

EFEITO DO TEMPO DE ENCHARQUE EMPREGADO NO TRATAMENTO DE NORMALIZAÇÃO SOBRE A MICROESTRUTURA E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS PARA VASOS DE PRESSÃO¹

Carlos Salaroli de Araújo²
José Antônio de Oliveira Torres³

Resumo

Avaliou-se a influência do tempo de encharque empregado no tratamento térmico de normalização sobre as características microestruturais e as propriedades mecânicas de duas distintas composições de aços para aplicação em vasos de pressão, sendo uma C-Mn e outra do tipo Baixa Liga, com adições de Nb, V, Ti, Cr, Ni e Mo. O aumento do tempo de encharque, tanto para o aço C-Mn quanto para o aço Baixa Liga, resultou em melhoria da homogeneidade microestrutural, com redução da intensidade da segregação central, em especial para valores acima de 1,0 min/mm de espessura. O tamanho de grão ferrítico, o grau de bandejamento e as propriedades mecânicas em tração, para ambos os aços, foram pouco influenciados pelo tempo de encharque. Para o aço Baixa Liga, os valores de energia absorvida em ensaio de impacto Charpy não foram afetados pelo tempo de encharque, ao menos para a faixa de 0,2 a 1,4 min/mm avaliada. Por outro lado, para o aço C-Mn a energia absorvida aumenta com o tempo de encharque, sendo que os melhores resultados foram obtidos para a faixa de 1,1 a 1,6 min/mm.

Palavras-chave: Normalização; Tempo de encharque; Aços para vasos de pressão.

EFFECT OF SOAKING TIME DURING NORMALIZING ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS FOR PRESSURE VESSELS

Abstract

The influence of soaking time during normalizing on microstructural characteristics and mechanical properties of two distinct compositions of steels for pressure vessel, one C-Mn and the other Low Alloy (with Nb, V, Ti, Cr, Ni and Mo additions), was evaluated. For both C-Mn and Low Alloy steels, the increase in soaking time resulted in improvement of microstructural homogeneity, accompanied by reduction in the intensity of centerline segregation, particularly for times above around 1.0 min/mm of plate thickness. Soaking time showed no influence on grain size, banding degree and tensile properties, for both steels. The absorbed energy in Charpy impact test of Low Alloy steel was not affected by soaking time, at least for the range of 0.2 to 1.4 min/mm evaluated. On the other hand, it was observed that C-Mn steel is more sensitive to soaking time. For this steel, the absorbed energy increases with soaking time and the best results were attained in the range of 1.1 to 1.6 min/mm.

Key-words: Normalizing; Soaking time; Steels for pressure vessels.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

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

³ Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Superintendência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas; Ipatinga, MG.

1 INTRODUÇÃO

Vários tipos de aços produzidos em linhas de laminação de chapas grossas são fornecidos com tratamento térmico de normalização, como, por exemplo, aços estruturais para plataformas marítimas, para o setor naval, para caldeiras e para vasos de pressão. O objetivo da normalização é a formação de uma microestrutura refinada e homogênea, o que resulta em melhoria da tenacidade e uniformização das propriedades mecânicas.^(1,2) A obtenção de uma microestrutura ideal após a normalização requer que ocorra plena austenitização e homogeneização do material durante o aquecimento, o que é controlado pela temperatura de tratamento e pelo tempo de encharque.

A temperatura de tratamento é uma variável bem estudada, sendo tipicamente empregados valores em torno de 55°C acima de Ac3. No caso de aços para aplicações estruturais, dos tipos C-Mn ou microligados, a temperatura de normalização geralmente se encontra dentro da faixa de 870 a 925°C.⁽²⁻⁴⁾

O tempo de encharque é normalmente determinado de modo empírico em cada empresa, sendo usualmente adotados padrões conservativos, o que implica em tempos de encharque maiores que o necessário.⁽⁴⁾ Tempos muito longos resultam em elevado consumo de energia e redução da produtividade. Por outro lado, o emprego de tempos muito curtos resulta em propriedades inadequadas e/ou heterogeneidade de propriedades ao longo da chapa. Se o tempo for insuficiente para a completa austenitização, a microestrutura final forma-se a partir dos grãos ferríticos que não sofreram transformação durante o aquecimento, dando origem a uma estrutura grosseira, com reduzidas tenacidade e resistência mecânica.

