

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE REAQUECIMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇO MICROLIGADO PROCESSADO POR LAMINAÇÃO CONTROLADA¹

Nissandro Domingues²
Carlos Salaroli de Araújo³
Sérgio Luiz Vieira⁴

Resumo

Foi verificada a influência do tempo de reaquecimento de placas nas propriedades mecânicas de aço microligado processado por laminação controlada. Amostras desse aço, extraídas de placa lingotada em escala industrial, foram reaquecidas a 1250°C com tempos de encharque entre 20 e 190 minutos, e em seguida, processadas por laminação controlada em escala piloto. Verificou-se que a resistência mecânica em tração e a energia absorvida em impacto Charpy do aço aumentam com o tempo de encharque. As alterações nessas propriedades mecânicas foram atribuídas principalmente às variações do tamanho do grão ferrítico e ao endurecimento por precipitação.

Palavras-chave: Tempo de encharque; Propriedades mecânicas; Aço microligado; Laminação controlada.

INFLUENCE OF THE REHEATING TIME ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF MICROALLOYED STEEL PROCESSED BY CONTROLLED ROLLING

Abstract

The influence of the reheating time of slabs in mechanical properties of microalloyed steel processed by controlled rolling was verified. Samples of this steel were extracted from slab casted in industrial scale, reheated at 1250°C using soaking times between 20 and 190 min and processed by controlled rolling in pilot scale. It was verified that the tensile mechanical resistance and Charpy test absorbed energy increase with the soaking time. The changes in these mechanical properties were caused mainly by variations in ferrite grain size and by precipitation strengthening mechanism.

Key words: Soaking time; Mechanical properties; Microalloyed steel; Controlled rolling.

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

³ Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M. Sc., Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁴ Membro da ABM, Técnico Metalurgista, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

1 INTRODUÇÃO

A laminação controlada envolve um rigoroso controle das condições de deformação a quente, visando proporcionar maiores resistência mecânica e tenacidade aos aços por meio de refino de grão e controle da precipitação de elementos microligantes. Ela é realizada em duas etapas denominadas desbaste e acabamento. No desbaste, os passes de laminação são aplicados acima da temperatura de não-recristalização (T_{nr}), ao passo que no acabamento, abaixo da T_{nr} . A temperatura de não-recristalização é a temperatura abaixo da qual o material não se recristaliza no tempo disponível entre os passes de laminação. Aços processados por laminação controlada normalmente são microligados ao Nb, elemento que atrasa a recristalização da austenita. Esse atraso é causado pela precipitação de partículas de Nb(C,N),⁽¹⁾ o que resulta em uma microestrutura austenítica deformada e com grande número de sítios para nucleação da ferrita (contornos dos grãos austeníticos e outros defeitos internos), proporcionando refino microestrutural no produto final.

Para o sucesso da laminação controlada, é fundamental que a maior parte do Nb esteja em solução sólida na austenita e disponível para se precipitar durante a laminação. A quantidade de Nb em solução sólida, por sua vez, é determinada pelas condições de reaquecimento de placas. Quanto maiores forem a temperatura e o tempo de reaquecimento, maior será a quantidade de Nb (e, eventualmente, outros microligantes como o Ti e o V) em solução.

Precipitados ricos em Nb e Ti normalmente possuem morfologia dendrítica na estrutura bruta de solidificação de aços microligados, conforme mostrado na Figura 1. Esses precipitados tendem a apresentar-se mais concentrados nas regiões interdendríticas da estrutura de solidificação. Adicionalmente, exibem gradiente de concentração de elementos químicos ao longo de suas dimensões, mostrando-se mais enriquecidos em Ti e N nas regiões centrais e em Nb e C nas periféricas.⁽²⁾

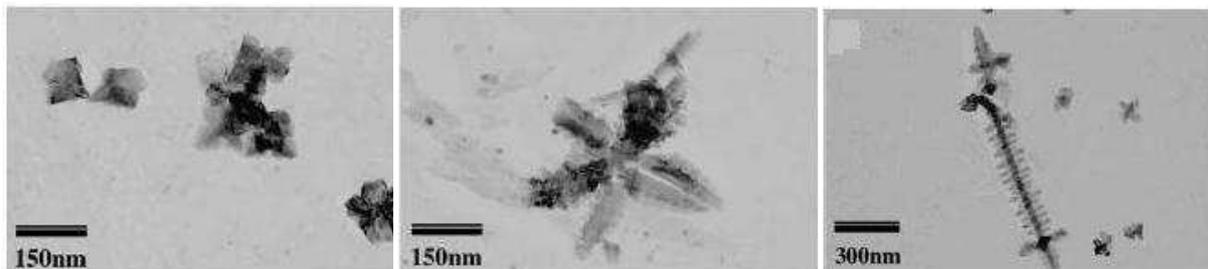


Figura 1 – Morfologias apresentadas por precipitados do tipo (Ti,Nb)(C,N) na estrutura bruta de solidificação de um aço 0,06%C-1,53%Mn-0,03%V-0,039%Nb-0,018%Ti-0,0040%N.⁽²⁾

