

EFEITO DO TEMPO DE ENCHARQUE NOS RECOZIMENTOS INTERCRÍTICOS DIRETO E CONTÍNUO NA MICROESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES DE AÇOS BIFÁSICOS

N. A. N. da Silva ⁽¹⁾; P. P. C. Lourenço ⁽¹⁾; E. D. P. Machado ⁽¹⁾; P. S. dos Santos ⁽¹⁾; M. T. P. Aguilár ⁽²⁾; W. Lopes ⁽¹⁾; E. C. S. Corrêa ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ CEFET/MG; ⁽²⁾ UFMG

CEFET/MG - Departamento de Engenharia de Materiais, Av. Amazonas 5253 - Nova Suíça - Belo Horizonte - MG, Brasil, CEP: 30.421-169

E-mail: elaine@deii.cefetmg.br

RESUMO

O estudo dos aços bifásicos ou dual phase (DP) tem sido impulsionado pela indústria automobilística e suas necessidades. Capazes de combinar alta resistência mecânica e boa conformabilidade, estes aços apresentam grandes vantagens quando comparados aos aços convencionais. Nesta pesquisa foram realizados os tratamentos térmicos de recozimento intercrítico direto e contínuo a 740°C em um aço de composição 0,121%C – 0,499%Si – 1,58%Mn – 0,0207%Cr com o objetivo de avaliar o efeito do tempo de encharque na microestrutura de aços dual phase e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas desses materiais. A avaliação dos resultados foi conduzida por meio de análise microestrutural e das propriedades mecânicas. A microestrutura obtida nos diferentes processamentos foi avaliada por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. Observou-se uma variação na fração volumétrica dos constituintes e uma mudança na morfologia da martensita com o tempo e com o tipo de processamento. Mudanças significativas nas propriedades também foram observadas.

Palavras-chave: aços bifásicos, recozimento intercrítico direto, recozimento intercrítico contínuo, tempo de encharque, microestrutura, propriedades mecânicas.

1. INTRODUÇÃO

O interesse pelo desenvolvimento de novos aços avançados de alta resistência (*Advanced High Strength Steels* - AHSS) tem crescido nos últimos anos, particularmente estimulado pela demanda do setor automotivo ^(1,2).

Chapas mais finas de aço com maior resistência mecânica permitem reduzir o peso das peças sem a perda de suas características originais. Entretanto, há casos em que um aumento da resistência leva à redução da conformabilidade do material, o que afeta a liberdade de *design*. Uma alternativa para esse impasse envolve novas combinações de composição química e de processamento, a fim de produzir efeitos microestruturais complexos para conciliar, tanto quanto possível, essas características, a princípio, contraditórias ^(3,4).

Aços *dual phase* (DP) ou bifásicos pertencem à família dos aços de alta resistência e baixa liga, apresentando basicamente em sua composição baixo teor de carbono, com adições de manganês entre 1% e 2%, e ainda pequenas quantidades de silício, nióbio, molibdênio e cromo. São caracterizados por sua microestrutura normalmente constituída de ilhas de martensita (martensita e austenita retida – constituinte MA) dispersas em uma matriz ferrítica. Entretanto, pequenas quantidades de outras fases ou constituintes, tais como bainita e perlita, podem também estar presentes. A microestrutura destes aços é a responsável em conferir ao material uma boa combinação de resistência e ductilidade, tornando-o promissor para aplicações na indústria automobilística ^(1,5,6,7).

Dentro deste contexto, o controle e conhecimento das condições de processamento, assim como as transformações que ocorrem tanto no tratamento intercrítico como no resfriamento são muito importantes para que se obtenham os resultados desejados: um aço com elevada ductilidade e capacidade de conformação e boa resistência mecânica. Portanto, é comum avaliar tanto por meio de modelagem como experimentalmente o efeito dos diferentes parâmetros de processamento sobre a microestrutura ⁽⁸⁾.

O objetivo deste estudo é avaliar o efeito de determinados parâmetros de processamento, como tempo de encharque e tipo de recozimento intercrítico (direto ou contínuo), na microestrutura de aços *dual phase* e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas desses materiais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O material usado na investigação foi adquirido em forma de chapa com espessura de 2,0 mm, cuja composição química se encontra em Tab. 1. As amostras foram cortadas em pequenas chapas com dimensões 210 mm x 60 mm para posterior tratamento térmico.

Tab.1. Composição química (% em peso) do aço utilizado no trabalho.