Avaliou-se nesse estudo a influência do tempo de encharque empregado no tratamento térmico de normalização sobre as características microestruturais e as propriedades mecânicas de chapas grossas de aços para aplicação em vasos de pressão, fabricados a partir de dois distintos projetos de liga.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram avaliadas 2 chapas de aços para vasos de pressão, produzidas em escala industrial na Linha de Laminação de Chapas Grossas da Usiminas, sendo uma do tipo C-Mn na espessura de 37,5 mm e outra do tipo baixa liga na espessura de 21,0 mm. A Tabela 1 mostra a composição química dos aços avaliados.

Tabela 1 – Composição química dos aços avaliados (% em massa).

Aço	C	Mn	Si	P	S	Nb + V + Ti	Cr + Ni + Mo
C-Mn	0,23	1,05	0,17	0,021	0,007	-	-
Baixa Liga	0,24	0,98	0,22	0,018	0,002	0,076	0,51

Da região do centro da largura de cada chapa foram retiradas 5 amostras, sendo 1 avaliada na condição como laminada (CL) e as demais submetidas a tratamento térmico de normalização em laboratório. As condições de normalização são mostradas na Tabela 2, onde nota-se que foram avaliados distintos tempos de encharque, mantendo a temperatura de tratamento igual a 900°C. O tempo total de permanência no forno (*tp*) é dado pela soma do tempo de aquecimento (*ta*) desde a temperatura ambiente até a temperatura de tratamento com o tempo de encharque (*te*) para a homogeneização térmica e microestrutural da chapa. O valor de *ta* é

função das características do forno e das dimensões do material enornado, tendo sido determinado através de termopares inseridos no centro da espessura das amostras.

Tabela 2 – Condições de normalização avaliadas.

Aço / Espessura	Temperatura (°C)	Tempos de Forno (min)			Resfriamento	Relação te/espessura (min/mm)
		Aquecimento (ta)	Encharque (te)	Total (tp)		
C-Mn e = 37,5mm	900	40	10	50	ar natural	0,27
			20	60		0,53
			40	80		1,07
			60	100		1,60
Baixa Liga e = 21,0mm		30	5	35		0,24
			10	40		0,48
			20	50		0,95
			30	60		1,43

Foram realizados os ensaios descritos a seguir.

- Ensaio de tração em corpos-de-prova transversais em relação à direção de laminação, com base de medida de 50 mm, de acordo com a norma DIN 50125.⁽⁵⁾ Foram ensaiados 3 corpos-de-prova de cada amostra.
- Ensaio de impacto Charpy em corpos-de-prova longitudinais, com dimensões de 10 x 10 x 55 mm e entalhe em V, de acordo com a norma ASTM E23.⁽⁶⁾ Os ensaios foram realizados nas temperaturas de -60°C, -40°C, -20°C e 0°C, sendo testados 3 corpos-de-prova para cada condição.
- Análise metalográfica ao microscópio ótico, em seções longitudinais. Os constituintes microestruturais foram revelados através de ataque com nital 4%, sendo determinados o tamanho de grão ferrítico, de acordo com a norma ASTM E112,⁽⁷⁾ e o grau de bandeamento segundo a norma ASTM E1268.⁽⁸⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características Microestruturais

Campos representativos da microestrutura no centro e a ¼ da espessura dos aços C-Mn e Baixa Liga podem ser vistos nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Verifica-se, em ambos os aços, que o aumento do tempo de encharque resulta em melhoria da homogeneidade microestrutural, com significativa redução da intensidade da segregação central. Pode-se observar que as condições com tempo de encharque superior a cerca de 1,0 min/mm exibem maior similaridade entre as microestruturas observadas no centro e a ¼ da espessura.



