

Figura 1 - Grãos gerados com um passe de laminação.

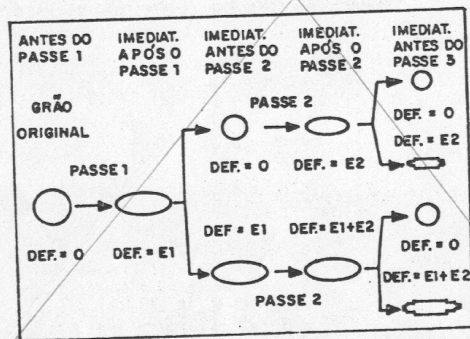


Figura 2 - Desenvolvimento da microestrutura previsto pelo modelamento matemático, quando ocorre recristalização parcial entre passes.

### EFEITOS DA DEFORMAÇÃO A QUENTE EM AÇÓS PERLÍTICOS COM NIÓBIO\*

Sérgio Norifumi Doi\*\*  
Paulo Roberto Mei\*\*\*  
Hans-Jürgen Kestenbach\*\*\*\*

#### RESUMO

Foi estudado o efeito da deformação da austenita sobre a transformação para perlita em aços contendo 0,8% C. Utilizou-se forjamento a quente de pequenas amostras que em seguida foram transformadas isotermicamente em banho de estanho a 650°C. Foram escolhidas a temperatura e a porcentagem de deformação como principais variáveis. Outros efeitos investigados incluíram o tamanho de grão da austenita e a presença de nióbio na composição química.

Os resultados mostraram que a deformação plástica acelera a transformação da austenita para perlita, tanto em altas temperaturas onde ocorre recristalização como em baixas temperaturas onde a perlita se forma a partir da austenita deformada. O efeito foi maior em amostras de aço microligado onde o nióbio foi solubilizado antes do forjamento. Discutem-se os resultados com base em observações metalográficas de amostras parcialmente transformadas.

\* Trabalho apresentado no Seminário de Metalurgia Física da ABM. Maio de 1989, Rio de Janeiro, RJ.  
\*\* Engº de Materiais, M.Sc., Engenheiro da COSIPA, Cubatão, S.P.  
\*\*\* Engº Mecânico, Dr. Engº, Professor Livre-Docente do Depto. de Engenharia de Materiais da FEC/UNICAMP, Campinas, S.P.  
\*\*\*\* Dipl. Ing., M.Sc., Ph.D., Professor Titular do Depto. de Engenharia de Materiais da UFSCar, São Carlos, S.P.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de aços mais resistentes e tenazes são alcançados principalmente pelo controle das microestruturas através da utilização dos elementos de ligas e dos tratamentos termomecânicos. Até a pouco tempo a deformação era usada para dar forma ao material, mas não para controlar a microestrutura<sup>(1)</sup>. Atualmente, tanto o controle das microestruturas quanto o das formas, são atingidos pelo desenvolvimento dos tratamentos termomecânicos<sup>(1)</sup>.

As variações do estado austenítico provocadas pelo processamento termomecânico com microadição de elementos de liga afetam a transformação, a microestrutura e as propriedades mecânicas dos aços<sup>(2,3)</sup>. Os efeitos do tamanho de grão austenítico, da presença ou não da deformação plástica não removida por recristalização e do nióbio em solução afetam a cinética de transformação austenita-perlita e conseqüentemente, a microestrutura resultante<sup>(2,3)</sup>.

Entretanto, a transformação da austenita deformada, que é a base dos tratamentos termomecânicos, ainda não é bem entendida.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Preparação dos aços

Os aços foram preparados por fusão a vácuo em forno de indução. A tabela I apresenta as composições químicas dos aços deste trabalho.

