

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE RECOZIMENTO INTERCRÍTICO PARA OBTENÇÃO DE AÇOS BIFÁSICOS¹

Fernando Generoso Neiva Ferreira²

Andersan dos Santos Paula³

Nilton Vieira Larcher⁴

Rodrigo Rocha de Meira⁵

Resumo

O aumento crescente dos requisitos de segurança a serem atingidos pela indústria automotiva vem cada vez mais exigindo a utilização de aços com maior conteúdo tecnológico, que é o caso do aço bifásico ("dual-phase"). Estes aços são caracterizados por uma microestrutura ferrítica-martensítica, associado a uma matriz ferrítica com ilhas dispersas de martensita. Neste trabalho, estudaram-se, em escala laboratorial, os efeitos das temperaturas de encharque intercrítico (750, 800 e 850°C) e distintas taxas obtidas por diferentes meios de resfriamento (ar, ar forçado e água) na obtenção de microestrutura bifásica a partir de aço laminado a frio "full-hard" (produzido industrialmente), com microadições de Nb e Mo. Utilizando ensaios mecânicos de tração, microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV), observou-se a influência do teor de carbono contido na austenita pré-resfriamento nas microestruturas resultantes e a influência da presença de ferrita encruada sobre as propriedades mecânicas das amostras estudadas.

Paravras-chave: Recozimento intercrítico; Aços avançados de alta resistência; Aços bifásicos; Ferrítico-martensítico.

INFLUENCE OF INTERCRITICAL ANNEALING PARAMETERS FOR OBTAINING DUAL PHASE STEELS

Abstract

The increasing safety requirements to be met by the automotive industry are increasingly demanding the use of higher technological content steels, which is the case of dual phase steel. These steels are characterized by a ferritic-martensitic microstructure associated with a ferritic matrix with scattered martensite islands. In this paper, we studied, in a laboratory scale, the effects of intercritical soaking temperatures (750, 800 and 850°C) and distinct cooling rates obtained by different cooling means (air, forced air and water) to obtain a dual phase microstructure from a full hard cold rolled steel (industrially produced), microalloyed with Nb and Mo. Using tensile test, optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM), we observed the influence of carbon content in pre-cooling austenite in the resulting microstructures and the influence of work-hardened ferrite on the mechanical properties of the studied samples.

Key-words: Intercritical annealing; Advanced high strength steels; Dual phase steels; Ferritic-martensitic.

¹ *Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.*

² *Engenheiro Metalurgista. Eng. de Desenvolvimento. Companhia Siderúrgica Nacional. Volta Redonda, RJ, Brasil.*

³ *Engenheiro Metalurgista. D.Sc. Professora Adjunta. Universidade Federal Fluminense. Volta Redonda, RJ, Brasil.*

⁴ *Engenheiro Metalurgista. D.Sc. Coordenador de Projetos Especiais. Companhia Siderúrgica Nacional. Volta Redonda, RJ, Brasil.*

⁵ *Engenheiro Metalurgista. M.Sc. Especialista de Desenvolvimento. Companhia Siderúrgica Nacional. Volta Redonda, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A necessidade simultânea de diminuir a emissão de poluentes provenientes da queima de hidrocarbonetos, o aumento na segurança dos passageiros e o uso de materiais sucedâneos, como o alumínio, na fabricação de estruturas automotivas, encorajaram as indústrias siderúrgicas e automotivas a desenvolverem novas tecnologias com base na aplicação de materiais ferrosos, na fabricação de veículos. O ULSAB (“Ultra Light Steel Auto Body”)⁽¹⁾ foi o precursor deste movimento, que propôs, desenvolveu e testou a substituição do aço carbono convencional utilizado nas partes estruturais por aços alta resistência baixa liga (ARBL), em inglês HSLA (“High Strength Low Alloy”) e aços avançados de alta resistência, em inglês AHSS (“Advanced High Strength Steels”), dentre eles os aços bifásicos, que geraram uma estrutura mais leve devido à redução de material com simultâneo aumento de tenacidade.

O Aço “dual-phase” (DP) é um material de crescente interesse comercial para certas aplicações automotivas. Forgas Júnior⁽²⁾ afirma que o desempenho dos AHSS, como o aço bifásico, é superior ao dos aços de alta resistência, dos aços livres de intersticiais, dos aços estruturais, dos aços ao manganês ou até mesmo dos aços ARBL. Os aços “dual-phase” combinam alta resistência e ductilidade relativamente aos outros tipos de aços automotivos (Figura 1) e possibilitam a utilização de chapas estruturais de menores espessuras e conseqüente redução no peso dos mesmos.