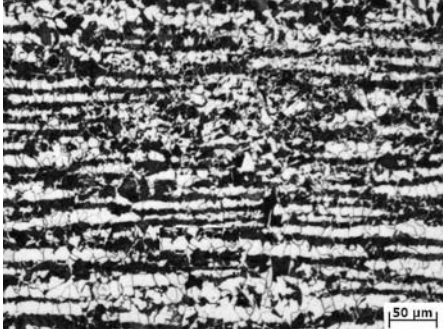

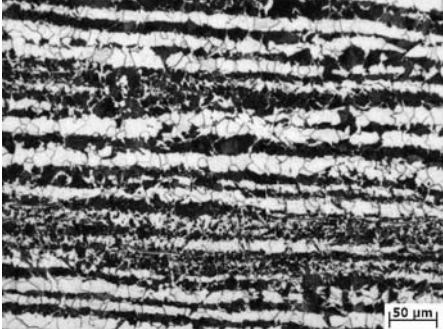

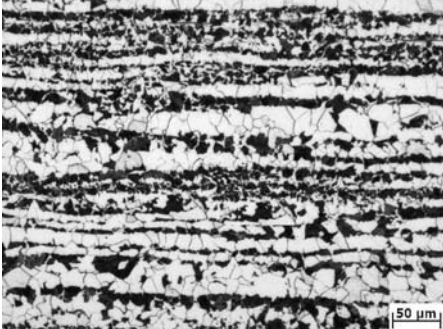
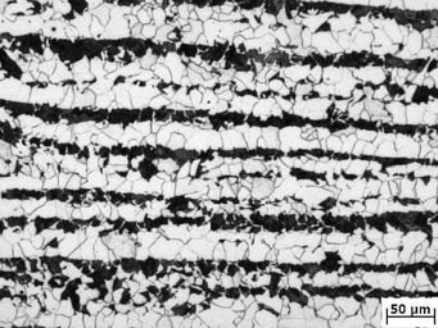


Condição	Centro da espessura	$\frac{1}{4}$ da espessura
a) Como laminada		
b) $t_e = 0,27$ min/mm		
c) $t_e = 0,53$ min/mm		
d) $t_e = 1,07$ min/mm		
e) $t_e = 1,60$ min/mm		

Figura 1 - Microestrutura observada nas amostras do aço C-Mn. Ataque: nital 4%.

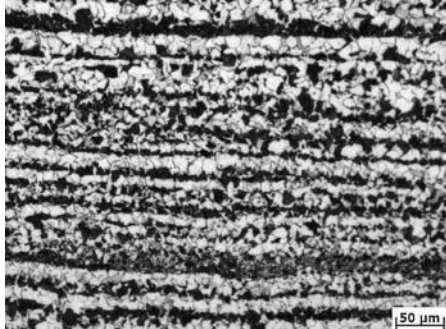
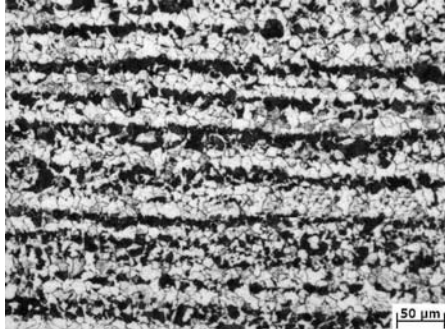
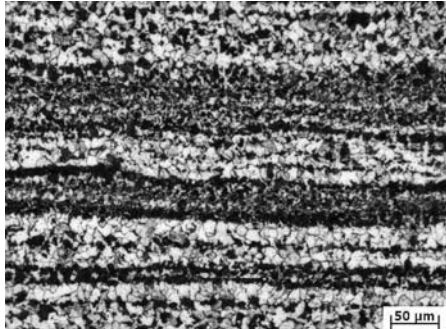

