

# INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE BOBINAMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS PARA PRODUÇÃO DE CHAPAS DE AÇO DUAL PHASE LAMINADAS A QUENTE\*

Isadora Almeida Rosa<sup>1</sup>  
Andersan dos Santos Paula<sup>2</sup>  
Julio Henrique Pimentel Medrano<sup>3</sup>  
Saulo Brinco Diniz<sup>4</sup>  
Mônica Aline Magalhães Gurgef<sup>5</sup>

## Resumo

Aços baixo-carbono com microestruturas ferrítico-bainíticos, bifásico, ou multifásicos têm características apreciáveis para a indústria automobilística, pois, combinam resistência, ductilidade e conformabilidade, permitindo produzir chapas mais finas resultando na redução do peso. Com o intuito de avaliar as características mecânicas e microestruturais obtidas através da variação da temperatura de bobinamento, desenvolveu-se um estudo a partir de um aço baixo carbono com microadição de molibdênio e nióbio, onde se verificou a possibilidade de produzir um aço *dual phase* na forma de chapas laminadas a quente, em escala industrial. Pode-se verificar que para menores temperaturas de bobinamento, obteve-se melhor desempenho quanto ao aumento da resistência mecânica e garantia de uma alta ductilidade vinculados a um refino expressivo no tamanho de grão da matriz ferrítica em conjunto com uma segunda fase com evidência de ilhas de martensita.

**Palavras-chave:** Aços baixo-carbono; Molibdênio; Bifásicos; Laminado a quente.

## INFLUENCE OF COILING TEMPERATURE IN THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES TO PRODUCE DUAL PHASE HOT ROLLED STEEL SHEETS

### Abstract

Low-carbon steels with ferritic-bainitic microstructures, dual-phase or complex-phase have appreciable features for this application that combines strength, ductility and formability, allowing produce thinner sheets resulting in weight reduction in the replacement of conventional steels without loss of its original features. In order to evaluate mechanical and microstructure characteristics obtained by distinct coiling temperatures, this work was developed from a low carbon steel with molybdenum and niobium microaddition, in order to produce dual phase or complex phase hot rolled steel processed on an industrial scale. The study was supported by microstructural and mechanical analysis, by optical microscopy, scanning electronic microscopy, uniaxial tensile tests and Vickers hardness tests. The best results was correlated with lowest coiling temperature associated with highest strength and ductility provide by significantly ferritic grains reduction associated to perlite and/or bainite with some martensitic islands.

**Keywords:** Low-carbon steels; Molybdenum; Dual phase; Hot rolled.

<sup>1</sup> Eng. Metalurgista, Belov Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> D.Sc. em Ciências dos Materiais, Eng. Metalurgista, Professora Adjunta, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil; e PPGEM/UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> M.Sc. em Eng. Mecânica, Eng. Metalurgista, Especialista em Engenharia de Produtos Laminados a Quente, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> M.Sc. em Eng. Metalúrgica, Eng. Metalurgista, Doutorando em Ciências dos Materiais, IME; e Técnico de Educação - Soldagem, CTS-Solda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheira Metalurgista, Mestranda da PPGEM/UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Devido a grande busca atual de menor consumo de combustíveis nos automóveis, a redução de peso na carroceria mantendo-se os mesmos custos de produção, ou até inferiores, tem-se tornado cada vez mais viável. Desta forma, o uso de aços bifásicos (“*dual-phase*”), “*complex-phase*” e martensíticos, tem aumentado significativamente na última década, pois estes aliam uma grande resistência mecânica com uma relativa ductilidade, e desta forma, é possível a obtenção de chapas com baixas espessuras e uma alta resistência mecânica [4].

Tais aços tem diferenças microestruturais entre eles, as quais proporcionam propriedades um pouco distintas. Os aços “*dual-phase*” são aqueles que têm uma matriz ferrítica macia com dispersão de ilhas de fases mais duras como, por exemplo, a martensita e/ou bainita [1], e os aços “*complex-phase*”, são aqueles que são compostos por um conjunto de fases resistentes (perlita, bainita e martensita) coexistindo em conjunto com a ferrita, que é uma fase mais plástica [2]. Em se tratando de aços “*dual-phase*”, estes são desenvolvidos de diversas formas, como por exemplo, através de laminação controlada, onde o material, após a laminação de acabamento, é submetido a resfriamentos controlados com o objetivo de aumentar a taxa de nucleação da ferrita num momento inicial dentro do campo intercrítico, enriquecendo com elementos de liga a austenita remanescente, aumentando assim sua temperabilidade e conseqüentemente possibilitando a formação de martensita durante o resfriamento [3]. Outra possibilidade de produção destes aços é através de linhas de galvanização, onde é realizado um recozimento no campo intercrítico, afim transformar a perlita existente em austenita enriquecido de elementos de ligas e por resfriamento controlado obtendo ao fim, a martensita ou bainita, para os ferríticos-martensíticos ou ferríticos-bainíticos, respectivamente [4].

