

# INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO E DO RESFRIAMENTO NA MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO BRANCO DE ALTO CROMO USADO EM CHUTES DE TRANSFERÊNCIA DE MINÉRIO DE FERRO\*

*Diego Loubach da Rocha<sup>1</sup>  
Anderson Pereira Martins<sup>2</sup>  
Cássio Santos de Carvalho<sup>3</sup>  
Flávio Antônio de Moraes Pinto<sup>4</sup>  
Adonias Ribeiro Franco Jr.<sup>5</sup>*

## Resumo

Os ferros fundidos brancos com alto teor de cromo (FFBACs) são amplamente empregados na indústria de mineração em equipamentos expostos ao contato com partículas altamente abrasivas, como minério de ferro. O desempenho tribológico dos FFAC pode ser melhorado com a aplicação de tratamentos térmicos adequados. Para elevar a capacidade de sustentação de carbonetos primários na matriz austenítica, e consequente melhoria de resistência ao desgaste, no presente trabalho um FFAC (14%Cr, 2,8%C) foi austenitizado e resfriado sob diferentes condições. As condições para os tratamentos térmicos foram: temperaturas de austenitização variando de 900 a 1050 °C, tempo de encharque de 1 hora e resfriamento ao ar sem agitação e em óleo com agitação. Os resultados obtidos com têmpera ao ar mostraram que temperaturas intermediárias proporcionam maior aumento de dureza e em todas as microestruturas verificou-se a formação de carbonetos secundários na matriz austenítica e formação de martensita em regiões circunvizinhas aos carbonetos primários. Os resfriamentos realizados em óleo resultaram em estruturas com menor dureza em comparação com aqueles realizados ao ar em decorrência da não formação de carbonetos secundários.

**Palavras-chave:** Ferro Fundido Branco de Alto Cromo; Microestrutura; Austenitização; Meios de resfriamento.

## INFLUENCE OF AUSTENITIZATION AND COOLING ON MICROSTRUCTURE OF HIGH-CHROMIUM WHITE CAST IRON USED IN IRON ORE TRANSFER HOUSES

### Abstract

High-Chromium white cast iron (HCWCI) is widely used in mining equipment in contact with highly abrasive particles, such as iron ore. The tribological performance of HCWCI can be improved with the application of heat treatments. In order to improve both the carrying capacity of primary carbides in the austenitic matrix and wear resistance. In this work a HCWCI (14% Cr, 2.8% C) was austenitized and cooled under different conditions. Heat treatments were carried out using austenitizing temperatures varying from 900 to 1050 °C, for 1 h and the coolings were made both in air without stirring and oil with stirring. Air coolings and intermediate temperatures resulted in higher values of hardness and all microstructures showed formation of secondary carbides in the austenitic matrix and martensite surrounding the primary carbides. Oil coolings resulted in microstructures with lower hardness, compared to air cooled microstructures due to non-formation of secondary carbides.

**Keywords:** High-Chromium White Cast Iron; Microstructure, Austenitization, Cooling media.

- <sup>1</sup> *Engenheiro Mecânico, mestrando em engenharia metalúrgica e de materiais, Propemm, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo - Brasil.*
- <sup>2</sup> *Técnico em metalurgia, técnico de laboratório, Propemm, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo - Brasil.*
- <sup>3</sup> *Tecnólogo em rochas ornamentais, doutor em engenharia e ciência dos materiais, Professor colaborador, Propemm, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo - Brasil.*
- <sup>4</sup> *Engenheiro metalúrgico, mestre em engenharia metalúrgica, Professor efetivo, Propemm, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo - Brasil.*
- <sup>5</sup> *Engenheiro metalúrgico, doutor em engenharia metalúrgica, Professor efetivo, Propemm, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo - Brasil.*
- <sup>6</sup> .

