELA V - Valores de n, R e R no estado laminado a frio e recozido.

Identif.	n	R	R
0	0,206	0,859	-0,216
1	0,231	1,220	-0,588

TABELA VI - Variações percentuais do estado laminado a quente para o estado laminado a frio e recozido.

IDENTIF.	LE (%)	LR (%)	% _T (%)	% _T (%)	n (%)	R (%)
01	-23	-25	+15	+12	+32	-7
02	-4	-17	-17	-15	+15	+26

TABELA VIII - Tamanho de grão e distância média de interceptação no estado laminado a frio e recozido.

IDENTIF.	TAMANHO DE GRÃO ASTM	DISTÂNCIA MÉDIA DE INTERCEPTAÇÃO (M)
0	17,14 +/- 0,27	0,81 +/- 0,07
1	16,71 +/- 0,42	0,98 +/- 0,14

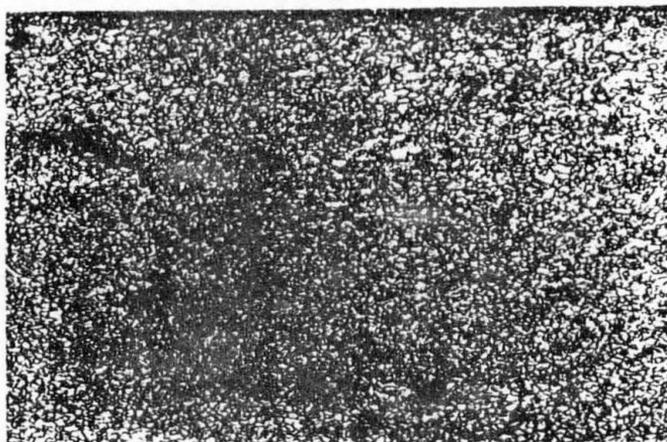


FIG.06 - Microestrutura do aço com nióbio após laminação a frio e recozimento. Ataque Nital 3%. Aumento 100x.
Foto ampliada 3,3 vezes.

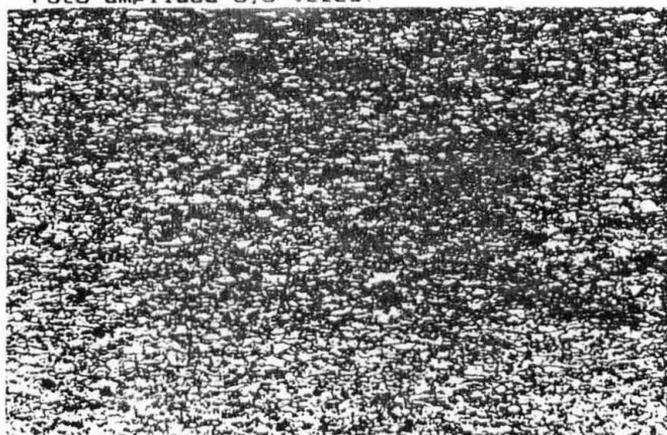


FIG.07 - Microestrutura do aço com titânio após laminação a frio e recozimento. Ataque Nital 3%. Aumento 100x.
Foto ampliada 3,3 vezes



FIG.08 - Distribuição dos precipitados no aço com nióbio, após laminação a frio e recozimento. Ataque Picral 1% Aumento 200x. Foto ampliado 3,3 vezes.

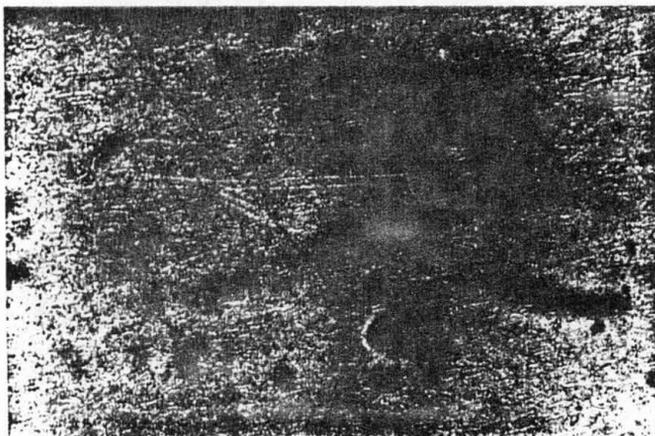


FIG.09 - Distribuição dos precipitados no aço com titânio, após laminação a frio e recozimento. Ataque Picral 1% Aumento 200x. Foto ampliado 3,3 vezes.