Durante o reaquecimento, a composição química dos precipitados é alterada. Na Figura 2, está mostrado o resultado de simulação conduzida em *software Thermo-Calc*[®] para um aço microligado ao Nb, Ti e V. Nota-se que a fração de C, N, Ti, V e Nb, presentes em carbonitretos, é reduzida com o aumento da temperatura. A concentração em massa de V nesses precipitados diminui acentuadamente para temperaturas inferiores às que se verificam para o Nb, e a concentração deste último elemento reduz acentuadamente para temperaturas inferiores às observadas para o Ti. Acima de 1.100°C aproximadamente, os carbonitretos apresentam maior concentração em massa de Ti e N e, para temperaturas superiores a 1.300°C, pode-se considerar ar que esses precipitados são constituídos essencialmente por esses dois elementos.

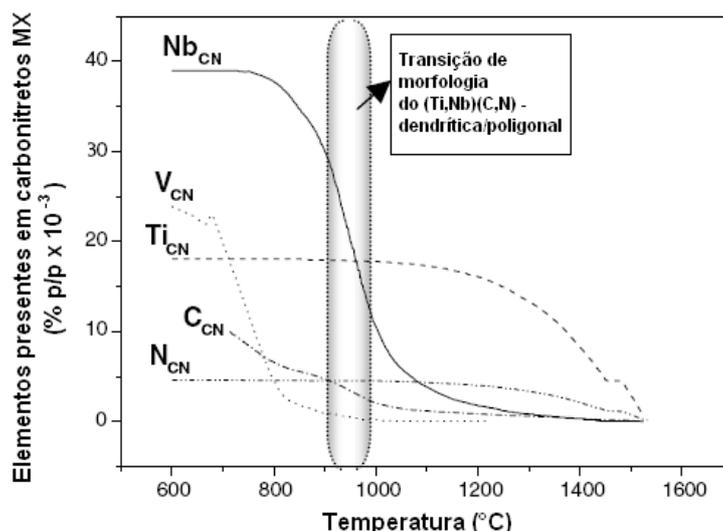


Figura 2 – Resultado de simulação conduzida em *software Termo-Calc*[®] para um aço microligado ao Nb, Ti e V.⁽³⁾

Essa mudança na composição química é também acompanhada de uma alteração na morfologia dos precipitados. Essas partículas, antes dendríticas, tendem a assumir aspecto poligonal com o aumento da temperatura. Na Figura 2, também pode ser vista a faixa de temperaturas, em torno de 950°C, em que os carbonitreto deixam de exibir morfologia dendrítica, para exibirem forma poligonal. Uma vez presentes em solução na austenita, os elementos solubilizados reprecipitam durante a laminação na forma de partículas mais finas, esféricas e homoganeamente distribuídas em relação à condição verificada na estrutura bruta de solidificação.

A literatura é rica em informações acerca da influência da temperatura de reaquecimento na dissolução desses precipitados, entretanto, praticamente não existem referências sobre a cinética das reações de dissolução. Foi demonstrado em estudo recente,⁽⁴⁾ que o encharque por 1 h a 1.225°C é suficiente para a dissolver praticamente todo o Nb precipitado em um aço 0,10%C-1,42%Mn-0,046%Al-0,045%Nb-0,052%V-0,0080%N. No entanto, informações sobre o efeito do tempo de encharque na dissolução de precipitados e nas propriedades mecânicas do produto final, especialmente daqueles processados por laminação controlada, são menos comuns.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras de 135 mm de espessura extraídas do centro da espessura de placa de 252 mm de espessura, lingotada em escala industrial. A composição química do aço pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço microligado utilizado (%p/p)

| C | Mn | Si | Ti | Nb | V | Al | N |
|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 0,10 | 1,57 | 0,23 | 0,011 | 0,050 | 0,036 | 0,028 | 0,0092 |

As amostras foram reaquecidas a 1.250°C empregando-se tempos de encharque de 20 minutos, 30 minutos, 40 minutos, 70 minutos, 100 minutos, 130 minutos, 160 minutos e 190 minutos. Após serem desenfundadas, elas foram

processadas por laminação controlada, visando a obtenção de chapas de 14 mm de espessura, deformação verdadeira (ϵ) de 2,26.