Elemento	C	Si	Mn	P	Mo	Cr	Ni
% em peso	0,121	0,499	1,58	0,0108	0,001	0,0207	0,0306
Elemento	V	Ti	B	Al	Nb	Cu	W
% em peso	0,0065	0,0022	<0,0004	0,0529	0,0138	0,009	0,01

2.2 Processamento Térmico

Tratamentos térmicos de recozimento intercrítico direto e recozimento intercrítico contínuo, após normalização, foram realizados. As temperaturas de transformação foram determinadas baseando-se no efeito do teor dos elementos de liga, principalmente de carbono e manganês, nas linhas de transformação (A_1 e A_3) do diagrama de equilíbrio Fe-Fe₃C e na quantidade das fases presentes após o resfriamento ⁽⁹⁾. Os cálculos empregados foram apresentadas nos estudos de Ghaheri et al. ⁽¹⁰⁾ e Movahed et al. ⁽¹¹⁾.

Os valores obtidos para A_1 foram 720,51°C e 723,03°C. Já os valores de A_3 foram 862,07°C e 858,30°C. Com o propósito de encontrar valores de temperatura que atendessem ambos os casos e as duas abordagens feitas, as temperaturas de austenitização e intercrítica foram escolhidas como sendo 880°C e 740°C respectivamente. Além das temperaturas, foram ainda definidos diferentes tempos de encharque (2, 5, 10 e 30 min), a fim de obter diferentes microestruturas e frações volumétricas de martensita (V_m). Os ciclos de tratamento térmico intercrítico direto e contínuo realizados são ilustrados na Fig. 1.

2.3 Caracterização Microestrutural dos Materiais

A caracterização microestrutural dos aços bifásicos foi realizada a partir de ensaios metalográficos com o propósito de se obter informações qualitativas e

semiquantitativas sobre a microestrutura formada após a realização dos diferentes ciclos térmicos.

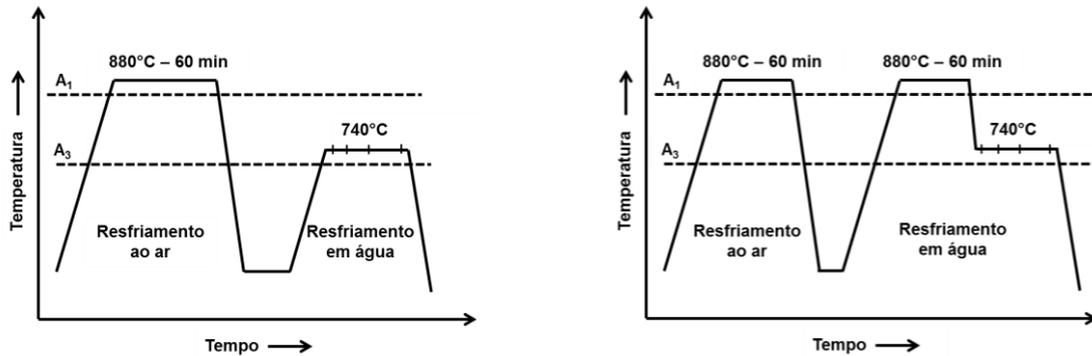


Fig. 1. Ciclos de tratamentos térmicos realizados. (a) Recozimento intercrítico direto e (b) recozimento intercrítico contínuo.

A micrografia foi revelada a partir de dois tipos de ataques químicos, sendo o primeiro deles com o reagente químico Nital 3% e o segundo com o reagente químico Le Pera ^(8,12). A realização dos diferentes ataques tem por finalidade tornar possível a determinação da proporção dos constituintes presentes baseando na diferença de coloração apresentada por cada um. As amostras devidamente atacadas foram analisadas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. A partir das imagens obtidas, a análise quantitativa dos constituintes foi realizada pelo método de contagem por pontos ^(13,14).

A partir das proporções obtidas de ferrita e do constituinte MA, foi possível verificar a fração volumétrica dos demais constituintes possivelmente presentes na microestrutura desses aços bifásicos (bainita, carbonetos e outros) pela Eq. (A) ⁽¹⁵⁾.

$$100 - (\text{Ferrita} + \text{MA}) = \text{outros constituintes} \quad (\text{A})$$

O tamanho do grão ferrítico foi medido a partir da análise de imagens com o auxílio de um software de análise de imagens, por meio do cálculo de área onde foram medidos 200 grãos para cada condição obtendo-se a média do tamanho de grão ferrítico.

2.4 Caracterização Mecânica dos Materiais

A caracterização mecânica dos materiais foi feita a partir de ensaio de dureza e de tração para as diferentes amostras submetidas aos tratamentos térmicos.