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração tem usado extensivamente os ferros fundidos com alto teor de cromo (FFBAC) em razão de sua alta dureza e alta resistência a abrasão. A sua estrutura bruta de fundição consiste basicamente de uma matriz austenítica e de carbonetos estéticos primários ( $M_7C_3$ ). Esta estrutura pode ser alterada por meio de tratamentos térmicos com o objetivo de transformar a matriz austenítica em martensita e precipitar carbonetos secundários. A matriz do material bruto de fundição é instável, pois é supersaturada de elementos de liga, e por isso, esses elementos se precipitam a partir da matriz, quando termicamente ativados. Durante o processo, ocorre alta taxa de precipitação de carbonetos secundários que leva a uma desestabilização da austenita pela diminuição dos elementos de liga e consequente formação de martensita durante o resfriamento.

Kopyciński et. al. [1] analisaram o efeito dos tratamentos térmicos na estrutura de um FFBAC. Os autores variaram as temperaturas de austenitização e realizaram medições de dureza após têmpera, revenido e recozimento. A têmpera afetou positivamente a dureza do material, enquanto o revenimento e o recozimento subsequente resultou em aumento de ductilidade e diminuição de dureza em relação aos valores obtidos com a têmpera. Karantzalis et. al. [2] avaliaram o efeito da temperatura e do tempo de austenitização na microestrutura e dureza, e observaram precipitação gradual de carbonetos secundários do tipo  $M_{23}C_6$ , e aumento gradual de dureza. Tabrett e Sare [3] também estudaram os efeitos da temperatura e do tempo na resistência à abrasão de duas ligas de ferro fundido alto cromo. Bedolla-Jacuíne et. al. [4] avaliaram a taxa de precipitação de carbonetos secundários em função da temperatura de austenitização e do tempo. Os autores verificaram que as maiores taxas de precipitação são obtidas em temperaturas em torno de 900 °C e com tempo de encharque de até 2 h.

O objetivo do presente trabalho foi analisar o efeito da temperatura de austenitização na microestrutura de um FFBAC usado na mineração e entender os mecanismos que são relevantes para ganho de dureza e consequente resistência ao desgaste. Isso abrirá caminho para emprego de tratamento em placas de chutes de transferência de minério para aumento da vida útil das mesmas em campo.

O FFBAC estudado é livre de elementos de liga fortes formadores de carbonetos como V e Ti. Alguns carbonetos de Mo podem estar presentes, mas não foram identificados nas análises EDS realizadas, as quais apresentaram carbonetos secundários tendo como elemento predominante o Cr.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Procedimento experimental

As amostras de FFBAC foram cortadas de uma placa de chute em cubos de 25,4 mm de aresta e austenitizadas em um forno de resistência a 900, 930, 960, 990, 1020 e 1050 °C por 1h. Em seguida, para cada uma dessas temperaturas, foram realizados resfriamentos em dois diferentes meios: ao ar sem agitação, e em óleo com agitação durante 3 minutos. As amostras foram cortadas transversalmente, lixadas, polidas com alumina de 1 e 0,3  $\mu$ m, limpas em banho ultrassônico, secadas com ar quente e atacadas com reagente Nital 4%. Os valores de dureza HRC foram determinados em

durômetro Heckert de bancada na meia diagonal de cada canto da amostra, sendo realizadas 4 medições para cada amostra. As análises microestruturais foram realizadas em microscópio ótico Leica modelo 750 DM, e adicionalmente em microscópio eletrônico de varredura da marca Zeis EVO MA10 com detector de elétrons secundários e aumentos de 1K e 4K.

## 2.2 Resultados e discussão

A Tabela 1 mostra a composição química do FFBC, amplamente usado em mineração. O material é especificamente aplicado na fabricação de chutes de transferência de uma grande mineradora. Verifica-se que os teores de molibdênio e níquel estão abaixo daqueles recomendados por Bedolla-Jacuinde et ([4]), o que pode resultar em baixa temperabilidade.