A T_{nr} foi calculada por meio da equação 1.⁽⁵⁾

$$T_{nr} (\text{°C}) = 887 + 464\%C + [6445\%Nb - 644\sqrt{\%Nb}] + [732\%V - 230\sqrt{\%V}] + 890\%Ti + 363\%Al - 357\%Si \quad [1]$$

Obteve-se o valor de 1.033°C para a T_{nr} . Assim, foi definido que o último passe de desbaste fosse realizado a 1.100°C e o primeiro passe de acabamento, a 950°C, garantindo-se a etapa de acabamento inteiramente na região de não-recristalização. O esquema de processamento pode ser visto na Figura 3.

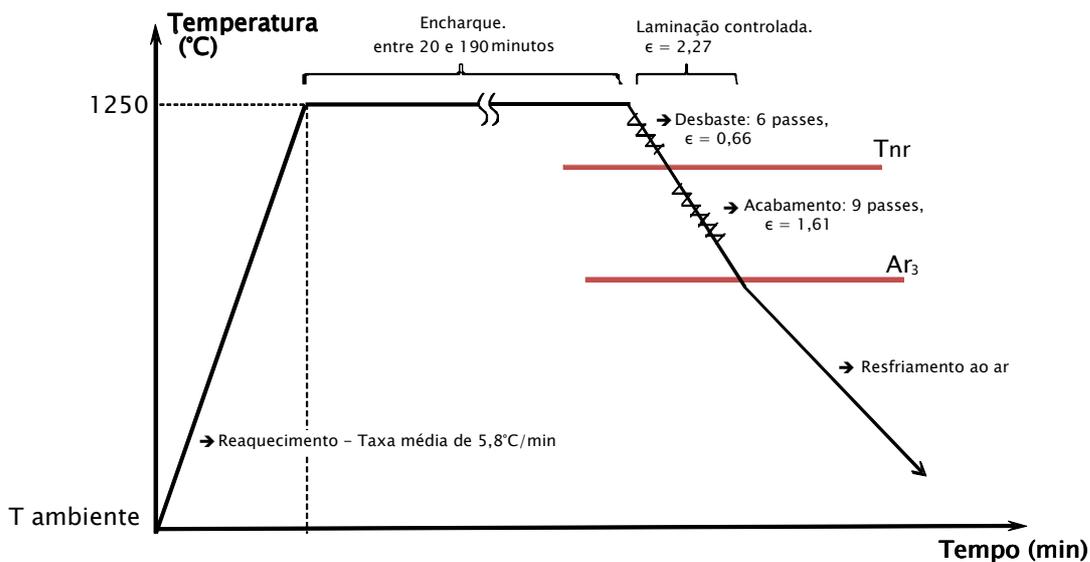


Figura 3 – Esquema de processamento empregado.

Para cada condição de reaquecimento empregada, mediu-se o tamanho de grão austenítico (TGA). Essa análise foi conduzida em local a 1 mm da superfície de amostras temperadas após serem desenfundadas.

Das chapas laminadas foram retiradas amostras para análise metalográfica. Foram identificados os constituintes microestruturais e medidas suas frações volumétricas (f_v). Mediu-se o tamanho de grão ferrítico (TGF) conforme procedimento descrito na norma ASTM E112.⁽⁶⁾ Essas análises foram conduzidas a $\frac{1}{4}$ da espessura em seção paralela ao sentido de laminação e ao plano da espessura da chapa.

Ensaio de tração foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos do tipo padrão de 50,8 mm de base de medida, orientados no sentido de laminação. Ensaio de impacto Charpy-V foram realizados a -40°C em corpos-de-prova do tipo padrão, orientados na direção transversal à de laminação. Ambos os tipos de corpos-de-prova estão especificados na norma ASTM A370.⁽⁷⁾

3 RESULTADOS

3.1 Evolução do Tamanho de Grão Austenítico Durante Encharque a 1.250°C

A evolução do tamanho do grão austenítico em função do tempo de encharque pode ser vista na Figura 4. Campos representativos dos grãos austeníticos para alguns tempos de encharque podem ser vistos na Figura 5.