Os ensaios de dureza foram realizados em um microdurômetro com penetrador Vickers. As amostras foram preparadas para esta análise da mesma forma com que foram preparadas as amostras para caracterização microestrutural, entretanto não houve ataque químico. Aplicou-se a carga de 1kgf durante 15 segundos. Foram realizadas oito impressões em cada amostra, obtendo-se o resultado médio dos valores de dureza e seus respectivos desvios padrões.

Os ensaios de tração foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios a uma velocidade de 4,5 mm/min e consequente taxa de deformação inicial de 10^{-3} s^{-1} . Para análise dos efeitos do processamento térmico dois corpos de prova, confeccionados segundo a norma ABNT NBR ISO 6152-1⁽¹⁶⁾ foram empregados para cada condição, para que uma similaridade nos resultados fosse atingida. Por meio desses experimentos foram determinados o limite de escoamento a 0,2%, o limite de resistência e o alongamento uniforme %.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Microestrutural

As Fig. 2 e Fig. 3 apresentam as imagens de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras tratadas por recozimento intercrítico direto a 740°C.

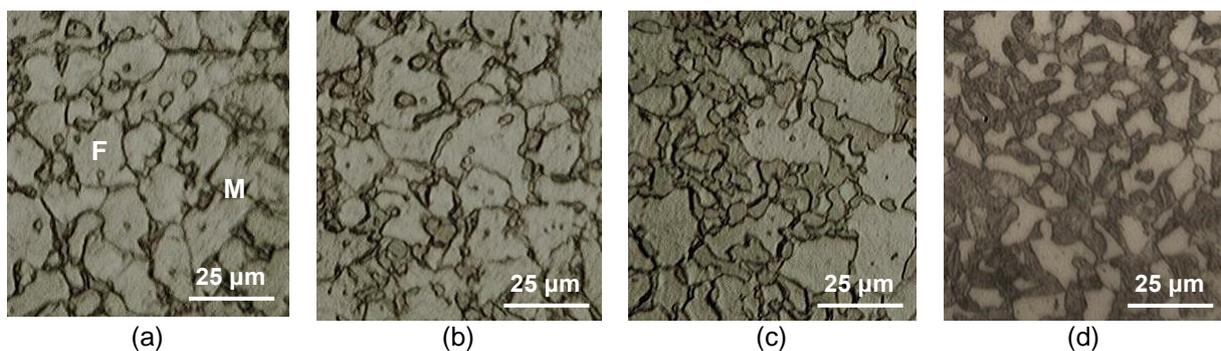


Fig. 2. Imagens de microscopia óptica das amostras submetidas ao ciclo de tratamento térmico recozimento direto a 740°C.

(a) 2 min; (b) 5 min; (c) 10 min e (d) 30 min.

A partir das imagens obtidas por MO das amostras tratadas por recozimento intercrítico direto a 740°C é possível observar um aumento considerável na fração volumétrica de martensita com a elevação do tempo de encharque. Esse fenômeno é comprovado pela análise semiquantitativa apresentada na Tab. 2, similarmente ao que foi observado por Mazaheri et al.⁽¹⁷⁾ ao variar o tempo de encharque de um

tratamento termomecânico de um aço 0,17%C–1,15%Mn–0,4%Si–0,95%Cr. Verifica-se também uma mudança na morfologia da martensita formada e um aumento no tamanho das ilhas, conforme notado nas imagens de MEV. Os tempos de encharque de 2 e 5 minutos não foram capazes de dissolver completamente os carbonetos, identificados por setas nas imagens que compõem a Fig.3. O mesmo foi observado por Zeytin; Kubilay e Aydin ⁽¹⁸⁾ ao tratar por recozimento intercrítico direto a 750°C dois aços de composições químicas distintas (0,08%C–1,35%Mn–0,045%P–0,35%Si–0,7%Cr e 0,1%C–1,2%Mn–0,5%Cr–0,5%Mo) em diferentes tempos de encharque (3, 10 e 30 min). Esses autores justificaram a presença dos carbonetos por influência dos elementos de liga Cr e Mo. Por fim, a redução do tamanho de grão ferrítico foi verificada tanto nas imagens obtidas por MO quanto por MEV e comprovada pela análise semiquantitativa mostrada na Tab.2.

