

# EFEITO DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO SOBRE O DESENVOLVIMENTO DE MICROESTRUTURA MULTICONSTITUÍDA EM UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA<sup>1</sup>

*Felipe Augusto Silva Pereira*<sup>2</sup>

*Almir Gonçalves Vieira*<sup>3</sup>

*Elaine Carballo Siqueira Corrêa*<sup>4</sup>

*Ivete Peixoto Pinheiro*<sup>5</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar a influência da temperatura de recozimento na fração volumétrica da ferrita alotriomórfica e da austenita retida e, conseqüentemente, alteração nas propriedades mecânicas dos aços resistentes ao desgaste com microestruturas multiconstituídas. Corpos de prova usinados foram submetidos ao tratamento térmico de dois estágios, sendo as temperaturas de recozimento 910°C, 880°C e 850°C por um período de 10 minutos, seguido de transformação bainítica à temperatura de 400°C, por 5 minutos. Verificou-se um pequeno decréscimo da dureza com a diminuição da temperatura de recozimento, devido ao aumento da fração volumétrica de ferrita na microestrutura predominantemente bainítica. A microestrutura multiconstituída composta por bainita, ferrita alotriomórfica e MA (martensita e austenita retida) pode apresentar resistência à abrasão superior a de um aço com mesma composição química e dureza mais elevada, pois a existência de ferrita alotriomórfica e partículas de austenita retida aumentam a capacidade de acomodação de deformação da microestrutura, prevenindo a esfoliação frágil que ocorre nos aços bainíticos.

**Palavras-chave:** Aços resistentes ao desgaste; Recozimento intercrítico; Microestrutura multiconstituída; Austêmpera.

## EFFECT OF AUSTENITIZING TEMPERATURE ON THE DEVELOPMENT OF POLIPHASIC MICROSTRUCTURES IN A HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEEL Abstract

The aim of this work was to study the influence of the austenitizing temperature in the volumetric fraction of the allotriomorphic ferrite and retained austenite, therefore, in the mechanical properties of wear resistant steels with poliphasic microstructure. After machining, the specimens were subjected to two stages heat treatments, consisting of austenitizing at 910°C, 880°C or 850°C for 10 minutes and austempered into a lead bath at 400°C for 5 minutes. The results showed a decrease in the hardness value as the austenitizing temperature diminishes, phenomenon associated with an increase in the volumetric fraction of ferrite in the dominant bainitic microstructure. The microstructure composed by bainite, allotriomorphic ferrite and MA (martensite/retained austenite) can exhibit higher wear resistance than that presented by other steel with the same chemical composition and higher hardness, as a result of the occurrence of allotriomorphic ferritic and retained austenite. This microstructure increases the ductility and prevents the brittle exfoliation that occurs in bainitic steels.

**Key words:** Special steel; Wear; Intercritical temperature; Poliphasic microstructure.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Bolsista PIBIC, Aluno de Graduação de Eng. Industrial Mecânica CEFET-MG; faspereira@oi.com.br

<sup>3</sup> Co-orientador Prof. Dr. da Coordenação de Ciências – CEFET-MG; agvieira@deii.cefetmg.br

<sup>4</sup> Co-orientadora Prof. Dra. do Curso de Engenharia de Materiais CEFET-MG; Elaine@deii.cefetmg.br

<sup>5</sup> Orientadora Prof. Dra. do Curso de Eng. de Materiais CEFET-MG; ivetepinheiro@deii.cefetmg.br

## 1 INTRODUÇÃO

O desgaste abrasivo pode ser definido como o deslocamento de material causado por partículas ou protuberâncias de elevada dureza, quando estas são forçadas contra superfície sólida ou deslizam ao longo dela.<sup>(1,2)</sup> Segundo Souza,<sup>(3)</sup> vários parâmetros influenciam os mecanismos de desgaste, sendo que os principais são: composição química; tamanho do grão; módulo de elasticidade; dureza; parâmetros de projetos (carregamento, tipo de movimento, aspereza, vibração, número de ciclos); temperatura de trabalho; umidade; atmosfera; tipo de fluido lubrificante; estabilidade do lubrificante etc.

