

Influência dos tratamentos térmicos de recozimento e desestabilização na precipitação de carbonetos secundários e na dureza de uma liga de ferro fundido branco alto cromo com nióbio

Influence of heat treatments of annealing and destabilizing in precipitation of secondary carbides and in hardness of a white cast iron alloy high chromium with niobium

Amanda Oliveira e Souza¹ , Anderson Edson da Silva², Ivete Peixoto Pinheiro²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, 30421-169, Belo Horizonte, MG, Brasil.

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais. Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, 30421-169, Belo Horizonte, MG, Brasil.

e-mail: amandaesouza@gmail.com, anderson_edson@hotmail.com, ivetepinheiro@cefetmg.br

RESUMO

Este estudo avalia o efeito da associação dos tratamentos térmicos de recozimento e desestabilização na precipitação e morfologia de carbonetos secundários e na dureza de uma liga de ferro fundido branco alto cromo (FFBAC) com adição de nióbio. O ferro fundido branco alto cromo é utilizado na fabricação de componentes envolvendo solicitações de desgaste, principalmente nas indústrias mineradoras, em equipamentos como chutes de transporte de minério, devido à sua elevada dureza e alta resistência ao desgaste abrasivo. Os tratamentos térmicos visam melhorar as propriedades mecânicas, por meio da precipitação de carbonetos secundários e da obtenção de matrizes martensíticas. A adição de cromo nos ferros fundidos tem como finalidade formar carbonetos e elevar a dureza da liga. A metodologia utilizada foi a fundição do material com adição de 0,5% de nióbio como elemento de liga e a caracterização metalográfica por meio de microscopias ópticas e eletrônicas, bem como a quantificação de carbonetos e a realização de ensaios de dureza. Foram analisadas amostras desestabilizadas sem e com recozimento prévio e foi verificado que o recozimento favoreceu uma maior precipitação de carbonetos secundários M_7C_3 , possibilitando uma redução no tempo de tratamento térmico de desestabilização e a transformação da matriz austenítica em martensítica durante o resfriamento, promovendo um aumento da dureza.

Palavras-chave: Ferro fundido branco alto cromo; Carbonetos secundários; Recozimento; Desestabilização; Dureza.

ABSTRACT

This study evaluates the effect of association annealing and destabilizing heat treatments in precipitation and morphology of secondary carbides and hardness in a high-chromium white cast iron alloy with the addition of niobium. White cast iron is used in the manufacture of components involving wear requests, mainly in the mining industries, in equipment such as ore transport chutes, due to its high hardness and high strength to abrasive wear. The heat treatments aim to improve the mechanical properties, through the precipitation of secondary carbides and the obtaining of martensitic matrices. The addition of chromium in cast irons aims to form carbides and increase the hardness of the alloy. The methodology used was the casting of the material with the addition of 0.5% niobium as an alloying element and metallographic characterization by means of optical and electronic microscopy techniques, as well as the quantification of carbides and performance of hardness tests. Destabilized samples were analyzed without and with previous annealing and it was verified that the annealing favored a greater precipitation of secondary carbides M_7C_3 , allowing a reduction in the thermal treatment time of destabilization and the transformation of the austenitic matrix into martensitic during the cooling, promoting an increase in hardness.

Keywords: High chromium white cast iron; Secondary carbides; Annealing; Destabilizing; Hardness.

1. INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos brancos alto cromo (FFBAC) são ligas de grande importância no setor industrial e possuem características que, combinadas a tratamentos térmicos adequados, permitem sua utilização em aplicações que envolvam desgaste [1]. A incidência do desgaste é muito comum em diversas atividades, principalmente nas indústrias mineradoras. O desgaste abrasivo, considerado o mais destrutivo, ocorre com o contato do equipamento com uma partícula sólida em movimento, provocando danos nos componentes das máquinas, o que causa redução da vida útil dos mesmos, sendo responsável por mais de 50% dos casos industriais envolvendo desgaste, provocando perdas e custos para as empresas [2, 3].

A adição de elementos de liga é utilizada nas ligas de FFBAC, tendo como função principal o aumento da dureza da liga, além da melhora na tenacidade. Estudos mostram que a adição de nióbio em teores de 0,5% a 1% promove aumento relevante na resistência ao desgaste de uma liga de ferro fundido branco alto cromo [4]. MELO [5], GUESSER *et al.* [6], Fiset *et al.* [7], HE-XING *et al.* [8] e FARAH [9] obtiveram um aumento na dureza e na resistência ao desgaste de ferros fundidos adicionando o nióbio como elemento de liga. No Brasil, a utilização do nióbio é interessante pelo fato do país possuir 98% das jazidas disponíveis no mundo.