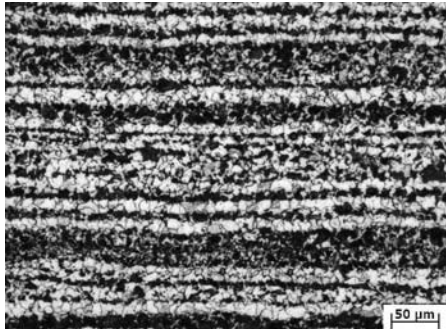
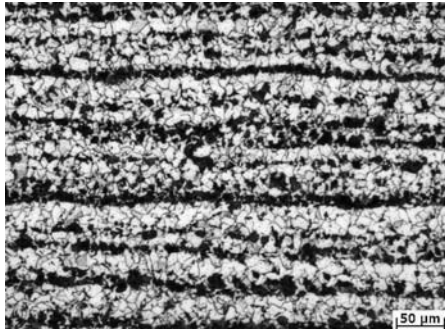
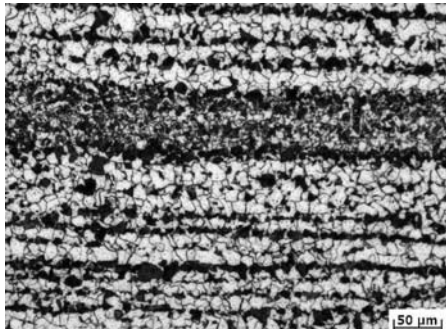
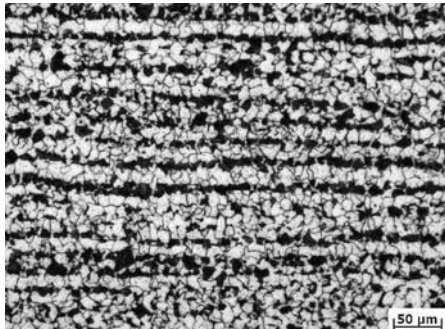
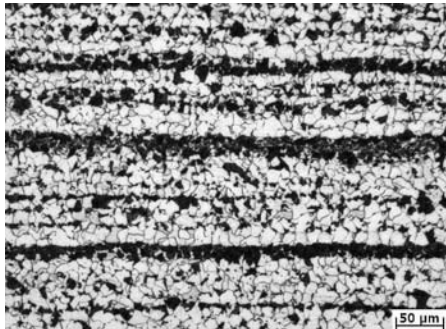
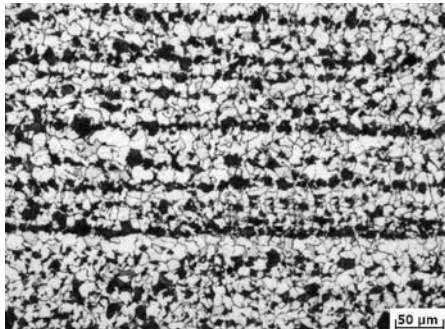
Condição	Centro da espessura	$\frac{1}{4}$ da espessura
a) Como laminada		
b) te = 0,24 min/mm		
c) te = 0,48 min/mm		
d) te = 0,95 min/mm		
e) te = 1,43 min/mm		

Figura 2 - Microestrutura das amostras do aço Baixa Liga. Ataque: nital 4%.

Todas amostras exibiram microestrutura constituída por ferrita e perlita bandeadas, sendo eventualmente observada a presença de constituintes de baixa temperatura de formação no centro da espessura. O aço Baixa Liga exibe maior quantidade de pequenas ilhas de martensita no centro da espessura, ao passo que o aço C-Mn exibe a presença de colônias de bainita somente para as condições de menor tempo de encharque. Esses resultados foram atribuídos às adições de Cr, Mo, Ni e V ao aço Baixa Liga (Tabela 1), que são elementos que aumentam a temperabilidade do material.

A Figura 3 mostra a variação do tamanho de grão ferrítico e do grau de bandeamento das amostras em função do tempo de encharque, comparativamente aos valores obtidos para a amostra como laminada. Para o aço C-Mn, o tratamento de normalização promoveu o refinamento dos grãos, independentemente do tempo de encharque empregado, como mostrado na Figura 3(a). Para esse aço, o tamanho médio de grão caiu de 18 μm na condição como laminado para 11 μm em todas as condições de normalização. O aço Baixa Liga, por sua vez, apresentou microestrutura mais refinada, com tamanho de grão ferrítico em torno de 6 μm para todas as condições, o que pode ser atribuído às adições de Nb, Ti e V. Em ambos os aços, no entanto, o tempo de encharque não promoveu alterações no tamanho de grão das amostras submetidas a tratamento de normalização.