Tabela I - Composição química dos aços utilizados (% em peso)

AÇO	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	N
8C	0,79	1,01	0,03	0,007	0,005	0,014	-	40ppm
8N	0,78	1,00	0,03	0,012	0,005	0,014	0,02	35ppm

Foram obtidos lingotes com e sem adição de nióbio como elemento de microliga. Os lingotes originais com seção transversal de 70x70 mm e peso aproximado de 5 kg foram solubilizados a 1200°C por 8 horas e reduzidos em forja de martelo para uma seção redonda de aproximadamente 14 mm de diâmetro.

### 2.2. Método de processamento austenítico e de transformação

Das barras forjadas de 14 mm de diâmetro, foram confeccionadas amostras cilíndricas com diâmetro de 10,0 mm por 20,0 mm de comprimento.

O sistema de forjamento a quente é apresentado, de forma esquemática, na figura 1. A deformação plástica é introduzida através da queda livre de um peso de 40 kg, que incide sobre duas amostras simultaneamente. Portanto, este modo de deformação ocorre por passe único, e a deformação total pode ser escolhida através da altura da placa limitadora, em 10, 30 e 50% de redução em altura. Opôs-se pela deformação simultânea de duas amostras (uma do aço sem nióbio e outra do aço com nióbio) para garantir o mesmo tratamento termomecânico nas mesmas, o que possibilita a comparação entre ambas. Na prática, as duas amostras (8C e 8N) com os seus respectivos termopares embutidos e conectados a um registrador gráfico de dois canais, foram enformadas em forno mufla, mantidas por um período de tempo, retiradas e posicionadas na base do equipamento de forjamento, submetidas ao impacto do peso e transferidas para banho isotérmico de estanho, simultaneamente. A curva da análise térmica deste processamento é mostrada na figura 2, indicando a temperatura e o tempo de austenitização, a temperatura e a quantidade de deformação, o tempo de permanência e a temperatura do banho isotérmico.

As amostras foram austenitizadas a 1200°C por 30 minutos, de formadas à 875°C com redução de 10, 30 e 50%; e à 1100°C com redução de 50% em altura, transferidas para um banho isotérmico de Sn a 650°C, mantidas por diferentes períodos de tempo de transformação e finalmente interrompidos por têmpera em água.

Também foram executados ensaios de transformação isotérmica em amostras não deformadas.

### 2.3. Análise metalográfica

Após têmpera em água, as amostras foram seccionadas no sentido longitudinal dos cilindros, polidos e atacadas com Nital 3% e solução aquosa saturada de ácido pícrico com agente molhante e observadas em microscópio ótico. A solução de Nital 3% foi utilizada para revelar os nódulos de perlita e a solução de pícrico para revelar os contornos do antigo grão austenítico. Os efeitos da deformação da austenita sobre a subsequente reação da formação perlita foram estudados pela comparação das microestruturas em amostras deformadas e não deformadas. A fração volumétrica da perlita foi medida por

lo método de contagem de pontos e o tamanho de grão austenítico foi determinado segundo a Norma ASTM E-112-82, procedimento de Interceptos Lineares e também pelo método da comparação de N<sup>o</sup>s ASTM.

Em se tratando de deformação de uma amostra cilíndrica, foi delimitado uma pequena área central do cilindro deformado para efeito de análise e comparação metalográfica, para minimizar o efeito da heterogeneidade de deformação nas bordas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Efeito do tamanho de grão austenítico na transformação austenita-perlita

Amostras de aços com e sem nióbio foram austenitizadas a 950 e 1200°C por 30 minutos, para se verificar o efeito do tamanho de grão austenítico sobre a velocidade de transformação da austenita em perlita, num banho isotérmico a 650°C. O tamanho de grão austenítico para austenitização a 950°C durante 30 minutos foi da ordem de 10 µm para o aço 8N e de 40 µm para o aço 8C. Para a temperatura de 1200°C e tempo de 30 minutos, foi da ordem de 600 µm para o aço 8N e de 700 µm para o aço 8C.