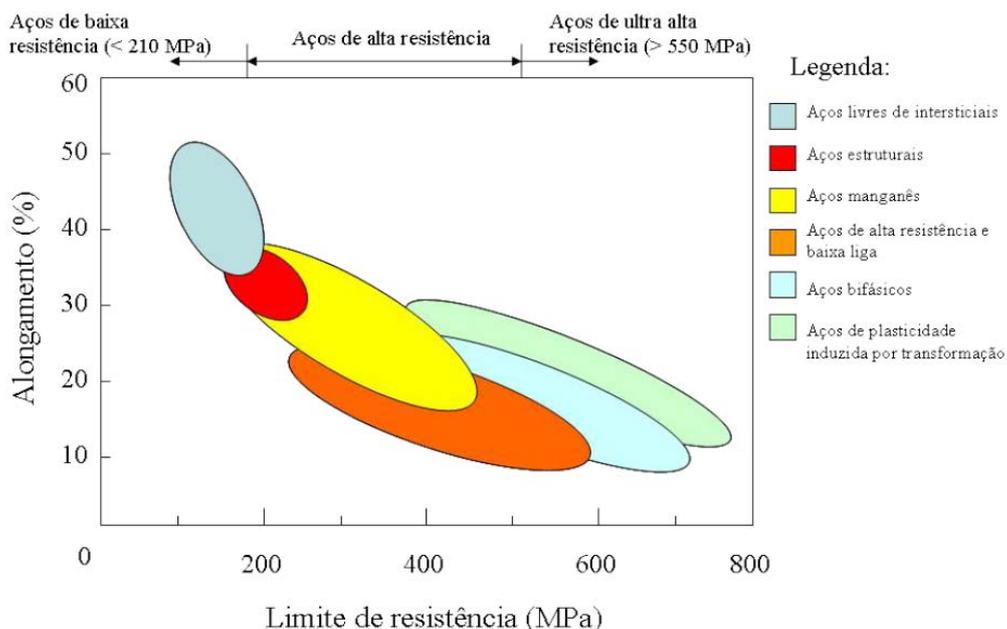


Figura 1. Comparativo entre os aços alta resistência AHSS, caso dos aços bifásicos, e aços de alta resistência.⁽²⁾

A microestrutura dos aços bifásicos é composta de uma matriz de ferrita macia e, dependendo da resistência, entre 20 a 70% em volume de fases duras, normalmente martensita (Figura 2). A fase ferrita geralmente é contínua, dando a estes aços excelente ductilidade. Quando estes aços são deformados, no entanto, a tensão é concentrada na fase de menor resistência (ferrita), criando a elevada taxa de endurecimento por deformação apresentada por estes aços. Hüseyin, Havva e Ceylan⁽³⁾ dizem que os aços “dual-phase” têm sido desenvolvidos através de novas combinações de relações entre ferrita e martensita.

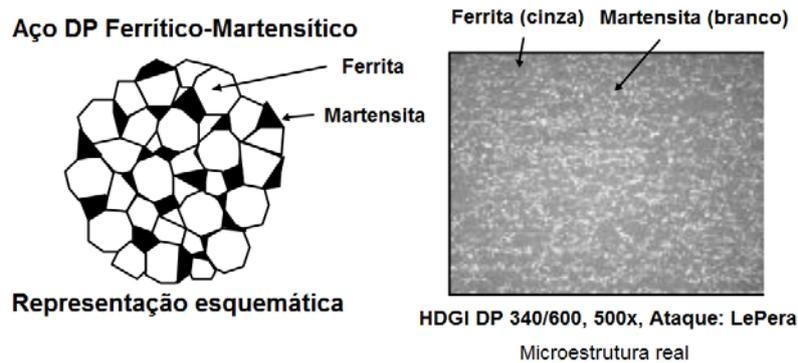


Figura 2. Microestrutura característica de um aço bifásico ferrítico-martensítico.⁽¹⁾

Este trabalho tem como objetivo correlacionar os parâmetros de recozimento intercrítico com as propriedades mecânicas e microestruturais de um aço bifásico com microadições de Nb e Mo.

Neste trabalho, estudaram-se, em escala laboratorial, os efeitos das temperaturas de encharque intercrítico (750, 800 e 850°C) e distintas taxas obtidas por diferentes meios de resfriamento (ar, ar forçado e água) na obtenção de microestrutura bifásica a partir de aço laminado a frio “full-hard” (produzido industrialmente), com microadições de Nb e Mo. Utilizando ensaios mecânicos de tração, microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV), observou-se a influência do teor de carbono contido na austenita pré-resfriamento nas microestruturas resultantes e a influência da presença de ferrita encruada sobre as propriedades mecânicas das amostras estudadas.

2 MATERIAL A MÉTODOS

2.1 Material

O material utilizado neste trabalho foi produzido pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) em escala industrial (Aciaria / Lingotamento contínuo / Reaquecimento de placas / Laminação a quente / Decapagem / Laminação a frio). A amostra é de produto laminado a frio antes da etapa de recozimento (full-hard), com 1,5 mm de espessura. A composição química do material está representada pelas percentagens dos elementos de liga na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química dos materiais em estudo

Composição química (% _p)				
C	Mn	Mo	Al	Nb
0,105 máx	1,70 máx	0,25 máx	0,045 máx	0,025 máx

As amostras de material laminado a frio “full-hard” foram cortadas em corpos de prova de dimensões 70 x 290 mm (Direção transversal (DT) x Direção de Laminação (DL)) para realização dos tratamentos térmicos.