O tratamento térmico de recozimento é empregado na literatura por diversos autores como MELO [5], OLIVEIRA [10] e PACHECO [11] apenas com a finalidade de reduzir as tensões de solidificação e diminuir a dureza do ferro fundido branco alto cromo quando há necessidade de algum tipo de usinagem na peça, sem analisar, desta forma, a influência do recozimento em aspectos importantes como resistência ao desgaste, fração volumétrica de carbonetos, morfologia e principalmente precipitação de carbonetos no material. FARAH [9], ABDEL-AZIZ *et al.* [12], FARIA *et al.* [13], Fiset *et al.* [14], HIGUERA-COBOS *et al.* [15], SILVA [16] e PENAGOS *et al.* [17] realizaram o tratamento térmico de desestabilização em FFBAC visando obter uma elevada dureza por meio da obtenção de matriz martensítica durante o resfriamento. Nestes estudos, o tratamento térmico de recozimento não foi associado ao tratamento térmico de desestabilização, não existindo, portanto, uma análise da influência da associação de ambos tratamentos térmicos no comportamento do FFBAC. Para isso, foram necessários tempos longos de desestabilização em fornos a temperaturas aproximadas de 900 a 1050 por tempos de até 6h para obter elevada dureza.

Desta forma, existe uma lacuna na literatura na análise da influência da realização do tratamento térmico de recozimento na precipitação de carbonetos de um ferro fundido branco com adição de nióbio e na associação deste tratamento com o tratamento térmico de desestabilização para potencializar a precipitação de carbonetos e a transformação martensítica. Além disso, MELO [5], PENAGOS *et al.* [17] e FARAH [9] utilizaram tempos de desestabilização de 6 h seguindo modelos já existentes na literatura, sendo que a variação deste parâmetro de tratamento térmico é pouco discutida e é necessária, já que tempos longos de fornos à altas temperaturas demandam um gasto energético alto.

O presente trabalho visa a realização de um estudo de associação dos tratamentos térmicos de recozimento e desestabilização, visando avaliar a influência principalmente do recozimento na precipitação de carbonetos secundários e na dureza de um FFBAC. Para isso, utilizou-se ligas de FFBAC com nióbio que foram tratadas termicamente. Parte das amostras foram recozidas e posteriormente submetidas ao tratamento térmico de desestabilização, enquanto a outra parte foi desestabilizada a partir do estado inicial bruto de fusão. Variou-se o tempo de tratamento térmico de desestabilização e a temperatura foi mantida constante para todas as amostras. Foi realizada a caracterização microestrutural do material e ensaios de dureza, permitindo avaliar os carbonetos formados (morfologia e fração volumétrica) e a influência do recozimento prévio associado à desestabilização no material em estudo sob diferentes condições de tratamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada no presente trabalho consistiu na preparação das amostras obtidas pelo processo de fundição, na realização de tratamentos térmico e na caracterização do material. A liga escolhida foi resultante da fusão de pedaços de rotor de bomba de polpa de minério de ferro utilizada em mineração, sendo uma liga de FFBAC Classe III tipo A, conforme a norma ASTM A532 [18], com adição de 0,5%Nb. A composição química final da liga após o processo de fundição pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição final da liga (%).

LIGA	Cr	C	Nb	Mn	Si	Ni	Mo	Cu	P	S
FFBAC (0,5%Nb)	25,313	3,092	0,610	0,931	1,217	0,467	0,089	0,138	0,033	0,007

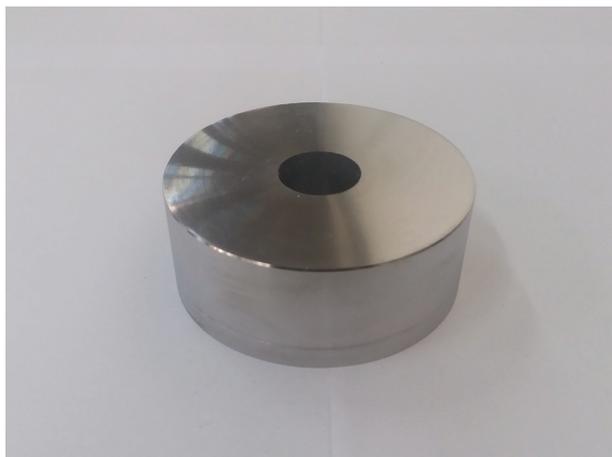


Figura 1: Amostra de ferro fundido branco alto cromo com nióbio recozida e usinada.