A microestrutura do aço é um importante parâmetro na resistência ao desgaste. No trabalho realizado por Deuis, Subramanian e Yellup,<sup>(1)</sup> os melhores resultados de resistência ao desgaste foram obtidos em microestruturas finas, com partículas semicoerentes dispersas. A influência dos carbonetos na resistência ao desgaste depende de sua dureza em relação à dureza da matriz. Para materiais com carbonetos, dispersos em uma matriz macia, uma diminuição no caminho livre médio pela redução do tamanho do carboneto resulta em melhor resistência ao desgaste. Uma redução no tamanho do grão aumenta a dureza e também conduz ao aumento da resistência ao desgaste.

A bainita é uma microestrutura alternativa para aços de trilhos de ferrovias,<sup>(4)</sup> em substituição à perlita. Alguns aços bainíticos apresentam uma excelente combinação de resistência mecânica e tenacidade (especialmente aqueles ligados ao silício), propriedades necessárias quando se deseja obter uma excelente resistência ao desgaste.<sup>(5)</sup> Entretanto, Kalousek, Fegredo e Lauffr<sup>(6)</sup> relatam que a resistência ao desgaste de uma estrutura perlítica é superior à das estruturas bainítica e martensítica revenida por apresenta maior taxa de encruamento em escorregamento por contato.

Na tentativa de obter propriedades mecânicas adequadas como ductilidade, soldabilidade e resistência ao desgaste para a produção de caçamba de caminhão de alto desempenho e baixo custo, foi desenvolvido um aço alta resistência baixa liga laminado a quente e resfriado ao ar com estrutura duplex de bainita e ferrita alotriomórfica de contorno de grão para substituir aços ferríticos/perlíticos convencionais.<sup>(7)</sup> A matriz desse aço foi composta por ripas de ferrita bainítica, ferrita alotriomórfica de contorno de grão e ilhas de MA (martensita/austenita retida) entre as ripas. Uma pequena quantidade de austenita retida mecanicamente estável aumenta a tenacidade do aço. Essa estrutura duplex apresentou resistência à abrasão superior a dos aços ferrita/perlita, até mesmo superior à da estrutura bainítica granular de um aço com mesma composição química e dureza mais elevada. Segundo os autores,<sup>(7,8)</sup> a maior resistência ao desgaste é devida principalmente às partículas duras de MA (martensita/austenita retida). A análise dos mecanismos de nucleação das microtrincas indicou que na estrutura duplex bainita/ferrita a existência de grãos de ferrita alotriomórfica e partículas de austenita retida aumentam a capacidade de acomodação da deformação da microestrutura e previne a esfoliação frágil que ocorre nos aços bainíticos.

O objetivo deste trabalho é estudar a influência da temperatura de recozimento intercrítico na fração volumétrica da ferrita alotriomórfica e da austenita retida em uma matriz bainítica e, conseqüentemente, alterações nas propriedades mecânicas de aços resistentes ao desgaste com microestruturas multiconstituídas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

O material utilizado neste trabalho foi um aço resistente ao desgaste cedido pela Usiminas. Sua composição química está mostrada na Tabela 1.

**Tabela 1:** Composição química do aço do aço USI-ABRA-L, fornecida pela USIMINAS (% p/p)

C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	P	S	Al	B
0,26	1,13	0,92	0,72	0,29	0,18	0,17	0,020	0,0010	0,094	0,0016

O material como recebido possuía microestrutura bainítica de elevada dureza (470 HV), decidiu-se então fazer um tratamento de recozimento isotérmico abaixo da zona crítica. Após 10 horas, a 700°C, o forno foi desligado e a placa resfriada em seu interior. O objetivo era obter uma estrutura de cementita esferoidizada em matriz ferrítica a partir da estrutura inicial bainítica. Optou-se por essa temperatura para evitar o crescimento exagerado do grão ferrítico. Após este tratamento térmico, constatou-se uma queda considerável na dureza de 470 HV para 205 HV.

