

EFEITO DA VARIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENCHARQUE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL IF PROCESSADO NO RECOZIMENTO CONTÍNUO DA USIMINAS ¹

Rodrigo Rocha de Meira ²
João Francisco Batista Pereira ³
Ronaldo Antônio Neves Barbosa ⁴

Resumo

Neste trabalho objetivou-se avaliar os efeitos nas propriedades mecânicas do aço *interstitial free* microligado com titânio (IF-Ti) decorrentes da variação das condições de encharque no recozimento contínuo da Usiminas. Objetivou-se também determinar, dentre as condições de encharque propostas, a que proporcionaria maior preservação do equipamento de recozimento contínuo. Para isto, foram recozidas continuamente 9 bobinas a frio (BFs) em condições de encharque diferentes. Foram utilizadas 3 temperaturas e 3 tempos totalizando 9 condições. Após o recozimento, as BFs foram amostradas e ensaiadas para análise de propriedades mecânicas. Foram feitos testes em escala de laboratório para verificar a influência da composição química, taxa de aquecimento, temperatura e tempo de encharque nas propriedades mecânicas. Todas as condições de encharque testadas atenderam aos requisitos de propriedades mecânicas, inclusive a condição cuja temperatura e o tempo foram mínimos, que são os mais propícios para a preservação do equipamento e aumento de produtividade.

Palavras-chave: Aços IF; Recristalização; Recozimento contínuo; Propriedades mecânicas.

EFFECT OF SOAKING CONDITIONS VARIATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF INTERSTITIAL FREE STEEL PROCESSED AT USIMINAS' CONTINUOUS ANNEALING

Abstract

The effects of soaking conditions variations of continuous annealing on the mechanical properties of interstitial free steel stabilized with titanium (Ti-IF) were evaluated in this work. The other objective was, among the conditions proposed, to indicate the ones that would provide greater preservation of the Usiminas continuous annealing equipment. In order to achieve that, 9 cold rolled coils were continuously annealed in 9 different conditions, one condition for each coil, with 3 soaking temperatures and 3 soaking times. After annealing, samples from the coils were tested in order to evaluate the mechanical properties. Tests in laboratory scale were done in order to verify the influences of chemical composition, heating rate, soaking temperature and time on the mechanical properties of the steel. All the soaking conditions tested resulted in mechanical properties within the requirements for Ti-IF steel, including the condition with the lowest temperature and the shortest time, which is most adequate to preserve the equipment and increase the productivity.

Key words: Continuous annealing; Interstitial free steel; Mechanical properties; Recrystallization.

¹ *Contribuição Técnica ao 43º Seminário de Laminação da ABM - Processos e Produtos Laminados e Revestidos; Curitiba, PR, 17 a 20 de outubro de 2006.*

² *Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.Sc.; Superintendência de Laminação a Frio da Usiminas; Ipatinga, MG.*

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

⁴ *Membro da ABM; Prof., Dr.; Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG; Belo Horizonte, MG.*

1 INTRODUÇÃO

Dentre os aços laminados a frio para aplicações em estampagem, os aços ultra baixo carbono livres de intersticiais (aços IF) são os principais aços produzidos atualmente. Isso porque possuem baixo limite de escoamento (LE), alto alongamento uniforme (ALO) associado a um coeficiente de encruamento (n) elevado e a uma adequada textura cristalográfica, ou seja, elevado coeficiente de anisotropia (r) em comparação a outros aços baixo C. Os aços IF, devido à sua elevada estampabilidade, são de grande importância na indústria automobilística e sendo a Usiminas um dos principais fornecedores, dedica grande atenção no processo produtivo deste material.

Para produzir o material IF no recozimento contínuo é necessário utilizar altas temperaturas de encharque, o que resulta maior consumo de energia e considerável deterioração de equipamentos internos da linha. Uma das alternativas seria otimizar as condições de encharque para minimizar estes fatores.