A figura 3 mostra as curvas de fração volumétrica de perlita transformada em função do tempo de transformação em banho isotérmico, de ambos os aços, 8C e 8N.

Para a temperatura de austenitização de 950°C, a transformação perlítica iniciou aos 38 s para o aço 8N e aos 47 s para o aço 8C. Neste caso o nióbio não foi efetivo no retardamento da transformação para perlita, devido à baixa solubilidade do mesmo nesta temperatura. Além disso o nióbio foi efetivo na retenção do crescimento de grão austenítico durante a austenitização.

Já, para a temperatura de austenitização de 1200°C, o início de formação da perlita foi aos 150 s para o aço 8C e 450 s para o aço 8N, onde deve ter solubilizado  $-0,0094\text{Nb}$ , segundo equação de Nordberg-Aronson<sup>(4)</sup>, mostrando ser bastante efetivo no retardamento da transformação para perlita e pouco efetivo na retenção do crescimento de grão.

A figura 4 mostra as micrografias das amostras parcialmente transformadas de ambos os aços, 8C e 8N. Pelas figuras 4(c) e (d) pode-se verificar que a perlita nucleou essencialmente nos contornos e cresceu para o interior dos grãos austeníticos.

A figura 4(a) e (b) mostram o efeito do tamanho de grão austenítico,

isto é, quanto menor for o tamanho de grão austenítico maior será a quantidade de nódulos nucleados para uma mesma porcentagem volumétrica de perlita transformada e num tempo de transformação isotérmica bem menor. Portanto, um tamanho de grão austenítico menor acelerou nitidamente a transformação para a perlita, tanto no aço sem Nb (8C) como no aço com Nb (8N).

#### 3.2. Efeito da temperatura de deformação sobre a transformação austenita-perlita

Foram utilizadas duas temperaturas de deformação, 1100 e 875°C, para se obter uma estrutura austenítica recristalizada e outra austenítica deformada e sem recristalização, respectivamente. Os aços 8N deformados a 875°C apresentaram uma estrutura austenítica totalmente deformada, sem recristalização; já os aços 8C com 50% de deformação a 875°C apresentaram uma estrutura parcialmente recristalizada. A temperatura de deformação de 1100°C, ambos os aços apresentaram estruturas austeníticas totalmente recristalizadas.

A figura 5, mostra as curvas de fração volumétrica de perlita (VFP%) transformada em função do tempo de transformação, no banho isotérmico a 650°C, de ambos os aços, 8C e 8N. A estrutura austenítica deformada mostrou-se mais efetiva na aceleração da transformação da perlita do que a estrutura austenítica totalmente recristalizada.

A figura 6 mostra as micrografias das amostras transformadas parcialmente, dos aços 8C e 8N que foram austenitizados a 1200°C por 30 minutos, e deformados com 50% de redução em altura. Em amostras recristalizadas, figuras 6(a) e (b), os nódulos de perlita são granulares e os contornos de grão não estão completamente ocupados. Isto indica que na transformação para perlita em aços recristalizados tanto a nucleação quanto o crescimento são importantes. Enquanto que em amostra deformada, figura 6(d), quase todo o contorno de grão é ocupado pelos nódulos de perlita e neste caso a transformação prossegue principalmente pelo espessamento (crescimento) dos filmes de perlita e pelas nucleações adicionais. Também pode-se observar nitidamente que a quantidade de nódulo de perlita é bem maior no aço com nióbio do que no aço sem nióbio.

#### 3.3. Efeito da quantidade de deformação sobre a transformação austenita-perlita

Para verificar o efeito da deformação sobre a transformação para perlita, foram utilizadas deformações de 10;30 e 50% de redução em altura, em amostras cilíndricas de ambos os aços, 8C e 8N, as quais foram executadas à temperatura de 875°C.