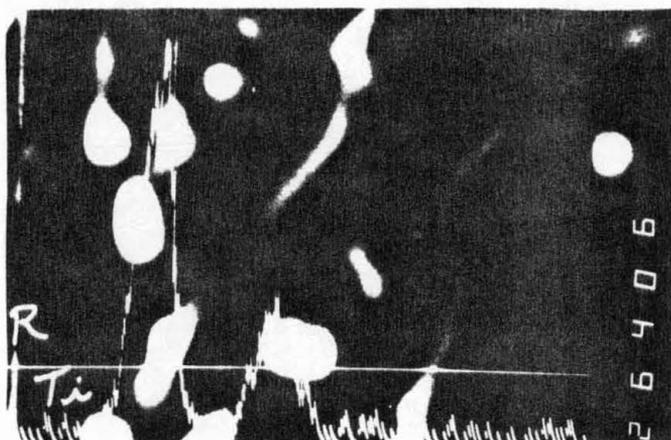


FIG 10 - Imagem de elétrons secundários da microestrutura do aço com titânio laminado a frio e recozido, mostrando um carboneto de titânio. Aumento 5000 X.

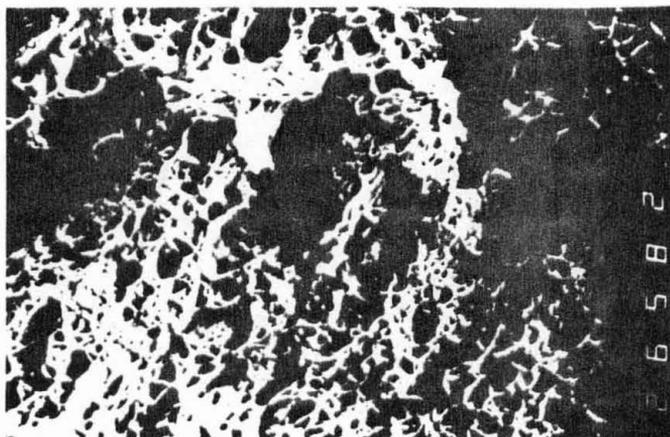


FIG.11 - Imagem de elétrons secundários mostrando o aspecto da fratura do aço com titânio sob tensão biaxial. Aumento 500x.

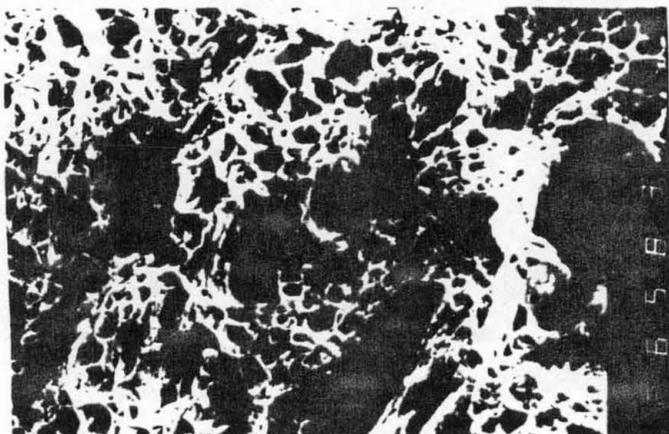


FIG. 12 - Imagem de elétrons secundários mostrando o aspecto da fratura do aço com nióbio sob tensão biaxial.

Aumento 500x.

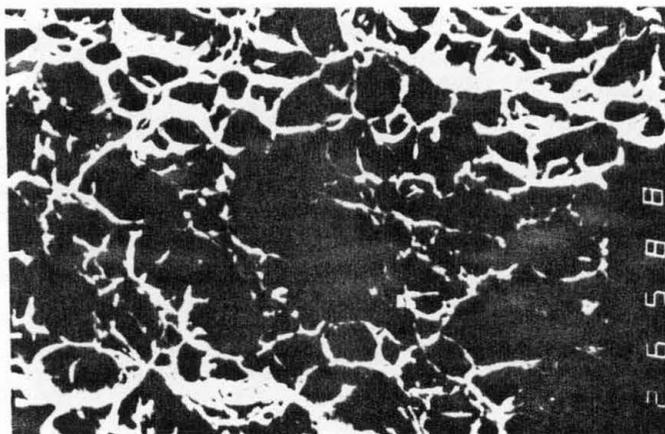


FIG. 13 - Imagem de elétrons secundários mostrando o aspecto da fratura do aço com titânio sob tensão uniaxial.