Pretendeu-se neste trabalho avaliar os efeitos da variação das condições de encharque do recozimento contínuo nas propriedades mecânicas do material IF e indicar a condição que proporcionaria o atendimento aos requisitos de propriedades mecânicas e ao mesmo tempo a preservação do equipamento.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Escala Industrial

Foram recozidas continuamente nove BF's em condições de encharque diferentes, utilizando-se três temperaturas (760°C, 790°C e 820°C) e três tempos (53 s, 100 s e 142 s) para cada temperatura, totalizando nove condições. A faixa de composição química é apresentada na Tabela 1. Os ciclos de recozimento em escala industrial são mostrados na Figura 1.

Tabela 1. Composição química do aço IF-Ti.

Qualidade	Composição química (% em massa)					
	C	Mn	Si	P	S	Ti
IF-Ti	≤ 0,006	≤ 0,35	≤ 0,04	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,08

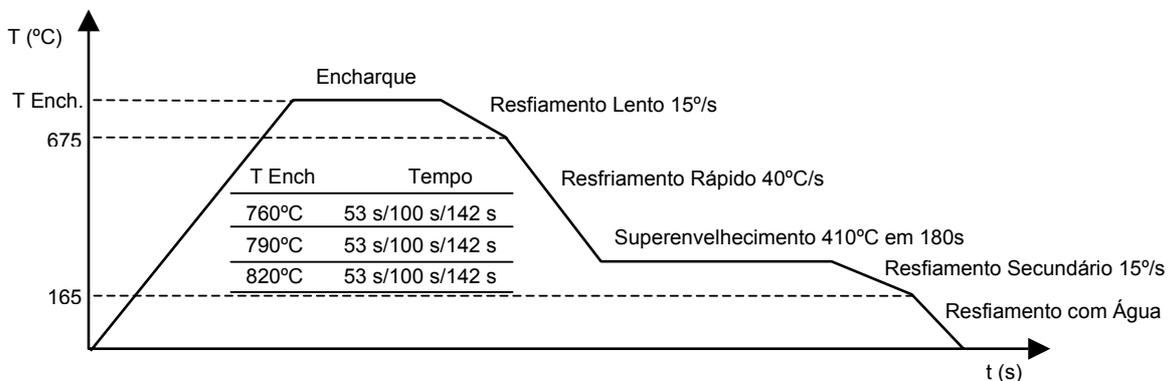


Figura 1. Curva esquemática dos ciclos de recozimento contínuo.

Após processamento em recozimento contínuo, as BFs foram cortadas em chapas (produto final) e amostradas na linha de tesoura, na posição de maior uniformidade de composição química e de menor variação de temperatura de bobinamento.

As amostras foram submetidas aos ensaios de tração para determinação do limite de escoamento, limite de resistência (LR) e alongamento percentual (AL), conforme Norma EN10.002.⁽¹⁾ Utilizando-se o mesmo ensaio foram determinados os coeficientes de anisotropia e de encruamento, conforme a Norma EN 10.130.⁽²⁾ Todos os ensaios de tração foram realizados na máquina Instron 4482.

2.2 Escala de Laboratório

Os testes em escala de laboratório (Gleeble) foram feitos para verificar as influências dos parâmetros temperatura e tempo de encharque, taxa de aquecimento e teor de C nas propriedades mecânicas, e também para estimar a temperatura de recristalização.

Na Tabela 2 estão detalhados os experimentos realizados. Para se verificar a influência da temperatura de encharque foi utilizada a amostra com 33 ppm de C, recozendo-a em três temperaturas diferentes conforme experimento 1. A verificação da influência do tempo de encharque foi realizada tomando-se a amostra com 33 ppm de C, utilizando-se três tempos de encharque diferentes, conforme experimento 2. A verificação da influência da taxa de aquecimento foi feita recozendo-se uma amostra com 33 ppm de C utilizando-se três taxas de aquecimento diferentes, conforme experimento 3. Para se verificar da influência do teor de C foram utilizadas as amostras com 33, 39, 50 e 68 ppm de C, conforme experimento 4. Os parâmetros adotados nas etapas de recozimento posteriores ao encharque foram exatamente os mesmos descritos na Figura 1, e após serem submetidos aos tratamentos descritos nesta Tabela, os corpos de prova foram ensaiados para se determinar as propriedades mecânicas LE, LR, AL, r e n.

Tabela 2. Descrição dos experimentos em escala de laboratório.