As figuras 7 e 8 mostram as curvas de fração volumétrica de perlita (VFP(%)) transformada, em função do tempo de permanência no banho isotérmico a 650°C, dos aços 8C e 8N, respectivamente. As curvas das figuras 7 e 8 indicam que a deformação plástica acelera a transformação da austenita para perlita, isto é, quanto maior a quantidade de deformação da austenita, mais rápida é a transformação para perlita. Também pode-se observar que o aço 8N demorou mais para se transformar em perlita do que os aços 8C, para as mesmas quantidades de deformação introduzidas.

Portanto a deformação acelera e o nióbio retarda a transformação da austenita para perlita. Kozasu et alii<sup>(5)</sup> observaram que um aumento na área interfacial efetiva da austenita, isto é, a área interfacial de contornos de grãos da austenita mais as áreas das bandas de deformação, produz um acréscimo no número dos sítios de nucleação por unidade de volume.

#### 3.4. Efeito do nióbio na transformação austenita-perlita

Na figura 9 observa-se as curvas de fração volumétrica de perlita (VFP(%)) transformada em função do tempo de permanência no banho isotérmico a 650°C, de amostras sem deformação e com 50% de redução em altura à 875°C de ambos os aços (8C e 8N), os quais foram austenitizados à 1200°C por 30 minutos. Comparando-se com as curvas dos aços 8C e 8N sem deformação, nota-se que o nióbio retarda acentuadamente o início de transformação para perlita. Para VFP = 20%, o tempo de transformação é da ordem de 180 s para o aço 8C e 480 s para o aço 8N. Uma deformação de 50%, altera o tempo de transformação em aproximadamente 40 s no aço 8C e 60 s no aço 8N, para uma VFP de -7%. Portanto, o nióbio em solução na austenita mostrou ser bastante efetivo no retardamento da transformação austenita → perlita.

#### 4. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas foram:

- (1) A transformação austenita → perlita foi acentuadamente acelerada pela deformação.
- (2) Quanto menor for o tamanho de grão austenítico, mais rápida será a transformação austenita → perlita.
- (3) O nióbio quando em solução na austenita, mostrou-se ser efetivo no retardamento da transformação austenita → perlita.
- (4) A quantidade de nódulos de perlita foi bem maior no aço com nióbio do que no aço sem nióbio, para amostras submetidas a um mesmo tratamento termomecânico.

#### BIBLIOGRAFIA

- (1) UNEMOTO, M.; OHTSUKA, N.; TAMURA, I. - Transactions, IJIJ, vol. 23, 1983, p. 775-784.
- (2) GLADMAN, T. and DULIEV, D. - Metal Sci., vol. 8, 1974, p. 167.
- (3) TANAKA, T.; TABATA, T.; HATOMURA, T. and SHIGA, C. - Proceedings of Microalloying 75, Union Carbide Corp., New York, 1975, p. 107.
- (4) NORDBERG, H. and ÅRONSON, B. - JISI, Dec. 1968, p. 1263.
- (5) KOZASU, I.; OUCHI, C.; SAMPEI, T. and OKITA, T. - Proceedings of Microalloying 75, Union Carbide Corp., New York, 1975, p.100.

#### AGRADECIMENTOS

À Eletrometal Metais Especiais S.A., através de seu Presidente Dr. José Dinis de Souza, pela preparação dos aços empregados neste trabalho.

Ao Prof.Dr. Oscar Balancin do DEMA/UFSCar pela utilização do Laboratório de Tratamento Termomecânico daquela Instituição.

À COSIPA - Companhia Siderúrgica Paulista através de seu Gerente de Pesquisas, Dr. Erberto Gentile e de seu Coordenador de Desenvolvimento de Produtos Dr. Roberto H. Bukalil, pelo suporte financeiro recebido para a realização deste trabalho.

Ao CNPq e à FAPESP pelos auxílios recebidos.