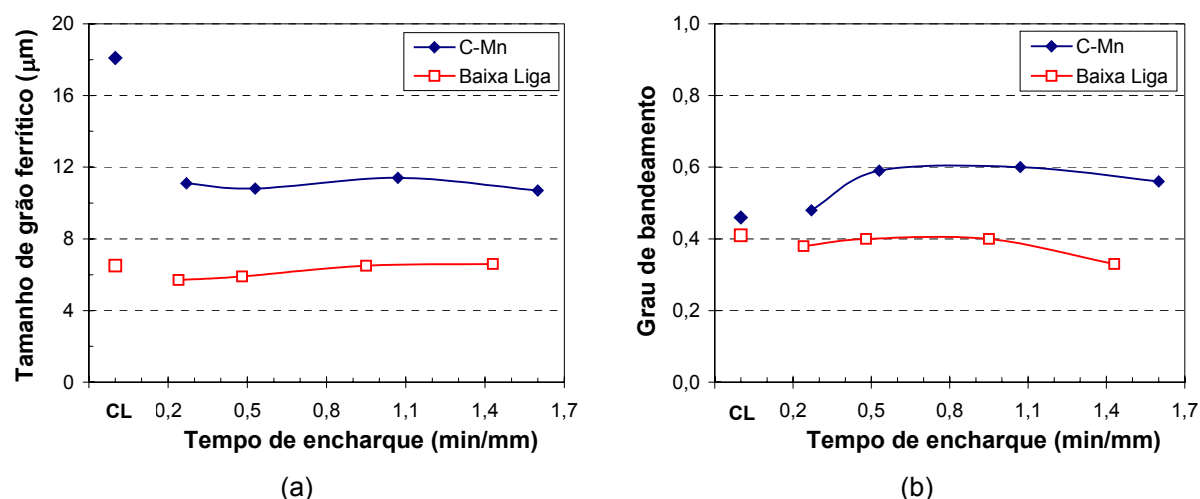


Figura 3 – Variação (a) do tamanho de grão ferrítico e (b) do grau de bandeamento com o tempo de encharque, em comparação à amostra como laminada.

O pré-requisito para a ocorrência de bandeamento microestrutural é a existência de bandas de microsegregação química, em especial de Mn, o que está associado ao fato desse elemento promover uma redução da temperatura Ar_3 . Isso faz com que, durante o resfriamento, a nucleação da ferrita ocorra primeiro nas regiões com menor teor de Mn, nas quais o valor local de Ar_3 é mais elevado. Os átomos de C que são rejeitados durante esse processo difundem-se rapidamente, resultando em regiões ricas em C que se transformam em perlita ao atingir a temperatura Ar_1 . No entanto, a existência de bandas de microsegregação química não significa que a microestrutura será necessariamente bandeada, uma vez que o mecanismo acima descrito é determinado pela cinética da transformação de fases, que é afetada pelos fatores mencionados a seguir.^(9,10)

i) Taxas de resfriamento reduzidas resultam em forte bandeamento, devido ao maior tempo disponível para a difusão do C das regiões de baixa para as de alta

concentração de Mn durante a transformação. As bandas tornam-se menos definidas com o aumento da taxa de resfriamento, sendo completamente eliminadas para valores acima de 5°C/s.

- ii) Grãos austeníticos muito finos implicam em elevado número de sítios disponíveis para a nucleação de ferrita. O bandeamento é intenso quando os grãos austeníticos são menores que o espaçamento entre as bandas de microsegregação, tendendo a desaparecer quando os grãos são de 2 a 3 vezes maiores que o espaçamento entre essas bandas.

Verificou-se que as amostras normalizadas do aço Baixa Liga exibem grau de bandeamento similar ao da amostra como laminada, enquanto que para o aço C-Mn o bandeamento aumentou após normalização, como visto na figura 3(b). O resultado do aço C-Mn pode estar relacionado à formação de uma microestrutura austenítica mais fina durante a normalização, em relação àquela existente ao final da laminação a quente. Pode-se perceber também que o aço C-Mn exibe maior grau de bandeamento que o aço Baixa Liga, para todas as condições avaliadas. Embora o tamanho de grão austenítico do aço C-Mn seja provavelmente maior, o espaçamento entre as bandas de microsegregação também é mais elevado, devido à menor redução sofrida durante a laminação da chapa de espessura igual a 37,5 mm, em comparação ao aço Baixa Liga de 21,0 mm de espessura. Portanto, o bandeamento mais intenso do aço C-Mn parece ser decorrente da menor taxa de resfriamento experimentada por esse material, em virtude de sua maior espessura.

3.2 Propriedades Mecânicas

Os valores de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento encontram-se mostrados na Figura 4. Pode-se observar que as propriedades mecânicas em tração praticamente não são afetadas pelos tratamentos de normalização, exceto pelo aumento no valor do limite de escoamento das amostras normalizadas do aço C-Mn, Figura 4(a). Esse resultado está associado ao refino de grão que os tratamentos de normalização conferiram ao aço C-Mn, Figura 3(a).