Para obter microestruturas constituídas por uma matriz bainítica, pequenas quantidades de ferrita alotriomórfica e de constituinte MA (martensita/ austenita retida) foram utilizados dois fornos. O primeiro foi ajustado em uma temperatura dentro da região intercrítica. O segundo foi mantido em uma temperatura do campo bainítico, contendo em seu interior um banho de chumbo para abaixar rapidamente a temperatura das amostras, evitando, assim, a formação de perlita. Depois de 5 minutos de transformação bainítica, as amostras foram retiradas do banho de chumbo e resfriadas em água. Este tratamento é denominado de tratamento térmico de dois estágios.<sup>(9)</sup>

Para estudar a influência da temperatura intercrítica na fração volumétrica de ferrita alotriomórfica e de austenita retida e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas das microestruturas multiconstituídas, foram usadas as seguintes condições de tratamento térmico:

- temperaturas de recozimento ( $T_i$ ): 850°C, 880°C e 910°C;
- tempo de recozimento ( $t_R$ ): 10 minutos;
- temperatura de transformação bainítica ( $T_B$ ): 400°C; e
- tempo de transformação bainítica ( $t_B$ ): 5 minutos.

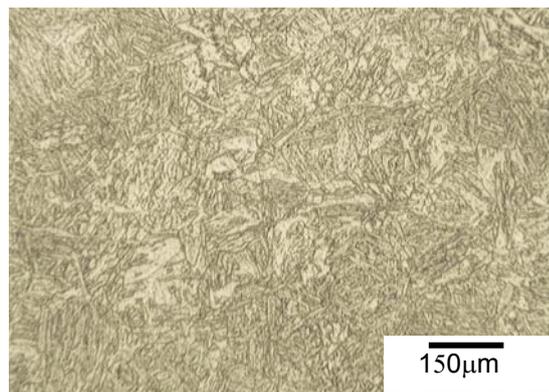
Após os tratamentos térmicos, foram realizados os ensaios de tração à temperatura ambiente em uma máquina de ensaios INSTRON modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados Merlin e extensômetro eletrônico 2630-100. A velocidade dos ensaios foi de 4mm/min, levando a uma taxa de deformação inicial de  $1,67 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ . Para cada amostra foi construído o gráfico tensão convencional x deformação convencional. A partir do gráfico, foram determinados os valores do limite de escoamento a 0,2% de deformação, o limite de resistência à tração e o alongamento uniforme.

As amostras metalográficas foram cortadas, embutidas, lixadas e polidas com pasta de diamante. O ataque metalográfico foi feito com Bandoh,<sup>(10)</sup> com o objetivo de revelar o constituinte MA (martensita/austenita retida). As microestruturas foram observadas com o auxílio de um microscópio óptico e software de captação de imagens. As medidas de dureza foram feitas em uma máquina de dureza Vickers. A presença de austenita retida no material tratado termicamente foi avaliada por meio de difração de raios-X. Os experimentos foram realizados um equipamento Philips,

utilizando a radiação Cu-K $\alpha$  e um cristal monocromador de grafite. As amostras foram cortadas na região de interesse e, em seguida, foram submetidas a uma solução contendo 15 ml de ácido clorídrico, 10 ml de ácido acético, 5 ml de ácido nítrico e 2 gotas de glicerina por 15 minutos. Este procedimento foi conduzido com o objetivo de eliminar os possíveis efeitos da preparação na análise de difração de raios-X da estrutura do metal. O ângulo de varredura utilizado na difração foi de 10° a 120°, e o passo foi de 0,020°/s. Após a obtenção dos difratogramas, a análise semi-quantitativa das fases foi realizada através da técnica das intensidades integradas, com o auxílio do programa comercial Microcal Origin.

### 3 RESULTADOS

A micrografia do material após tratamento térmico de recozimento é apresentada na Figura 1. Observa-se que, apesar da redução da dureza de 470 HV para 205 HV, a microestrutura não apresenta cementita esferoidizada em uma matriz ferrítica poligonal. A estrutura é composta por bainita degenerada. Esta microestrutura inicial influenciou de modo significativo na morfologia da ferrita alotriomórfica obtidas nos tratamentos térmicos de dois estágios e nas propriedades mecânicas.



**Figura 1** – Fotomicrografia da amostra recozida isotermicamente a 700°C durante 10h, ataque de Nital 5%.

A Tabela 2 apresenta os resultados de propriedades mecânicas das amostras multiconstituídas. Verifica-se que quanto menor a temperatura de recozimento menor a dureza da amostra e maior a resistência mecânica.

