

AÇO USI-ABRA-L RESISTENTE AO DESGASTE COM MICROESTRUTURA MULTICONSTITUÍDA ¹

*Felipe Augusto Silva Pereira ²
Almir Gonçalves Vieira ³
Ivete Peixoto Pinheiro ⁴*

Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar a influência da temperatura de recozimento na fração volumétrica da ferrita alotriomórfica e na sua morfologia e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas de 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, 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/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-chaves: Aços resistentes ao desgaste; Recozimento intercrítico; Microestrutura multiconstituída.

USI-ABRA-L WEAR RESISTANT STEEL WITH POLIPHASIC MICROSTRUCTURE

Abstract

The aim of this work was to study the influence of the austenitizing temperature in the volume fraction and morphology of the allotriomorphic ferrite and, 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 quenching 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 ferrite 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.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Bolsista PIBIC, Aluno do Curso de Graduação de Engenharia Industrial Mecânica CEFET-MG; faspereira@oi.com.br*

³ *Co-orientador Professor-Doutor da Coordenação de Ciências – CEFET-MG; agvieira@deii.cefetmg.br*

⁴ *Orientadora Professora-Doutora do Curso de Engenharia 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^(1, 2). Segundo Souza⁽³⁾, vários parâmetros influenciam os mecanismos de desgaste, sendo que os principais são:

- parâmetros de material: composição química, tamanho do grão, módulo de elasticidade, condutividade térmica, dureza etc;
- parâmetros de projetos: forma, carregamento, tipo de movimento, aspereza, vibração, número de ciclos etc;
- parâmetros de meio ambiente: temperatura, contaminação, umidade, atmosfera etc;
- parâmetros de lubrificação: tipo de lubrificante, estabilidade de lubrificante, tipo de fluido, lubrificação etc;
- presença ou ausência de desgaste interno.

A microestrutura do aço é um importante parâmetro na resistência ao desgaste. No trabalho realizado por Deuis *et al.*,⁽¹⁾ os melhores resultados de resistência ao desgaste foi obtida em microestruturas finas, com partículas semi-coerentes 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,⁽⁴⁾ 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.⁽⁵⁾ Entretanto, Kalousek *et al.*⁽⁶⁾ 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.⁽⁷⁾ 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.

Xu *et al.*⁽⁸⁾ investigaram a resistência ao desgaste de um aço baixa liga baixo carbono alta resistência laminado a quente e resfriados ao ar até 250°C. A estrutura obtida era composta por uma matriz de bainita granular com ferrita alotriomórfica localizada nos contornos de grãos da austenita primária e pequenas ilhas de constituinte MA (martensita e austenita retida).

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,⁽⁷⁾ 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

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho foi um aço resistente ao desgaste cedido pela Usiminas. Sua composição química está mostrada na Tabela 1. O material foi entregue na forma de placas com 200mm de comprimento e seção transversal de 50 x 70mm.

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 (470HV). Para facilitar o processo de usinagem dos corpos de tração e de análise metalográfica, decidiu-se fazer um tratamento de recozimento isotérmico das placas. Após 10 horas, a 700°C, o forno foi desligado e a placa resfriada em seu interior. O objetivo era obter uma estrutura esferoidizada a partir da estrutura inicial bainítica. Optou-se por esse tratamento térmico para evitar um possível crescimento exagerado de grão.

Após este tratamento térmico, constatou-se uma queda considerável na dureza de 470 HV para 205 HV e o material apresentava condições para ser usinado no Cefet-MG. Para cada condição de tratamento térmico, foram usinadas três amostras, sendo duas conforme a Figura 1, destinadas aos ensaios de tração e uma para a análise metalográfica, com 8mm de diâmetro e 90mm de comprimento.

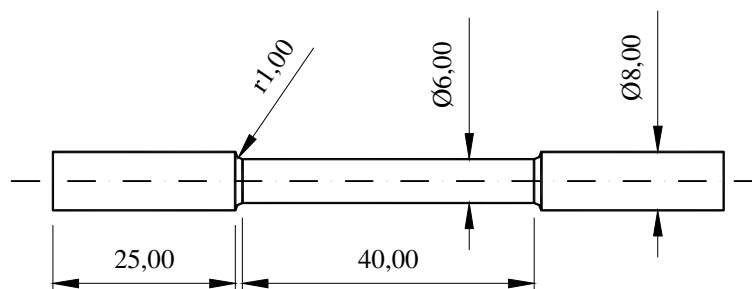


Figura 1 - Desenho esquemático do corpo de prova do ensaio de tração dimensões em milímetros.