Aumento 1000x.

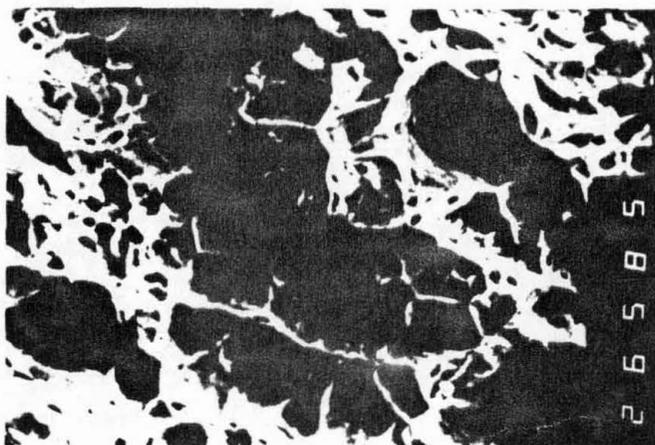


FIG. 14 - Imagem de elétrons secundários mostrando o aspecto da fratura do aço com nióbio, sob tensão uniaxial. Aumento 1000x.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.) ROSSI, IVANDE - Caracterização de aços de baixo carbono microligados ao Ti ou ao Nb após laminação a frio e recozimento em caixa, tendo em vista as propriedades de estampagem em termos de r e m. Dissertação de mestrado apresentado à EPVSP para obtenção do título de Mestre em Engenharia - São Paulo, 1985.
- 2.) PICKERING, F. B. Physical metallurgy and the design of steels. London, Applied Science, 1978. p.1-87;
- 3.) MEYER, L., HIESTERKAMP, F. & MUESCHENBORN, W. Columbium, titanium and vanadium in normalized, thermo-mechanically treated and cold-rolled steels. In: MICROALLOYING 75. Proceedings. Washington 1-3, 1975. New York, Union Carbide, 1977. p. 153-167;
- 4.) IRVINE, K. J.; PICKERING, F. B. & GLADMANN, T. Grain-refined C-M steels. Journal of Iron and Steel Institute, London, 205 (2) : 161-182, february, 1967;

- 5.) SEKINE, H. & MARUYAMA, T. Retardation of recrystallization of austenite during hot-rolling in Nb containing low-carbon steels. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, 16 (8) : 427-436, August, 1976;
- 6.) ANDRADE, H.L.; AKBEN, M.G. & JONAS, J.J. Effect of molybdenum, niobium and vanadium on static recovery and recrystallization and on solute strengthening in microalloyed steels. Metallurgical Transactions A, Metals Park, 14 (10) : 1967-1977, October, 1983;
- 7.) IRVINE, K.L.; GLADMANN, T.; ORR, J & PICKERING, F.B. Controlled rolling of structural steels. Journal of the Iron and Steel Institute, London, 208 (8) : 717-726, August, 1970;
- 8.) GOODMAN, S.R. & CHOUDHRY, A.R. Recrystallization behaviour and tensile properties of continuously annealed high-strength cold-rolled steel sheets containing columbium and titanium. In: METTALURGY OF CONTINUOUS-ANNEALED SHEET STEELS SYMPOSIUM. Proceedings. Dallas, February 15-16, 1982. Warrendale, The Metallurgical Society of AIME, 1982. p. 229-247;
- 9.) GLADMAN, T.; HOLMES, B. & PICKERING, F.B. Work hardening of low carbon steels. JOURNAL OF THE IRON AND STEEL INSTITUTE, London, 208 (2) : 172-183, February, 1970;
- 10) HOOK, R.E. & NYO, H. Recrystallization of deep drawing columbium treated interstitial-free sheet steels Metallurgical Transactions A, Metals Park, 6(7) : 1443-1541, July, 1975;
- 11) GLADMANN, T.; McIVOR, I.D.; PICKERING, F.B. Effect of carbide and nitride particles on the recrystallization of ferrite. Journal of the Iron and Steel Institute, London, 209 (5) : 380-390, May, 1971;
- 12) JONAS, J.J. & WEISS, I. Effect of precipitation on recrystallization in microalloyed steels. Metal Science, London, 13 (3/4) : 238-245, March/April, 1979.

