

# CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO BALÍSTICO DE ALTA DUREZA\*

*Suzane de Sant'ana Oliveira<sup>1</sup>  
Karollyne Gomes de Castro Monsores<sup>2</sup>  
Anderson Oliveira da Silva<sup>3</sup>  
João Gabriel Passos Rodrigues<sup>4</sup>  
Ricardo Pondé Weber<sup>5</sup>*

## Resumo

Aços de alta dureza (HHA – High Hardness Armor) são os mais utilizados na fabricação de blindagens para veículos militares, em virtude da relação custo-benefício apresentada por esta classe de materiais, quando comparada as dos materiais cerâmicos, poliméricos e compósitos; além das excelentes propriedades que podem ser obtidas por meio dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Esses tratamentos geram uma microestrutura denominada martensita revenida, conferindo ao material dureza acentuada sem perda de tenacidade; propriedades antagônicas para um aço, porém relevantes para as blindagens. A dureza permite a ocorrência da quebra da ponta do projétil, já a tenacidade, absorver a energia de impacto. Todo tratamento térmico é considerado eficaz, quando permite obter apenas as fases importantes para o seu desempenho. No caso da têmpera e do revenido, obter apenas martensita é quase impossível, podendo esta apresentar percentuais elevados de austenita retida, o que contribui para a diminuição do desempenho balístico do aço. Sendo assim, este trabalho teve por objetivo caracterizar a microestrutura de um aço balístico de alta dureza, desenvolvido por siderúrgicas brasileiras, para confirmar a microestrutura proveniente dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido, além de analisar sua microestrutura e verificar por meio de difração de raios X, a possível presença da austenita retida.

**Palavras-chave:** Blindagem metálica; Caracterização metalográfica; Austenita retida

## MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF A HIGH HARD BALLISTIC STEEL

### Abstract

High Hardness steel is the most used in the manufacture of armors for military vehicles, due to the cost-benefit ratio presented by this class of materials, when comparing ceramic, polymeric and composite materials, in addition to excellent properties that can be obtained by means of quench and tempering treatments. These treatments generate a microstructure called tempered martensite, giving the material hardness with no loss of toughness; properties antagonistic to a steel, but relevant to the armor. The hardness allows the occurrence of the projectile tip break, as well as the toughness, to absorb the impact energy. Every heat treatment is considered effective, when it allows only the phases that are important for its performance to be obtained. In the case of quench and tempering, only barred martensite is almost impossible, which can present high percentages of retained austenite, which contributes to the reduction of the ballistic performance of the steel. The objective of this work was to characterize the microstructure of a high hardness ballistic steel, developed by Brazilian steelmakers, to confirm the microstructure from the quench and tempering treatments, besides analyzing its microstructure and

verifying by means of lightning diffraction X, the possible presence of retained austenite.

**Keywords:** Metallic armor; Metallographic characterization; Retained austenite.

- <sup>1</sup> *Tecnologia em Processos Metalúrgicos, Mestre, Doutoranda em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Tecnologia de Polímeros, Mestre, Doutoranda em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro e Brasil.*
- <sup>3</sup> *Licenciatura em Química, Mestre, Doutorando em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro e Brasil.*
- <sup>4</sup> *Engenharia de Petróleo, Mestrando em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro e Brasil*
- <sup>5</sup> *Engenharia Mecânica, Doutor, Professor do curso de Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços de alta dureza e alta resistência são muito utilizados como blindagem balística. Esses aços são processados metalurgicamente com a finalidade de obter um bom desempenho balístico que atenda aos requisitos estabelecidos em norma. Contudo, alguns fatores metalúrgicos, que podem afetar o desempenho balístico desses aços, vêm sendo estudados por diversos pesquisadores ao longo dos anos [1-4].

Alguns desses fatores como a microestrutura, juntamente com os tratamentos térmicos, são de vital importância para o comportamento das blindagens metálicas. É sabido que a microestrutura martensítica revenida reúne uma boa dureza sem perda de tenacidade, o que auxilia na quebra da ponta do projétil e na absorção da energia de impacto. Todavia, alguns aços que apresentam a microestrutura de bainita inferior, podem demonstrar um desempenho semelhante e até mesmo superior ao da martensita revenida, ainda mais quando processados na temperatura de fragilização do revenido [1, 4, 5].