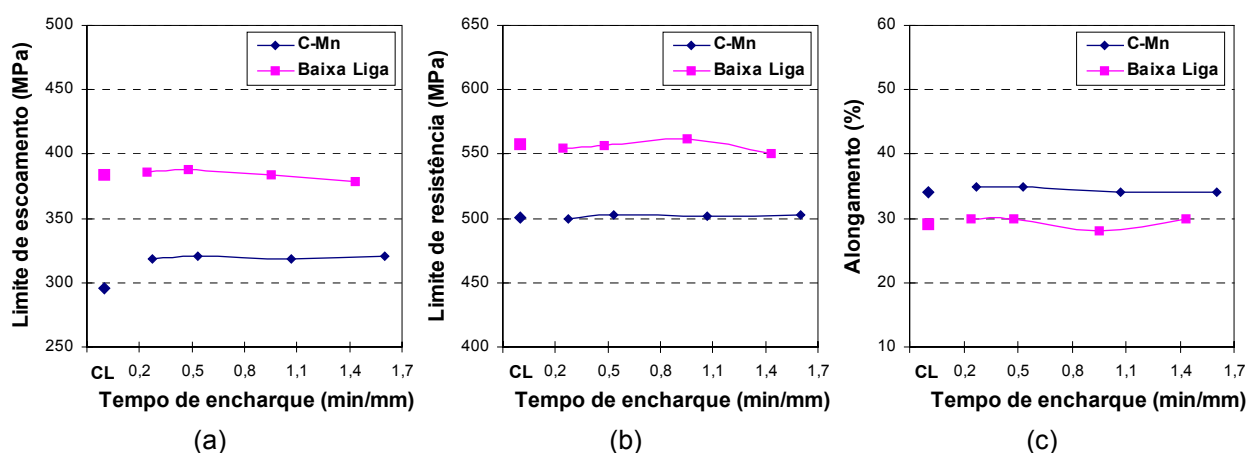


Figura 4 – Variação (a) do limite de escoamento, (b) do limite de resistência e (c) do alongamento com o tempo de encharque.

A Figura 5 mostra as curvas de energia absorvida em ensaio Charpy. As curvas obtidas para o aço Baixa Liga são muito próximas, Figura 5(b), indicando que o mesmo foi pouco afetado pela normalização, diferentemente do observado para o aço C-Mn, que exibiu valores superiores de energia absorvida para as condições

normalizadas em relação à amostra como laminada, Figura 5(a). Para esse aço, verifica-se que os resultados melhoram com o aumento do tempo de encharque de 0,27 min/mm para 0,53 min/mm e, em seguida para 1,07 min/mm. No entanto, o aumento dos valores de energia absorvida parece exibir um limite, uma vez que os resultados obtidos para esse último tempo são similares aos do tempo de 1,60 min/mm. Considerando que as 4 condições de normalização avaliadas exibiram tamanho de grão similar, figura 3(a), a melhoria de desempenho pode estar associada à maior homogeneidade microestrutural obtida para tempos de encharque mais elevados, Figura 1.

