

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA INTERCRÍTICA NA MICROESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO BIFÁSICO*

*Aline Silva Magalhães¹
Suzanny Cristina Soares Martins²
Marcelo Fonseca Pinto³
Maria Teresa Paulino Aguilar⁴
Maria Celeste Monteiro de Souza Costa⁵
Wellington Lopes⁶
Elaine Carballo Siqueira Corrêa⁷*

Resumo

Nas últimas décadas a crescente demanda por carros mais seguros, econômicos e menos poluentes exigiram das montadoras, siderúrgicas e comunidade científica investimentos na pesquisa e no desenvolvimento de novos materiais, tais como os aços avançados de alta resistência. Dentro deste contexto, neste trabalho foi realizada a análise da microestrutura e das propriedades mecânicas de um aço bifásico na condição inicial e submetido a tratamentos térmicos com aquecimento na região intercrítica e resfriamento brusco. Foram analisadas a proporção dos constituintes na microestrutura e as propriedades mecânicas por meio de microscopia óptica e eletrônica de varredura, de difração de raios X, dureza e de tração. Observou-se, em geral, que o aumento da temperatura intercrítica levou a uma elevação da fração de martensita e, conseqüentemente, influenciou de forma a aumentar os valores de dureza, resistência mecânica e diminuir a ductilidade.

Palavras-chave: Aço bifásico; Tratamento intercrítico; Microestrutura; Propriedades.

INFLUENCE OF INTERCRITICAL TEMPERATURE IN THE MICROSTRUCTURE AND THE MECHANICAL PROPERTIES OF A DUAL PHASE STEEL

Abstract

In recent decades the increasing demand for safer, economical and less polluting cars demanded of automakers, steelmakers and scientific community investments in research and development of new steels, such as advanced high strength steels. The aim of this work was the analysis of the microstructure and the mechanical behavior of a dual phase steel, in the initial condition and subjected to thermal processing with intercritical heating and quenching. The ferrite-martensite fraction in the material was evaluated by optical and scanning electron microscopy techniques and its influence in the mechanical properties was analyzed through hardness and tensile tests. It was observed that the increase of the intercritical temperature raised the fraction of martensite and thus led to an increase in hardness, yield strength and ultimate tensile strength and to a decrease in the elongation.

Keywords: Dual Phase steel; Intercritical heat treatment; Microstructure; Properties

¹ Eng. Materiais, Mestranda Eng. Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Eng. Materiais, Mestranda Eng. Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Graduando Eng. Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Eng. Metalurgista, Dra., Professora, DEMC, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁵ Eng. Mecânica, Dra., Professora, DEMAT, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁶ Eng. Mecânico, Dr., Professor, DEMAT, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁷ Eng. Mecânica, Dra., Professora, DEMAT, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A primeira geração dos aços avançados de alta resistência, quando comparados aos aços carbono convencionais, apresentam uma microestrutura complexa, em geral multifásica, na qual a ferrita é geralmente acompanhada de outras fases. Esse arranjo confere um efeito significativo nas propriedades e na conformabilidade, tornando esses aços uma das soluções disponíveis para atender à necessidade por materiais que apresentem ductilidade e resistência mecânica simultaneamente. A justificativa para este comportamento está embasada nas complexas interações entre os constituintes presentes na microestrutura dos avançados de alta resistência, que devem exibir variações significativas de dureza entre si [1].

Um dos principais representantes da classe de aços avançados de alta resistência são os aços bifásicos (*dual phase*), mais comumente utilizados na forma de chapas em aplicações automotivas para componentes de segurança [2]. Tais materiais são caracterizados por apresentar uma microestrutura composta por uma matriz de ferrita contínua e ilhas de martensita distribuídas nos contornos da ferrita. Essa microestrutura confere a estes aços propriedades mecânicas necessárias para a aplicação à qual se destinam, além de uma boa conformabilidade, características interessantes para materiais submetidos a processos de estampagem, como os que ocorrem nas montadoras.

De maneira geral, estes materiais são produzidos a partir de aços baixo carbono, com o manganês como principal elemento de liga, por meio de aquecimento na região intercrítica, campo de coexistência da ferrita e da austenita, seguida de resfriamento brusco [3]. Esse processamento ocasiona a transformação da austenita em martensita e um eventual teor de austenita retida, podendo ainda formar pequenas quantidades de perlita, bainita e carbonetos, de acordo com a taxa de arrefecimento [4].