O tratamento térmico deve ser realizado com muita cautela para que não haja um elevado percentual de austenita retida (maior que 11%), pois pode prejudicar o desempenho balístico da blindagem, tornando-se um ponto de instabilidade, onde até mesmo uma transformação microestrutural pode ocorrer durante o impacto [2,6]. Sabendo a influência que os processos metalúrgicos têm sobre o desempenho da blindagem, este trabalho tem por objetivo analisar a microestrutura de um aço de alta dureza, produzido nacionalmente, a fim de verificar a formação da martensita revenida e o percentual de austenita retido, tanto metalograficamente quanto pelo ensaio de difração de raios X.

## 2 DESENVOLVIMENTO

O material de estudo é um aço de alta dureza (HHA – “High Hardness Armor”), desenvolvido nacionalmente, com a finalidade de atuar na Nova Família de Blindados sobre Rodas (NFBR) do Exército Brasileiro (EB) [7]. Este aço foi temperado a partir de 910°C, aproximadamente, e revenido em 310°C. Foi fornecido em placas 500 x 500 x 7 mm, conforme apresentado na Figura 1. A composição química do aço HHA é apresentada na Tabela 1.

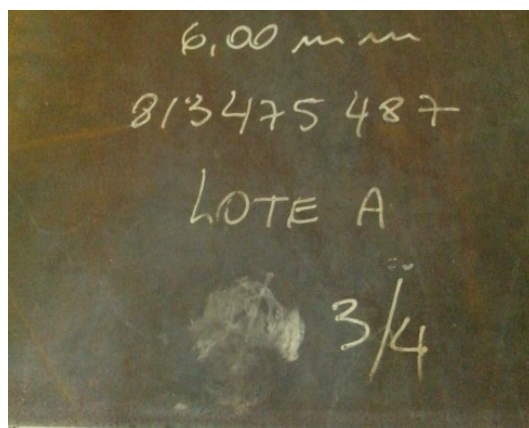


Figura 1. Fotografia do aço HHA.

**Tabela 1.** Composição química do novo aço HHA (%).

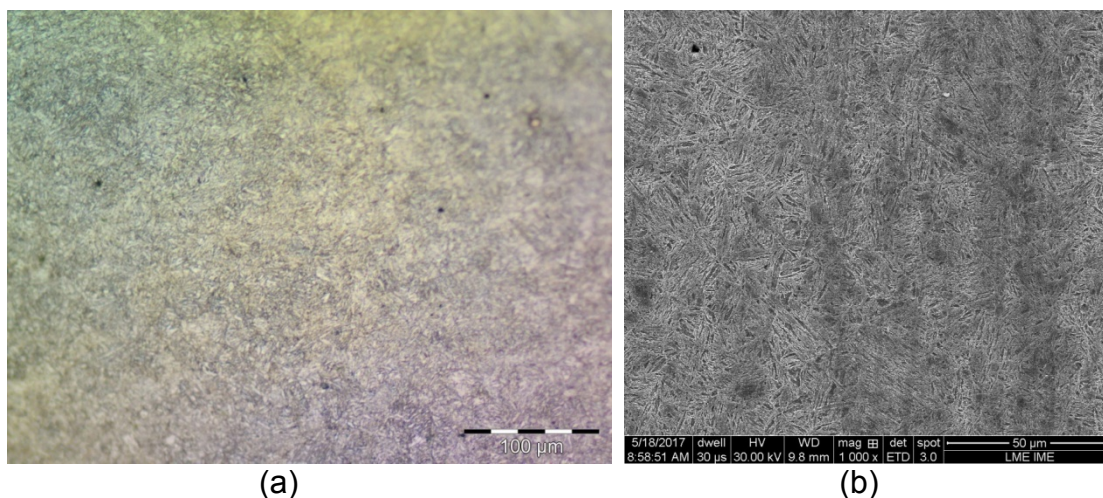
Elemento	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Ti	Nb	Cu	Al	Mo
%	0,201	1,011	0,014	0,004	1,090	0,529	0,571	0,021	0,023	0,013	0,068	0,394

Para a análise metalográfica, a amostra do aço HHA foi preparada por meio de técnicas convencionais de lixamento e polimento [8]. Após, foi realizado um ataque com a solução de Nital 2%. A microestrutura foi observada por meio de Microscopia Ótica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

O teor de austenita retida, no aço “como recebido”, foi verificado com o auxílio de duas técnicas: análise metalográfica e por meio da técnica de difração de raios X. Para a análise metalográfica foi utilizado um reativo constituído de uma solução aquosa a 10% de metabissulfato de sódio, que permite distinguir a austenita retida das demais fases [9-11].