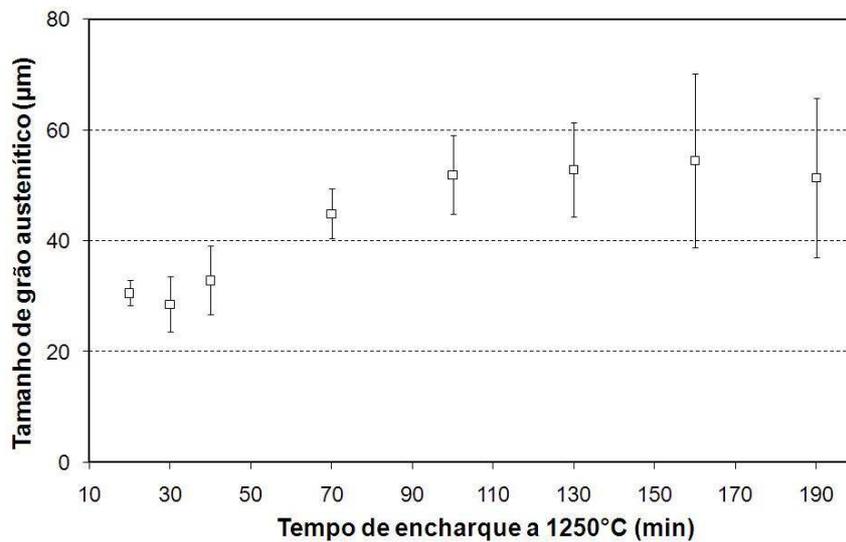
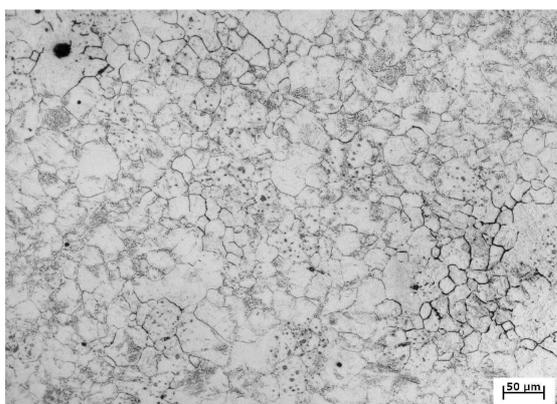
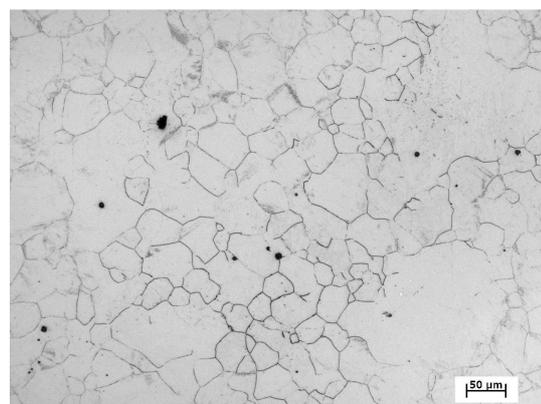


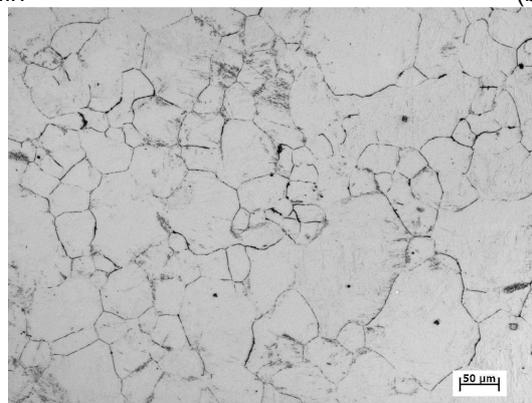
Figura 4 – Evolução de TGA em função do tempo de encharque.



(a) 20 min



(b) 100 min



(c) 160 min

Figura 5 – Aspecto dos grãos austeníticos para distintos tempos de encharque. Ataque com reagente à base de ácido pícrico.

3.2 Microestrutura e Propriedades Mecânicas das Chapas

A microestrutura das chapas mostrou-se constituída por ferrita ($f_f = 85\%$) e perlita ($f_p = 15\%$). Os resultados das medições de TGF em função do tempo de encharque estão plotados na Figura 6. O aspecto da microestrutura das chapas para alguns tempos de encharque empregados está mostrado na Figura 7.