**Tabela 1.** Composição química do ferro fundido do experimento

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
2,80	0,97	0,88	0,058	0,026	13,56	0,26	0,76	1,03

### 2.2.1 Dureza

A Figura 1 mostra a dureza do FFBC em função da temperatura de austenitização e do meio de resfriamento. Para temperatura de 900 °C, os resfriamentos em óleo e ao ar conduzem a aumentos semelhantes de dureza. Para temperaturas de 930 e 960 °C, os maiores valores de dureza são atingidos para os dois meios de resfriamento, porém com aumento mais acentuado para o resfriamento ao ar, sendo máximo para temperatura de 930 °C. Para a temperatura de 990 °C, o aumento de dureza volta a ser semelhante para os dois meios e para 1020 °C só ocorre aumento de dureza para o material resfriado ao ar. Para a temperatura de 1050 °C verifica-se um decréscimo nos valores de dureza, sendo mais acentuado quando o resfriamento se dá em óleo.

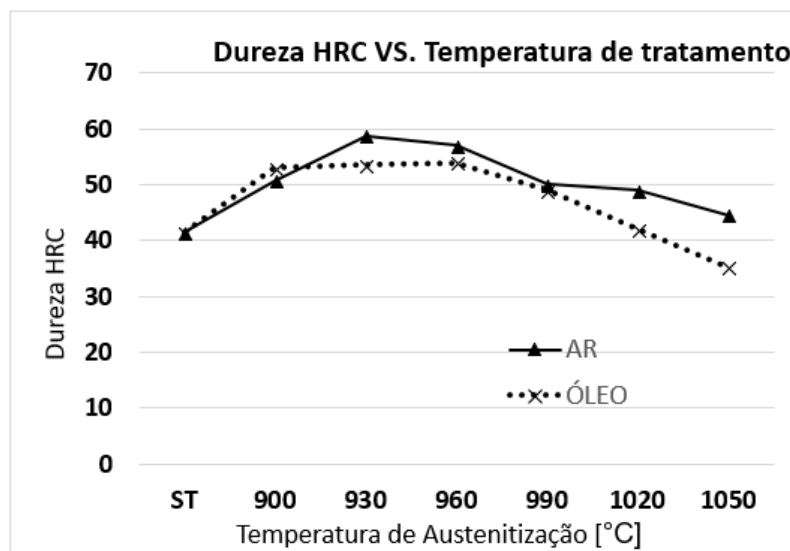


Figura 1. Variação da dureza do ferro fundido branco alto cromo (FFBC) com a temperatura de austenitização e com o tipo de resfriamento.

### 2.2.2 Microestrutura do FFBC na condição bruta de fundição

A microestrutura do FFBC no estado bruto de fundição é apresentada na Figura 2. Verifica-se a presença de dendritas de austenita e de carbonetos eutéticos do tipo  $M_7C_3$ . O ataque realizado sugere que o eutético tende a estar conectado na matriz em uma estrutura de barras que avançam perpendicularmente à superfície analisada, de acordo com Bedolla-Jacune et al. [4].