2.2 Recozimento Intercrítico

Trzaska e Dobrzanski⁽⁴⁾ mostraram que as temperaturas de início e final de formação de austenita durante o aquecimento podem ser aproximadas pelas equações (1) e (2), respectivamente:

$$Ac_1[^\circ\text{C}] = 739 - 22,8.C - 6,8.Mn + 18,2.Si + 11,7.Cr - 15.Ni - 6,4.Mo - 5.V - 28.Cr \quad (1)$$

$$Ac_3[^\circ\text{C}] = 937,3 - 224,5.\sqrt{C} - 17.Mn + 34.Si - 14.Ni + 21,6.Mo + 41,8.V - 200Cr \quad (2)$$

Daí, para a composição estudada, teríamos $Ac_1 \cong 720^\circ\text{C}$ e $Ac_3 \cong 860^\circ\text{C}$. Então as temperaturas de encharque intercristicas 750, 800 e 850°C, foram selecionadas. O tratamento térmico foi realizado por 180 segundos em um forno tipo mufla. As amostras foram resfriadas em ar, ar forçado, água a 80°C e salmoura (solução de água, gelo, sal e álcool).

Nota: As amostras resfriadas em salmoura foram utilizadas somente analisar indiretamente a microestrutura reinante à temperatura do tratamento térmico em condição metaestável.

Para registrar as taxas de resfriamento foi utilizado um termopar tipo k (cromel-alumel) que foi unido aos corpos de prova por solda a ponto, os dados obtidos foram coletados e transferidos para um computador.

2.3 Preparação Metalográfica

Neste trabalho, para o processo de lixamento, foram utilizadas lixas de carvão de silício com diferentes granulometrias: 100, 220, 320, 400, 600, 1200 mesh, sucessivamente, fazendo uso de água como lubrificante. O polimento manual foi realizado na poliriz Panambra DPU-10, em rotação de 200 rpm.

2.4 Caracterização Microestrutural

Para análise da morfologia das microestruturas obtidas, as amostras foram atacadas com Nital 3%, por imersão, durante 30 segundos, ou até que as amostras ficassem foscas.

Para a quantificação da segunda fase formada em cada meio de resfriamento (ar, ar forçado e água), utilizou-se o ataque com Picral 5%, por imersão, durante 60 segundos, ou até que as amostras ficassem foscas.

A fim de otimizar os resultados com os ataques Picral 5%, a solução original foi submetida a um tratamento, caracterizado por Colpaert⁽⁵⁾ como envelhecimento, para torná-lo mais eficiente, que consiste em adicionar pequenas sucatas de aço ao carbono na mistura, que deixa de ser amarelada e passa a apresentar uma tonalidade verde escura, quase preta.

As amostras foram observadas utilizando-se um Microscópio Óptico (MO), equipamento da marca ZEISS, modelo AXIOPHOT, para morfologia e quantificação de fases, e um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), equipamento da marca FEI, modelo QUANTA 3D FEG, para morfologia e análise química da martensita (neste caso das amostras fruto do resfriamento ao ar, ar forçado e água).

2.5 Caracterização Mecânica

Para determinação das propriedades mecânicas, conforme NBR 6152, foram extraídos dois corpos de prova na direção longitudinal por condição de tratamento, com base de medida de 80 mm e o ensaio de tração foi realizado, equipamento da marca INSTRON, modelo 5585H, e extensômetro AVE, com o uso de 2 velocidades diferentes ao longo do ensaio: 1,2 cm/min até o Limite de escoamento e de 38,4 mm/min após o escoamento até o limite de resistência.

Foram feitas 5 medidas de dureza Rockwell B com carga de 100 Kg, e posteriormente convertidas para Brinell, em cada uma das amostras/condições de estudo, com auxílio de um durômetro da marca WILSON-INSTRON, modelo Series B 2000.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Baseado nos valores calculados, as taxas de resfriamento para os meios ar, ar forçado e água a 80°C foram 5°C/s, 20°C/s e 200°C/s, respectivamente. Ximenes⁽⁶⁾ praticou taxas de resfriamento semelhantes ao estudar os efeitos de tratamentos térmicos intercríticos em um aço ferrítico-bainítico.

As frações volumétricas de segunda fase mostradas na figura 3 são semelhantes para os três meios de resfriamento mostrados nas temperaturas de 750 e 800°C. Como a austenita formada em baixas temperaturas é muito rica em carbono, a temperabilidade desta fase é aumentada a ponto de possivelmente permitir que esta se transforme totalmente em martensita mesmo com baixas taxas de resfriamento.

Para a temperatura de 850°C, o resfriamento em água apresentou valores bem mais elevados que os outros dois meios de resfriamento. Isto ocorreu em função da elevada taxa de resfriamento alcançada com este meio de resfriamento, fazendo com que toda a austenita formada durante o aquecimento, mesmo que pobre em carbono, se transformasse em martensita.