Este trabalho (desenvolvido no âmbito do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação de Rosa [5]) visou estudar a influência de pequenas variações na temperatura de acabamento e de bobinamento, a partir de testes em escala industrial, na microestrutura e conseqüentemente nas propriedades mecânicas de um aço de baixo carbono com microadições de molibdênio e nióbio laminado a quente em escala industrial. Tal influência foi avaliada através de Microscopia Óptica (MO), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), ensaio de tração e ensaio de dureza Vickers.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo, utilizou-se um aço baixo carbono com microadição de molibdênio e nióbio, na forma de chapa laminada a quente com 3,2 mm de espessura, provenientes de 3 corridas distintas, no qual não apresentaram diferenças significativas na composição química. A Tabela 1 apresenta a composição química das amostras CP1 (Condição de Processamento 1), CP2 (Condição de Processamento 2) e CP3 (Condição de Processamento 2), utilizadas neste estudo.

**Tabela 1.** Composição química das amostras em estudo (% em peso).

Amostra	Composição Química (% em peso)											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Nb	V	Al	Ti	Mo	Cr
CP1	0,076	0,047	1,58	0,013	0,004	0,01	0,016	0,006	0,024	0,004	0,18	0,01
CP2	0,066	0,063	1,63	0,014	0,005	0,02	0,014	0,007	0,034	0,004	0,18	0,01
CP3	0,065	0,063	1,63	0,015	0,006	0,02	0,014	0,007	0,038	0,005	0,18	0,01

O material em estudo foi obtido a partir de três processamentos distintos (diferentes temperaturas de Acabamento e Bobinamento reais e vinculadas a regiões de coleta das amostras), no qual foram denominados de amostra CP1, CP2 e CP3. A Tabela 2 apresenta as temperaturas de Acabamento e Bobinamento das amostras em estudo de acordo com seu processamento.

**Tabela 2.** Temperatura de Bobinamento e Acabamento das amostras em estudo.

		Amostras		
		PC1	PC2	PC3
Temperatura (°C)	Temperatura de Acabamento	925	910	920
	Temperatura de Bobinamento	575	525	615

Foram extraídas amostras, referente à seção transversal associada a DL (direção de laminação), das amostras CP1, CP2 e CP3. As amostras foram embutidas a quente com resina fenólica, e em seguida lixadas com lixas de carvão de silício de 220 a 2500 mesh. Após a etapa de lixamento as amostras foram polidas em solução aquosa de alumina com granulometria 1, 0,5, 0,3 e 0,05  $\mu\text{m}$  e por último, foram atacadas com solução de Nital 3% (97 ml de álcool etílico e 3 ml de ácido Nítrico).

A caracterização microestrutural foi realizada em Microscópio Óptico - MO (marca Leica) com uma câmera digital acoplada. Como também em um Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV (marca Carl Zeiss, Modelo EVO MA10), com os parâmetros: tensão de aceleração de 22 kV, distância de trabalho de 9 mm e *spot size* de 550 para uso do detector de elétrons secundários. A quantificação de fase foi realizada com auxílio de um software de análise de imagem (Image J) acoplado ao microscópio ótico, e para tal foram observados 5 campos distintos a  $\frac{1}{4}$  da espessura para cada amostra coletada nas três condições de processamento em estudo.