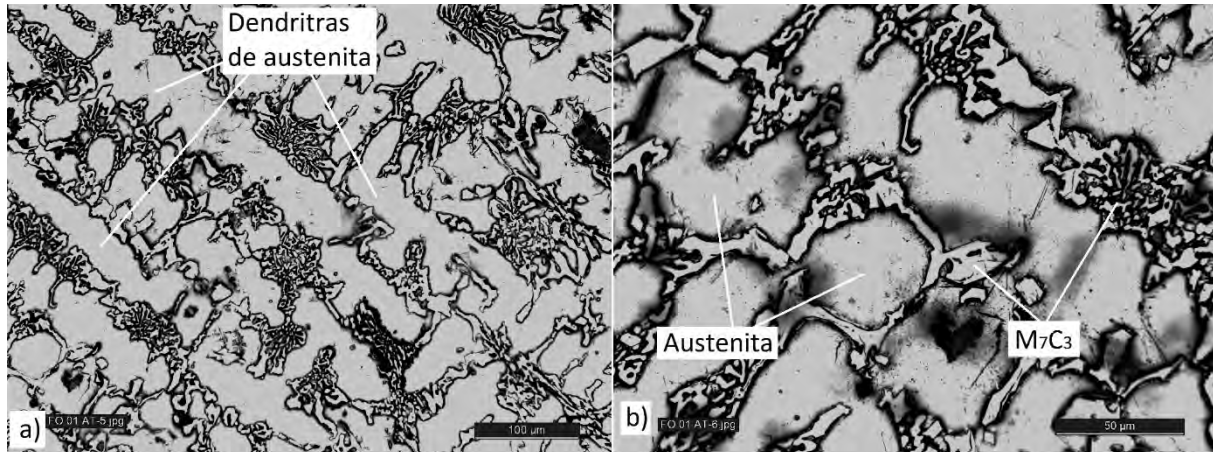


Figura 2. MO da estrutura bruta de fundição do FFBC mostrando: a) dendritas de austenita, e b) detalhes da morfologia e disposição dos carbonetos eutéticos na matriz austenítica.

### 2.2.3 Efeito da temperatura de austenitização na microestrutura de amostras temperadas ao ar

As características morfológicas das áreas transformadas e as medidas realizadas em equipamento de dureza instrumentada sugerem a presença de martensita nas vizinhanças dos carbonetos primários. As observações em MEV revelam a presença de cavidades esféricas dispersas na matriz onde estavam alojados os carbonetos secundários, formados durante o tratamento, que se desprenderam durante preparação metalográfica. Turenne et al [5] também verificaram a formação desse tipo de microestrutura e morfologia dos carbonetos secundários, a qual apresentou dureza de 62 HRC, que é um valor bem próximo ao encontrado para a dureza de 930 °C.

A análise por MEV das amostras tratadas ao ar nas temperaturas de 900 a 1050 °C é apresentada na Figura 3.

Para 900 °C, pode ser notada a presença de carbonetos secundários de pequeno diâmetro e em pequena quantidade volumétrica, o que pode ser entendido como uma fase inicial do processo de precipitação. Para temperatura de 930 °C, Figura 3b, verifica-se a presença de uma pequena fração de carbonetos secundários com diâmetros maiores do que aqueles formados na temperatura de 900 °C. O aspecto da estrutura da matriz sugere que a mesma se constitui predominantemente por martensita, tanto nas regiões vizinhas aos carbonetos eutéticos quanto naquelas mais distantes.

Aumentando a temperatura para 960 °C, é possível observar na Figura 3c que a martensita se concentra no entorno dos carbonetos eutéticos primários. Provavelmente, esta transformação martensítica está associada a maior concentração de carbono e cromo nessa região, em detrimento das regiões mais distantes que tiveram empobrecimento dos referidos elementos em decorrência da



formação de carbonetos secundários. Em relação a temperatura de 930 °C, verificou-se uma maior quantidade de carbonetos secundários com dispersão ainda grosseira e de forma globular.