Experimento	T _{ench} (°C)	t _{ench} (s)	Tx _{aq} (°C/s)	Teor C (ppm)
1	760, 790 e 820	53	média	33
2	760	53, 100 e 142	média	33
3	760	53	mínima, média e máxima	33
4	760	53	média	33, 39, 50 e 68

Onde: T_{ench} = temperatura de encharque; t_{ench} = tempo de encharque; Tx_{aq} = taxa de aquecimento; Teor C = teor de carbono.

Sabe-se que quanto maior a temperatura de encharque em relação à temperatura de recristalização, mais adequadas serão as propriedades mecânicas do material IF. Para assegurar a efetividade da temperatura de encharque de 760°C foi necessário estimar a temperatura de recristalização. Isto foi feito aquecendo-se corpos de prova até uma determinada temperatura na taxa de aquecimento média e em seguida resfriando-os bruscamente com água, para posterior análise metalográfica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Escala Industrial

A Figura 2 mostra os resultados de propriedades mecânicas após o processamento do material IF-Ti em escala industrial.

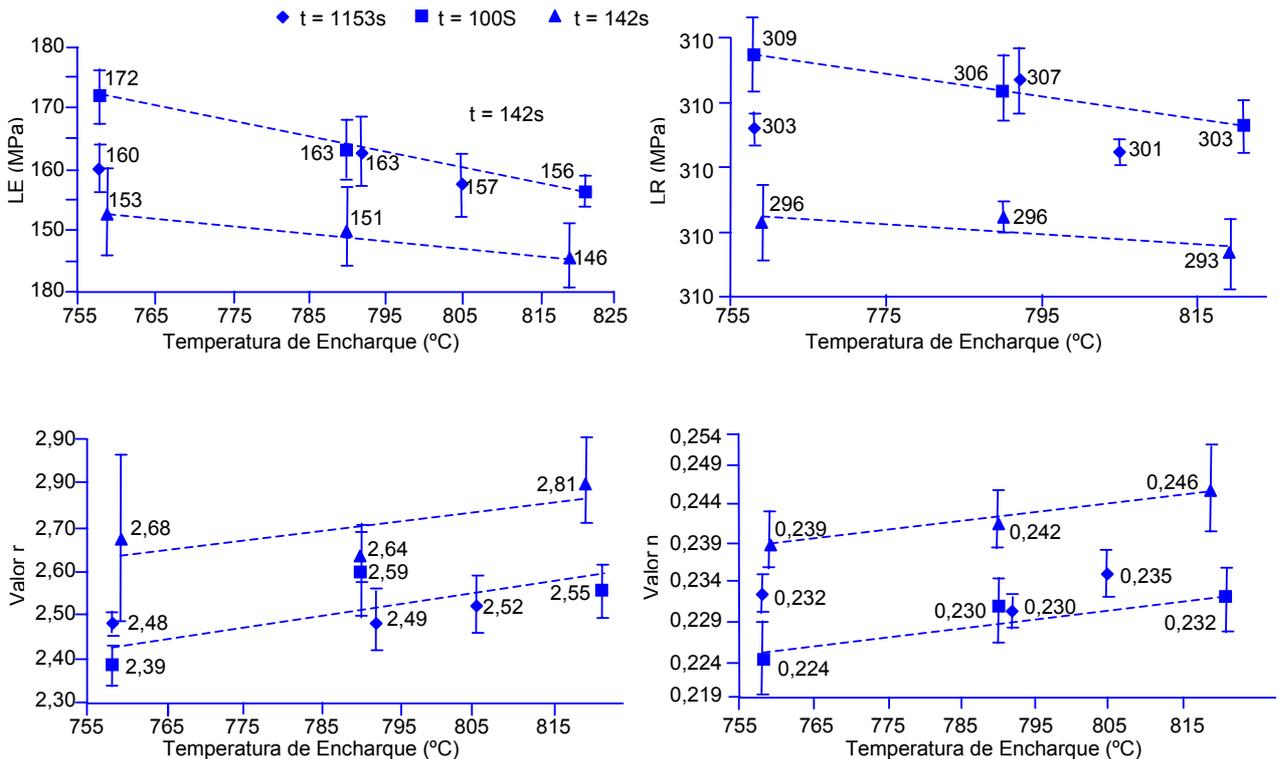


Figura 2. Propriedades mecânicas do material IF-Ti após processamento em escala industrial.

