

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLUBILIZAÇÃO TEMPERATURA E TEMPO DE ENCHARQUE NA T_{nr} DE UM AÇO MICROLIGADO AO NB, V, E TI

Camilla Pessanha Schiavo¹
Berenice Mendonça Gonzalez²
Antônio Adel dos Santos³
Kleiner Marques Marra⁴

Resumo

Foi investigado o efeito da temperatura e do tempo de encharque na solubilização de elementos V, Nb e Ti em aços microligados, utilizando-se análise termodinâmica e determinação experimental da temperatura de não-recristalização, T_{nr} . Verificou-se que a solubilização é dependente da temperatura e do tempo, e dentre os três elementos, o nióbio é que controla a solubilização em condições usuais do reaquecimento de placa. A determinação da T_{nr} também pode ser uma forma indireta de avaliação da solubilização.

Palavras-chave: Aços microligados; T_{nr} ; Dissolução; Precipitados.

INFLUENCE OF SOLUBILIZATION PARAMETERS: SOAKING TEMPERATURE AND TIME, ON T_{nr} OF MICROALLOYED (NB, V AND TI) STEEL

Abstract

In this study the effect of soaking temperature and time on the dissolution of elements V, Nb and Ti in microalloyed steels was investigated, using thermodynamic analysis and experimental determination of T_{nr} . It was found that the dissolution is dependent on temperature and time, niobium being the controlling factor of the solubility in usual conditions of slab reheating, and also that the T_{nr} can be used as an indirect evaluation of solubilization.

Key words: Microalloyed steels; Non-recrystallization temperature; Dissolution; Precipitates.

I INTRODUÇÃO

Aços de alta resistência mecânica processados em linhas de chapas grossas são usualmente microligados ao V, Nb e Ti e normalmente destinados à fabricação de tubos para transporte de óleo e gás. Além de possuírem alta resistência mecânica, adequada resistência ao impacto e boa soldabilidade, esses materiais devem ainda apresentar resistência à fragilização por hidrogênio.

A alta resistência mecânica é obtida por endurecimento por precipitação e, também, pelo refino de grão obtido por laminação a quente controlada, que é realizada em duas etapas: desbaste e acabamento. Na etapa de desbaste ocorre o refino de grão devido à recristalização da austenita. A etapa de acabamento também é realizada

na região austenítica, porém em temperaturas abaixo da temperatura de não recristalização (T_{nr}). Nessa segunda etapa, a austenita não recristaliza e acumula deformação a cada passe, aumentando assim o número de sítios para a posterior nucleação da ferrita.

O valor da T_{nr} depende principalmente do teor dos elementos microligantes Nb, Ti, e V em solução sólida na austenita,⁽¹⁾ sendo a efetividade de cada elemento decrescente nesta ordem. Como a dissolução dos microligantes durante o processo de reaquecimento depende da temperatura e da composição química inicial do aço, também a T_{nr} será função destas variáveis. Adicionalmente, Bai et al.⁽²⁾ mostram que a T_{nr} depende da escala de deformações e taxas de deformação por passe.

¹ Membro da ABM, Engenheira Metalurgista, M.Sc., Diretoria de Pesquisa e Inovação da Usiminas, Rua Professor José Vieira de Mendonça, nº 3011, Bairro Engenho Nogueira, Cep 31310-260, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: camilla.schiavo@usiminas.com

² Bacharel em Física, D.Sc., UFGM, Av. Antônio Carlos, 6627, Escola de Engenharia-Bloco II, Sala 2639, Campus UFGM, Cep 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: gonzalez@demet.ufmg.br

³ Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, D.Sc., Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Av. Pedro Linhares Gomes, nº 5431, Bairro Usiminas, Cep 35160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: antonio.adel@usiminas.com

⁴ Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, D.Sc., Diretoria de Pesquisa e Inovação da Usiminas, Rua Professor José Vieira de Mendonça, nº 3011, Bairro Engenho Nogueira, Cep 31310-260, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: kleiner.marra@usiminas.com

Os elementos microligantes adicionados ao aço retardam o processo de recristalização da austenita durante a laminação controlada. A efetividade desse atraso depende do elemento e da forma como ele se encontra no aço, em solução sólida ou sob a forma de precipitados. Para que os mecanismos de endurecimento por precipitação e por refino de grão tenham sua efetividade maximizada é necessário que a solubilização dos elementos microligantes, especialmente Nb e V, seja completa ou quase completa.