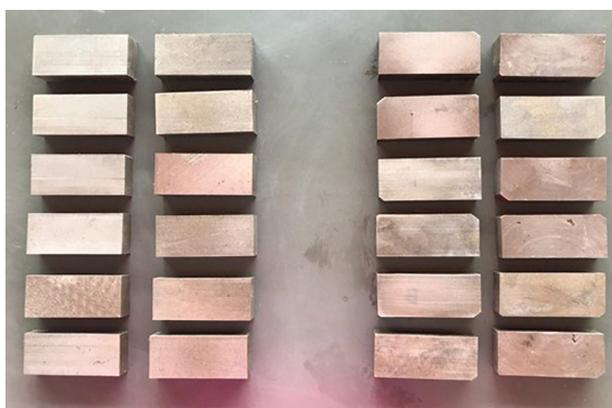


Figura 2: Amostras após o corte por eletroerosão a fio.

Após a fusão, o material passou por uma limpeza por jateamento e parte dele foi submetido ao tratamento térmico de recozimento a 700 °C por um tempo de 6 horas e resfriado por aproximadamente 48 horas até a temperatura ambiente, dentro do próprio forno, parâmetros estes sugeridos na literatura por ORTEGA-CUBILLOS *et al.* [19] CARMO *et al.* [20]. Pode-se observar na Figura 1 uma amostra após o tratamento térmico de recozimento e usinagem. Foram obtidas ao todo duas amostras sem recozimento e duas recozidas.

As amostras foram cortadas por meio de eletroerosão a fio em dimensões aproximadas de 58 mm (comprimento) × 25 mm (largura) × 13 mm (espessura), sendo obtidas ao todo doze amostras sem recozimento e doze amostras recozidas. Elas podem ser observadas após o corte na Figura 2. As amostras foram posteriormente identificadas conforme o tempo de desestabilização e se foram ou não recozidas, sendo 0,5B, 0,5R, 1B, 1R, 2B, 2R, 3B e 3R, onde a letra B indica sem recozimento (bruto de fusão) e a letra R indica recozida, e os números indicam o tempo em horas de desestabilização.

O tratamento térmico de desestabilização é um tratamento conjugado que visa a precipitação de carbonetos secundários devido à manutenção da amostra em altas temperaturas e a transformação da matriz austenítica em martensítica durante o resfriamento, atuando nesse estágio como o tratamento tradicional conhecido como têmpera. Todas as amostras foram submetidas ao tratamento térmico de desestabilização com manutenção de temperatura em 1050°C e tempos de 0,5 h, 1 h, 2 h e 3 h. O tempo máximo de desestabilização utilizado neste trabalho foi de 3 h, visto que tempos maiores seriam excessivos para as amostras que já estavam recozidas, pois já teriam carbonetos precipitados. Na literatura, os tempos de desestabilização utilizados variaram de 0,5 h a 6 h [9–14, 16, 17]. Após o tratamento de desestabilização as amostras foram resfriadas com a utilização de ventiladores (ar forçado). Posteriormente, todas as amostras foram revenidas a 200°C por 2 h, sendo resfriadas dentro do forno. Pode-se observar na Figura 3 as rotas de tratamentos térmicos, com recozimento e sem recozimento, seguido por

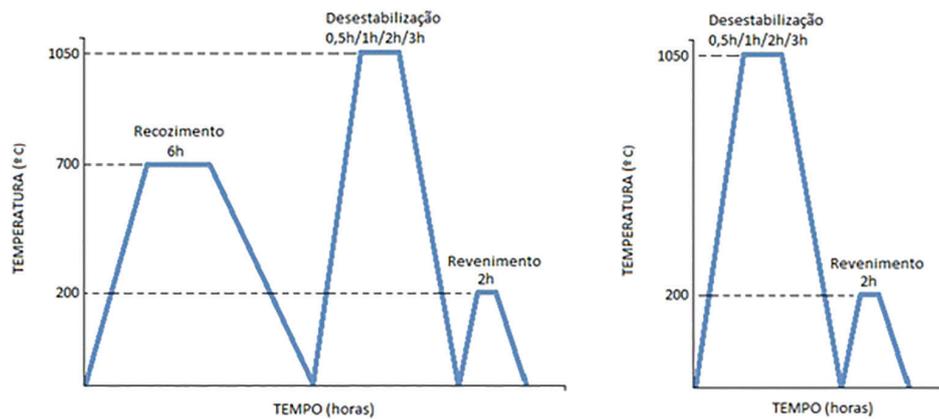


Figura 3: Rotas de tratamentos térmicos realizados nas amostras.

desestabilização realizados em quatro tempos distintos com manutenção da temperatura e o tratamento térmico de revenimento feito nas mesmas condições de tempo e temperatura para todas as amostras.

O intuito do tratamento térmico de recozimento é reduzir a dureza para permitir uma melhor usinabilidade do material e promover precipitação de carbonetos secundários de tal forma que, ao realizar a desestabilização, já exista previamente um grande volume de carbonetos secundários precipitados. Portanto, ocorre uma redução no tempo do tratamento térmico de desestabilização para concluir a precipitação de carbonetos secundários e promover a transformação da austenita em martensita ao resfriar o material ao ar forçado. A precipitação de carbonetos reduz a quantidade de carbono na matriz, o que favorece a transformação austenítica em martensítica, devido ao aumento da temperatura crítica de transformação martensítica, auxiliando, desta forma, na resistência ao desgaste do material.