Na análise por difração de raios X (DRX) a varredura foi realizada no modo passo-a-passo no intervalo angular de 20° a 140°, com incrementos de 0,02° e tempo de contagem de 0,05 s por passo. O difratograma foi refinado pelo método de Rietveld, utilizando o programa X'pert High Score Plus, a fim de auxiliar na verificação da austenita retida (fração de ferrita e austenita retida) por meio da identificação dos picos refinados e com o auxílio de fichas ICDD (*International Center for Diffraction Data*) [6, 12].

Nas Figuras 2 (a) e 2 (b) é apresentada a microestrutura do aço após o ataque com o reagente Nital 2%, por meio das técnicas de microscopia ótica e eletrônica de varredura, respectivamente.



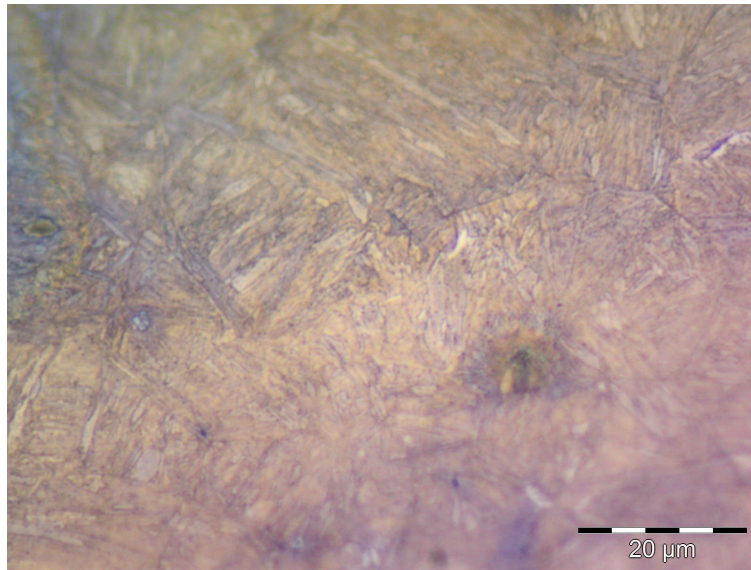
**Figura 2.** Microestrutura do aço HHA por meio de (a) microscopia ótica e (b) microscopia eletrônica de varredura.

A análise das Figuras 2 (a) e 2 (b) permite identificar a microestrutura de martensita revenida, típica dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido [5, 12, 13]. Essa microestrutura é considerada ótima para blindagem balística, pois pode proporcionar uma dureza acentuada sem perda de tenacidade. Essas características são fundamentais para blindagem, pois a dureza é responsável pela quebra da ponta do projétil e a tenacidade pela absorção da energia de impacto [1, 4].

A microestrutura é muito importante para as características mecânicas. Por isso, os tratamentos térmicos devem ser realizados corretamente, para que uma eventual austenita retida, em percentuais elevados, não prejudique o desempenho balístico.



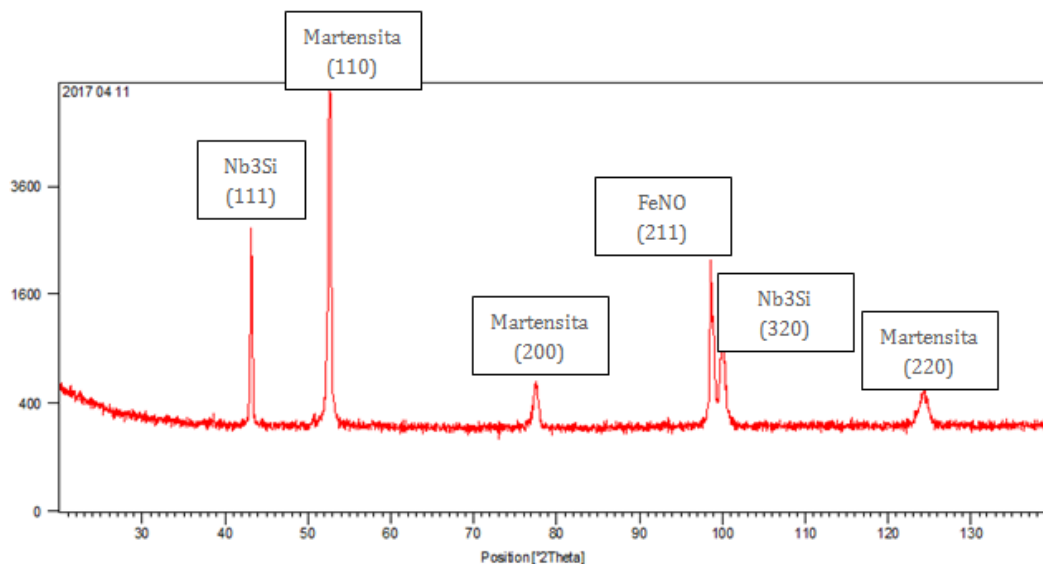
Na Figura 3 é apresentada a micrografia do aço HHA após o ataque com o reagente metabissulfito 10%.