A caracterização microestrutural das amostras tratadas termicamente e resfriadas em salmoura evidenciam, pela quantidade de martensita presente na microestrutura final, a quantidade de austenita existente durante o recozimento intercrítico. Esta análise teve de ser realizada somente qualitativamente, devido a limitações do ataque Picral 5% para quantificação de fases. O aumento da fração volumétrica de austenita com o aumento da temperatura de encharque, associada as regiões escuras referente aos grãos de martensita presente nas microestruturas, é mostrado na Figura 4.

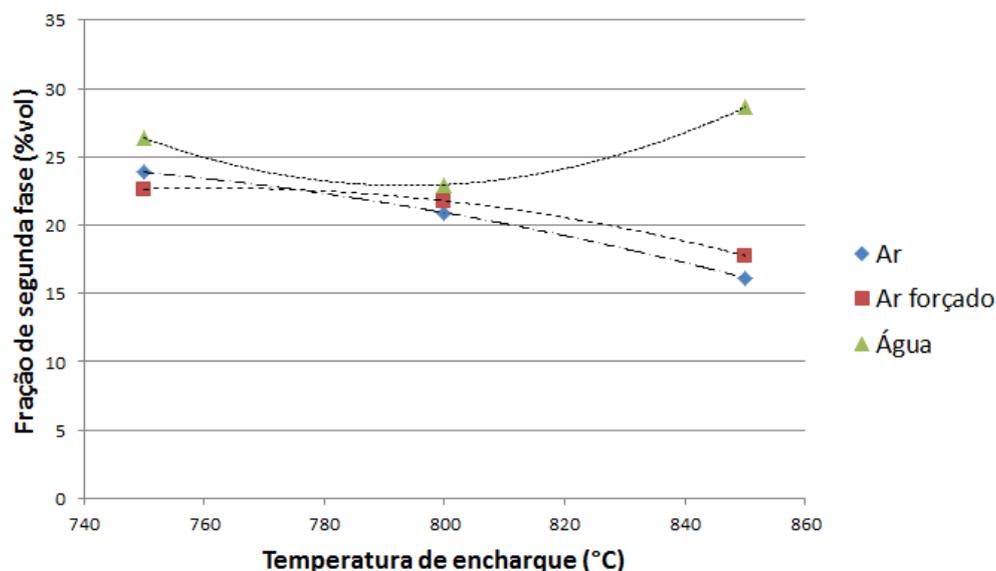


Figura 3. Fração volumétrica de martensita, percentual, para os materiais estudados.