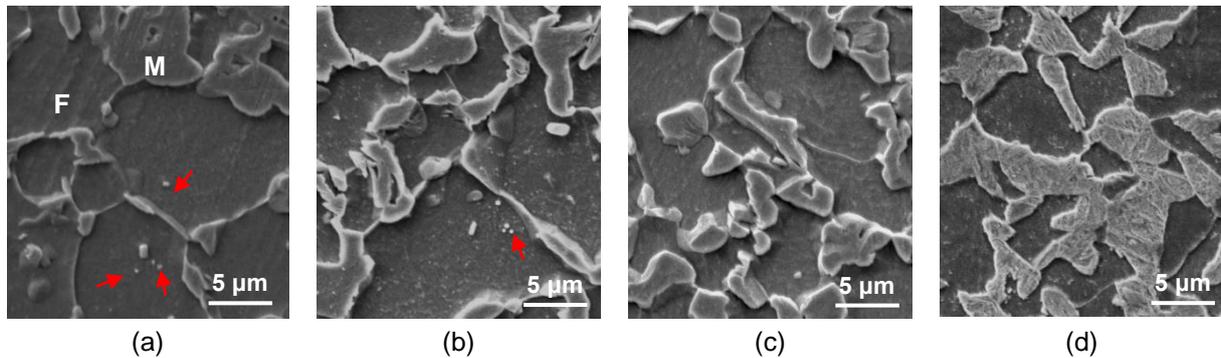


Fig. 3. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras submetidas ao ciclo de tratamento térmico recozimento intercrítico direto a 740°C.

F – Ferrita; M – Constituinte MA.

(a) 2 min; (b) 5 min; (c) 10 min e (d) 30 min.

Tab. 2. Fração volumétrica dos constituintes presentes nas amostras submetidas ao ciclo de tratamento térmico recozimento intercrítico direto a 740°C e tamanho médio do grão ferrítico.

Tempo de encharque (min)	% Ferrita	% MA	Demais constituintes	Tamanho de grão médio (µm)
2	67,24 ± 3,16	31,77 ± 3,27	0,99	7,02
5	67,87 ± 3,75	28,46 ± 3,19	3,67	6,87
10	64,99 ± 3,15	32,27 ± 3,48	2,74	6,28
30	55,80 ± 4,94	43,21 ± 3,44	0,99	5,40

Calcagnotto; Ponge e Raabe ⁽¹⁹⁾, ao observarem os efeitos do tempo de encharque no tratamento intercrítico direto de um aço 0,17%C–1,63Mn–0,28%Si a 730°C, notaram que para tempos reduzidos, a transformação de fase era baixa e apresentava um aumento rápido ao atingir 5 min. Em seguida, os níveis se estabilizavam até o tempo máximo de encharque (30 min). Foi concluído que com a

elevação do tempo de encharque, a taxa de transformação de fase é mais lenta porque os sítios preferenciais de nucleação da austenita ou seja, a cementita, estão esgotados e o crescimento dessa austenita tem que prosseguir pela difusão de carbono através da interface austenita/ferrita, que é mais lenta. O tamanho de grão ferrítico se mantém praticamente estável.

Nas Fig. 4 e Fig. 5 são apresentados os resultados das amostras submetidas ao tratamento de recozimento intercrítico contínuo a 740°C. Verifica-se, de forma qualitativa, um aumento na fração volumétrica de martensita com o tempo de encharque, assim como a redução no tamanho de grão ferrítico, especialmente ao confrontar as imagens relativas aos tempos de 2 min e 30 min. Esses resultados são comprovados pelos valores da análise semiquantitativa apresentados na Tab. 3, ressaltando-se que a elevação mencionada não foi pronunciada. Dessa forma, comportamento distinto foi verificado de acordo com o tipo de tratamento intercrítico empregado. Em adição à diferença da proporção dos constituintes, a morfologia da martensita não apresentou grande variação com a elevação do tempo de encharque para o recozimento contínuo.

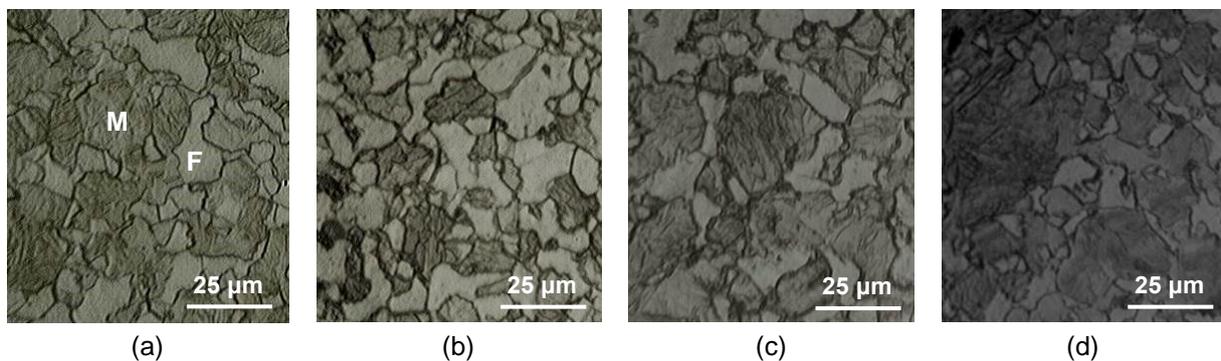


Fig. 4. Imagens de microscopia óptica das amostras submetidas ao ciclo de tratamento térmico recozimento intercrítico contínuo a 740°C.