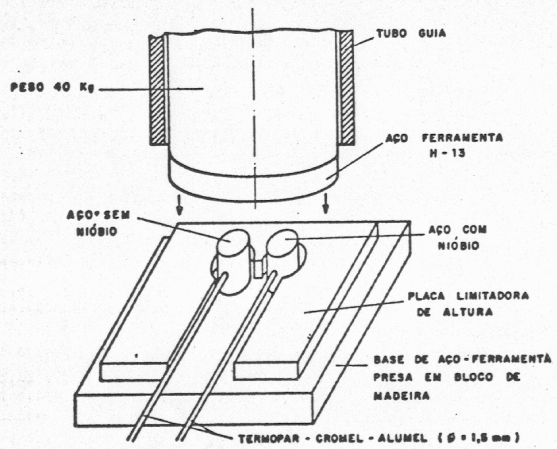


Fig.1 - Sistema de forjamento a quente.

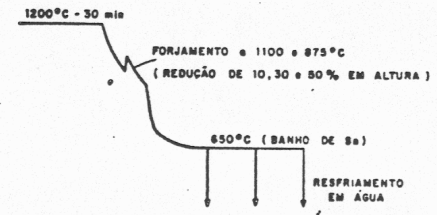


Fig.2 - Curva esquemática da história térmica dos procedimentos termomecânicos.

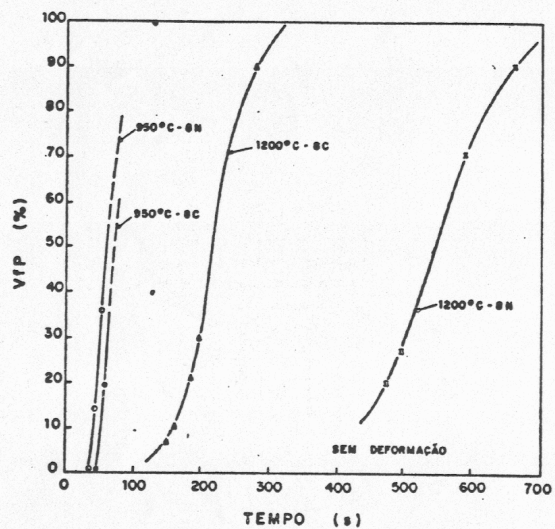


Fig. 3 - Curvas de fração volumétrica de perlita (VFP(%)) versus tempo de transformação a 650°C, dos aços 8C e 8N que foram austenitizados a 950°C e 1200°C.

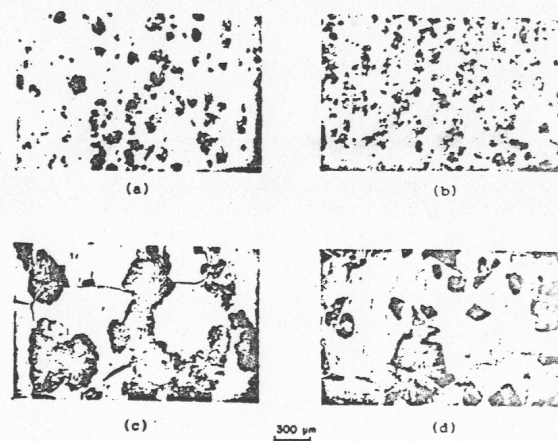


Figura 4 - Micrografias mostrando a transformação para perlita a 650°C, em amostras sem deformação.  
 (a) aço 8C, austenitizado a 950°C /30', transformado por 55 s.  
 (b) aço 8N, austenitizado a 950°C/30' , transformado por 55 s.  
 (c) aço 8C, austenitizado a 1200°C/30', transformado por 190 s.  
 (d) aço 8N, austenitizado a 1200°C/30', transformado por 500 s.