Após os tratamentos térmicos, a análise microestrutural foi realizada por microscopia óptica no microscópio da marca KONTROL, modelo IM713 e por microscopia eletrônica de varredura, no microscópio eletrônico da marca JOEL JSM, modelo 6360LV, equipado com EDS (Espectrômetro de Energia Dispersiva). As amostras foram lixadas manualmente de acordo com a ordem de granulometria, 80;120;220;320;400 e 600 mesh, polidas com pasta de diamante em suspensão de 6, 3 e 1 μm e atacadas com reagente Vilella por 15 segundos. Foi verificada a fração volumétrica de carbonetos por meio das imagens obtidas no microscópio óptico com aumento de 1500 vezes de amostras atacadas com reagente Vilella, utilizando o software Fiji is Just Image J.

Os ensaios de dureza foram realizados nas amostras desestabilizadas sem e com recozimento, sendo realizado em onze regiões distintas da amostra com carga de 100 kgf e tempo de 10 s com uso do equipamento SHIMADZU modelo SSX-550, conforme a norma ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008 [21].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microscopia óptica e eletrônica de varredura permitem verificar nas microestruturas das amostras no estado bruto de fusão, sem nenhum tratamento térmico, uma matriz predominantemente austenítica, com colônias de perlita, carbonetos de nióbio (NbC), carbonetos primários hexagonais (M_7C_3), bem como carbonetos eutéticos, como pode ser observado na Figura 4. O material obtido pode ser caracterizado como um ferro fundido hipereutético devido à presença de carbonetos primários hexagonais (M_7C_3).

As amostras apresentaram uma matriz predominantemente martensítica após o tratamento térmico de desestabilização. Observou-se a presença dos carbonetos secundários na matriz de todas as amostras com formas e disposições diferentes, que surgiram a partir dos tratamentos térmicos de recozimento e desestabilização [22]. A presença dos carbonetos secundários indica que o tratamento térmico de recozimento e desestabilização foram eficazes, pois, a precipitação destes carbonetos reduz a quantidade de carbono na austenita, aumentando a temperatura de início da transformação martensítica. Devido ao tamanho e volume ocupado pelos carbonetos M_7C_3 , obtêm-se um material com melhor resistência ao desgaste [16]. As microestruturas das amostras desestabilizadas com e sem recozimento podem ser observadas na Figura 5.

A morfologia dos carbonetos sofreu alteração com a variação do tempo de tratamento térmico, sendo mais expressiva nas amostras recozidas e desestabilizadas por 0,5 h, na qual os carbonetos apresentaram maior tamanho e maior quantidade por unidade de área precipitados na matriz. Eles apresentaram nas formas de cubos e hastes, sendo que as amostras sem recozimento apresentaram maiores quantidades de carbonetos em forma de hastes com o aumento do tempo de desestabilização e as amostras recozidas apresentaram maior quantidade de carbonetos em hastes independente do tempo de desestabilização. Ambas morfologias se assemelham às encontradas na literatura, sendo tratadas

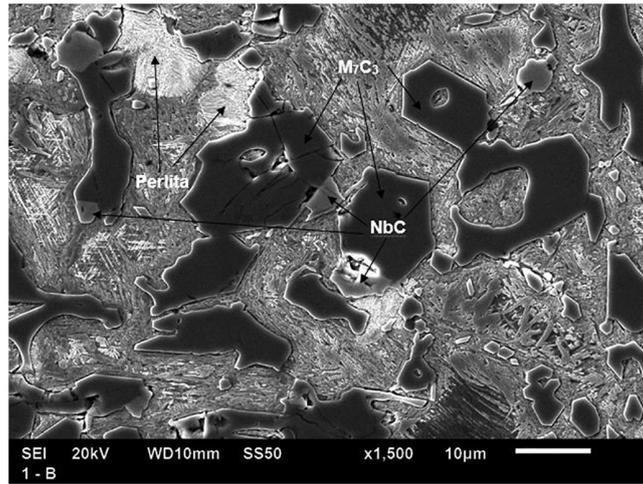


Figura 4: Microestrutura da liga bruta de fusão sem tratamento térmico (MEV).