Portanto, um fator chave para o processamento de aços microligados de alta resistência por laminação controlada é a solubilização dos elementos de microliga, que ocorre durante a etapa de reaquecimento de placas.

Assim, é objetivo deste trabalho avaliar as condições de tempo e temperatura na solubilização dos elementos microligantes Nb, Ti e V, em um aço de alta resistência mecânica, aplicando-se duas metodologias: (a) análise termodinâmica; (b) avaliação indireta por meio de determinações da T_{nr} .

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Foi avaliada uma amostra de placa industrial de um aço microligado ao Nb, Ti e V, normalmente processado como produto “Chapa Grossa”. A amostra foi coletada antes da etapa de reaquecimento, na extremidade da placa de origem. A composição química desse aço é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço avaliado (% em massa)

C	Mn	Si	Nb	V	Ti	N
0,12	1,52	0,30	0,058	0,035	0,019	0,0062

2.2 Análise Termodinâmica

Foram aplicadas equações de produto de solubilidade para cálculo da temperatura de solubilização, utilizando-se dois grupos de equações, um apresentado por Palmiere, Garcia e DeArdo⁽³⁾ e outro por Gladman.⁽⁴⁾ Estes autores compilaram um conjunto de equações de produto de solubilidade para dissolução de cada tipo de precipitado de Nb, Ti e V. Também foi usado o *software* Thermo-Calc® para análise da dissolução.

2.3 Determinação da T_{nr}

Para determinação da T_{nr} foram realizados ensaios de torção de acordo com a metodologia proposta por Boratto et al.,⁽⁵⁾ num simulador termomecânico Gleeble 3500. Os corpos de prova foram retirados a

¼ da espessura, com as seguintes dimensões: 165 mm de comprimento total, 20 mm de comprimento útil (seção resistente), 15 mm de diâmetro fora do comprimento e 8 mm de diâmetro no comprimento útil.

O ciclo termomecânico aplicado para determinação da T_{nr} é mostrado na Figura 1. Numa primeira etapa foi avaliado o efeito da temperatura na T_{nr} , sendo para isso mantido o tempo de encharque em 5 min. Após o encharque foram aplicadas deformações de 0,25 por passe com uma taxa de deformação igual a 1 s^{-1} . Numa segunda investigação testou-se o efeito do tempo na dissolução. Assim, as temperaturas de encharque escolhidas foram 1.100°C e 1.200°C , variando-se o tempo de encharque em 10 minutos e 15 minutos.

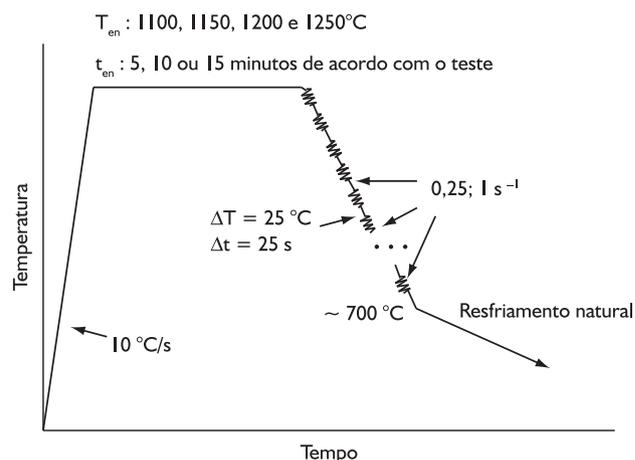


Figura 1. Representação esquemática dos ciclos de torção realizados na Gleeble.

No ensaio de torção foram medidas a tensão e a deformação equivalentes e geradas as curvas tensão-deformação para todas as condições de ensaios previstas. Foi, então, calculada a tensão média em cada passe, representada em gráficos em função do inverso da temperatura do passe. Estes gráficos permitiram a determinação da T_{nr} .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise termodinâmica

Aplicando-se os produtos de solubilidade para o aço estudado, obtêm-se as temperaturas de dissolução dos diferentes precipitados de Nb, V e Ti (Tabela 2). Os valores referem-se à média e ao desvio padrão dos resultados de cálculos com a aplicação do conjunto de equações apresentada para cada precipitado.