**Figura 3.** Micrografia da amostra após o ataque com metabissulfito 10%.

O ataque metalográfico com o metabissulfito 10% permite identificar, além da austenita retida, a ferrita, a martensita e a bainita, colorindo-as de branco, azul e marrom, respectivamente. Todavia, não foi possível identificar a presença da austenita retida, pois as técnicas metalográficas podem apresentar certas limitações quando esta fase se encontra em percentuais inferiores a 15%. Contudo, a análise por meio de difração de raios X auxilia na identificação de percentuais superiores a 2% [6,11].

Na Figura 4 é apresentado o difratograma do aço HHA estudado.



**Figura 4.** Difratograma do aço HHA.

Esta análise possibilitou identificar os picos de martensita, Nitreto de Ferro e Nb3Si, com auxílio do software *X'Pert High Score Plus*. A austenita retida não foi

identificada, o que confirmou a não existência desta fase em percentuais superiores a 2% [11].

Por meio do método analítico, utilizando os índices de Miller da fase martensítica, foi possível determinar um parâmetro de rede ~0,404 nm [14].

### 3 CONCLUSÃO

As análises permitiram chegar às seguintes conclusões:

- A análise metalográfica, realizada com Nital 2%, permitiu concluir que os tratamentos térmicos de têmpera e revenido foram realizados corretamente e resultando na microestrutura de martensita revenida;
- O ataque com o reagente metabissulfito 10%, devido à sua falta de sensibilidade, não possibilitou verificar a existência de austenita retida;
- A análise por meio de difração de raios X auxiliou na identificação dos picos e do parâmetro de rede da fase martensítica. Além disso, confirmou a não existência de austenita retida em percentuais superiores a 2%.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Exército brasileiro e às agências financeiras nacionais (CNPq, CAPES e FAPERJ) por patrocinar esta pesquisa.

### REFERÊNCIAS

- 1 Manganello SJ, Abbott KH. Metallurgical factors affecting the ballistic behavior of steel targets, J. Materials, 7 (1972) 231-239.
- 2 Jena PK, Siva Kumar K, Krishna VR, Singh AK, Balakrishna B, Studies on the role of microstructure on performance of a high strength armour steel, Engineering Failure Analysis, Vol 15, Issue 8 (2008), p. 1088-1096.
- 3 Maweja, K, Stumpf, W., The design of advanced performance high strength low-carbon martensitic armour steels: Microstructural considerations. Materials Science & Engineering A\_V480 (2008) 160-165.
- 4 Crouch I, Cimpoeru SJ, Li H., Shanmugan D, (Ed.). The Science of Armour Materials. Woodhead Publishing, 2017, cap.2, p. 55-115.
- 5 Bhadeshia H, Honeycombe R. Steels: microstructure and properties. Butterworth-Heinemann, 2017.
- 6 Oliveira SDS, Souza ER, Weber RP, Miguez Suarez JC. Avaliação do teor de austenita retida em um aço balístico de alta dureza. RMCT VOL.33 N°2 2016, p.28-31
- 7 United State Department of army. Norma MIL-DTL-46100E (MR), Amendment 1, Detail Specification Armor Plate, Steel, Wrought, High Hardness, 2008.
- 8 American Society for Testing and materials, Norma E-3 - Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, 2011.
- 9 Vander Voort GF, Metallography, principles and practice. McGraw-Hill, 4ed, (2007).
- 10 Colpaert, H, Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns/ Hubertus Colpaert; Revisão Técnica André Luiz V. da Costa e Silva. – 4ª ed – São Paulo: Blucher, 2008.
- 11 Anazawa RM, Abdalla AJ, Hashimoto TM, Pereira MS, Estudo das propriedades mecânicas do aço 300M devido à utilização de retífica após tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (2011)

- 12 Silva, ALV. da Costa e, Aços e ligas especiais/ André Luiz V. da Costa e Silva; Paulo Roberto Mei – 3ª ed. – São Paulo: Blucher, 2010.
- 13 Samuels LE. Tempering of Martensite. Metallogr. Microstruct. Anal. (2014) 3: 70-90
- 14 Rietveld HM, Line profiles of neutron powder-diffraction peaks for structure refinement, Acta Cryst. 22 (1967), pp. 151-1521.
- 15 Suryanarayana C, & Norton MG. X-ray diffraction: a practical approach. 1998.