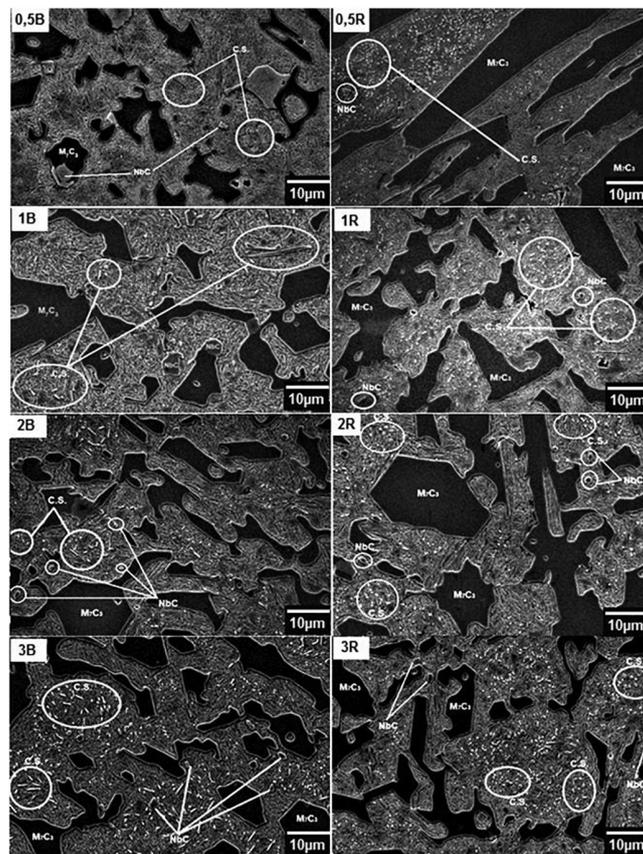


Figura 5: Microestruturas das ligas tratadas termicamente (MEV).

como morfologias “rod-type” e “discrete rod-type” [23]. Todas as amostras apresentaram carbonetos de nióbio de forma compacta, o que promove uma melhor fixação dos mesmos na matriz, auxiliando o material em sistemas de desgaste, protegendo os carbonetos e a matriz [24]. A morfologia dos carbonetos secundários pode ser observada na Figura 6, onde 1 representa os carbonetos nas formas de cubos e 2 nas formas de hastes.

Para quantificar a fração volumétrica de carbonetos (FVC), as superfícies das amostras foram atacadas com reagente Vilella e as imagens que evidenciaram os carbonetos foram obtidas por microscopia eletrônica e

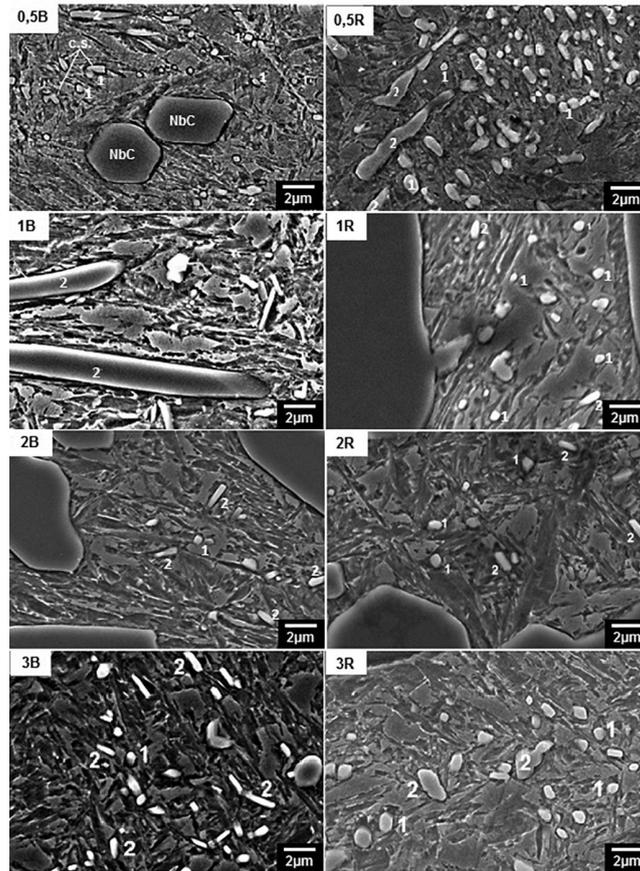


Figura 6: Microestrutura dos carbonetos secundários.

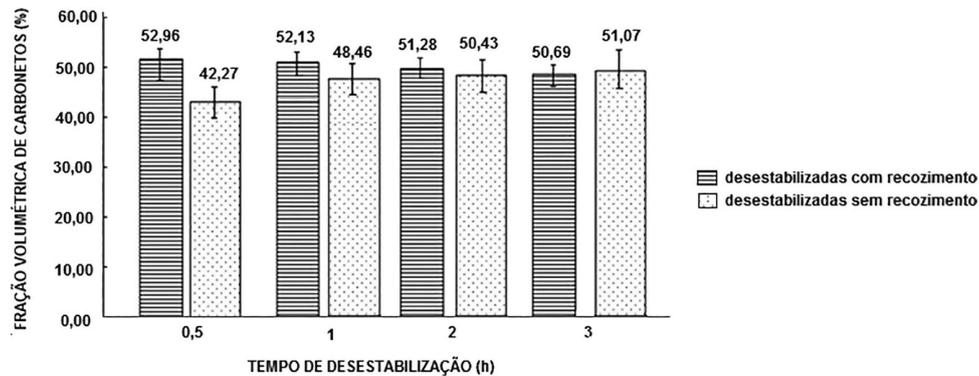


Figura 7: FVC amostras desestabilizadas com e sem recozimento.