Na Tabela 3 mostra-se, esquematicamente, quais precipitados estariam dissolvidos em cada temperatura de encharque considerando-se o produto de solubilidade. Nota-se que os precipitados de V (VC e VN) e Nb (NbN)

Tabela 2. Ordem de dissolução dos precipitados baseada nos valores médios calculados pelas equações de produto de solubilidade

Precipitado	VC	VN	NbN	TiC	NbC	Nb(CN)	TiN
Ref. (3)	-	-	1.097 ± 74	-	1.198 ± 59	1.229 ± 64	-
Ref. (4)	852 ± 68	909 ± 12	1.060 ± 31	1.146 ± 168	1.164 ± 61	-	1.630 ± 42

"-": valor não calculado devido à ausência de equações disponíveis para esse tipo de precipitado nas referências (3) e (4).

Tabela 3. Estimativa de dissolução dos precipitados formados na placa após reaquecimento a diferentes temperaturas

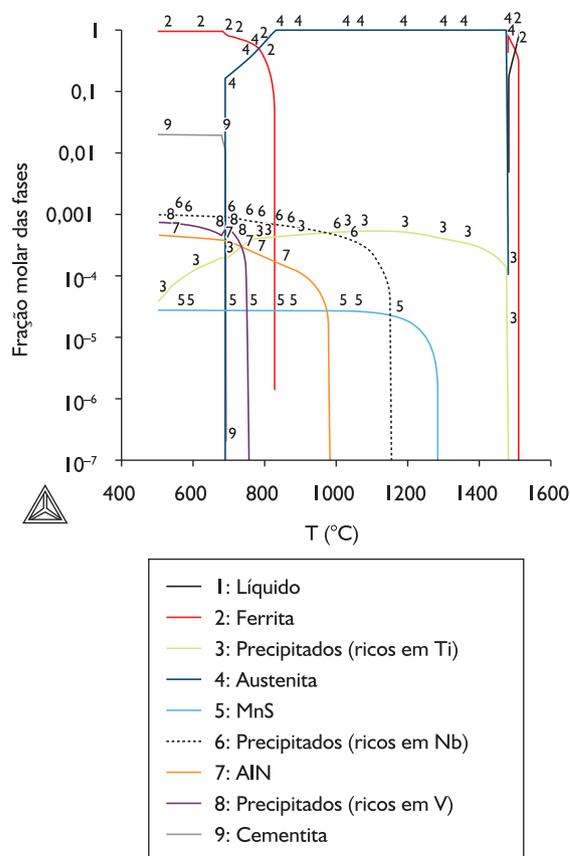
Ref.	$T_{\text{encharque}}, ^\circ\text{C}$							
	1100		1150		1200		1250	
	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)
Ppt.								
VC	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
VN	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-
NbN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TiC	■	-	✓	-	✓	-	✓	-
NbC	■	■	■	■	✓	✓	✓	✓
Nb(CN)	-	■	-	■	-	■	-	✓
TiN	■	-	■	-	■	-	■	-

Legenda- (3): Referência 3; (4): Referência 4; "-": valor não calculado devido ausência de equações disponíveis para esse tipo de precipitado na referência; "✓": haverá dissolução do precipitado segundo o autor referenciado; "■" não haverá dissolução do precipitado.

se dissolvem em temperaturas mais baixas, não sendo determinantes para as condições de reaquecimento uma vez que a temperaturas da ordem de 1.100°C já estariam dissolvidos. A condição de reaquecimento é determinada, então, pela dissolução dos precipitados TiC, NbC e Nb(CN) e também pela equação de solubilidade que se está considerando. Como, de maneira geral, os precipitados de Ti dissolvem-se para temperaturas bem superiores aos dos dois outros microligantes, e considerando-se os precipitados ricos de Nb presentes, a melhor condição de solubilização seria obtida a 1.250°C para as temperaturas e equações testadas.

A análise da dissolução de precipitados utilizando o *software* Thermo-Calc produz resultados interessantes conforme apresentado na Figura 2. Ao contrário do produto de solubilidade, que prevê precipitados clássicos de estequiometria fixa em toda faixa de temperatura, o Thermo-Calc prevê precipitados complexos com estequiometria variável ao longo da faixa de temperatura. Além disso, a solubilização é um processo que se inicia em temperaturas bem abaixo daquelas previstas pelo produto de solubilidade.