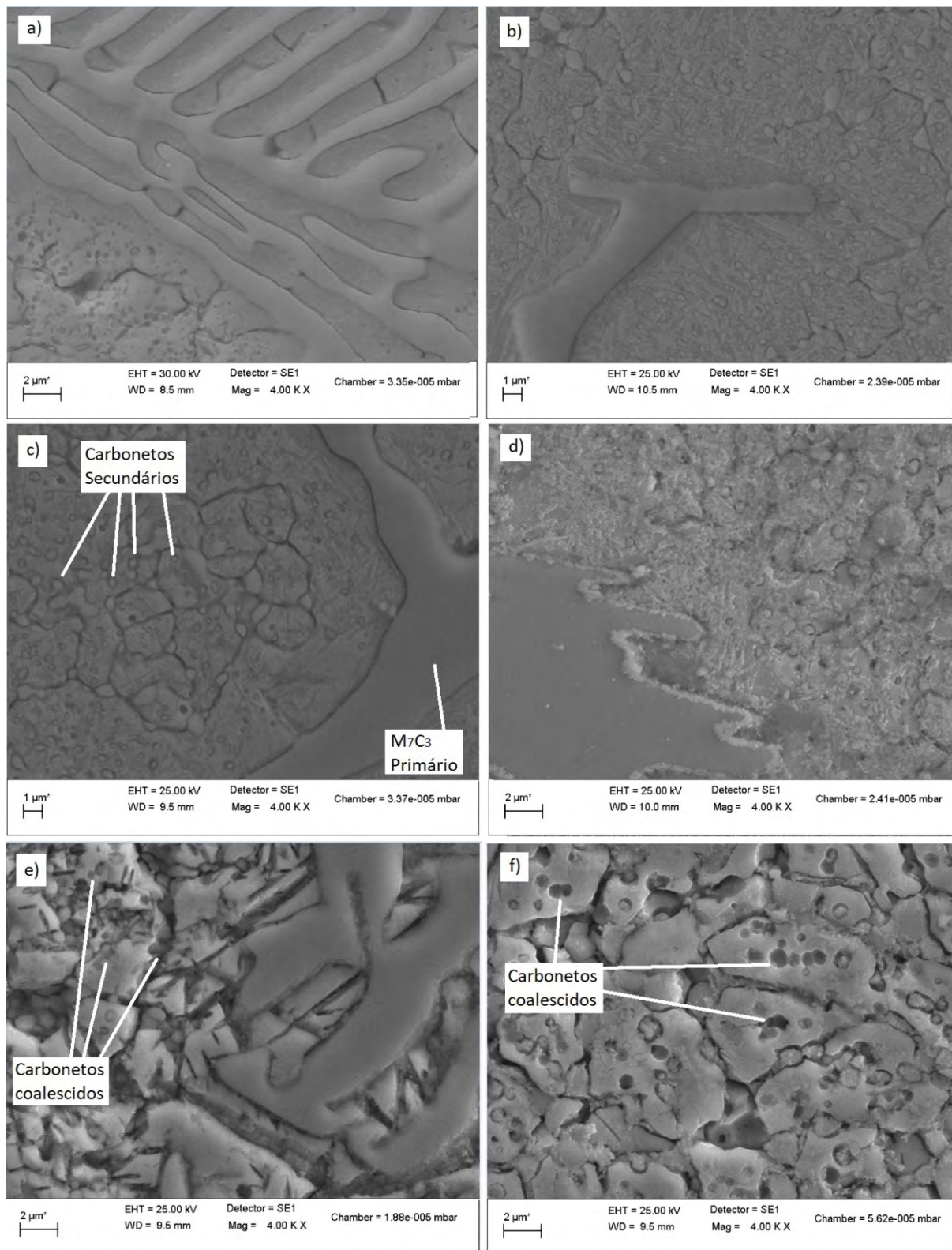


Figura 3 – MEV do FFBAC resfriado ao ar e previamente austenitizado nas temperaturas de: a) 900 °C, b) 930 °C, c) 960 °C, d) 990 °C, e) 1020 °C e f) 1050 °C

Na temperatura de 990 °C, Figura 3d, verifica-se que os carbonetos secundários formados são mais finos e mais bem distribuídos. A fração dos mesmos também é maior, em razão da maior difusão alcançada pelos elementos formadores de carbonetos (cromo e carbono) nesta temperatura. Observa-se também uma menor fração de área transformada em martensita.