óptica, sendo analisadas no software Fiji is Just Image J. Nas amostras sem recozimento, houve um acréscimo da FVC com o aumento do tempo de tratamento térmico de desestabilização, enquanto nas amostras recozidas a variação da FVC foi muito pequena. Analisando a FVC das amostras desestabilizadas sem e com recozimento, pode-se observar que quase todas as amostras recozidas apresentaram um aumento em relação às amostras sem recozimento, representando 0,85% de aumento nas amostras desestabilizadas por 2 h, 3,67% nas amostras desestabilizadas por 1 h e 10,69% nas amostras desestabilizadas por 0,5 h (aumento mais expressivo) e apenas nas amostras desestabilizadas por 3h ocorreu um decréscimo de 0,38%. Pode-se observar na Figura 7 a FVC.

A Análise de Variância (ANOVA) é um teste estatístico usado para comparar as variâncias entre as médias de grupos diferentes. Neste trabalho, a ANOVA foi realizada com a utilização do programa Microsoft Excel considerando 11 amostras, com nível de confiança de 95% e nível de significância (α) igual a 5%, rejeitando a hipótese nula H_0 para $p < \alpha$ sendo $\alpha = 0,05$ e $F > F_{crítico}$, indicando que há diferença estatisticamente significativa em pelo menos um par de médias. Na Tabela 2, a ANOVA foi utilizada para analisar se a fração volumétrica de carbonetos foi influenciada pelo tratamento térmico de recozimento, comparando a FVC entre

um grupo de amostras com recozimento e desestabilizadas, um grupo de amostras sem recozimento e desestabilizadas e entre os dois grupos. A variação no tempo de tratamento térmico de desestabilização nas amostras sem recozimento e desestabilizadas interferiu na FVC, já que há diferença estatística entre eles, ocorrendo um aumento na FVC com o aumento do tempo de desestabilização. No entanto, nas amostras recozidas e desestabilizadas, o tempo de desestabilização não interferiu na FVC, já que são estatisticamente iguais. A ANOVA evidenciou que há diferença estatística entre as amostras sem e com recozimento (todas as amostras), concluindo que o tratamento térmico de recozimento influenciou na FVC.

A dureza se comportou conforme os estudos propostos por ORTEGA-CUBILLOS *et al.* [19] que concluíram que a maior dureza foi da liga submetida à um recozimento prévio com o tempo de desestabilização reduzido se comparado à dureza das ligas sem recozimento e desestabilizadas. No entanto, nos estudos propostos por ORTEGA-CUBILLOS *et al.* [19] o material estudado, um ferro fundido branco, não possuía a adição de elementos de liga, como o nióbio, proposto neste trabalho. Na Figura 8 pode ser observada a dureza das amostras desestabilizadas com e sem o tratamento térmico de recozimento. Verifica-se que a maior dureza apresentada foi na amostra recozida e desestabilizada por 0,5 h.

A dureza da liga bruta de fusão foi 603HV e após o recozimento, 446 HV, visto que o tratamento térmico de recozimento reduz a dureza do material. Após o tratamento térmico de desestabilização, a maior dureza apresentada nas amostras sem recozimento foi 806,5 HV, na amostra desestabilizada por 3h, e nas amostras recozidas, 840,82 HV na amostra recozida e desestabilizada por 0,5 h, confirmando que o tratamento térmico de desestabilização foi eficaz no aumento da dureza do material e que a associação dos tratamentos de recozimento e desestabilização permitiram obter com apenas 0,5 h de desestabilização uma dureza maior que com 3 h de desestabilização para uma liga sem recozimento. O teste estatístico ANOVA foi usado para análise da dureza Vickers de um grupo de amostras recozidas e desestabilizadas, de um grupo de amostras sem recozimento (apenas desestabilizadas) e entre os dois grupos. Considerando 11 amostras, com nível de confiança de 95% e nível de significância (α) igual a 5%, rejeitando a hipótese nula H_0 para $p < \alpha$ sendo $\alpha = 0,05$ e $F > F_{crítico}$, indicando que há diferença estatisticamente significativa em pelo menos um par de médias. O teste evidenciou que há variações estatísticas na dureza do material com relação ao tempo de desestabilização e que ela foi influenciada pelos tratamentos térmicos de recozimento e desestabilização, como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 2: Teste ANOVA: FVC.