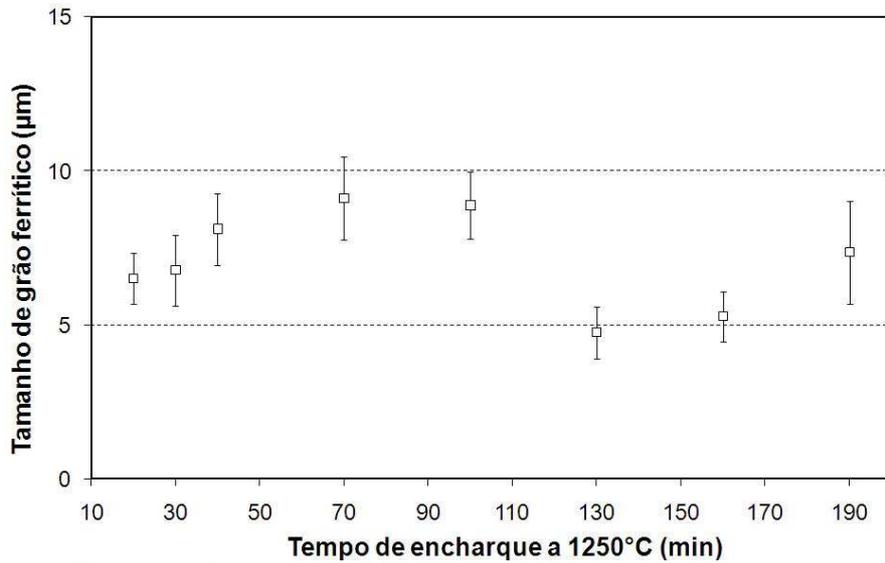
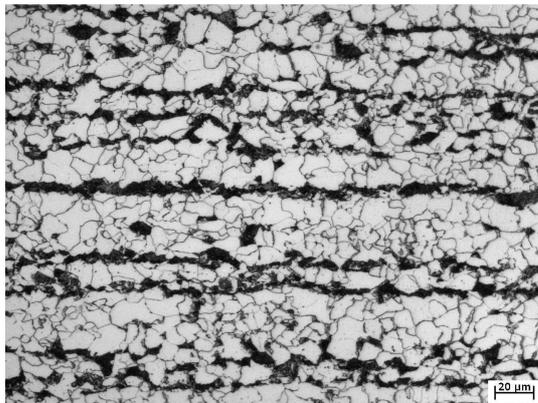
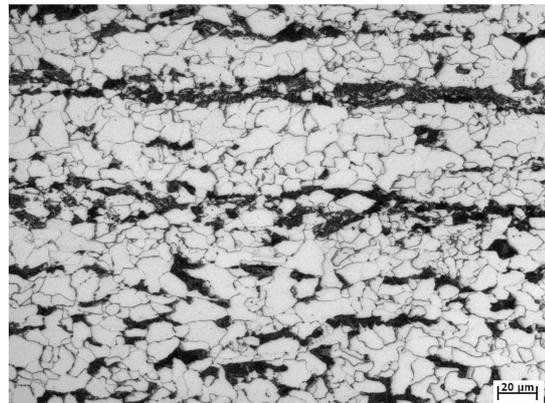


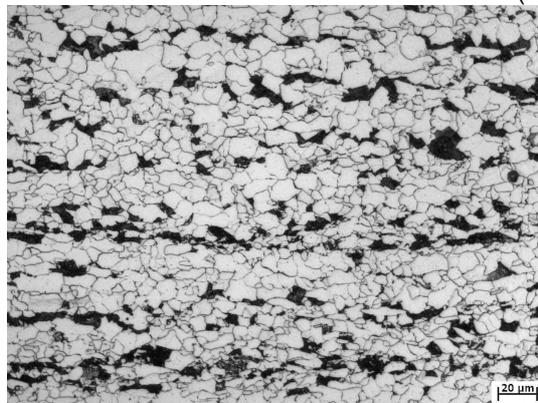
Figura 6 – Evolução de TGF em função do tempo de encharque.



(a) 20 min



(b) 100 min



(c) 160 min

Figura 7 – Microestruturas após laminação, para distintos tempos de encharque. Ataque com reagente à base ácido nítrico.

Os valores das propriedades mecânicas em tração estão plotados em função do tempo de encharque na Figura 8.