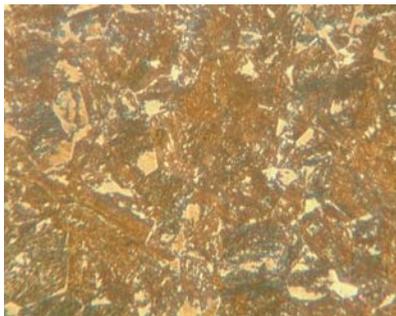
**Tabela 2:** Propriedades Mecânicas

Temperatura de Recozimento (°C)	Dureza Vickers (HV)	Alongamento Uniforme (%)	Alongamento Total (%)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)
850	336	7,9 ± 0,4	11,9 ± 0,3	941 ± 8	1.270 ± 6
880	340	8,7 ± 0,3	12,4 ± 0,3	906 ± 8	1.261 ± 4
910	345	6,9 ± 0,4	11,2 ± 0,3	864 ± 2	1.252 ± 21

As Figuras 2 a 4 referem-se às estruturas multiconstituídas obtidas. Com o intuito de identificar com maior clareza a ferrita alotriomórfica e os constituintes de MA (martensita/austenita retida) foi utilizado o ataque de Bandoh, uma vez que este ataque revela o constituinte MA no tom mais claro da micrografia e a ferrita

alotriomórfica em um tom azulado. Pode ser observado um aumento da quantidade de ferrita alotriomórfica com a diminuição da temperatura de recozimento intercrítico. A Figura 2 mostra que para a maior temperatura de recozimento intercrítico o constituinte MA apresenta-se maior e mais individualizado.

As Figuras de 5 a 7 exibem os resultados da difração de raios-X para as amostras multiconstituídas da maior para a menor temperatura de austenitização. Verifica-se que para todas as três temperaturas de recozimento foi observado a presença de austenita retida, nas amostras austemperadas. A análise semi-quantitativa realizada por meio da difração de raios-X indicou a presença de 13,8% de austenita retida para a amostra com recozimento à temperatura de 910°C, 16,5% para 880°C e 16,2% para 850°C.



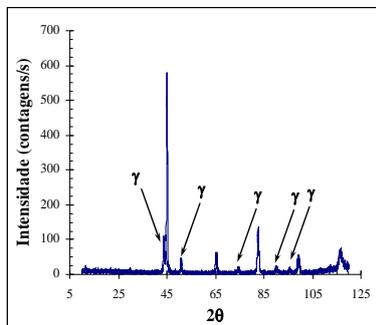
**Figura 2** – Fotomicrografia da amostra austenitizada a 910°C por 10 minutos e austemperada a 400°C por 5 minutos. Ataque: Bandoh.



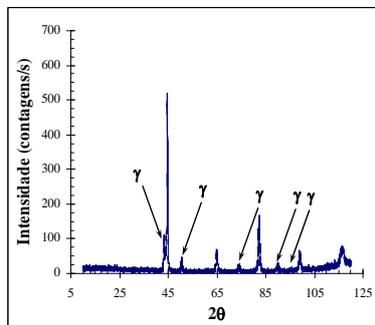
**Figura 4** – Fotomicrografia da amostra austenitizada a 880°C por 10 minutos e austemperada a 400°C por 5 minutos. Ataque: Bandoh.



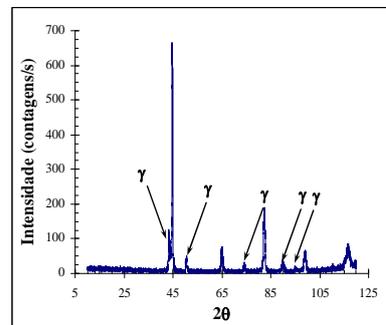
**Figura 4** – Fotomicrografia da amostra austenitizada a 850°C por 10 minutos e austemperada a 400°C por 5 minutos. Ataque: Bandoh.