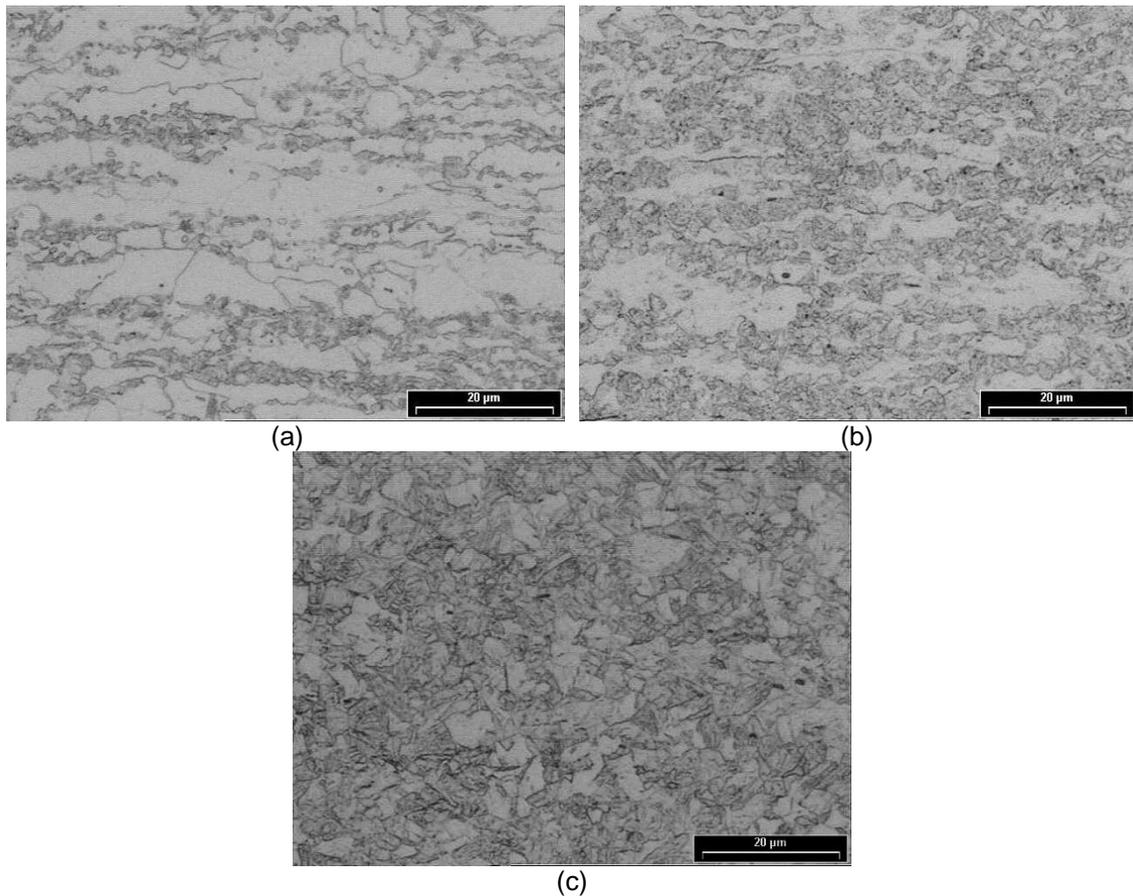


Figura 4. Micrografias das amostras tratadas termicamente e resfriadas em salmoura: (a) 750°C; (b) 800°C; (c) 850°C. Ataque: Nital 3%.

Os microconstituintes observados para os meios de resfriamento ar e ar forçado nas três temperaturas de recozimento em estudo são evidenciados na Figura 5. Apesar da fração volumétrica de austenita aumentar com o aumento da temperatura de recozimento intercrítico, a caracterização metalográfica das amostras resfriadas ao ar e ar forçado apresentaram formação, além de ferrita (F) e microconstituente martensita-austenita retida (MA), de outras microestruturas, como bainita (B) em algumas regiões, nas temperaturas de 800 e 850°C. Hüseyin, Havva e Ceylan⁽³⁾ apresentaram resultados similares em 2008, ao tratar aços microligados a 750, 785 e 820°C, resfriando ao ar.