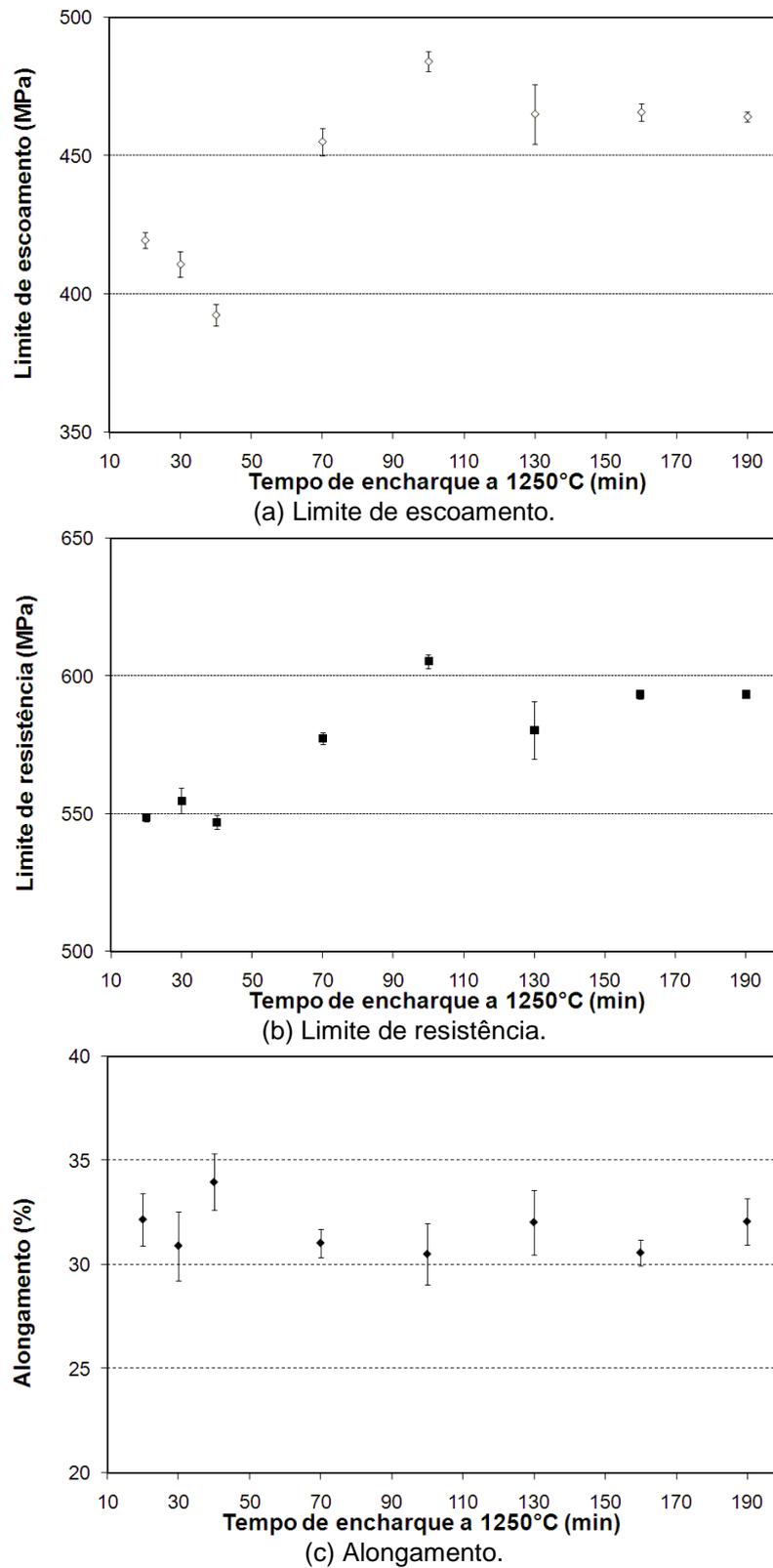


Figura 8 – Propriedades mecânicas em tração em função do tempo de encharque.

Os valores de energia absorvida por impacto Charpy a -40°C estão plotados em função do tempo de encharque na Figura 9.