(a) 2 min; (b) 5 min; (c) 10 min e (d) 30 min.

Zhuang et al. ⁽²⁰⁾ analisaram os efeitos do tempo de encharque em amostras de um aço 0,22%C–0,47%Si–2,5%Mn–0,41%Cr tratadas por recozimento intercrítico contínuo a 820°C. Foi verificado um aumento no tamanho das ilhas e na fração volumétrica de martensita com o tempo. Nesse caso, essas ilhas ficaram uniformemente distribuídas na matriz ferrítica, com dimensões tendendo à estabilização depois de um período de permanência no campo intercrítico. Ressalta-se que a quantidade de martensita para diferentes tempos não apresentou diferenças acentuadas, corroborando com os resultados encontrados neste estudo.

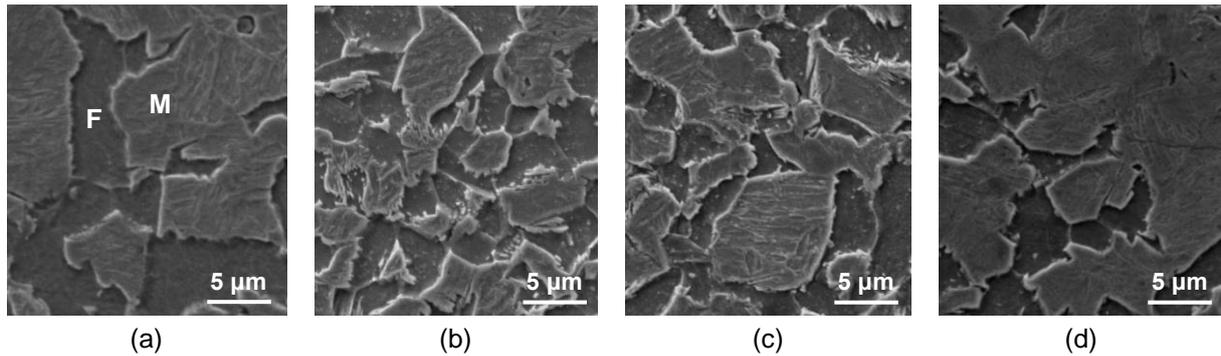


Fig. 5. Imagens de microscopia eletrônica de varredura das amostras submetidas ao ciclo de tratamento térmico recozimento intercrítico contínuo a 740°C.

F – Ferrita; M – Constituinte MA.

(a) 2 min; (b) 5 min; (c) 10 min e (d) 30 min.

Tab. 3. Fração volumétrica dos constituintes presentes nas amostras submetidas ao ciclo de tratamento térmico recozimento contínuo a 740°C e tamanho médio do grão ferrítico.

Tempo de encharque (min)	% Ferrita	% MA	Demais constituintes	Tamanho de grão médio (µm)
2	51,28 ± 7,68	46,22 ± 2,73	2,50	6,99
5	48,78 ± 6,14	49,39 ± 5,30	1,83	5,08
10	38,64 ± 7,46	52,36 ± 5,56	9,00	5,02
30	31,48 ± 3,52	52,04 ± 8,32	16,48	4,95

Gaheri et al. ⁽¹⁰⁾, comparando os processamentos direto e contínuo, verificaram o crescimento da martensita ao longo dos contornos de grão ferríticos para amostras tratadas por recozimento intercrítico direto e o desenvolvimento de colônias maiores de martensita para amostras tratadas por recozimento intercrítico contínuo. Esse último comportamento é verificado no presente trabalho, ou seja, a quantidade de constituinte MA gerada no tratamento contínuo foi superior àquela desenvolvida no processamento direto, para os quatro tempos de encharque estudados.

3.2 Análise das Propriedades Mecânicas

Os efeitos do tempo de encharque na dureza dos materiais tratados por recozimento intercrítico direto e contínuo podem ser verificados na Fig. 6. O comportamento observado para as amostras tratadas por recozimento intercrítico direto está de acordo com a análise da microestrutura, uma vez que para este tipo de processamento foi constatada a elevação na proporção do constituinte MA, mais duro, e a redução no tamanho de grão ferrítico com o tempo, fenômenos que levam ao aumento de dureza. Resultados similares foram encontrados nos trabalhos de Zeytin; Kubilay e Aydin ⁽¹⁸⁾ e Alfirano; Samdan e Maulud ⁽²¹⁾, justificados pelo acréscimo da fração volumétrica de martensita e o coalescimento de suas ilhas com

o aumento do tempo de encharque.