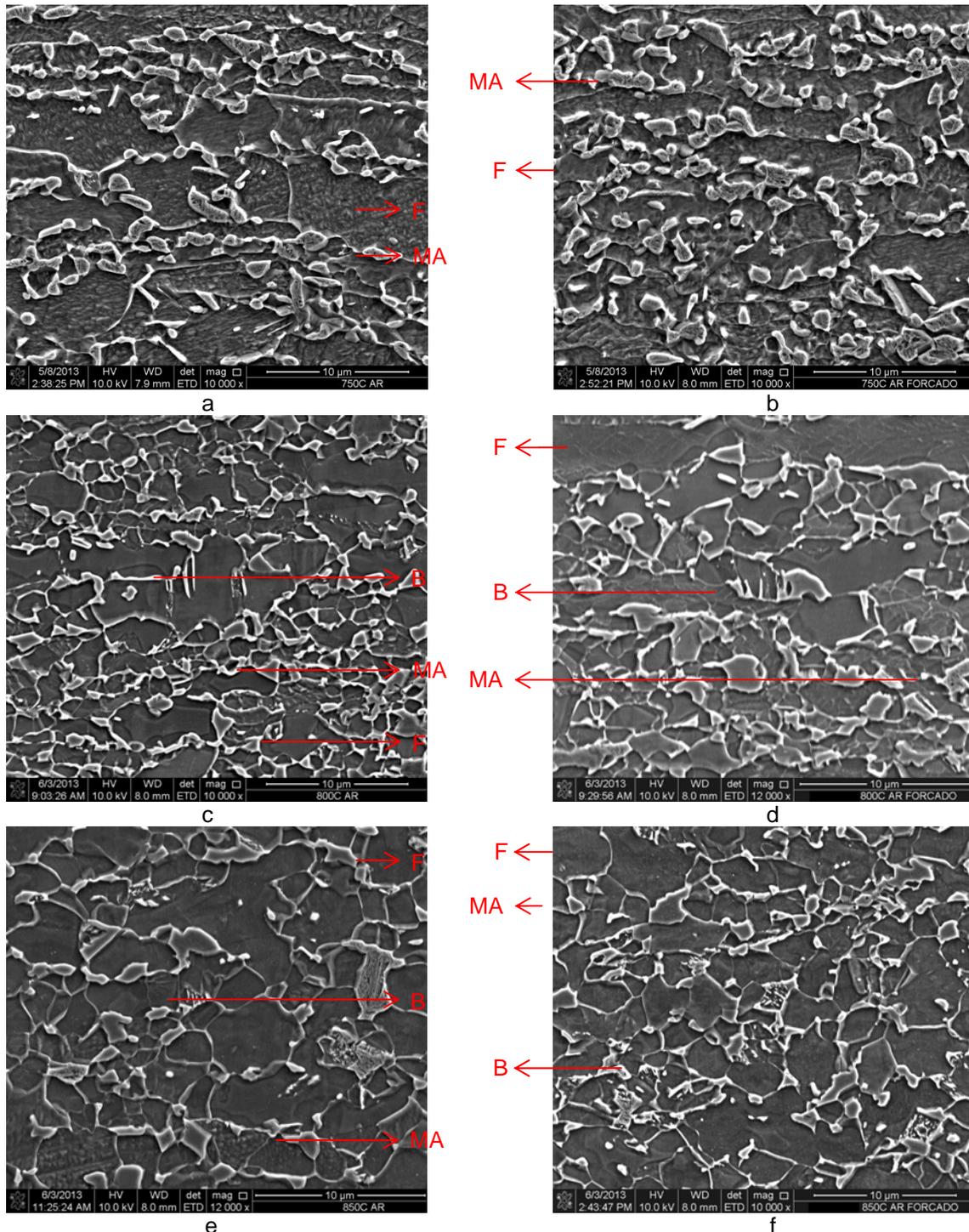


Figura 5. Amostras tratadas termicamente e resfriadas ao ar (esquerda) e ar forçado (direita). Temperaturas de encharque: (a) e (b) 750°C; (c) e (d) 800°C; (e) e (f) 850°C. MEV – Imagens de elétrons secundários. Ataque: Nital 3%.

O aparecimento do microconstituente bainita para os meios de resfriamento menos severos (ar e ar forçado) e temperaturas de 800 e 850°C (conforme Figura 5 e detalhamento microestrutural na Figura 6) está diretamente ligado à redução da concentração de carbono na austenita, o que favorece a cinética das transformações de caracteres difusional e semi-difusional. De maneira análoga, as concentrações de carbono nos materiais resfriados em salmoura representam austenita pré-

resfriamento. O empobrecimento em carbono da martensita presente para os materiais estudados é evidenciado na Figura 7.

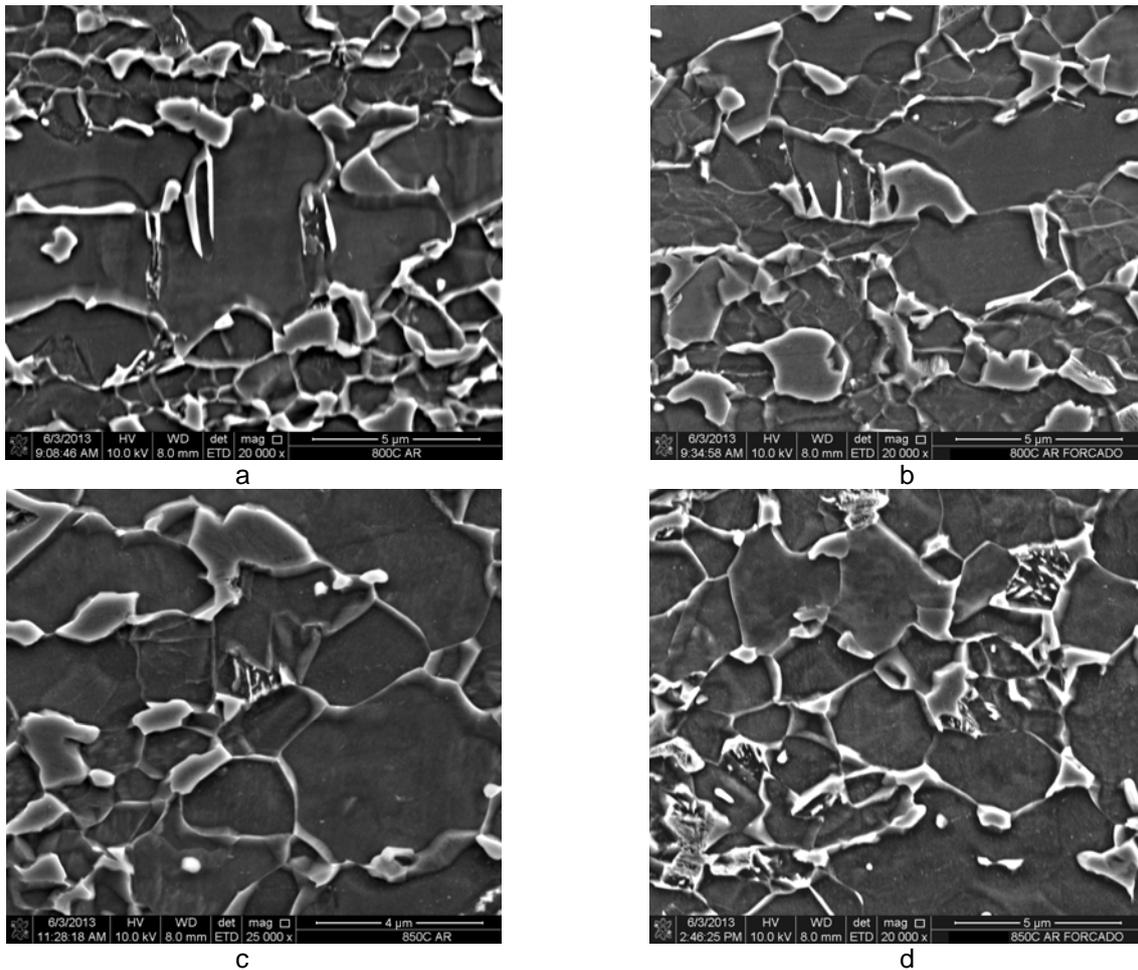


Figura 6. Detalhamento microestrutural das amostras tratadas termicamente e resfriadas ao ar (esquerda) e ar forçado (direita). Temperaturas de encharque: (a) e (b) 800°C; e (c) e (d) 850°C. MEV – Imagens de elétrons secundários. Ataque: Nital 3%.