Dentro deste contexto, neste trabalho, foi realizada a análise da microestrutura desenvolvida e das propriedades mecânicas de um aço bifásico submetido a tratamentos térmicos com aquecimento na região intercrítica e resfriamento brusco.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi realizado o estudo da microestrutura desenvolvida e do comportamento em termos de propriedades mecânicas de um aço bifásico originalmente da classe de resistência de 1000MPa, submetido a tratamentos térmicos intercríticos em temperaturas diversas com subsequente resfriamento brusco. O material, de espessura 2,0mm, apresentou a composição química disposta na Tabela 1, obtida por meio de análise por espectrometria de emissão óptica, conduzida em um espectrômetro Shimadzu Modelo Foundry Master Xpert.

Tabela 1. Composição química do aço (% em peso) do aço bifásico DP1000

Elemento	Fe	C	Mn	Si	Cr	Ni	Al	Nb	W
Teor (%)	97,4%	0,12%	1,58%	0,49%	0,02%	0,03%	0,05%	0,01%	0,01%

As temperaturas intercríticas utilizadas (Tabela 2) no processamento térmico, realizado em banho de sal, foram estipuladas por meio de cálculo de equações disponíveis na literatura que se baseiam no efeito dos teores de elementos de liga nas temperaturas de início e fim do campo intercrítico, principalmente o carbono e o manganês[5,6].

Tabela 2. Parâmetros de tratamentos térmicos aplicados ao aço bifásico

Tratamento Térmico	Temperatura	Tempo de encharque	Resfriamento
Normalização	900°C	60 min	ar
Aquecimento	730°C		
intercrítico com	770°C	60 min	água
resfriamento rápido	810°C		

Em termos de caracterização microestrutural, foram conduzidas análises por microscopia óptica (microscópio Fortel com sistema de aquisição de imagens Kontrol Modelo M713) e por microscopia eletrônica de varredura (microscópio Shimadzu Modelo SSX-550 Superscan), análise quantitativa dos constituintes utilizando o método de contagem por pontos (Norma ASTM E562: 2011) e avaliação por difração de raios X (difratômetro Shimadzu Modelo XRD-7000), essa última com alvo metálico de cobre, ângulo de varredura entre 30° a 100° e passo de 0,02s⁻¹. A preparação metalográfica para a microscopia foi realizada seguindo as etapas de corte, embutimento a frio com resina acrílica, lixamento com lixas de granulometrias de #240, # 320, #400 e #600 e polimento com pasta de diamante em panos de 9µm e 3µm. Os reagentes químicos utilizados para revelação da microestrutura foram Nital 3% e LePera modificado. Para difração de raios X, as amostras foram lixadas e posteriormente decapadas em uma solução de ácido clorídrico por 60 minutos, de forma a retirar os efeitos da preparação nos resultados.

A determinação das propriedades mecânicas foi realizada por meio de ensaios de dureza Vickers e ensaios de tração, estes últimos considerando as direções longitudinal e transversal em relação à original de laminação, no intuito de estudar o efeito da direção de laminação anterior ao processamento térmico no comportamento do material. Na dureza Vickers (microdurômetro Shimadzu Modelo HMV 2T) foram empregadas duas amostras e 10 testes em cada uma, com carga de 1Kgf e tempo de aplicação de 15s. Os ensaios de tração foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios (Instron Modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados BlueHill 2 e extensômetro acoplado Instron Modelo 2630-100), com uma velocidade de movimentação da garra de 4,5 mm/min. Os corpos de prova para o ensaio de tração, duas amostras para cada condição, foram confeccionados por eletroerosão a fio (máquina Charmiles Modelo Robofil 240), com a geometria de as dimensões de acordo com a norma NBR 6152-1:2002.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As microscopias ópticas e eletrônicas de varredura do aço bifásico no estado inicial e nas três condições de tratamentos térmicos intercríticos são mostradas na Figura 1. De maneira geral, em todas as temperaturas estudadas, o material apresenta uma microestrutura composta pelos constituintes ferrita, indicado pelas setas contínuas, e martensita (constituente MA – martensita e austenita retida), indicado pelas setas tracejadas nas micrografias obtidas por MO. Nas imagens obtidas por MEV, o constituinte MA se mostra nitidamente em relevo em relação à matriz ferrítica.