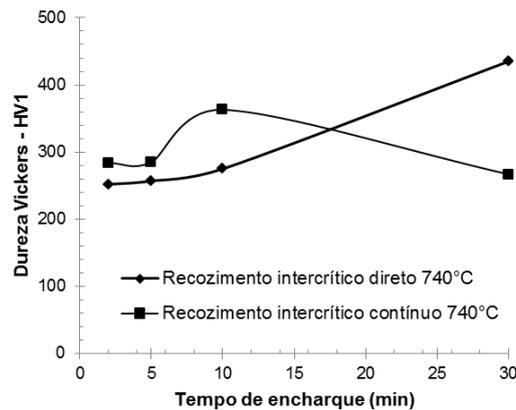


Fig. 6. Variações nos valores de dureza Vickers para amostras tratadas por recozimento intercrítico direto e contínuo a 740°C.

Por outro lado, as amostras tratadas por recozimento intercrítico contínuo exibiram um aumento nos valores de dureza até o tempo de encharque de 10 minutos e posteriormente esses valores foram reduzidos. Esse resultado pode estar relacionado a uma diminuição no teor de carbono da martensita para maiores frações volumétricas desse constituinte, conforme observado por Mazaheri et al. ⁽¹⁾ e Movahed et al. ⁽²²⁾.

Amostras tratadas por recozimento intercrítico direto apresentaram um aumento nos valores de limite de escoamento e limite de resistência à tração com a elevação do tempo de encharque, conforme mostrado na Fig. 7a. Em contrapartida, aquelas tratadas por recozimento intercrítico contínuo sofreram um leve decréscimo em seus limites de escoamento e de resistência à tração (Fig. 7b). Comportamento inverso foi observado para os valores de alongamento uniforme que, para os resultados de recozimento intercrítico direto, apresentaram uma queda com o aumento do tempo de encharque e um suave aumento para amostras tratadas por recozimento intercrítico contínuo (Fig. 8). Observa-se que, apesar da maior fração volumétrica de martensita presente nas amostras tratadas por recozimento intercrítico contínuo, ocorre uma perda de resistência mecânica no material.

O aumento da proporção de martensita e o decréscimo da fração de volume de ferrita com o aumento do tempo de encharque são responsáveis pelo aumento da resistência mecânica do material e a perda no alongamento. Entretanto, apesar do decréscimo no alongamento uniforme, para o caso de amostras tratadas por recozimento intercrítico direto, aços bifásicos podem ser facilmente conformados,

pois consistem de um arranjo fixo de martensita em uma matriz macia de ferrita ⁽²⁰⁾.

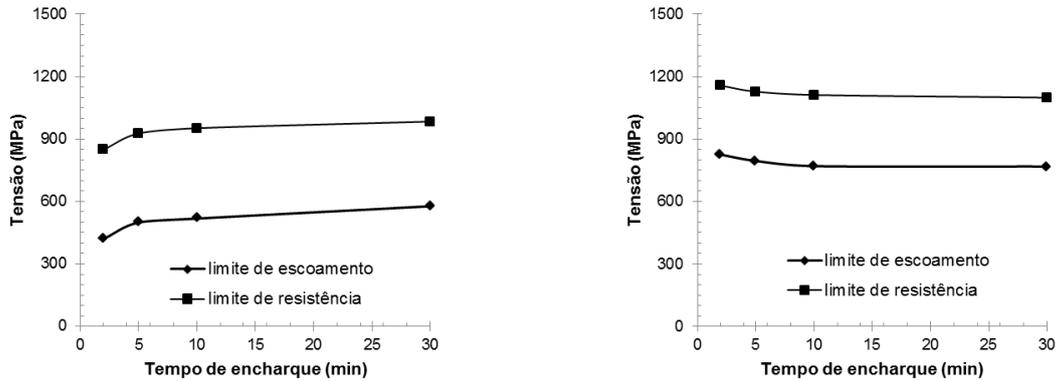


Fig. 7. Variações dos limites de escoamento e resistência com o tempo de encharque para amostras tratadas por (a) recozimento intercrítico direto e (b) recozimento intercrítico contínuo.