Bedolla-Jacuíne et al. [4] encontraram uma pequena fração de carbonetos secundários formados quando se usam temperaturas de austenitização mais baixas. A austenita possui menor capacidade de retenção de carbono e cromo e com isso é esperada um maior volume de carbonetos secundários. Contudo, a cinética de precipitação varia com a temperatura de austenitização. Em temperaturas inferiores a 990 °C, é necessário maior tempo de encharque para que a precipitação seja completa. No mesmo trabalho, a maior fração de carbonetos secundários do tratamento em temperatura inferior só é alcançada com tempo de encharque superior a 3 horas. No presente trabalho, o tempo de encharque foi de 1 hora, o que sugere que não houve tempo suficiente para precipitação completa na faixa de temperatura de 900 a 960 °C

Para as temperaturas de 1020 e 1050 °C, Figura 3(e-f), já é possível notar a ocorrência de coalescimento de carbonetos secundários e a presença de martensita já não se faz evidente como ocorreu nas temperaturas de austenitização mais baixas. Nessa temperatura, a austenita é capaz de reter mais carbono e mais cromo e por isso, esta fase torna-se mais estável. Há menor quantidade de elementos disponíveis para precipitação e após o resfriamento, percebe-se uma maior fração de austenita retida na matriz.

#### **2.2.4. Efeito da temperatura de austenitização na microestrutura de amostras temperadas em óleo**

O resfriamento realizado em óleo ocorre de maneira mais drástica do que no resfriamento ao ar. A análise por MEV das amostras tratadas em óleo nas temperaturas de 900 a 1050 °C é apresentada na Figura 4. Observa-se a presença de martensita em todas as estruturas em virtude da alta velocidade de resfriamento alcançada com o uso de óleo, não se evidenciando a presença de carbonetos secundários.