Todos os resultados apresentados nesta Figura estão em conformidade com os requisitos de propriedades mecânicas do material em estudo, inclusive os relativos à condição de encharque cuja temperatura é mínima (760°C) e o tempo também mínimo (53 s), a qual proporcionaria maior preservação do equipamento e maior produtividade. Nota-se de forma geral uma melhora na conformabilidade do material com o aumento da temperatura, e os resultados das amostras referentes ao tempo de encharque igual a 142 s apresentaram valores de propriedades mecânicas que indicam maior ductilidade, sugerindo uma possível influência do maior tempo nas propriedades mecânicas. Os resultados das amostras referentes ao tempo de 53 s ficaram em posição intermediária em relação aos resultados das amostras referentes aos tempos de 100 e 142 s, contrariando a expectativa de que essa condição (tempo de encharque mínimo) resultasse em menor estampabilidade.

Os resultados obtidos no alongamento percentual atenderam aos requisitos desta propriedade, ou seja, maiores ou iguais a 40%, em todas condições propostas.

3.2 Escala de Laboratório

Os testes em escala de laboratório objetivaram verificar a razão pela qual as amostras referentes ao tempo de 53 s apresentaram o comportamento acima descrito. Além disso, procurou-se verificar quais seriam as influências, além do tempo e da temperatura de encharque, do teor de C e da taxa de aquecimento nas propriedades mecânicas.

A avaliação da influência da taxa de aquecimento nas propriedades mecânicas é devida à variação deste parâmetro no processamento do aço em escala industrial, uma vez que, por limitações no equipamento, não foi possível processar todo o material utilizando-se a mesma taxa de aquecimento.

Nas Figuras 3 a 7 é mostrada a influência da temperatura e tempo de encharque, teor de C e taxa de aquecimento nas propriedades mecânicas obtidas após processamento do material em escala de laboratório.