Para obter microestruturas constituídas por uma matriz bainítica, pequenas quantidades de ferrita alotriomórfica e de constituinte M.A. (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. Antes que a reação bainítica se completasse, as amostras foram retiradas do banho de chumbo e resfriadas em água. Este tratamento é denominado de tratamento térmico de dois estágios⁽⁹⁾ e está ilustrado esquematicamente na Figura 2.

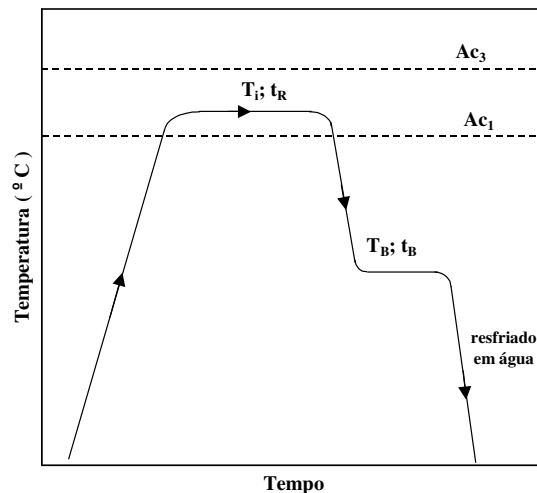


Figura 2 - Desenho esquemático do tratamento térmico de dois estágios.⁽⁹⁾

Para estudar a influência da temperatura intercrítica na fração volumétrica de ferrita alotriomórfica e na sua morfologia 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 Nital 5% e, com o objetivo de revelar o constituinte MA (martensita/austenita retida), foi utilizado metabissulfito de sódio a 2%. 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.

3 RESULTADOS

A micrografia do material após tratamento térmico de recozimento é apresentada na Figura 3. 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 e ferrita. Esta microestrutura inicial influenciou de modo significativo a morfologia da ferrita alotriomórfica obtidas nos tratamentos térmicos de dois estágios e nas propriedades mecânicas.

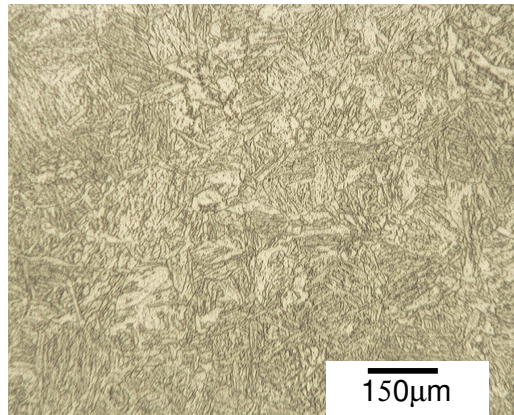


Figura 3 – Fotomicrografia da amostra recozida isotermicamente a 700°C durante 10h, ataque de nital 5%.

A Tabela 2 apresenta os resultados de propriedades mecânicas das amostras multiconstituídas.

Tabela 2: Propriedade Mecânicas

Temperatura de Recozimento (°C)	Dureza Vickers (HV)	Alongamento Uniforme (%)	Alongamento Total (%)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Parâmetro de Tenacidade (%MPa)
850	336	7,9 ± 0,4	11,9 ± 0,3	941 ± 8	1270 ± 6	15.107
880	340	8,7 ± 0,3	12,4 ± 0,3	906 ± 8	1261 ± 4	15.567
910	345	6,9 ± 0,4	11,2 ± 0,3	864 ± 2	1252 ± 21	13.954

A Figura 4 mostra as curvas tensão convencional x deformação convencional para amostras das estruturas multiconstituídas obtidas nas três temperaturas de recozimento até ser atingido o alongamento uniforme.