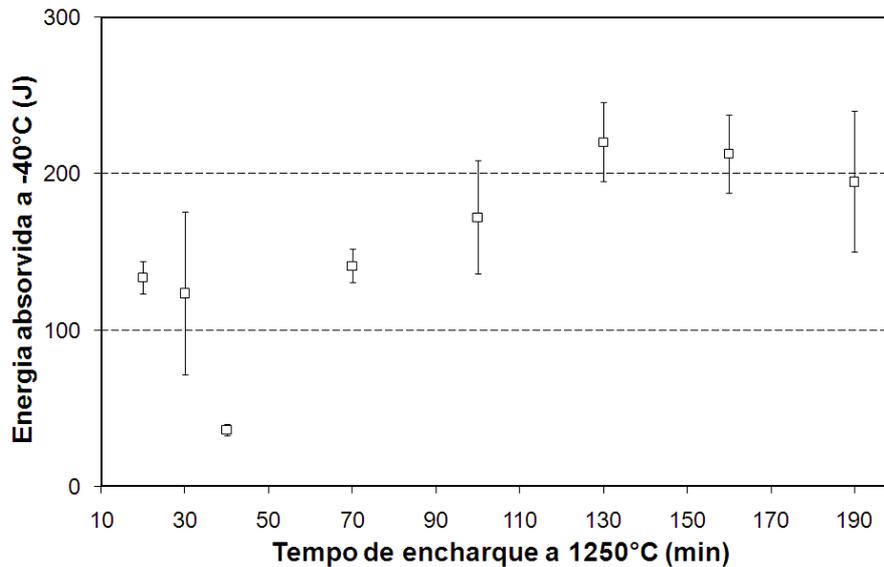


Figura 9 – Energia absorvida por impacto Charpy a -40°C em função do tempo de encharque.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Alterações Microestruturais Durante Austenitização a 1.250°C

O tamanho de grão austenítico variou consideravelmente com o tempo de encharque (Figura 4). Entre 20 minutos e 40 minutos, as alterações em TGA não foram significativas, pois, ainda que o potencial para crescimento de grão fosse elevado, é suposto que não tenham sido dissolvidos muitos precipitados, de modo que grande quantidade deles permaneceu na matriz restringindo a mobilidade dos contornos de grão austeníticos.

Entre 40 minutos e 100 minutos, os precipitados que restringiam o crescimento do grão começaram supostamente a se dissolver, o que provocou notável aumento de TGA em razão da maior mobilidade que os contornos de grão adquiriram. Para tempos entre 100 minutos e 190 minutos, novamente não foi observada alteração de TGA devido, possivelmente, à restrição do crescimento dos grãos imposta pelos precipitados que permaneceram no aço.

4.2 Microestrutura das Chapas

As alterações mais significativas foram observadas no tamanho do grão ferrítico (Figura 6). Como os fenômenos de precipitação influenciam o tamanho do grão ferrítico, as hipóteses a seguir podem ser sugeridas para explicar os resultados obtidos.

Com o prolongamento do encharque, aumenta-se a quantidade de Nb em solução na austenita, o que tende a provocar maior precipitação de Nb(C,N) durante a laminação, favorecendo o refino do grão ferrítico. Todavia, entre 20 minutos e 100 minutos de encharque, esse refino não foi observado. É possível que, nesse intervalo de tempo, os carbonitretos de Nb(C,N) não tenham precipitado na faixa de temperaturas em que são efetivos para atrasar a recristalização. Adicionalmente, com a maior quantidade de elementos em solução resultante do aumento do tempo de encharque, os precipitados formados durante a laminação podem ter crescido e,

eventualmente, coalescido e, como consequência, perderam a eficiência em controlar a migração dos contornos de grão ferríticos após a transformação, o que justifica o aumento de TGF.

Entre 100 minutos e 160 minutos de encharque, supostamente ocorreu precipitação de Nb(C,N) na faixa de temperaturas em que são efetivos para atrasar a recristalização, e o efeito dessa precipitação sobre o refino do grão ferrítico foi predominante, o que justifica os menores valores de TGF obtidos nesse intervalo de tempo.

Para tempos maiores que 160 minutos, nota-se novamente aumento do grão ferrítico. Embora os carbonitretos de Nb, precipitados durante a laminação, possam ter contribuído para atrasar a recristalização durante o acabamento, é provável que após a transformação, eles tenham crescido e, eventualmente, coalescido, tornando-se ineficientes para restringir a migração dos contornos de grão ferríticos. Como consequência, esses contornos adquiriram maior mobilidade, o que resultou no aumento do valor de TGF.

4.3 Propriedades Mecânicas das Chapas

As propriedades mecânicas em tração (Figura 8) foram influenciadas pelas alterações no tamanho do grão ferrítico e pela componente de endurecimento por precipitação. Entre 20 minutos e 40 minutos de encharque, o tempo disponível para solubilização pode não ter sido suficiente para promover uma intensa precipitação de partículas durante a laminação. Consequentemente, a contribuição para as propriedades mecânicas por parte da componente de endurecimento por precipitação pode não ter sido considerável. No intervalo de tempo em questão, as variações na resistência mecânica podem ter sido mais influenciadas pelo aumento do grão ferrítico, o que resultou na queda do limite de escoamento, mas sem alterar significativamente o limite de resistência.