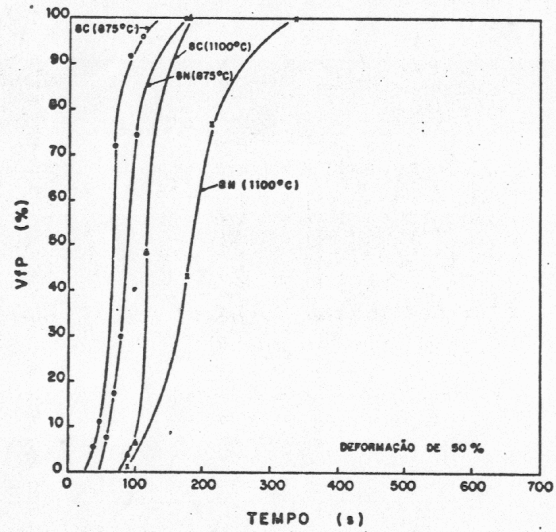


Fig. 5 - Curvas de fração volumétrica de perlita (VfP(%)) versus tempo de transformação a 650°C, dos aços 8C e 8N que foram austenitizados a 1200°C/30' e deformados (50%) à temperaturas de 1100 e 875°C.

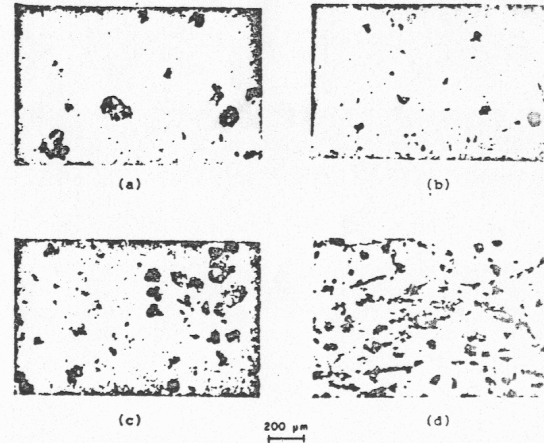


Figura 6 - Micrografias mostrando a transformação para perlita a 650°C, em amostras austenitizadas a 1200°C (30') e submetidas a 50% de redução em altura.  
 (a) aço 8C, deformado a 1100°C e transformado por 88 s.  
 (b) aço 8N, deformado a 1100°C e transformado por 88 s.  
 (c) aço 8C, deformado a 875°C e transformado por 40 s.  
 (d) aço 8N, deformado a 875°C e transformado por 70 s.

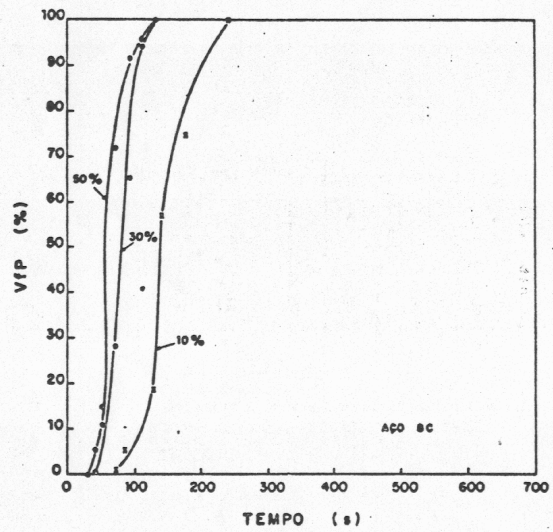


Fig.7 - Curvas de fração volumétrica de perlita (VFP(%)) versus tempo de transformação a 650°C, dos aços 8C que foram austenitizados a 1200°C/30', e deformados a 875°C por 10,30 e 50% de redução em altura.