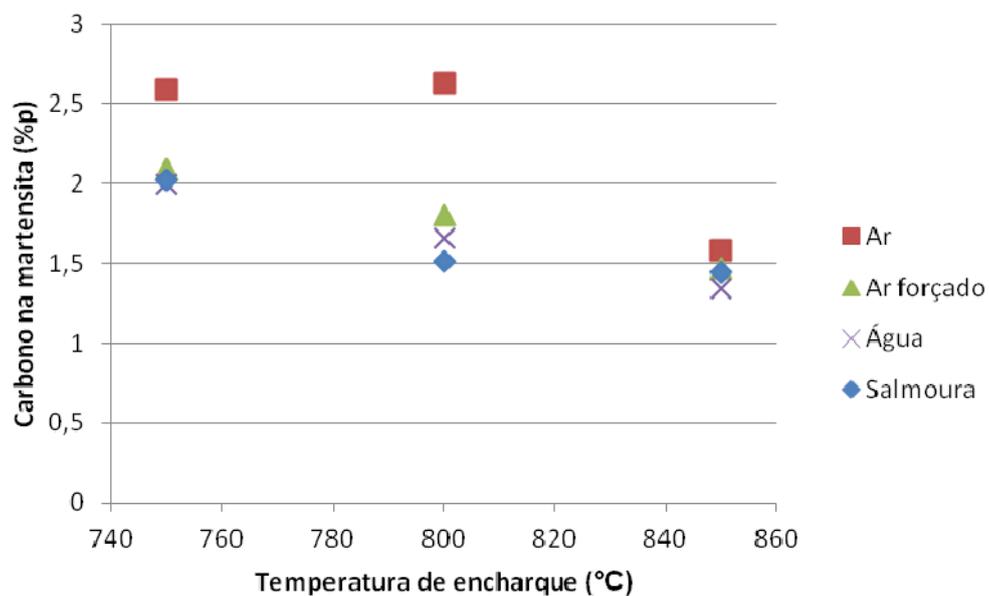


Figura 7. Concentração de carbono na martensita, percentual em peso, para os materiais estudados.

A partir da Figura 5 também podemos observar a matriz ferrítica encruada para as amostras tratadas a 750°C (Figura 5 – a, b), parcialmente recristalizadas a 800°C (Figura 5 – c, d) e totalmente recristalizada a 850°C (Figura 5 – e, f). Este efeito reflete diretamente nos menores valores de alongamento e maiores valores de limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e dureza encontradas para as amostras tratadas a 750°C. Drumond⁽⁶⁾ observou comportamentos semelhantes ao estudar aços bifásicos microligados ao molibdênio. A Tabela 2 mostra os resultados de propriedades mecânicas encontrados.

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos materiais estudados

Identificação		LE (MPa)	LR (MPa)	Al (%)	Dureza (HB3000)
Encharque (°C)	Meio de resfriamento				
750	Ar	408	723	11,3	200
	Ar forçado	433	745	12,2	195
	Água	475	795	9,1	222
800	Ar	379	671	15,3	176
	Ar forçado	396	701	12,6	185
	Água	529	856	5,9	231
850	Ar	323	579	24,5	159
	Ar forçado	332	601	19,7	162
	Água	921	1110	2,7	279

O LE, LR e dureza das amostras resfriadas ao ar e ar forçado apresentaram o mesmo comportamento, diminuindo seus valores com o aumento da temperatura de encharque, ao passo que as amostras resfriadas em água apresentaram acréscimo, sendo mais acentuado para os valores de LE, cerca de 80% (Figura 8). A redução nestas propriedades para as amostras resfriadas ao ar e ar forçado foi devida a formação de fases de menor resistência, como a bainita, no lugar de ilhas dispersas de martensita, juntamente com a formação de uma microestrutura mais grosseira. De acordo com os resultados obtidos por Drumond⁽⁷⁾, é provável que haja uma inflexão na curva de LE em temperaturas entre 750 e 800°C, devido a transição do efeito predominante do encruamento da ferrita a menores temperaturas para o efeito devido somente à presença da martensita, a altas temperaturas.