Entre 40 minutos e 100 minutos, houve supostamente maior solubilização de elementos durante o encharque, favorecendo que maior quantidade de partículas fosse precipitada na laminação. Nesse intervalo de tempo, a contribuição por parte do endurecimento por precipitação na resistência mecânica pode ter sido considerável, o que justifica o aumento tanto no limite de escoamento quanto no de resistência.

Para tempos de encharque maiores que 100 minutos, nota-se queda na resistência mecânica do aço. Embora tenha sido verificado refino de grão, essa queda na resistência pode ser atribuída aos tamanhos maiores e, eventualmente, ao coalescimento que as partículas precipitadas supostamente sofreram durante a laminação.

É interessante destacar que, ainda que o tempo de encharque tenha influenciado a resistência mecânica do aço, não foram verificadas alterações significativas no alongamento.

Variações no tempo de encharque alteraram consideravelmente a energia absorvida em impacto Charpy do aço (Figura 9). É provável que os resultados de E_{abs} tenham sido influenciados tanto pelas variações no tamanho do grão ferrítico quanto pelas supostas alterações na morfologia e distribuição dos precipitados na matriz. Contudo, é possível que, para tempos de encharque em torno de 40 minutos, o menor valor de E_{abs} tenha sido mais influenciado pelo aumento do grão ferrítico, ao passo que os maiores valores de E_{abs} , obtidos entre 130 minutos e 160 minutos de encharque, pelos menores valores de TGF.

5 CONCLUSÕES

O grão austenítico tende a crescer com o prolongamento do encharque até cerca de 100 minutos. Acima deste valor, as alterações no seu tamanho médio não são significativas.

A principal alteração na microestrutura das chapas foi no tamanho de grão ferrítico (TGF). Observou-se que o valor de TGF aumenta com o prolongamento do encharque até 100 minutos. Entre 100 minutos e 160 minutos, o grão ferrítico diminui e acima de 160 minutos, o valor de TGF aumenta novamente. Embora não foram confirmadas neste estudo, as alterações no tamanho do grão ferrítico podem ser atribuídas à precipitação de microligantes durante a laminação, em especial do Nb.

O tempo de encharque influencia consideravelmente as propriedades mecânicas em tração e a energia absorvida por impacto Charpy de aços microligados processados por laminação controlada. A resistência mecânica e a energia por impacto Charpy-V do aço exibem uma tendência de aumento com o prolongamento do encharque. O alongamento, por sua vez, não foi influenciado pelo tempo de encharque. As alterações verificadas nessas propriedades estão associadas às variações no tamanho do grão ferrítico e, supostamente, no modo como as partículas encontraram-se distribuídas na matriz.

REFERÊNCIAS

- 1 NAGARAJAN, V., PALMIERE, E. J., SELLARS, C.M. – *Strain-induced precipitation of Nb(C,N) in austenite during multipass deformation in microalloyed steels* – 3rd International Conference on Thermomechanical Processing of Steels (TMP), September 2008, Italy.
- 2 JUN, H. J., KANG, K. B., PARK, C. G. – *Effects of cooling rate and isothermal holding on the precipitation behavior during continuous casting of Nb-Ti bearing HSLA steels*. In: Scripta Materials 48, Acta Materiala Inc. Elsevier Science Ltd., p. 1081-1086, 2003.
- 3 HONG, S. G., JUN, H. J., KANG, K. B. – *Evolution of precipitates in the Nb-Ti-V microalloyed HSLA steels during reheating*. In: Scripta Materials 48 (2003), Acta Materiala Inc. Published by Elsevier Science Ltd., p. 1201-1206, 2003.
- 4 CHAKRABARTI, D., DAVIS, C., STRANGWOOD, M. – *Development of bimodal grain structures in Nb-containing high-strength low-alloy steels during slab reheating*. In: Metallurgical and Materials Transactions, Volume 39A, p. 1963-1977, August 2008.
- 5 BARBOSA, R. A. N. M.; BORATTO, F. J. M.; SANTOS, D. B. – *Fundamentos da laminação controlada*. Belo Horizonte, Setembro de 1989.
- 6 NORMA ASTM E 112 – *Test methods for determination average grain size* – The American Society for Testing and Materials (ASTM), 2004.
- 7 NORMA ASTM A 370 – *Test methods and definitions for mechanical testing of steel products* - ASTM, Edição: 2007, Revisão: A.