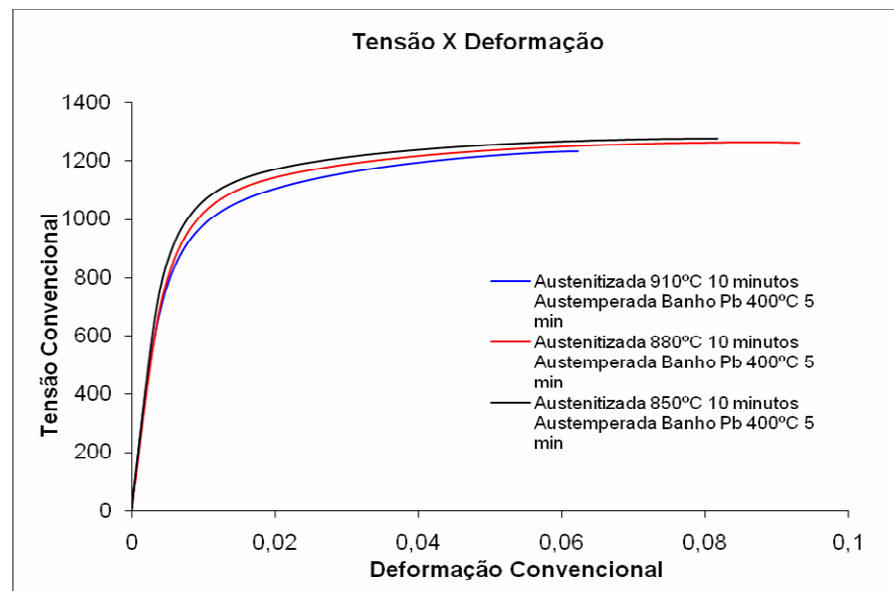


Figura 4 – Curvas tensão convencional X deformação convencional até o início da estricção.

As Figuras 5 e 6 referem-se ao aço recozido a 910°C por dez minutos, transformação bainítica no banho de chumbo a 400°C por cinco minutos, resfriada em água e o ataque utilizado foi o nital a 5% (Figura 5) e o metabissulfito de sódio 2% (Figura 6) com o intuito de identificar com maior clareza os constituintes de MA (martensita/austenita retida). Verificou-se na Figura 5 e 6 uma matriz predominantemente bainítica, com ferrita alotriomórfica e constituinte MA. Na Figura 5 a ferrita alotriomórfica e o constituinte MA apresentam-se claros, não sendo possível identificá-los separadamente. Para identificação do constituinte MA, usou-se o metabissulfito de sódio 2% (Figura 6), onde se pode observar o constituinte MA (setas claras) e a ferrita alotriomórfica (setas escuras).

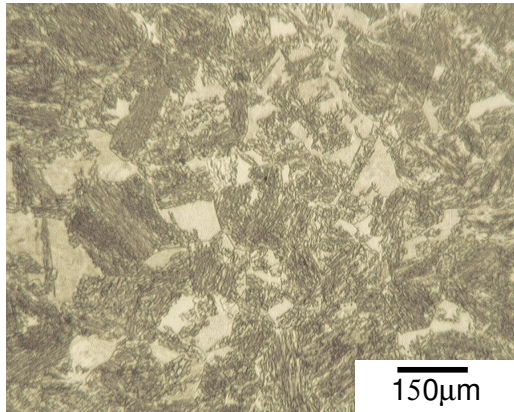


Figura 5 – Fotomicrografia da amostra recozida a 910°C por 10 minutos e a 400°C por 5 minutos. Ataque: nital 5%.

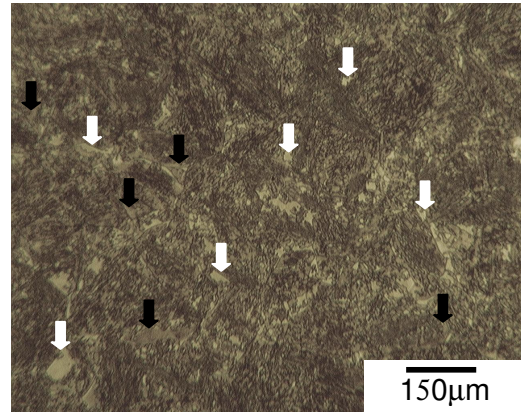


Figura 6 – Fotomicrografia da amostra recozida a 910°C por 10 minutos e a 400°C por 5 minutos. Ataque: metabissulfito de sódio 2%.

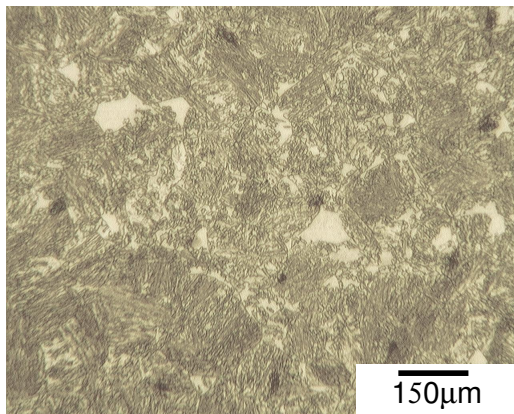


Figura 7 – Fotomicrografia da amostra recozida a 880°C 10 minutos e a 400°C por 5 minutos. Ataque: nital 5%.