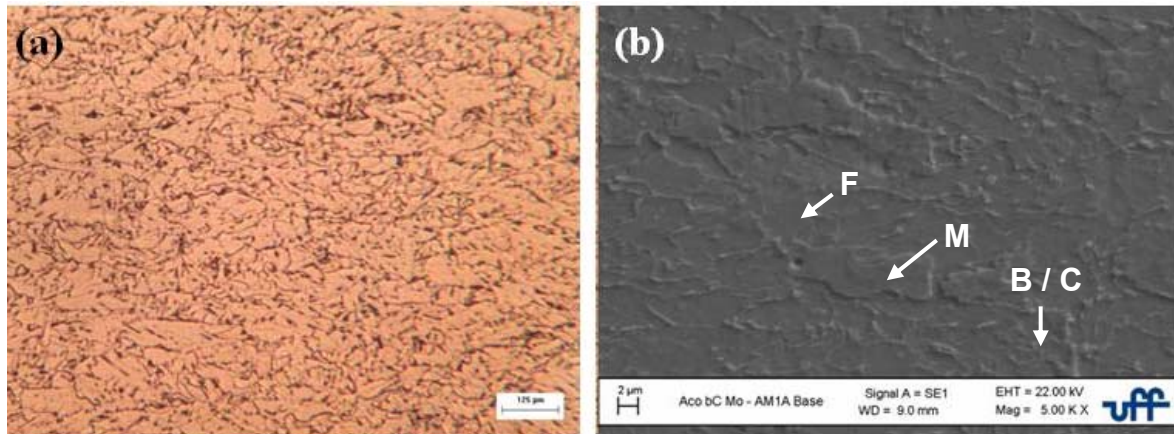
Foram realizadas 10 medições de dureza Vickers (Micromet 3 – Fabricante Micro Hardness), com uma carga de 100 g durante um tempo de permanência de 18 segundos em cada amostra, a  $\frac{1}{4}$  da espessura na seção transversal associada a (DL). Após esta medição foi-se realizado a média aritmética e o cálculo do desvio padrão dos resultados obtidos por amostra.

Os corpos de provas utilizados para o ensaio de tração tinham uma base de medida de 50 mm (segundo a NBR 6673:1981), sendo 3 corpos de prova para cada amostra. Após o ensaio de tração uniaxial em uma máquina de ensaios universal (modelo 4484, Fabricante Instron) foram obtidas as propriedades mecânicas de Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência (LR), Alongamento (AL), e Razão Elástica (LE/LR), associadas a direção original de laminação a quente.

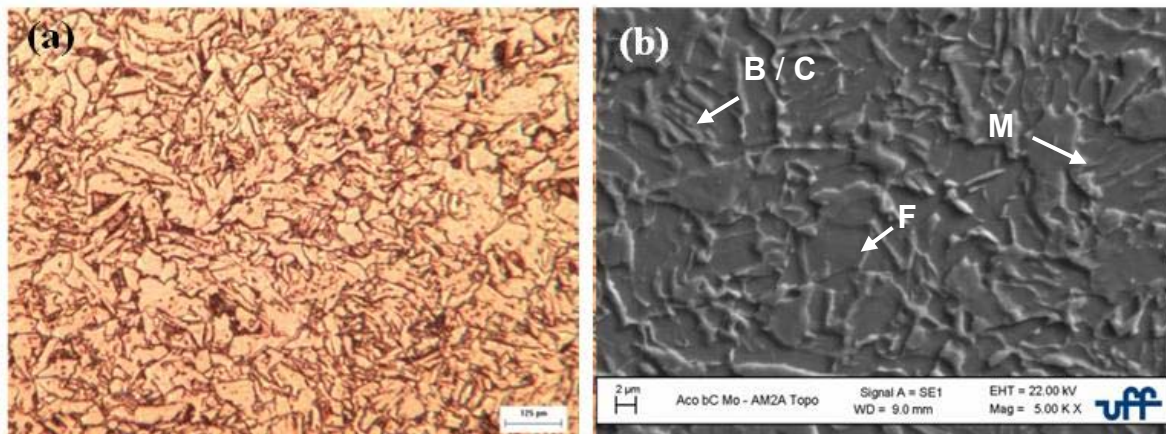
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 1, 2 e 3 são apresentadas as microestruturas das amostras CP1, CP2 e CP3, respectivamente, observadas por (a) Microscopia Óptica (MO) e (b) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