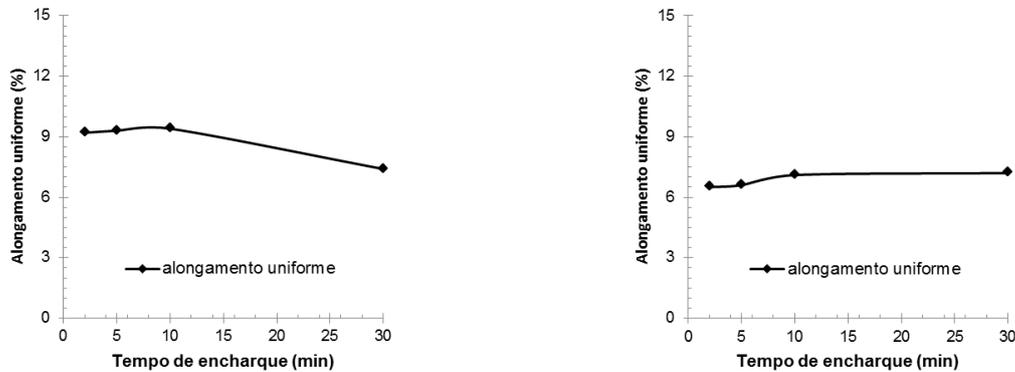


Fig. 8. Variações do alongamento uniforme com o tempo de encharque para amostras tratadas por (a) recozimento intercrítico direto e (b) recozimento intercrítico contínuo.

4. CONCLUSÕES

Todas as amostras tratadas apresentaram uma microestrutura composta pelos constituintes ferrita e martensita após passarem pelos diferentes ciclos de tratamentos térmicos. A proporção de martensita foi elevada com o aumento do tempo de encharque no campo intercrítico, fenômeno mais acentuado para o tratamento direto. A redução do tamanho de grão ferrítico com o aumento do tempo de encharque também foi observada para ambos tipos de processamento. O tratamento intercrítico direto provocou uma mudança na morfologia da martensita com o aumento do tempo de encharque, o que não foi verificado para amostras tratadas por recozimento intercrítico contínuo.

Em termos de valores de dureza, para amostras tratadas por recozimento intercrítico direto, verificou-se o aumento dessa propriedade com o tempo de

encharque. Esse resultado está relacionado ao aumento da fração volumétrica do constituinte MA e o refino do grão ferrítico. Apesar de apresentarem uma quantidade maior de constituinte MA, amostras tratadas por recozimento intercrítico contínuo tiveram um decréscimo em seus valores de dureza após certo tempo de encharque, o que pode ser justificado pela redução no teor de carbono presente na martensita formada. O recozimento intercrítico direto provocou um aumento nos valores dos limites de escoamento e de resistência à tração e um decréscimo do alongamento uniforme. Com alterações menos acentuadas, amostras tratadas por recozimento intercrítico contínuo apresentaram comportamento contrário.

5. AGRADECIMENTOS

À CAPES, à FINEP e à FAPEMIG pelo apoio financeiro e por concessão de bolsa. Ao Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

6. REFERÊNCIAS

- 1 MAZAHERI, Y; KERMANPUR, A; NAJAFIZADEH, A. A novel route for development of ultrahigh strength dual phase steels. *Materials Science & Engineering A*, Iran, v. 619, p. 1-11, Sep. 2014.
- 2 TASAN, C. C; DIEHL, M.; YAN, D.; BECHTOLD, M.; ROTERS, F.; SCHEMMAN, L.; ZHENG, C.; PERANIO, N.; PONGE, D.; KOYAMA, M.; TSUZAKI, K.; RAABE, D. An overview of dual phase steels: Advances in microstructure-oriented processing and micromechanically guided design. *Annual Review of Materials Research*, Germany, v. 45, p. 391-431, April 2015.
- 3 MATLOCK, D. K.; SPEER, J.G.; MOOR, E.D; GIBBS, P.J. Recent developments in advanced high strength steel for automotive applications: an overview. *Jestech*, Colorado, v. 15, n.1, p. 1-12, 2012.
- 4 ZHANG, F; RUI MI, A; WO, P. C.; FIELD, D. P. Morphology and distribution of martensite in dual phase (DP980) steel and its relation to the multiscale mechanical behavior. *Materials Science & Engineering A*, v. 659, p. 93 – 103, 2016.
- 5 CAO, Y.; AHLSTRÖM, J.; KARLSSON, B. The influence of temperatures and strain rates on the mechanical behavior of dual phase steel in different conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, Gothenburg, Sweden, v. 4, n.1, p. 68-74, 2015.
- 6 SEYEDREZAI, H.; PILKEY, A. K.; BOYD, J.D. Effect of pre- IC aneling treatments on the final microstructure and work hardening behavior of a dual phase steel. *Materials Science & Engeneering A*, Canada, v. 594, p. 178 – 188, 2014.
- 7 GHASSEMI-ARMAKI, H. et al. Deformation response of ferrite and martensite in a dual-phase steel. *Acta Materialia*. USA, v. 62, p. 197-211, 2014.
- 8 COLPAERT, Hubertus. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 652p.
- 9 TASCA, M. R. B.; MACHADO, M. L. P. Simulação da laminação a quente para a produção de aço bifásico. In: *Workshop de Ciência e Tecnologia em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do PROPEMM*, 2. Agosto, 2012, Vitória. Anais... Vitória: PROPEMM, 2012.