No material no estado inicial (Figura 1.a) foi evidenciada uma microestrutura com morfologia contínua da martensita, assim como relatado por Wang e Wei (2013) [7], que também, para um aço da classe de resistência de 1000MPa, descreve a martensita com uma morfologia mais contínua, próxima a de uma rede. No material submetido a tratamentos intercríticos, comparando-se as microestruturas desenvolvidas nas três temperaturas aplicadas, verificou-se que, de maneira

qualitativa, a elevação da temperatura resultou em um aumento na fração de constituinte MA.

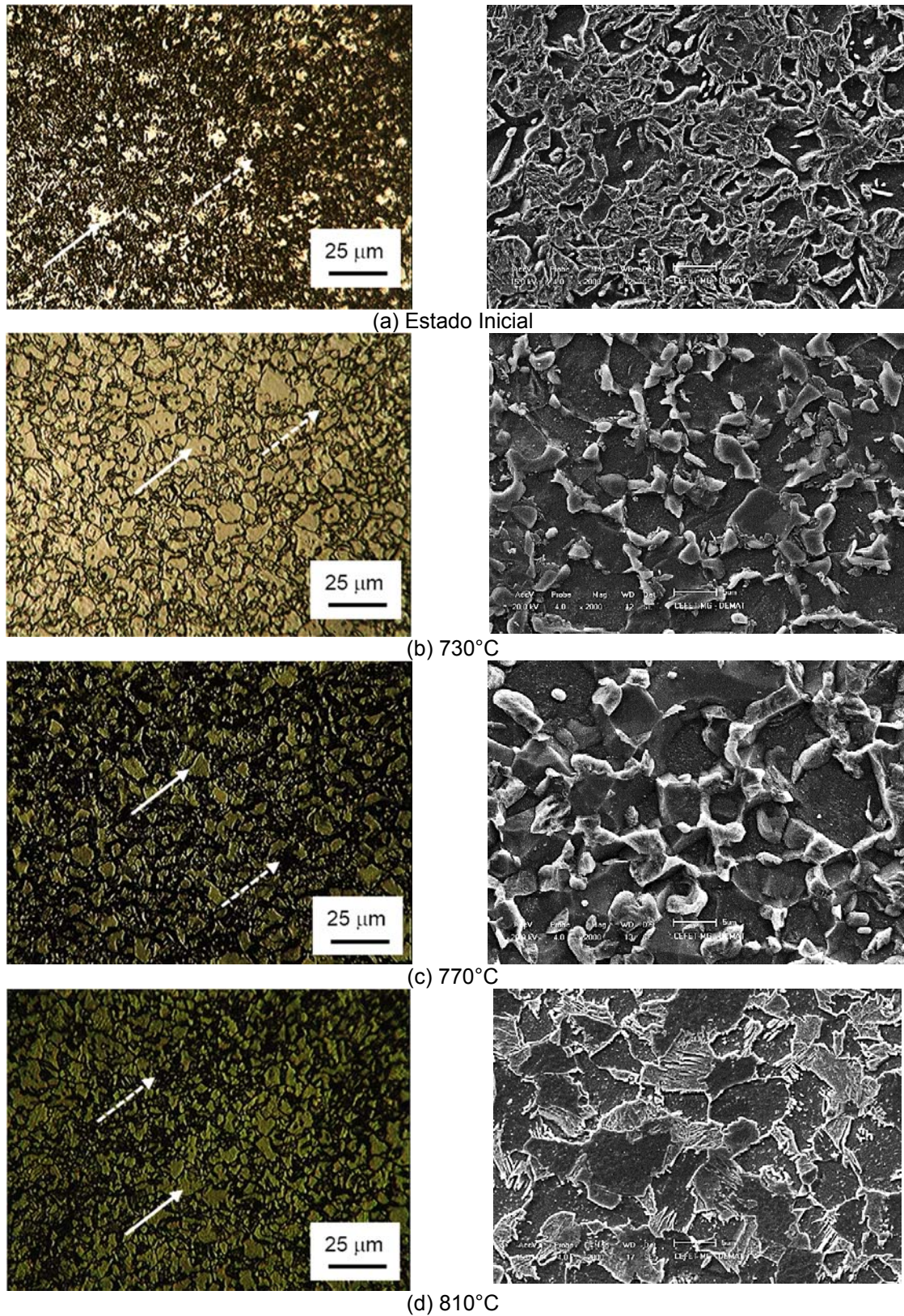


Figura 1. Micrografias ópticas e eletrônicas de varredura do aço bifásico no estado inicial e nas condições de tratamento intercrítico aplicadas.