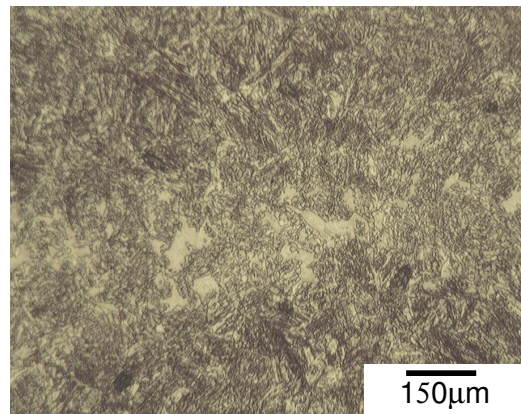


Figura 8 – Fotomicrografia da amostra recozida a 850°C 10 minutos e a 400°C por 5 minutos. Ataque: nital 5%.

As Figuras 7 e 8 mostram as microestruturas obtidas para as temperaturas de recozimento de 880°C e 850°C. O ataque utilizado foi nital a 5%. Nas três microestruturas obtidas a microestrutura é composta por uma matriz bainítica, ferrita alotriomórfica e constituinte MA. Observa-se que quanto menor a temperatura de recozimento, mais difícil fica a identificação da ferrita alotriomórfica, uma vez que seu tamanho de grão é menor e está mais dispersa na matriz bainítica.

4 DISCUSSÃO

Com a elevação da temperatura de recozimento ocorre um pequeno aumento da dureza das microestruturas, devido à redução da quantidade de ferrita alotriomórfica e aumento da quantidade de bainita.

A morfologia da ferrita alotriomórfica das estruturas multiconstituídas é um reflexo direto da microestrutura inicial. A ferrita alotriomórfica encontra-se mais dispersa na matriz bainítica, diferente da obtida por Xu et al.,⁽⁸⁾ que estava, localizada somente nos contornos de grãos da austenita primária. Quanto menor a temperatura de recozimento, menor o seu tamanho de grão, uma vez que sua velocidade de crescimento é menor, além da ferrita alotriomórfica se tornar mais dispersa na matriz bainítica,. Essa ferrita alotriomórfica mais fina e dispersa melhora a acomodação da deformação da microestrutura e prevenção da esfoliação frágil que ocorre nos aços bainíticos.

Com o aumento da temperatura de recozimento (910°C), observa-se um crescimento de grão da ferrita alotriomórfica e das partículas de MA (Figura 5). Acredita-se que a microestrutura obtida a 850°C possua uma certa quantidade de carbonetos, devido à sua alta estabilidade e ao curto tempo de recozimento (10 minutos). Esses fatos podem explicar o decréscimo do limite de escoamento com a elevação da temperatura, embora a quantidade de bainita da microestrutura aumente.

As propriedades mecânicas de um aço multiconstituído dependem da quantidade de cada microconstituente, do tamanho de suas partículas, de sua morfologia e, no caso das estruturas em estudo, do efeito TRIP. Assim, o comportamento das propriedades mecânicas tornam-se muito complexos. Entretanto, para a faixa de temperatura estudadas, o limite de resistência à tração e a ductilidade são praticamente constantes com a temperatura de recozimento.

Como a proposta deste trabalho é justamente a de pesquisar a influência da ferrita alotriomórfica na acomodação da deformação da microestrutura, os resultados encontrados à temperatura de recozimento de 850°C mostraram que houve um aumento significativo do limite de escoamento.

5 CONCLUSÃO

Conseguiu-se obter uma microestrutura multiconstituída composta por ferrita alotriomórfica, bainita e constituinte MA. Na temperatura de recozimento mais baixa (850°C) a estrutura é mais fina e homogênea, tendo a bainita o constituinte principal. A ferrita alotriomórfica finamente dispersão na matriz bainítica melhora a acomodação da deformação da microestrutura.

Verificou-se um decréscimo do limite de escoamento com o aumento da temperatura de recozimento. Esse fato foi provocado, provavelmente pela redução da quantidade de carbonetos e pelo aumento do tamanho de grão da ferrita e do constituinte MA, embora a quantidade de bainita tenha aumentado.

Os valores encontrados para o limite de resistência à tração e ductilidade são praticamente constantes para a faixa de temperatura de recozimento estudadas, embora haja mudanças na fração volumétrica dos constituintes e em sua morfologia.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Professora Doutora Elaine Carballo Siqueira Corrêa pelo apoio indispensável para a conclusão desta pesquisa, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pelo incentivo e financiamento da mesma e a Usiminas pelo fornecimento do material.

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-Al₂O₃ 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 de 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.