**Figura 5** – Difração de raios-X da amostra austenitizada a 910°C por 10 minutos e austemperada a 400°C por 5 minutos.



**Figura 6** – Difração de raios-X da amostra austenitizada a 880°C por 10 minutos e austemperada a 400°C por 5 minutos.



**Figura 7** – Difração de raios-X da amostra austenitizada a 850°C por 10 minutos e austemperada a 400°C por 5 minutos.

#### 4 CONCLUSÕES

Os tratamentos térmicos em dois estágios com diferentes temperaturas intercríticas possibilitaram a formação de amostras multiconstituídas por ferrita alotriomórfica, bainita e constituinte MA (martensita e austenita retida). Foi observado, por meio das fotomicrografias das Figuras 2 a 4 um aumento da quantidade de ferrita alotriomórfica com a diminuição da temperatura de recozimento intercrítico. A morfologia da ferrita alotriomórfica encontrada difere da apresentada nos trabalhos de Xu et al.,<sup>(8)</sup> onde os grãos da ferrita alotriomórfica apresentavam-se nos contornos de grão da austenita prévia. No presente trabalho, a ferrita



alotriomórfica encontra-se com uma morfologia refinada entre as ripas da bainita, apenas com o ataque químico de Bandoh foi possível visualizá-la. Espera-se que com a presente microestrutura seja possível obter maior resistência ao desgaste, uma vez que a capacidade de acomodação da deformação da microestrutura com ferrita alotriomórfica e do constituinte MA entre as ripas de bainita deverá ser maior, além de prevenir a esfoliação frágil da bainita.

Outra importante conclusão foi que quanto menor a temperatura de recozimento intercrítico maior a resistência mecânica apresentada nos ensaios de tração devido ao efeito TRIP (*TRansformation Induced Plasticity*), onde a austenita retida se transforma em martensita durante a sollicitação mecânica.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo incentivo e financiamento desta pesquisa e a Usiminas pelo fornecimento do aço.

## REFERÊNCIAS

- 1 DEUIS, R. L.; SUBRAMANIAN, C.; YELLUP, J. M. Abrasive wear of aluminium composites – a review, **Wear Abrasive**, n. 201, 1996, p.132-144.
- 2 MONDAL, D. P.; DAS, S.; JHA, A. K.; YEGNESWARAN, A. H. Abrasive wear of Al alloy- $Al_2O_3$  particle composite: a study on the combined effect of load and size of abrasive, **Wear Abrasive**, n. 223, 1998, p.131-138.
- 3 SOUZA, R. C. Estudo do comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com WC-12Co, WC-17Co, WC-10Co-4Cr e WC-10Ni pelo sistema HVOF/HP. Tese (Doutorado), Lorena – SP, Brasil, set. 2002.
- 4 DEVANATHAN, R.; CLAYTON, P.; Rolling-sliding wear behavior of three bainitic steels, **Wear**, v. 151, 1991, p. 255-26.
- 5 CABALLERO, F.G.; BHADSHIA, H.K.D.H.; MAWELLA, K.J.A.; JONES, D.G.; BROWN, P. Design of novel high strength bainitic steels. Parts 1 and 2, **Materials Science Technology**, v. 17, 2001, p. 512–522.
- 6 KALOUSEK, J.; FEGREDO, K.M.; LAUFFR, E.E. The wear resistance and worn metallography of pearlite, bainite and tempered martensite rail steel microstructures of high hardness, **Wear**, v. 105, 1985, p. 199–222.
- 7 XU, P.G.; FANG, H.S.; BAI, B.Z.; WANG, Z.J.; YANG, Z.G.; HUANG, J.F. **Journal of Iron Steel Research Institute**, v. 9, 2002, p. 33.
- 8 XU, P.; BAI, B.; YIN, F.; FANG, H.; NAGAI, K. Microstructure control and wear resistance of grain boundary allotriomorphic ferrite/granular bainite duplex steel, **Materials Science and Engineering A**, v. 385, 2004, p. 65–73.
- 9 MATSUMARA, O.; SAKUMA, Y.; TAKECHI, H. Retained austenite in 0.4C-Si-1.2 Mn steel sheet intercritically heated and austempered, **ISIJ International**, v. 32, n. 9, 1992, p. 1014-1020.
- 10 THOMPSON, S.W. and KRAUS, G. Structure and properties of continuously cooled bainitic ferrite-austenite-martensite microstructure. In: MECHANICAL WORKING AND STEEL PROCESSING. Proceedings, 1989. p. 467-481, 1968.