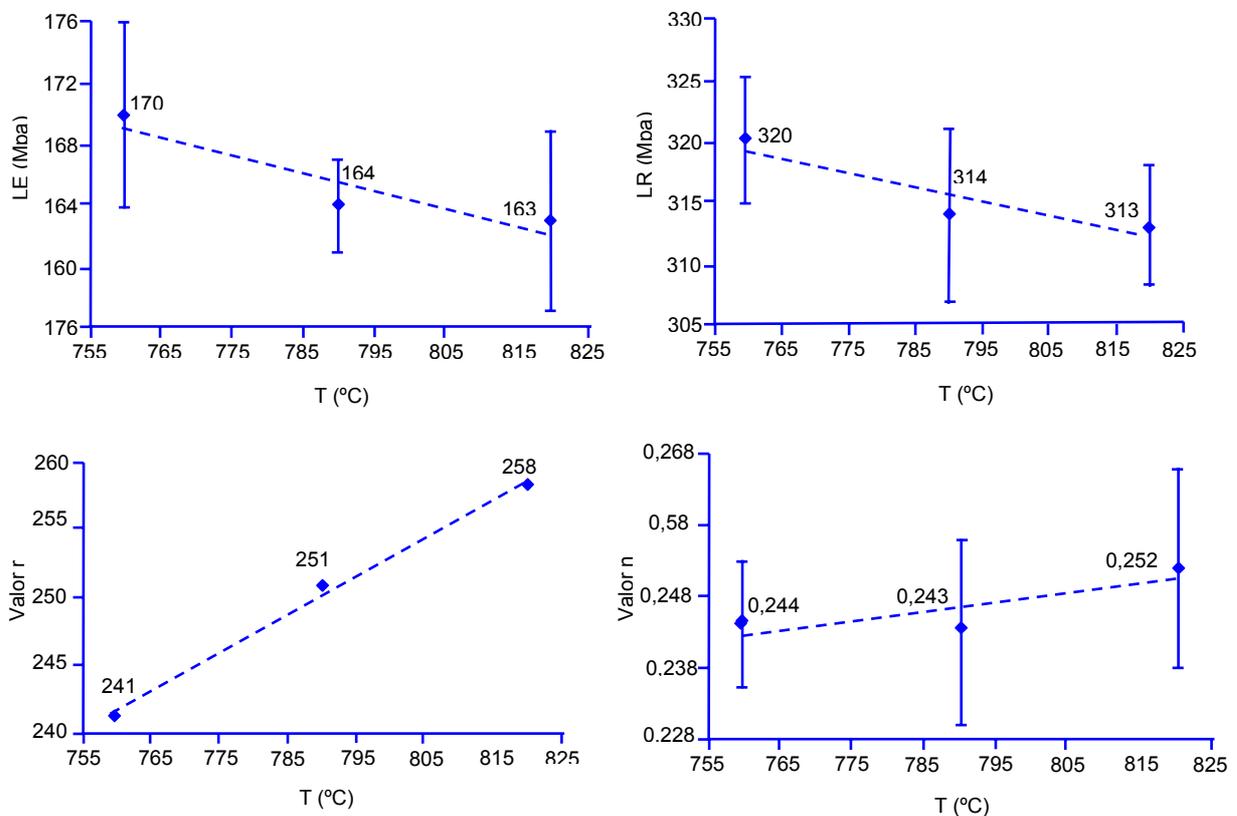


Figura 3. Influência da temperatura de encharque nas propriedades mecânicas.

Os testes em escala de laboratório confirmam a influência da temperatura de encharque nas propriedades mecânicas, o que está de acordo com Barbosa, Pereira e Ribeiro.⁽³⁾ A Figura 4 mostra a influência do tempo de encharque nas propriedades mecânicas.

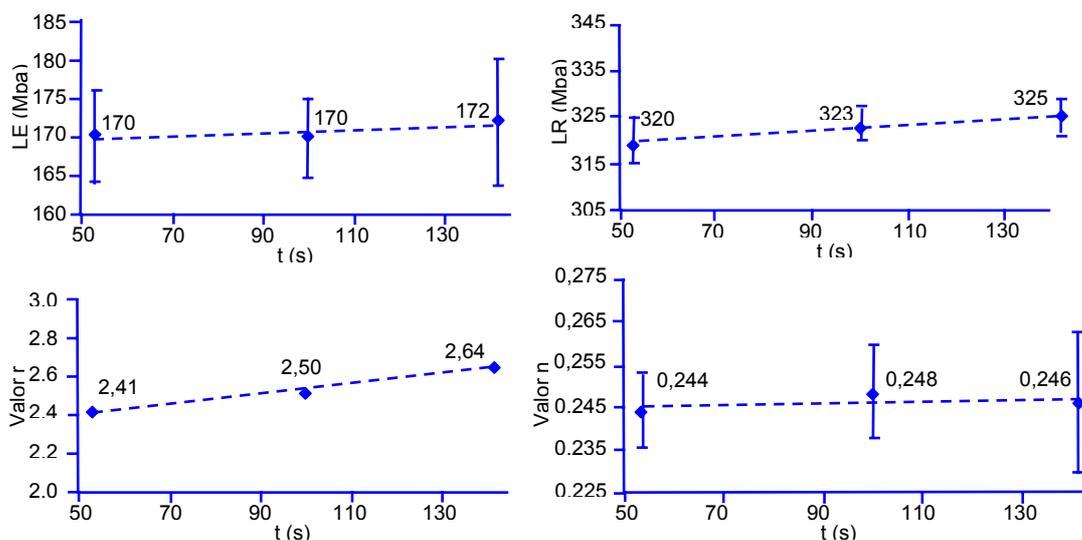


Figura 4. Influência do tempo de encharque nas propriedades mecânicas.

Percebe-se que as propriedades mecânicas não foram influenciadas pelo tempo de encharque, isto porque tal parâmetro não foi longo o suficiente, uma vez que é inviável empregar tempos de encharque longos no recozimento contínuo. As amostras referentes ao tempo de encharque de 142 s na escala industrial indicaram maior ductilidade (Figura 2), o que não se percebe na Figura 5. Em vista disto torna-se necessária a determinação da causa deste fato e esclarecer o comportamento inesperado das amostras referentes ao tempo de 53 s (Figura 2). A análise da influência do teor de C (ou Ti*) nas propriedades mecânicas possibilita esclarecer os fatos acima, como é mostrado na Figura 5.