	α	P-VALOR	F	F CRÍTICO	RESULTADO
Recozidas	0,05	0,0612	2,4087	2,4902	Iguais
Sem recozimento	0,05	0,0458	4,7490	3,4902	Diferentes
Todas as amostras	0,05	0,0120	6,2741	5,9873	Diferentes

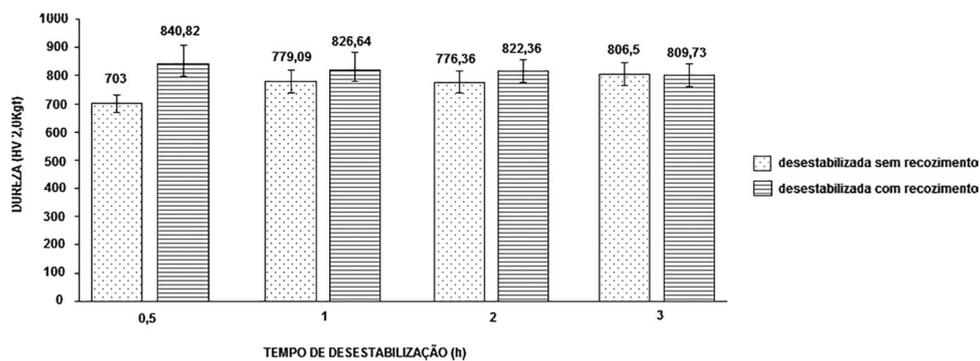


Figura 8: Dureza das amostras sem e com recozimento.

Tabela 3: Teste ANOVA: Dureza Vickers.

	A	P-VALOR	F	F CRÍTICO	RESULTADO
Recozidas	0,05	0,0093	4,2867	2,8387	Diferentes
Sem recozimento	0,05	0,0148	3,9266	2,8285	Diferentes
Todas as amostras	0,05	0,0000	7,0677	2,1263	Diferentes

O tratamento térmico prévio de recozimento influenciou na dureza do material, possibilitando um aumento da dureza nas amostras que foram previamente recozidas se comparadas às amostras que não foram. Além disso, o tempo de desestabilização também interferiu na dureza, principalmente comparando amostras com 0,5 h e 3 h de desestabilização, sendo que, para as amostras sem recozimento, quanto maior foi o tempo de tratamento térmico, maior foi também a dureza. Já nas amostras recozidas, ocorreu o inverso, quanto maior foi o tempo de tratamento térmico de desestabilização, menor foi a dureza.

4. CONCLUSÃO

Diante do objetivo de avaliar a influência dos tratamentos térmicos de recozimento e desestabilização na precipitação de carbonetos secundários, os resultados permitiram concluir que o tratamento térmico de recozimento e desestabilização foram eficientes na precipitação de carbonetos e a desestabilização foi responsável pela transformação da matriz austenítica em martensítica, além disso, ambos tratamentos térmicos possibilitaram um aumento da dureza do material.

O tratamento térmico de recozimento possibilitou uma maior precipitação de carbonetos na matriz, visto que uma amostra recozida e desestabilizada por 0,5 h possui maior FVC, maiores carbonetos e maior dureza que uma amostra sem recozimento desestabilizada por 3 h. Desta forma, possibilitou uma redução no tempo do tratamento de desestabilização para obter uma matriz martensítica com elevada dureza.

Com relação à morfologia dos carbonetos secundários, foi verificada a presença nas formas de cubos, “*discrete rod-type*” e hastes, “*rod-type*”, sendo que as amostras sem recozimento apresentaram maiores quantidades de carbonetos em forma de hastes com o aumento do tempo de desestabilização e as amostras recozidas apresentaram maior quantidade de carbonetos em hastes independente do tempo de desestabilização.