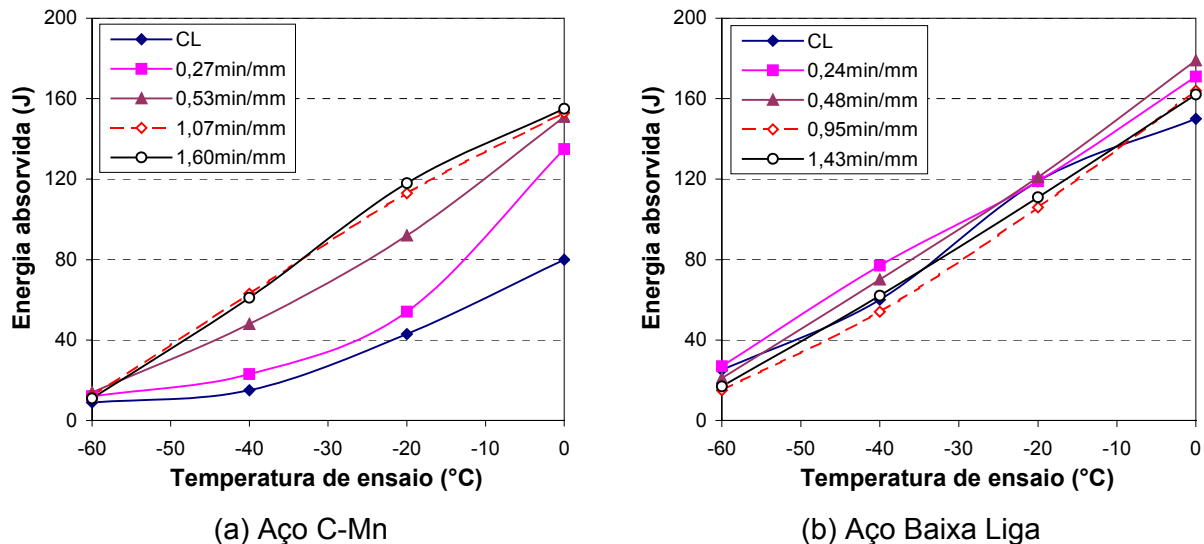


Figura 5 – Curvas de energia absorvida em ensaio de impacto Charpy.

4 CONCLUSÕES

Foi avaliado o efeito do tempo de encharque utilizado no tratamento térmico de normalização sobre as características microestruturais e as propriedades mecânicas de duas distintas composições de aços para aplicação em vasos de pressão, sendo uma do tipo C-Mn e outra do tipo Baixa Liga (com adições de Nb, V, Ti, Cr, Ni e Mo), chegando-se às conclusões descritas a seguir.

- O aumento do tempo de encharque, tanto para o aço C-Mn quanto para o aço Baixa Liga, resultou em melhoria da homogeneidade microestrutural, com redução da intensidade da segregação central, em especial para valores da relação tempo de encharque/espessura da chapa iguais ou superiores a cerca de 1,0 min/mm.
- O tamanho de grão, o grau de bandeamento e as propriedades mecânicas em tração, para ambos os aços, foram pouco influenciados pelo tempo de encharque.
- Para o aço Baixa Liga, os resultados do ensaio de impacto Charpy não foram afetados pelo tempo de encharque, ao menos para a faixa de 0,2 a 1,4 min/mm avaliada. Por outro lado, o aço C-Mn mostrou-se mais sensível ao tempo de encharque empregado. Para esse aço, a energia absorvida aumenta com o tempo de encharque, sendo que os melhores resultados foram obtidos para a faixa de 1,1 a 1,6 min/mm.

REFERÊNCIAS

- 1 KRAUS, G. **Steels: Heat Treatment and Processing Principles**. Materials Park, Ohio: ASM International, 2nd Ed., 1993.
- 2 MORRISON, W.B. Microstructure Control in Practice. **Ironmaking and Steelmaking**, Vol. 22, No. 6, p. 453-458, 1995.
- 3 COCHRANE, R.C., MINTZ, B., WARD, J.L. Influence of Prior Microstructure on Normalising Response of C-Mn-Al-Nb Steels. **Materials Science and Technology**, Vol. 5, p. 20-28, January 1989.
- 4 RUGLIC, T. Normalizing of Steel. **ASM Handbook - Volume 4: Heat Treating**. In: ASM Handbook on CD-ROM, ASM International and The Dialog Corporation, 1999.
- 5 DIN. Test Pieces for Tensile Testing of Metallic Materials. **DIN 50125:2004-1**.
- 6 ASTM. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. **ASTM E23-03**. In: Annual Book of ASTM Standards 2003, Section 3, Volume 03.01.
- 7 ASTM. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. **ASTM E112-96**. In: Annual Book of ASTM Standards 2003, Section 3, Volume 03.01.
- 8 ASTM. Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures. **ASTM E1268-01**. In: Annual Book of ASTM Standards 2003, Section 3, Volume 03.01.
- 9 OFFERMAN, S.E.; VanDIJK, N.H.; REKVELDT, M.T. et al. Ferrite/Pearlite Band Formation in Hot Rolled Medium Carbon Steel. **Materials Science and Technology**, Vol. 18, p. 297-303, March 2002.
- 10 THOMPSON, S.W.; HOWELL, P.R. Factors Influencing Ferrite/Perlite Banding and Origin of Large Pearlite Nodules in a Hypoeutectoid Plate Steel. **Materials Science and Technology**, Vol. 8, p. 777-784, September 1992.