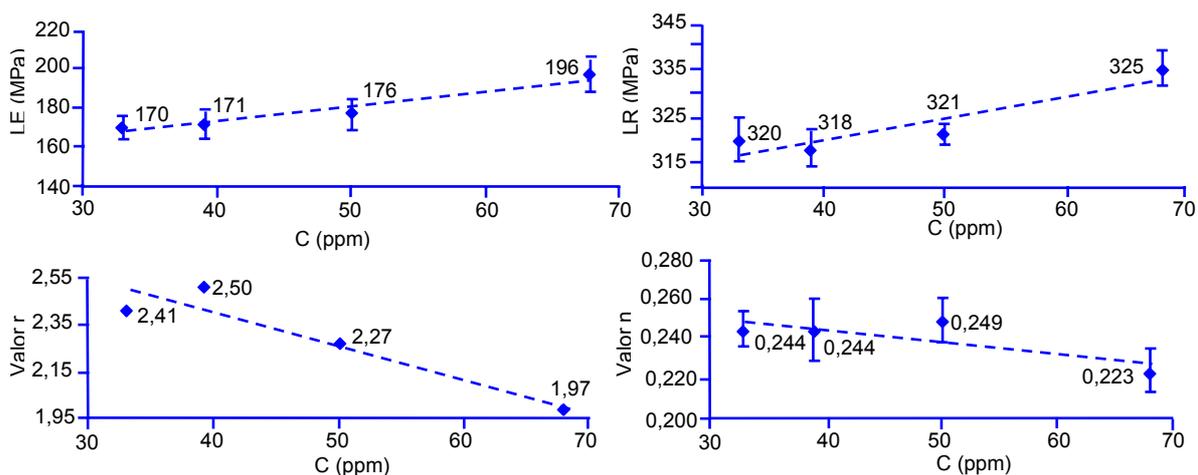


Figura 5. Influência do teor de C nas propriedades mecânicas.

Nota-se uma perda da ductilidade com o aumento do teor de C, que relaciona-se diretamente com outro parâmetro de suma importância, o Ti*, definido pela equação:

$$Ti^* = \frac{[\%Ti - 1,5 (\%S)]}{\%C + \%N},$$

onde %Ti, %S, %C e %N são, respectivamente, os teores de titânio, enxofre, carbono e nitrogênio. Conforme a equação acima, aumentando-se o teor de C ocorre um decréscimo do Ti^* , resultando em um aumento na temperatura de recristalização, uma vez que o Ti tem o papel de estabilizar praticamente todo o C em solução sólida sob a forma de carbonetos. Assim sendo, a Figura 6 explica a maior conformabilidade das amostras referentes ao tempo de 142 s de encharque na escala industrial em relação às demais, uma vez que possuem maiores valores de Ti^* . O posicionamento intermediário das amostras referentes ao tempo de 53 s em relação às amostras de 100 e 142 s nas propriedades mecânicas também pode ser explicado considerando-se os valores de Ti^* , que são maiores nas amostras referentes ao tempo de 53 s se comparados com os valores referentes às amostras do tempo de 100 s.