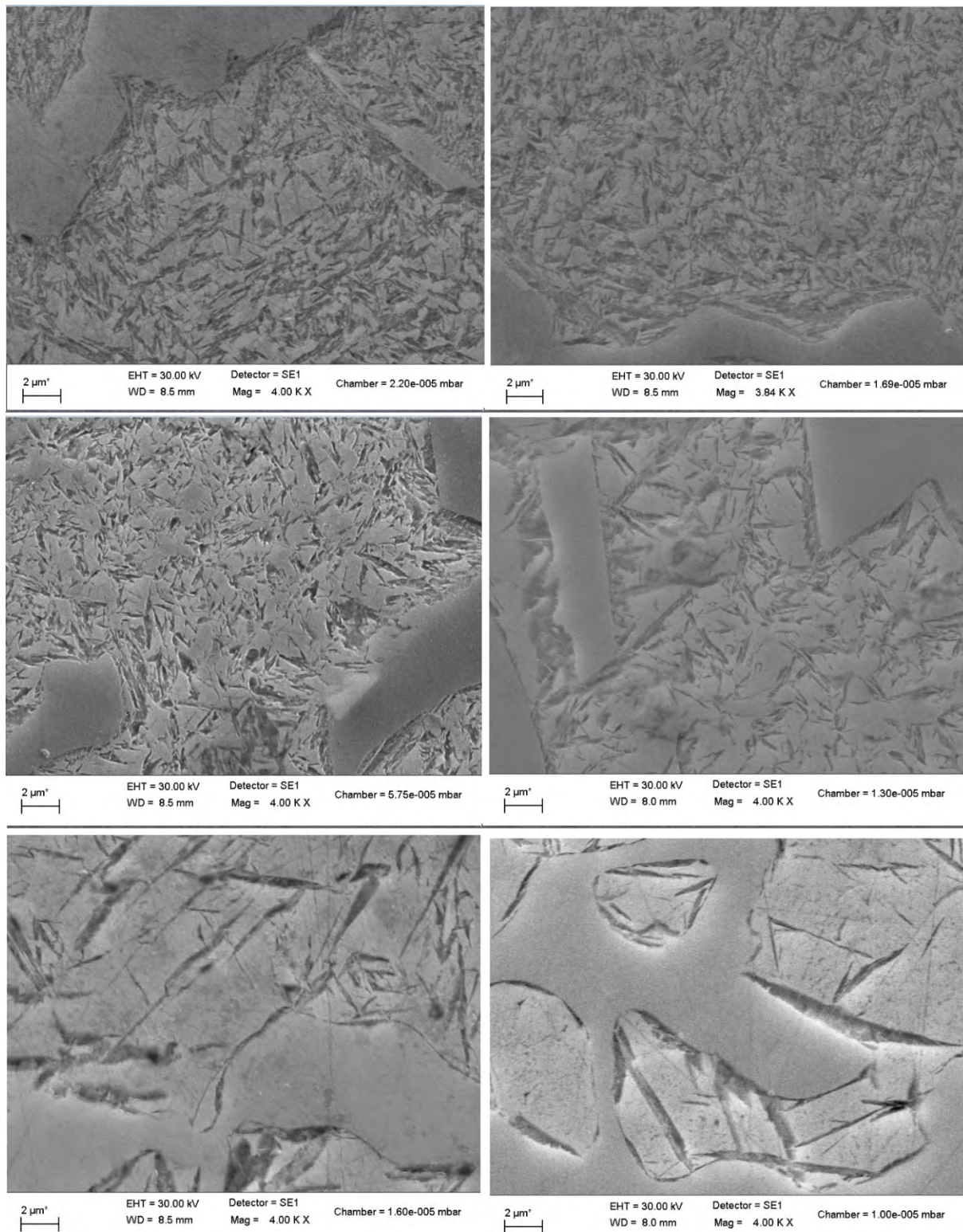


Figura 4 – MEV do FFBAC resfriado em óleo e previamente austenitizado nas temperaturas de: a) 900 °C, b) 930 °C, c) 960 °C, d) 990 °C, e) 1020 °C e f) 1050 °C

A análise EDS apresentada na Figura 5 indica que não ocorre a formação de carbonetos secundários no FFBAC resfriado em óleo, diferentemente do material resfriado ao ar.



As regiões contendo martensita diminuíram com o aumento da temperatura de austenitização, indicando que a taxa de nucleação dessa fase é menor, uma vez que a austenita resultante ao final da austenitização é mais estável.

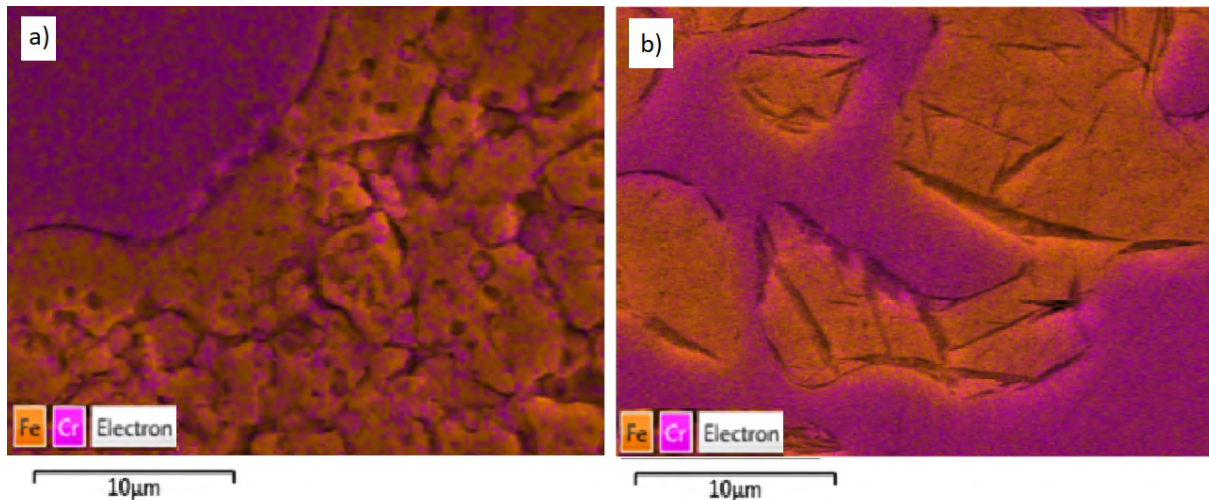


Figura 5 – Microanálise EDS do FFBC austenitizado a 1050 °C e resfriado: (a) ao ar, constatando a presença de carbonetos secundários na matriz; e (b) em óleo, evidenciando a presença apenas de martensita na matriz.