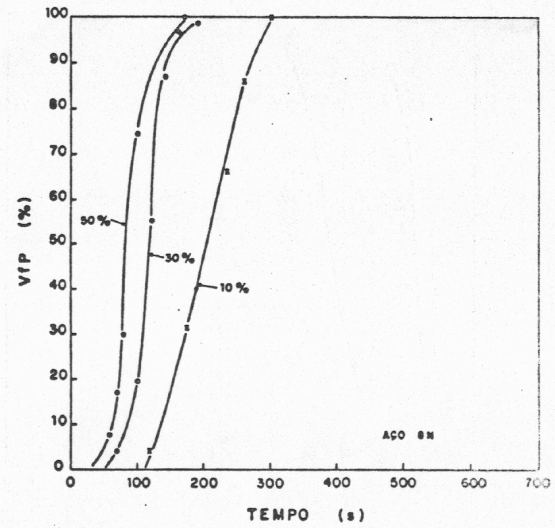


Fig.8 - Curvas de fração volumétrica de perlita (VFP(%)) versus tempo de transformação a 650°C, do aço 8N que foram austenitizados a 1200°C/30' e deformados a 875°C por 10,30 e 50% de redução em altura.



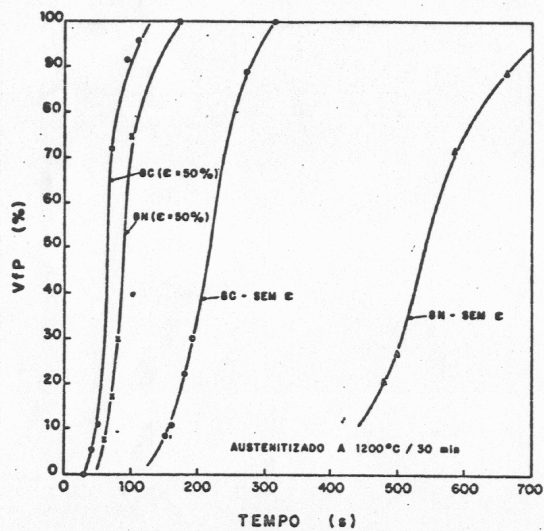


Fig. 9 - Curvas de fração volumétrica de perlita (VfP(%)) versus tempo de transformação a 650°C, dos aços 8C e 8N que foram austenizados a 1200°C/30'; e que foram austenizados a 1200°C/30' e deformados por 50% a 875°C.

RECUPERAÇÃO E DANO MECÂNICOS DO ALUMÍNIO LAMINADO A FRIO  
PROCESSADO POR FLEXO-TRAÇÃO<sup>(1)</sup>

Antônio Eustáquio de Melo Pertence<sup>(2)</sup>  
Renan Gonçalves Cirino<sup>(3)</sup>  
Paulo Roberto Cetlin<sup>(4)</sup>

RESUMO

Da aplicação do processo de deformação cíclica por flexo-tração tem sido obtidos resultados peculiares frente àqueles alcançados pelo processo de deformação monotônica por laminação. Comparando-se amostras inicialmente recozidas, deformadas por laminação ou por flexo-tração, pode-se observar que o material apresenta menor grau de encruamento no processo de flexo-tração considerando-se um mesmo valor de deformação nos dois processos. Além, disso, o material, mesmo sendo extensamente deformado por laminação e só depois ciclado por flexo-tração, apresenta um quadro de recuperação onde o limite de resistência à tração diminui e o alongamento percentual aumenta. Algumas oscilações apresentadas por estas propriedades podem ser interpretadas como danos mecânicos causados pelo processo de flexo-tração.

- (1) Contribuição técnica a ser apresentada no Seminário sobre Metalurgia Física e Tratamentos Térmicos da Comissão de Metalurgia Física e Tratamentos Térmicos (CONFIT) da ABM, Rio de Janeiro, 4 e 5 de Maio de 1989.
- (2) Membro da ADM. Eng. Mec., M.Sc., Prof. Assistente do Departamento de Engenharia de Construção de Máquinas da UFMG, Belo Horizonte, MG.
- (3) Membro da ADM. Eng. Met., atualmente Assistente Técnico, Dept. CQ, Belgo Mineira Bekaert, Vespasiano, MG.
- (4) Membro da ABM. Eng. Mec., M.Sc., Dr. Eng., Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Belo Horizonte, MG.