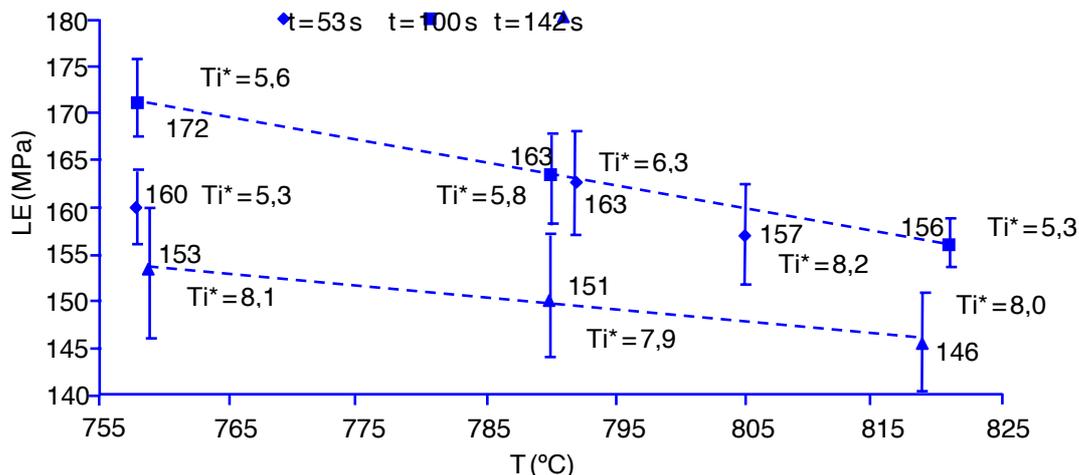


Figura 6. LE em função da temperatura e do tempo de encharque e a influência do Ti^* .

A Figura 7 mostra os resultados de propriedades mecânicas em função da variação da taxa de aquecimento, onde A_{x1} , A_{x2} e A_{x3} são respectivamente as taxas de aquecimento máxima, média e mínima. Nota-se que tal variação não foi suficiente para promover alterações significativas nas propriedades mecânicas. Conforme Ferry Muljono e Dunne,⁽⁴⁾ taxas de aquecimento maiores que 100°C/s podem resultar em menor tamanho de grão após recozimento, ao passo que as taxas de aquecimento utilizadas neste trabalho foram da ordem de 10°C/s. Após a análise das Figuras 3 a 7 observa-se que a temperatura de encharque e o teor de C foram os parâmetros que mais influenciaram as propriedades mecânicas, sendo que os resultados em escala de laboratório confirmaram os resultados obtidos em escala industrial.

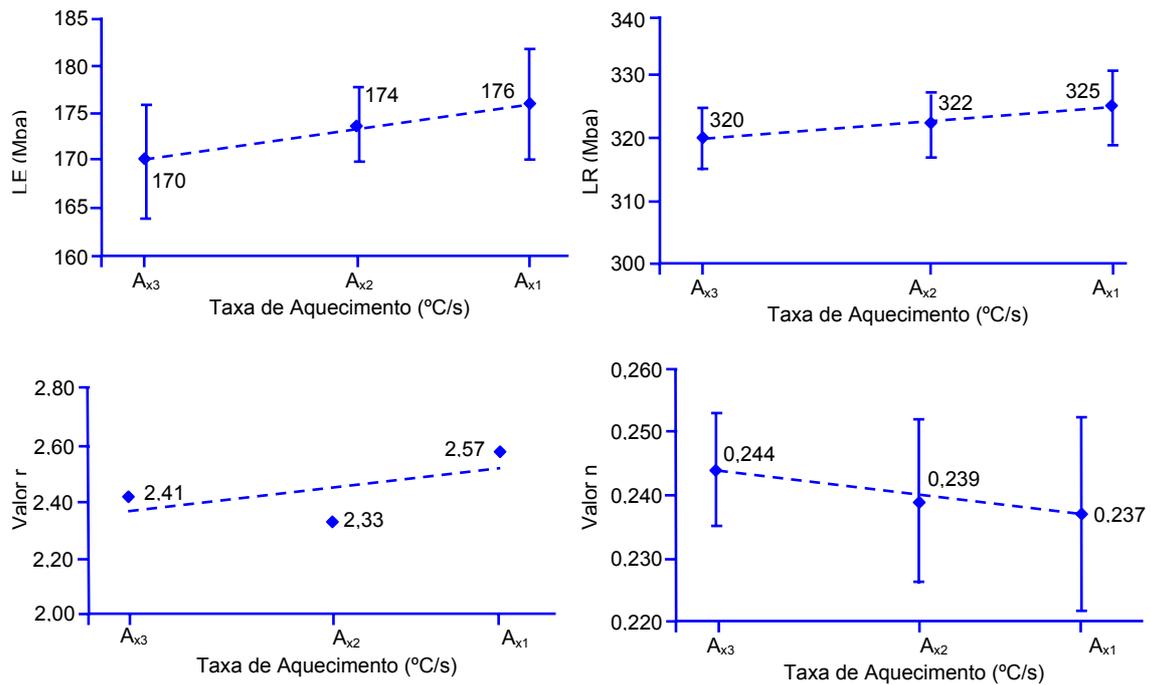


Figura 7. Influência da taxa de aquecimento nas propriedades mecânicas.