O constituinte MA formado se apresentou disposto em forma de ilhas, distribuídas uniformemente ao longo dos contornos de grão ferríticos, característica perceptível principalmente nas imagens de microscopia eletrônica de varredura. Além da elevação da proporção do constituinte MA com o aumento de temperatura, verifica-se que a morfologia da martensita se altera na temperatura de aquecimento de 810°C, apresentando-se mais coesa, com porções interligadas, tornando a visualização das ilhas menos evidentes, podendo sua morfologia ser descrita como uma rede contínua.

Observa-se ainda, de maneira qualitativa, uma menor fração de martensita no aço tratado termicamente, nas três condições, em comparação com a liga no estado inicial. Estudos recentes, avaliando o efeito da elevação da temperatura intercrítica na microestrutura desenvolvida de aços C-Mn, observaram o aumento da fração de martensita conforme é conduzida a elevação da temperatura intercrítica [5,8,9].

Os resultados da análise semiquantitativa dos constituintes nas condições pesquisadas, com o objetivo de correlacionar tais dados com as propriedades, estão dispostos na Tabela 3 e representados na Figura 2.

Tabela 3. Percentuais dos constituintes obtidos por meio da análise quantitativa nas diversas condições estudadas

Amostra	% Ferrita	Desvio Padrão	% MA	Desvio Padrão	Outros Constituintes	Desvio Padrão
Estado Inicial	46,32%	5,76	49,50%	7,89	4,18%	9,77
730°C	67,56%	2,90	29,54%	3,49	2,90%	6,89
770°C	62,65%	9,67	34,48%	8,93	2,87%	5,73
810°C	56,78%	4,46	38,85%	7,33	4,37%	4,99

Verifica-se que, para o material submetido ao tratamento intercrítico, a elevação de temperatura levou ao aumento na fração de martensita e, de forma complementar, resultou na diminuição da fração de ferrita. Além dos constituintes citados, em aços bifásicos podem estar presentes ainda, em menor proporção, perlita ou, até mesmo, bainita. O material no estado inicial apresentou percentuais de ferrita e martensita semelhantes, com uma pequena superioridade para a fração de MA. Em relação aos resultados do aço tratado termicamente, é observado um aumento da proporção de martensita e diminuição da ferrita de acordo com a elevação da temperatura intercrítica exibindo, em todas as condições de tratamento intercrítico, valores de MA inferiores ao material no estado inicial. A fração dos demais constituintes revelou-se em percentuais reduzidos, não evidenciando, no entanto, uma tendência de acordo com a temperatura intercrítica aplicada.

De maneira geral, os dados obtidos por meio da análise semiquantitativa dos constituintes reiterou os resultados referentes à observação qualitativa da fração de martensita nas microscopias exibidas. Especificamente em relação ao material no estado inicial, o percentual de constituinte MA observado se aproximou do encontrado nos estudos de Wang e Wei (2013) [7], que identificou um volume de martensita de 50% na caracterização de um aço DP 1000.

Considerando as condições envolvendo tratamento térmico, dados semelhantes foram observados por Mazaheri et al. (2014) [8], que relacionaram a tendência de elevação do constituinte MA com a temperatura à maior quantidade de austenita formada no aquecimento intercrítico.

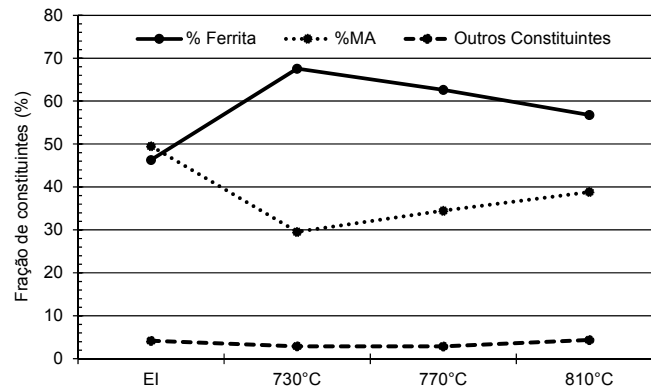


Figura 2. Representação gráfica da análise quantitativa nas diversas condições estudadas.