#### 2.2.4 Correlação de microestrutura e dureza

Para o resfriamento realizado ao ar, os maiores valores de dureza foram obtidos para a temperatura de 930 e 960 °C, o que sugere que nessas temperaturas ocorre a melhor combinação entre fração de área transformada em martensita e fração de carbonetos secundários precipitados. Para temperaturas subsequentes a formação de martensita decresce gradualmente. A dissolução dos carbonetos primários em temperaturas mais elevadas também contribui para isso, uma vez que estes sedem carbono para a matriz, a partir de onde ocorrem a precipitação de carbonetos secundários. Ainda que a presença de carbonetos secundários seja mais evidente, não há suporte suficiente da matriz para prover maiores níveis de dureza.

Esse efeito também foi observado por Karantzalis. Outros pesquisadores como Powell e Bee [6] caracterizaram os carbonetos secundários como do tipo  $M_{23}C_6$ , com formato cuboidal. No entanto, isso pode estar associado a diferente composição química existente entre o FFBC estudado por esses pesquisadores e o deste trabalho.

### 3 CONCLUSÃO

Para o FFBC com 13,88 %Cr, resfriado em óleo e ao ar, submetido a diferentes temperaturas de austenitização, conclui-se que

1. O maior ganho de dureza pode ser obtido na faixa de temperatura de austenitização de 930 e 960 °C devido principalmente a ótima combinação existente entre fração de martensita e precipitação de carbonetos secundários. O uso de temperaturas maiores ocasiona redução gradual da dureza, tanto para resfriamento a óleo como resfriamento a AR.
2. A partir de 1020 °C, iniciam-se os processos de dissolução dos carbonetos primários e de coalescimento de carbonetos secundários. Esses fenômenos e

a consequente redução de fração de martensita são responsáveis pela diminuição de dureza.

3. Na temperatura de 1050 °C, o coalescimento de carbonetos secundários e a estabilização da austenita levam a uma acentuada queda na dureza, sendo mais evidente quando os resfriamentos são realizados em óleo.
4. O resfriamento em óleo suprime a precipitação de carbonetos secundários,

## Agradecimentos

Suporte financeiro do convênio entre Embrapii/Vale S.A/ Facto. Apoio técnico da equipe do laboratório de Ensaios Não Destrutivos do IFES Vitória.

## REFERÊNCIAS

- 1 Kopyciński, D., Guzik, E., Siekaniek, D., Szczesny, A.. Analysis of the High Chromium Cast Iron Microstructure after the Heat Treatment. Archives of Foundry Engineering. 2014, vol. 14 (n. 3): p. 43–46.
- 2 Karantzalis, A. E.; Lekatou, A.; Diavatil, E. Effect of destabilization heat treatments on the microstructure of high-chromium cast iron: A microscopy examination approach. Journal of Materials Engineering and Performance. 2009, vol. 18 (8): p. 1078–1085.
- 3 Tabrett, C. P.; Sare, I. R. The effect of heat treatment on the abrasion resistance of alloy white irons. Wear. 1997, vol. 203–204: p. 206–219.
- 4 Bedolla-Jacuinde, A.; Arias, L.; Hernández, B. Kinetics of secondary carbides precipitation in a high-chromium white iron. Journal of Materials Engineering and Performance. 2003. vol. 12 (4): p. 371-382.
- 5 Turenne, S., Lavallée, F. and Masounave, J. Matrix microstructure effect on the abrasion wear resistance of high-chromium white cast iron, Journal of Materials Science. 1989. vol. 24: p. 3021-3028.
- 6 Powell, G. L. F., Bee, J. V. Secondary carbide precipitation in an 18 wt %Cr-1 wt % Mo white iron. Journal of Materials Science. 1996, v. 31, (3): p. 707–711.