Tanto em escala de laboratório quanto industrial, todos os resultados obtidos estão em conformidade com os requisitos de propriedades mecânicas do material IF-Ti, exceto para as amostras com o teor de C de 68 ppm processadas em escala de laboratório.

Os resultados da análise da temperatura de recristalização mostraram que o material apresentou frações recristalizadas acima de 90% a 710°C, reforçando a possibilidade de se empregar a temperatura de 760°C no encharque em escala industrial. A Figura 8 apresenta os resultados de dureza em função da temperatura.

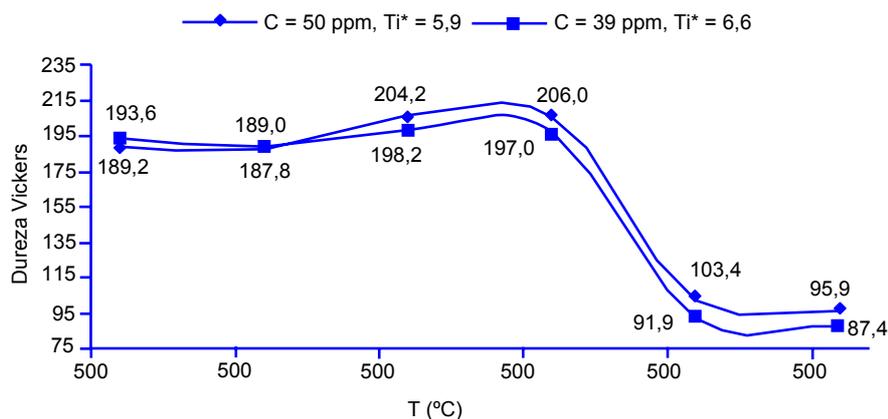


Figura 8. Dureza Vickers em função da temperatura.

4 CONCLUSÕES

Todos os resultados dos experimentos em escala industrial e de laboratório foram satisfatórios em relação aos requisitos de propriedades mecânicas do aço IF-Ti, exceto quando o material apresentou teor de C mais alto (68 ppm). Dentre estes resultados satisfatórios, pode-se destacar a condição de temperatura e tempo de encharque mínimos empregados em escala industrial (760°C e 53 s), que é a condição de processamento com maior potencial de preservação de equipamento e de maior produtividade.

Dentre os parâmetros estudados, os que mais influenciaram as propriedades mecânicas foram a temperatura de encharque e o teor de C. Observou-se o aumento da conformabilidade com a temperatura, de acordo com Barbosa et al.⁽³⁾.

Os parâmetros tempo de encharque e taxa de aquecimento não influenciaram significativamente as propriedades mecânicas. Em relação à faixa estudada do tempo de encharque, pode-se afirmar que os tempos adotados nos experimentos não foram longos o suficiente. A variação da taxa de aquecimento também foi insuficiente, uma vez que a ordem de grandeza dos valores deste parâmetro adotada foi pequena.

REFERÊNCIAS

- 1 EN 10.002-1-1990. Tensile Testing of Metallic Materials. Part 1 - Method of Test at Ambient Temperature, 2001.
- 2 EN 10.130-1991+A1-1998. Cold Rolled Low Carbon Steel Flat Products for Cold Forming – Technical Delivery Conditions, 1998.
- 3 BARBOSA, A. H. A.; PEREIRA, J. F. B.; RIBEIRO, C. F. Influência das Condições de Encharque no Recozimento Contínuo nas Propriedades Mecânicas de Aços Interstitial Free-IF Microligados com Ti, 56º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, Julho, 2001.
- 4 FERRY, M.; MULJONO, D.; DUNNE, D. P. Recrystallization Kinetics of Low and Ultra Low Carbon Steels During High-Rate Annealing. ISIJ International, vol. 41 n.9, 2001, p. 1053 - 1060.