Conhecendo-se a fração molar dos precipitados e a fração molar dos elementos que os compõem a diferentes temperaturas, ambos fornecidos pelo Thermo-Calc, foram calculadas as concentrações de Ti, Nb, C e N que estariam presentes na forma de precipitados complexos e as concentrações que restariam em solução sólida após reaquecimento.⁽⁶⁾ Na Figura 3 é mostrada a evolução dos elementos em solução sólida, em função da temperatura. Observa-se que a dissolução avança como o aumento da

**Figura 2.** Gráficos obtidos com o software Thermo-Calc® para o aço estudado.

temperatura. O teor de Nb do aço é de 0,058%. Após encharque a 1.200°C, ficarão 0,048% desse elemento em solução sólida significando que o restante, 0,010%, estará na forma de precipitado.

Isto também se aplica para os outros elementos e para as outras temperaturas. A concentração de Ti dissolvida não chega a 50% de seu teor inicial. Apenas pequena parte do C inicial encontra-se na forma de precipitado, e o N, além do baixo teor, permanece quase todo na forma de precipitado TiN. Assim, o Nb exerce o papel dominante no processo de solubilização.

3.2 Análise da T_{nr}

Os valores de T_{nr} são tomados a partir do ponto de mudança de inclinação das curvas tensão de deformação média versus temperatura.

O efeito da temperatura de encharque sobre a T_{nr} , entre 1.100°C e 1.250°C, é apresentado na Tabela 4, para tempo de encharque de 5 min. Nota-se que o aumento da temperatura de encharque acarreta significativo aumento

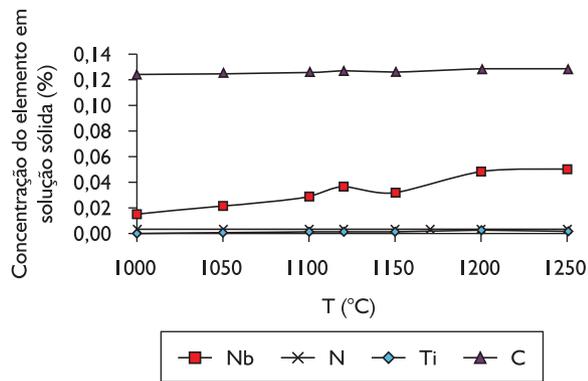


Figura 3. Evolução da concentração dos elementos presentes em solução sólida com a temperatura de encharque prevista pelo Thermo-Calc®.

Tabela 4. Valores de T_{nr} determinados nos ensaios de torção com tempo de encharque de 5 minutos

$T_{encharque}$, °C	T_{nr} , °C
1.100	882
1.150	892
1.200	945
1.250	953

da T_{nr} . Isto pode ser explicado pela maior dissolução dos precipitados, conforme mostrado pela análise termodinâmica. O aumento da dissolução gera maior força motriz para a precipitação durante a deformação, induzindo o retardo da recristalização em temperaturas mais elevadas.

O efeito do tempo de encharque na T_{nr} é mostrado na Tabela 5, para as condições estudadas. Não se consegue perceber a mesma tendência observada na Tabela 4, em que ocorre elevação da T_{nr} com a temperatura. Mesmo que os resultados obtidos apresentassem essa tendência, poderia ser afirmado que o efeito do tempo é, relativamente, muito menos significativo que o da temperatura.

A Figura 4 sumariza o efeito combinado dos elementos Nb e Ti em solução sólida na T_{nr} . As concentrações destes elementos é determinada com o auxílio do Thermo-Calc, partindo-se das fases e de suas concentrações presentes em cada temperatura. Por meio de cálculos estequiométricos, foram determinadas as quantidades remanescentes dos elementos Nb, Ti, C e N presentes em solução sólida nas temperaturas utilizadas nos ensaios de torção,⁽⁶⁾ de forma similar à realizada na Figura 3. Ficou bem evidenciado que a T_{nr} aumenta à medida que é incrementada a concentração em solução sólida dos elementos microligantes.