Os resultados das análises por difração de raios X em todas as condições investigadas são exibidos na Figura 3. Verifica-se a presença de picos de ferrita/martensita, com correspondência aos planos (110), (200), (211) e (220), sem evidências da existência de outras fases presentes. Os difratogramas estão, a princípio, de acordo com os resultados da análise microscópica, por meio da qual foi observada a presença de constituintes que condizem com as fases apresentadas nos gráficos. No entanto, não foram verificados picos relativos à austenita retida na estrutura do material. Acredita-se que a proporção dessa fase, combinada à martensita formando o constituinte MA, seja reduzida, não sendo possível ser identificada pela técnica empregada. Em relação aos demais constituintes (perlita, bainita, carbonetos), não identificados por MO e MEV, apenas estimados pela técnica de metalografia semiquantitativa, não foram detectados picos relativos às fases (cementita e outros carbonetos) que compõem os mesmos. Os resultados obtidos são reiterados por estudos nos quais aços carbono manganês das classes DP 600 e de alta resistência e baixa liga apresentaram, de maneira semelhante ao presente trabalho, apenas os picos referentes às fases ferrita/martensita [9,10].

Os resultados de dureza Vickers média, acompanhados dos desvios padrão, do aço estudado no estado inicial e após os tratamentos térmicos é exibido na Tabela 4 e representado graficamente na Figura 4. Os valores obtidos podem ser relacionados aos resultados exibidos pelas microscopias e pela análise semiquantitativa dos constituintes. A elevação da dureza se deu de acordo com o aumento na fração de martensita com a elevação da temperatura. No entanto, as durezas nas condições tratadas não ultrapassaram os valores encontrados para o material no estado inicial. Ghaheri et al. [5] também observaram a elevação dos valores de dureza Vickers ao estudar o efeito do aumento da temperatura intercrítica em rotas de processamento por têmpera direta e recozimento contínuo, a partir de um aço bifásico inicialmente normalizado. Esses autores relacionaram o aumento da dureza com uma maior solubilização de carbono na austenita nas temperaturas mais elevadas.

Mazaheri et al. [8] ressaltam que o aumento da temperatura intercrítica e, conseqüentemente, da fração de martensita, exerce dois efeitos contrários sobre a dureza. A princípio, ocorreria o aumento da dureza devido à elevação do percentual do constituinte de maior dureza, neste caso, a martensita. Por outro lado, a elevação da temperatura intercrítica, implicando em uma maior proporção de austenita antes do resfriamento brusco, resultaria em uma menor quantidade de carbono equivalente presente na austenita e, conseqüentemente, martensita, cuja dureza depende fortemente do % de carbono. Dessa forma, a propriedade apresentada pelo material após os tratamentos intercríticos seria um balanço das influências citadas.