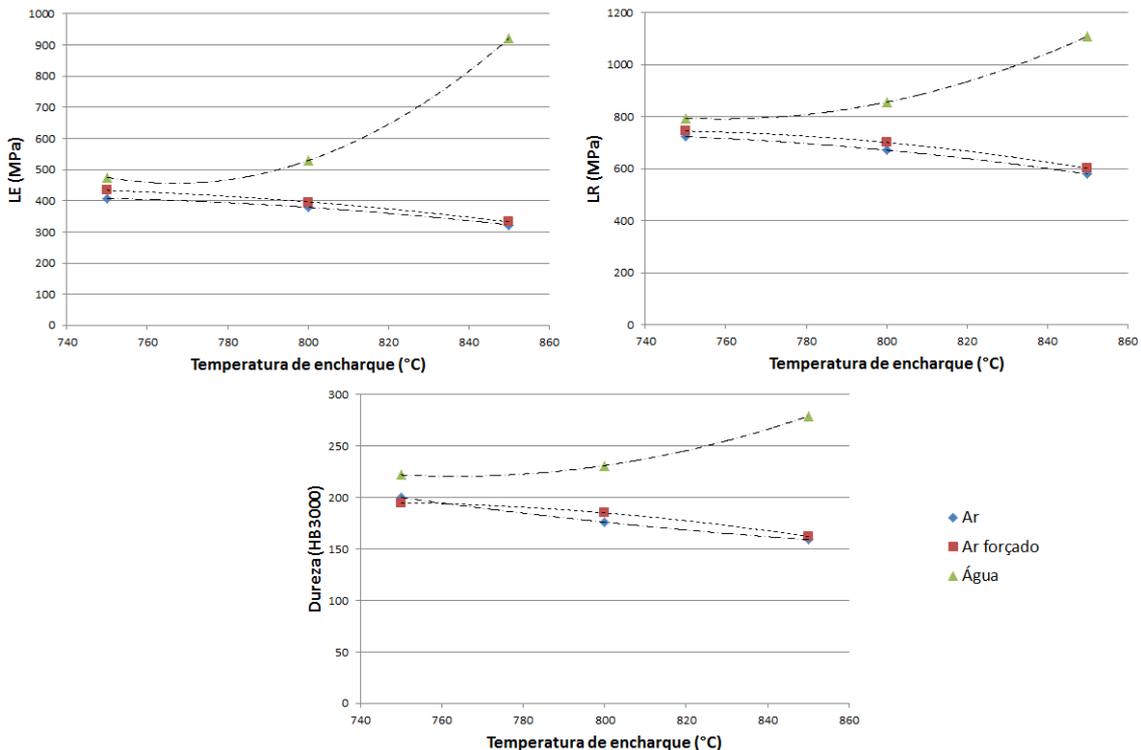


Figura 8. Comportamento das propriedades mecânicas para as condições de processamento empregadas.

4 CONCLUSÃO

Entre as temperaturas de 750 e 800°C, a porcentagem em volume de martensita formada foi bastante semelhante para os três meios de resfriamento (ar, ar forçado e água).

Para o aço estudado, quanto maior a temperatura de austenitização (até 850°C), maior foi a porcentagem em volume de martensita formada após o resfriamento em água.

Para todas as condições de resfriamento estudadas, os materiais apresentaram matriz ferrítica encruada quando tratadas a 750°C, recristalização parcial da ferrita a 800°C e recristalização total a 850°C.

Para as amostras resfriadas ao ar e ar forçado, houve uma redução nos limites de escoamento e de resistência com o aumento da temperatura de austenitização, para os dois aços estudados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) pelo fornecimento de materiais e recursos técnico-laboratoriais disponibilizados para a execução deste trabalho. Em especial ao Juan Carlos Sacramento e Leone Arthur Mattos, técnicos do laboratório de metalografia, e Reginaldo Gomes Toledo, engenheiro responsável pela operação do MEV do Centro de Pesquisas da CSN.

REFERÊNCIAS

- 1 ULSAB-AVC. Technical Transfer Dispatch #6. AISI, Southfield, MI, 2001.

- 2 FORGAS JÚNIOR, A., Influência da temperatura de recozimento intercrítico no comportamento mecânico de um aço bifásico baixo carbono. Dissertação de Mestrado, Centro Universitário da FEI, 2009.
- 3 HÜSEYİN, A.; HAVVA, K. Z.; CEYLAN, K. Effect of Intercritical Annealing Parameters on Dual Phase Behavior of Commercial Low-Alloyed Steels. Journal of iron and steel research. International. 17 (2010). p. 73-78, 2008.
- 4 TRZASKA, J., DOBRZANSKI, L. A. Modelling of CCT diagrams for engineering and constructional steels, Journal of Materials Processing Technology 192-193 (2007) 504-510.
- 5 COLPAERT, H., Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4 ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2008.
- 6 XIMENES, D. A. C. Produção de aço com microestrutura ferrítica- bainítica e avaliação de técnicas de preparação metalográfica para caracterização microestrutural. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal Fluminense, 2013.
- 7 DRUMOND, J. Efeito do silício e de parâmetros de processo nas microestruturas e propriedades mecânicas de um aço bifásico laminado a frio. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.