Tabela 5. Efeito do tempo de encharque nos valores de T_{nr} para as condições estudadas

$T_{encharque}$, °C	1.100°C			1.200°C		
$t_{encharque}$, min	5	10	15	5	10	15
T_{nr} , °C	882	892	884	945	918	937

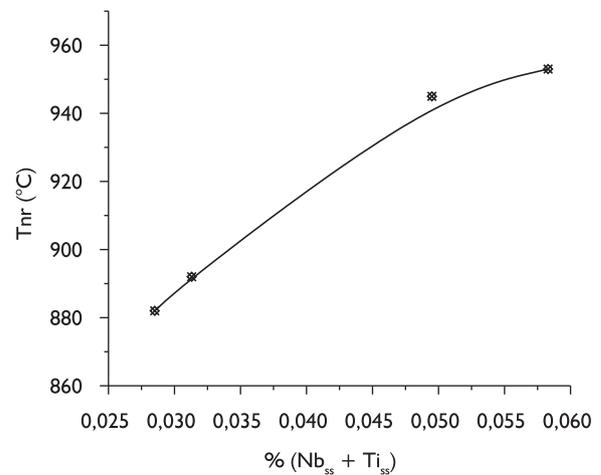


Figura 4. Evolução da T_{nr} com os teores de Nb e Ti em solução sólida.

4 CONCLUSÕES

Existem várias equações de produto de solubilidade para prever a temperatura de dissolução de precipitados de elementos de Nb, V e Ti durante o encharque de aços microligados. Pelas análises realizadas, compreende-se que tais equações fornecem valores aproximados da temperatura em que praticamente se completa a dissolução do precipitado. Verifica-se, ainda, considerável variabilidade entre os valores fornecidos por estas equações, para um mesmo precipitado.

A análise termodinâmica usando-se o Thermo-Calc® mostrou que a dissolução se inicia em temperatura bem abaixo daquela prevista pelo produto de solubilidade, e avança com o aumento da temperatura. O vanádio se dissolve em temperaturas relativamente baixas, da ordem de 800°C. Os precipitados ricos em Nb se dissolvem em temperaturas intermediárias, entre 1.050°C e 1.250°C, e exercem papel determinante na solubilização. Os precipitados ricos em Ti praticamente não se dissolvem em temperaturas usuais de processo, sendo atingindo a dissolução somente em temperaturas de cerca de 1.400°C.

Os resultados obtidos permitem concluir que a T_{nr} está associada à solubilização dos elementos de microliga. Adicionalmente, mostra-se que a temperatura de encharque, entre 1.100°C e 1.250°C, exerce efeito significativo na T_{nr} , aumentando este valor. Por outro lado, o tempo de encharque parece ter apenas ligeira influência ao aumentar a T_{nr} , embora alguns resultados tenham contrariado esta tendência.

Estes resultados são importantes para o cálculo da T_{nr} pela aplicação de equações algébricas, pois ela depende, além da composição química do aço, da temperatura e do tempo de encharque e das condições de deformação. Quando se consideram as equações da literatura para o cálculo da T_{nr} deve-se levar em conta o teor dos elementos de microliga em solução sólida e não os valores de composição nominal.

REFERÊNCIAS

- 1 BARBOSA, R. A. N. M.; BORATTO, F. J. M.; SANTOS, D. B. *Fundamentos da laminação controlada*. Belo Horizonte: UFMG, 1989.
- 2 BAI, D. Q. et al. Effect of deformation parameters on the no-recrystallization temperature in Nb-bearing steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 24A, n. 10, p. 2151-9, Oct. 1993.
- 3 PALMIERE, E. J.; GARCIA, C. I.; DeARDO, A. J. Compositional and microstructural changes wich attend reheating and grain coarsening in steels containing niobium. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 25A, n. 2, p. 277-85, Feb. 1994.
- 4 GLADMAN, T. *The physical metallurgy of microalloyed steels*. London: The Institute of Materials, 1997.
- 5 BORATTO, F. et al. Efeito da composição química nas temperaturas críticas para laminação controlada de aços micro-ligados. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 43, 1988, Belo Horizonte. *Anais...* São Paulo: ABM, 1988. p. 183-96.
- 6 SCHIAVO, C. P. *Estudo da solubilização do Nb em aços microligados durante o reaquecimento de placas*. 2010. 148 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Metalúrgica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

Recebido em: 5/1/2011

Aprovado em: 11/3/2011