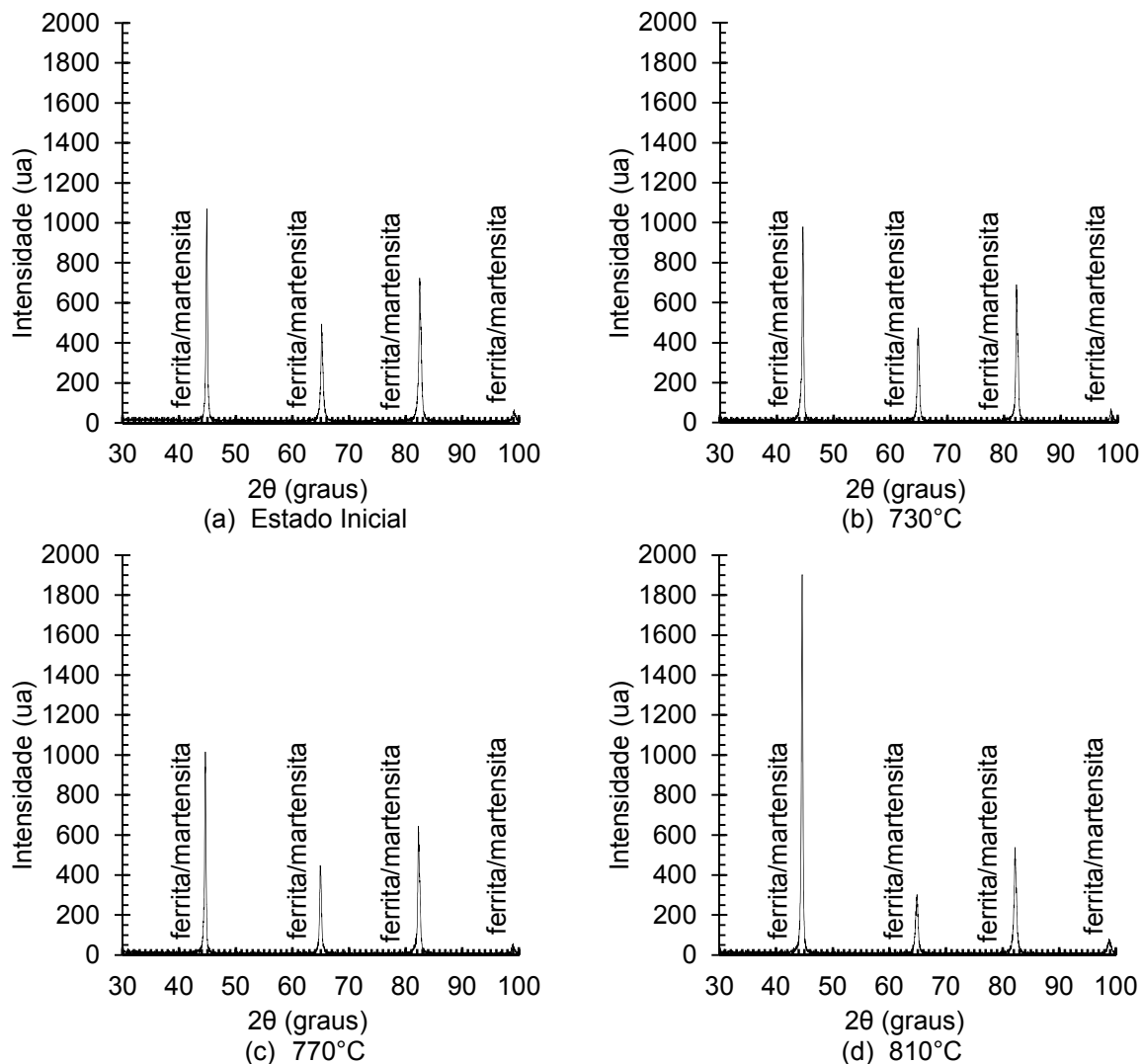


Figura 3. Difratogramas do aço bifásico no estado inicial e tratado termicamente.

Tabela 4. Dureza Vickers do aço nas condições estudadas.

Condição	Estado Inicial	730°C	770°C	810°C
Dureza média	349,40HV	229,00HV	267,10HV	292,70HV
Desvio Padrão	11,23	6,57	5,20	3,30

A Tabela 5 exibe os valores médios de limite de resistência, de limite de escoamento e de alongamento uniforme obtidos a partir das curvas tensão versus deformação convencionais, seguida das Figuras 5, 6 e 7, com a comparação dos resultados do material no estado inicial e tratado termicamente.

O aço bifásico no estado como recebido exibiu valor de limite de resistência um pouco acima do esperado pela especificação do material. Ghassemi-Armaki et al. [12] estudaram a deformação dos constituintes ferrita e martensita em um aço bifásico da classe de resistência de 980MPa, obtendo na caracterização do material no estado inicial o valor de 1050MPa para o limite de resistência e um alongamento uniforme de 9,5%.

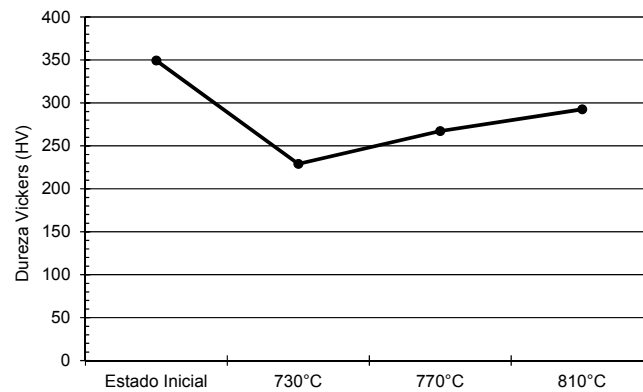


Figura 4. Gráfico representativo dos valores de dureza Vickers nas condições estudadas.

Tabela 5. Propriedades mecânicas no estado inicial e nas três temperaturas intercríticas estudadas.