Todas as amostras apresentaram carbonetos de nióbio de forma compacta, o que promove uma melhor fixação dos mesmos na matriz, auxiliando o material em sistemas de desgaste, protegendo os carbonetos e a matriz.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e à Universidade Federal de Minas Gerais pela disponibilidade de laboratórios para a realização de ensaios e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ROTHERY, W.H., *Estrutura das ligas de ferro*, São Paulo, Editora Edgar Blücher, 1968.
- [2] EYRE, T.S., “Wear characteristics of metals”, In: Rigney, D.A., Glaeser, W.A. (eds.), *Source book on wear control technology*, Ohio, ASM, 1978.
- [3] MOORE, M.A., “A review of two-body abrasive wear”, *Wear*, v. 27, n. 1, pp. 1–17, 1974. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(74\)90080-5](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(74)90080-5).
- [4] SILVA, C.S., “*Análise microestrutural em altas temperaturas de um ferro fundido branco de alto cromo com molibidênio e nióbio*”, Tese de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- [5] MELO, I.N.R., “*Caracterização e avaliação da resistência ao desgaste de uma liga de ferro fundido alto cromo com adição de nióbio*”, Tese de M.Sc., Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- [6] GUESSER, W.L., COSTA, P.H.C., PIESKE, A., “Nióbio em ferros fundidos brancos ligados ao cromo para aplicações em desgaste abrasivo”, *Meturgia*, v. 45, n. 381, pp. 768–776, 1989.
- [7] FISET, M., PEEV, K., RADULOVIC, M., “The influence of niobium on fracture toughness and abrasion resistance in high-chromium white cast irons”, *Journal of Materials Science Letters*, v. 12, n. 9, pp. 615–617, 1993. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00465569>.
- [8] HE-XING, C., ZHE-CHUAN, C., JIN-CAI, L., *et al.*, “Effect of niobium on wear resistance of 15% Cr white cast iron”, *Wear*, v. 166, n. 2, pp. 197–201, Jul. 1993. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90262-K](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(93)90262-K).
- [9] FARAH, A.F., “*Desenvolvimento de uma liga de ferro fundido branco alto cromo com nióbio, tratada termicamente, para resistência ao desgaste abrasivo*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1997.
- [10] OLIVEIRA, C.G., “*Desenvolvimento e caracterização de liga de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio para uso em mineração*”, Tese de M.Sc., Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

- [11] PACHECO, D.A., “*Caracterização estrutural e propriedades mecânicas e tribológicas de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- [12] ABDEL-AZIZ, K., EL-SHENNAWY, M., OMAR, A., “Microstructural characteristics and mechanical properties of heat treated high-Cr white cast iron alloys.”, *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 12, n. 14, pp. 4675–4686, 2017.
- [13] FARIA, L.M., MELO, I.N.R., SANTOS, A.J., *et al.* “Heat treatment effect on the microstructure and tribological behaviour of a high chromium cast iron with 0.5% of Niobium”, *ISIJ*, v. 60, n. 11, pp. 2569–2575, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-760>.
- [14] FISET, M., PEEV, K., RADULOVIC, M., “The influence of niobium on fracture toughness and abrasion resistance in high-chromium white cast irons.”, *Journal of Materials Science Letters*, v. 12, n. 9, pp. 615–617, 1993. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00465569>.
- [15] HIGUERA-COBOS, O.F., DUMITRU, F.D., MESA-GRAJALES, D.H., “Improvement of abrasive wear resistance of the high chromium cast iron ASTM A-532 through thermal treatment cycles.”, *Revista de la Facultad de Ingeniería*, v. 25, n. 41, pp. 93–103, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.19053/01211129.4141>.
- [16] SILVA, J.V., “*Estudo da influência do tratamento térmico de austenitização seguida de resfriamento ao ar forçado na resistência ao desgaste abrasivo do ferro fundido branco Astm A532 II D*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- [17] PENAGOS, J.J., PEREIRA, J.I., MACHADO, P.C., *et al.*, “Heat treatment effect on the microstructure and tribological behaviour of a high chromium cast iron with 0.5% of Niobium”, *Wear*, v. 983, pp. 376–377, 2017.
- [18] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM A532-14: standard specification for abrasion-resistant cast irons standard*, West Conshohocken, Wiley, 2014.
- [19] ORTEGA-CUBILLOS, P., BERNARDINI, P.A.N., TORRES, L.A., “Otimização do tratamento térmico de desestabilização do ferro fundido branco de alto cromo classe II D usado em moinhos de carvão de usinas termelétricas”, In: *Anais CIMM*, Bogotá, Editora Uniandes, 2006.
- [20] CARMO, D.J., DIAS, J.F., LEONARDO, I.M., “Desenvolvimento do processo metalúrgico para obtenção de conexões, em ferro fundido branco de alto cromo”, *Metals and Materials*, v. 54, pp. 198–205, 1998.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008: materiais metálicos – ensaio de dureza Vickers – Parte 1: método de ensaio*. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.
- [22] SANTOS, J.F.M., “*Caracterização e estudo do amaciamento e endurecimento de ferros fundidos brancos de alto cromo*”, Tese de M.Sc., Universidade do Porto, Portugal, 2009.
- [23] POWELL, G.L.F., LAIRD II, G., “Structure, nucleation, growth and morphology of secondary carbides in high chromium and Cr-Ni white cast irons”, *Journal of Materials Science*, v. 27, n. 1, pp. 29–35, 1992. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02403640>.
- [24] HE-XING, C., ZHE-CHUAN, C., JIN-CAI, L., *et al.*, “Effect of niobium on wear resistance of 15% Cr white cast iron”, *Wear*, v. 166, n. 2, pp. 197–201, Jul. 1993. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90262-K](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(93)90262-K).