- 10 GHAHERI, A.; SHAFYEI, A.; HONARMAND, M. Effects of inter-critical temperatures on martensite morphology, volume fraction and mechanical properties of dual phase steels obtained from direct and continuous annealing cycles. *Materials and Design*, Iran, v. 62, p. 305 – 319, May 2014.
- 11 MOVAHED, P. KOLAHGAR, S.; MARASHI, S.P.H.; POURANVARI, M.; PARVIN, N. The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steel sheets. *Materials Science & Engineering A*, Iran, v. 518, p. 1-6, May 2009.
- 12 VUROBI JÚNIOR, S.; CINTHO, O. M. Técnicas metalográficas para caracterização microestrutural dos aços. In: 2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. Agosto, 2006. Ponta Grossa, Paraná. Anais... Paraná: Associação dos Engenheiros e Arquitetos de Ponta Grossa, 2006.
- 13 VANDER VOORT, G. F. *Metallography: principles and practice*. NewYork: McGraw-Hill, 1999. 773 p.
- 14 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E562: Standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count. West Conshohocken: 2011.
- 15 MURARI, F. D. Cinética de envelhecimento de aços dual phase de baixa resistência mecânica laminados a frio. 2009. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- 16 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 6152-1: Materiais Metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2002.
- 17 MAZAHERI, Y; KERMANPUR, A; NAJAFIZADEH, A. Nanoindentation study of ferrite-martensite dual phase steels developed by a new thermomechanical processing. *Materials Science & Engineering A*, Iran, v. 639, p. 8-14, May 2015.
- 18 ZEYDIN, H.K.; KUBILAY, C.; AYDIN, H. Investigation of dual phase transformation of commercial low alloy steels: Effect of holding time at low inter-critical annealing temperatures. *Materials Letters*, Turkey, v. 62, p. 2651 – 2653, Jan. 2008.
- 19 CALCAGNOTTO, M.; PONGE, D.; RAABE, D. Microstructure control during fabrication of ultrafine grained dual phase steel: characterization and effect of intercritical annealing parameters. *ISIJ International*, Germany, v. 53, n. 5, p. 874 – 883, Dec. 2011.
- 20 LI, Z.; WU, D.; LÜ, W.; YU, H.; SHAO, Z.; LUO, L. Effect of holding time on the microstructure and mechanical properties of dual phase steel during intercritical annealing. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci.*, China, v. 30, n. 1, p. 156 – 161, Feb. 2015.
- 21 ALFIRANO; SAMDAN, W.; MAULUD, H. Effect of intercritical annealing temperature and holding time on microstructure and mechanical properties of dual phase low carbon steel. *Advances in Applied Mechanics and Materials*, Indonesia, v. 493, p. 721 – 726, 2014.
- 22 MOVAHED, P. KOLAHGAR, S.; MARASHI, S.P.H.; POURANVARI, M.; PARVIN, N. The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steel sheets. *Materials Science & Engineering A*, Iran, v. 518, p. 1-6, May 2009.

EFFECT OF HOLDING TIME ON INTERCRITICAL DIRECT AND CONTINUOUS ANNEALING ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF DUAL PHASE STEELS

ABSTRACT

The study of dual phase steels (DP) has been driven by the automotive industry and its needs. These steels have great advantages when compared to conventional steels since they are able to combine high mechanical strength and good formability. Direct and continuous intercritical annealing at 740°C in a steel of composition 0.121% C - 0.499% Si - 1.58% Mn - 0.0207% Cr were performed in order to evaluate the effect of holding time on the microstructure and mechanical properties of dual phase steels. The results evaluation were conducted by microstructural and mechanical properties analysis. The microstructure obtained in the different processes was evaluated by optical microscopy and scanning electron microscopy. There was a variation in the volume fraction of constituents and a change in martensite morphology with holding time and the type of processing. Significant changes on properties were also observed.

Keywords: Dual Phase steel, direct intercritical annealing, continuous intercritical annealing, holding time, microstructure, mechanical properties.