Condição		Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento uniforme (%)
Estado Inicial	Longitudinal	828MPa	1085MPa	6,67%
	Transversal	847MPa	1114MPa	5,64%
730°C	Longitudinal	442MPa	896MPa	9,81%
	Transversal	427MPa	896MPa	9,92%
770°C	Longitudinal	584MPa	1098MPa	6,99%
	Transversal	553MPa	1050MPa	6,49%
810°C	Longitudinal	819MPa	1266MPa	4,99%
	Transversal	810MPa	1247MPa	3,92%

Ao comparar o material nas distintas temperaturas de tratamento intercrítico, percebe-se um aumento das tensões limite de resistência e de escoamento e uma redução do alongamento uniforme com a elevação da temperatura. O valor obtido no estado inicial de limite de resistência à tração e o alongamento percentual se mostraram próximos aos exibidos na temperatura de 770°C, enquanto que o valor do limite de escoamento se aproximou do encontrado para a temperatura de 810°C. Mazaheri et al. [8] destacam que o efeito do aumento da resistência mecânica relacionado à presença de martensita deve-se, além da elevação da proporção do constituinte mais resistente, à sua capacidade de afetar o comportamento na deformação na matriz de ferrita pela introdução de tensões internas, o que ocorre devido ao gradiente de deformação entre os constituintes com diferentes comportamentos. Os autores apontam que a martensita afeta a ferrita devido às discordâncias introduzidas nessa estrutura vizinha às ilhas de martensita, como resultado de deformações plásticas associadas à expansão volumétrica da transformação martensítica [13,14]. As discordâncias são requeridas para acomodar este gradiente e para permitir a deformação compatível nas duas fases [15,16]. Considerando os efeitos da direção de laminação prévia aos tratamentos térmicos no comportamento do material, verifica-se que, em geral, apesar de uma pequena superioridade nos valores referentes ao estudo na direção transversal, não foram evidenciadas diferenças significativas entre as direções estudadas.

4 CONCLUSÃO

O material estudado apresentou microestruturas compostas pelos constituintes ferrita e martensita, e o aumento da temperatura intercrítica resultou em uma

elevação da fração de martensita nas microestruturas. Em relação às propriedades mecânicas, o aumento da temperatura intercrítica resultou em uma elevação dos valores da dureza, das tensões limite de resistência e de escoamento, assim como a redução do alongamento percentual. Não foram evidenciadas diferenças significativas nas propriedades mecânicas com a direção de laminação prévia.

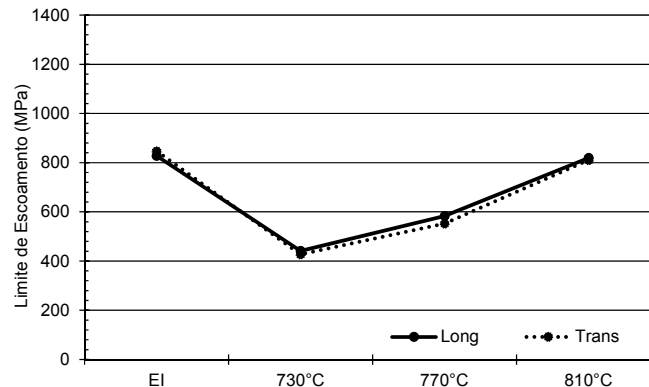


Figura 5. Limites de escoamento apresentados pelo material nas condições estudadas nos sentidos longitudinal e transversal ao de laminação original.

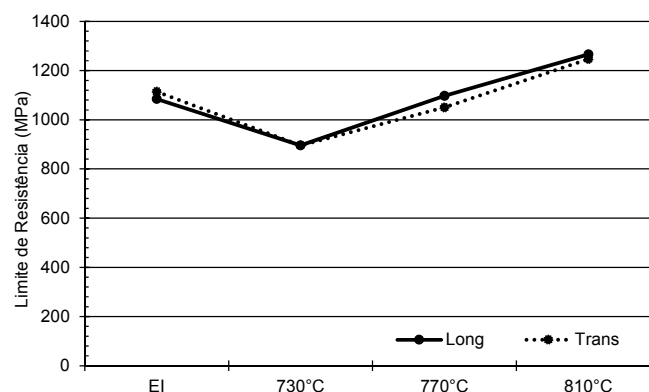


Figura 6. Limites de resistência à tração apresentados pelo material nas condições estudadas nos sentidos longitudinal e transversal ao de laminação original.

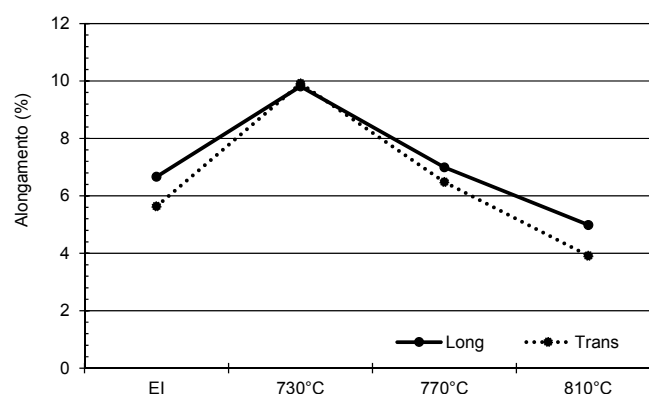


Figura 7. Alongamentos percentuais apresentados pelo material nas condições estudadas nos sentidos longitudinal e transversal ao de laminação original.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelas bolsas de mestrado e de iniciação científica, respectivamente, e à Metaltemp pelos tratamentos térmicos.

REFERÊNCIAS

- 1 Shi, L.; Yan, Z.; Liu, Y.; Zhang, C.; Qiao, Z.; Ning, B.; Li, H. Improved toughness and ductility in ferrite/acicular ferrite dual phase steel through intercritical heat treatment. *Materials Science & Engineering A*. 2014; 590:7-15.
- 2 Hovart, C.D. Advanced steels for lightweight for automotive structures. In: MALLICK, P.K. *Materials, Design and Manufacturing for Lightweighth Vehicles*. New York: Elsevier; 2010.
- 3 Lis, J.; Lis, A.K.; Kolan, C. Processing and properties of C-Mn steel with dual phase microstructure. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005; 162: 350-354.
- 4 Colpaert, H. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. 4 ed. São Paulo: Blücher; 2008.
- 5 Ghaheri, A.; Shafyeyi, 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*. 2014; 62: 305-319.
- 6 Movahed, P.; Kolahgar, S.; Marashi, S.P.H.; Pournvari, M.; Parvin, N. The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steels sheets. *Materials Science and Engineering A*. 2009; 518:1-6.
- 7 Wang, W.; Wei, X. The effect of martensite volume and distribution on shear fracture propagation of 600–1000 MPa dual phase sheet steels in the process of deep drawing. *International Journal Mechanical Science*, 2013; 67: 100-107.
- 8 Mazaheri, Y.; Kermapur, A.; Najafizadeh, A.; Saedi, N. Effects of initial microstructure and thermomechanical processing parameters on microstructures and mechanical properties of ultrafine grained dual phase steels. *Materials Science & Engineering A*. 2014; 612: 54-62.
- 9 Zhao, Z.; Tong, T.; Liang, J.; Yin, H.; ZHAO, A.; TANG, D. Microstructure, mechanical properties and fracture behavior of ultra-high strength dual-phase steel. *Materials Science & Engineering*. 2014; 618: 182-188.
- 10 Hadianfard, M.J. Low cycle fatigue behavior and failure mechanism of a dual-phase steel. *Materials Science and Engineering A*. 2009; 499: 493-499.
- 11 Agarwal, N.; Chaudhari, G.P.; Nath, S.K. Slurry and cavitation erosion of HSLA steel processed by warm multidirectional forging and inter-critical annealing. *Tribology International*. 2014; 70: 18-25.
- 12 Ghassemi-Armaki, H.; Maab, R.; Bhat, S.P.; Sriram, S.; Greer, J.R.; Kumar, K.S. Deformation response of ferrite and martensite in a dual phase steel. *Acta Materialia*. 2014; 62: 197-211.
- 13 Kadkhodapour, J.; Schmauder, S.; Raabe, D.; Ziaei-Rad, S.; Weber, U.; Calgagnotto, M. Experimental and numerical study on geometrically necessary dislocations and non-homogeneous mechanical properties of the ferrite phase in dual phase steels. *Acta Materialia*. 2011; 59: 4387-4394.
- 14 Calgagnotto, M.; Ponge, D.; Demir, E.; Raabe, D. Orientation gradients and geometrically necessary dislocations in ultrafine grained dual-phase steels studied by 2D and 3D EBSD. *Materials Science Engineering*. 2010; 527: 2738-2746.
- 15 Kang, Y.L.; Han, Q.H.; Zhao, X.M.; Cai, M.H. Influence of nanoparticle reinforcements on the strengthening mechanisms of an ultrafine-grained dual phase steel containing titanium. *Materials and Design*. 2012; 41: 370-379.
- 16 Sodjit, S.; Uthaisangasuk, V. Microstructure based prediction of strain hardening behavior of dual phase steels. *Materials and Design*. 2012; 41: 370-379.