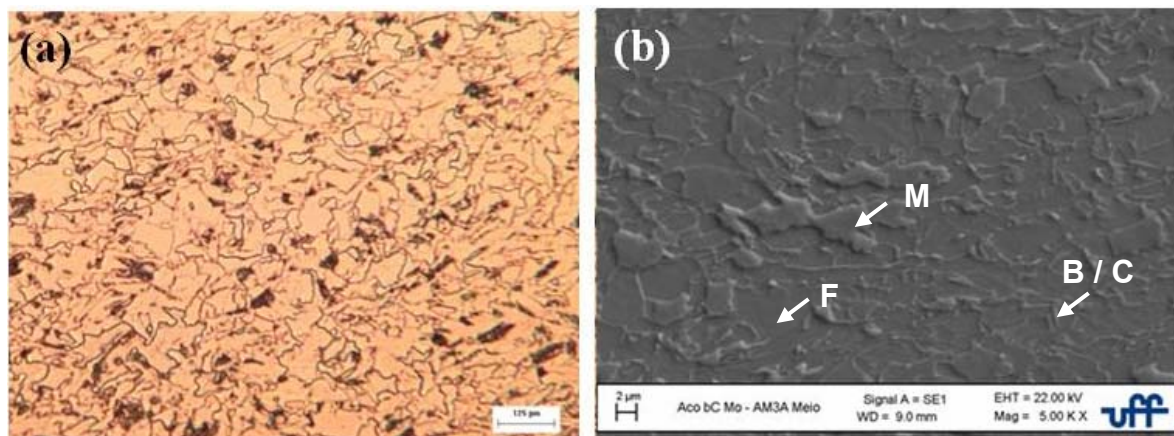




**Figura 1.** Amostra CP1 observada por (a) Microscopia óptica (MO) com aumento de 500x, e (b) por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com aumento de 5000x. Na Figura F = Ferrita, B = Bainita, M = Martensita e C = Carbonetos.



**Figura 2.** Amostra CP2 observada por (a) Microscopia óptica (MO) com aumento de 500x, e (b) por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com aumento de 5000x. Na Figura F = Ferrita, B = Bainita, M = Martensita e C = Carbonetos.



**Figura 3.** Amostra CP3 observada por (a) Microscopia óptica (MO) com aumento de 500x, e (b) por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com aumento de 5000x. Na Figura F = Ferrita, B = Bainita, M = Martensita e C = Cementita.

De uma forma geral, de acordo com o apresentado nas Figuras de 1 a 3, pode-se observar que uma pequena variação na temperatura de acabamento e bobinamento das amostras em estudo, foi possível a obtenção de sutis diferenças nas

microestruturas obtidas, tanto visualizadas por Microscopia Óptica quanto por Microscopia Eletrônica de Varredura.

De acordo as microestruturas obtidas para a amostra CP1 e CP2 (Figuras 1 e 2, respectivamente), pode-se constatar que estas apresentaram grãos ferríticos com um caráter acicular e uma evidência aparente de martensita e de segunda fase (perlita e/ou bainita). A amostra CP3 (Figura 3) apresentou grãos ferríticos com aspecto heterogêneo e alguns aciculares e aparentemente uma menor evidência de martensita e segunda fase (perlita e/ou bainita).

Através das imagens obtidas por Microscopia Óptica, foi possível realizar a quantificação de fase das amostras em estudo. Na Tabela 3 é apresentado o resultado da quantificação de fases obtidas através da Microscopia Óptica para as amostras em estudo.

**Tabela 3.** Quantificação de fases das amostras em estudo.

Porcentagem de Fases (%)	Amostras		
	CP1	CP2	CP3
<b>Ferrita</b>	93,7	91,7	93,8
<b>Segunda Fase</b>	6,3	8,3	6,2

Comparando os valores obtidos na quantificação de fases com as temperaturas de processamento, aparentemente não existe uma relação das temperaturas com a quantidade de segunda fase formada (onde esta segunda fase engloba qualquer perlita, bainita e/ou martensita formada). Porém pela análise morfologia das fases apresentada anteriormente obtidas pelas micrografias de MEV e MO, pode-se observar que a região de menor temperatura de bobinamento (CP2) apresentou evidências de uma maior fração de ilhas de martensita.

Já para as Amostras CP1 e CP3, observa-se que os valores obtidos para a ferrita e a segunda fase, foram praticamente iguais, porém de acordo com as imagens apresentadas nas Figuras 1 e 3, é notório que as microestruturas são distintas, e que a amostra CP1 apresenta uma fração volumétrica de segunda fase maior do que a amostra CP3. Tal diferença de resultados está vinculada, a limitação do software utilizado em diferenciar regiões claras / escuras durante a análise.

Tais diferenças nas microestruturas obtidas após o processamento em diferentes condições (diferentes temperaturas de acabamento e bobinamento) proporcionam propriedades mecânicas diferentes. Na Tabela 4 são apresentados os valores das propriedades mecânicas obtidas para as amostras CP1, CP2 e CP3.

**Tabela 4.** Propriedades mecânicas das amostras em estudo.

Propriedades Mecânicas	Amostras		
	CP1	CP2	CP3
<b>Limite de Escoamento (LE) - DT</b>	581 MPa	480 MPa	431 MPa
<b>Limite de Resistência (LR) - DT</b>	659 MPa	612 MPa	529 MPa
<b>Razão Elástica (LE/LR) - DT</b>	0,88	0,78	0,81
<b>Alongamento - DT</b>	27,70%	24,00%	27,20%
<b>Dureza Vickers (HV)</b>	135	191	158

Com base nas propriedades mecânicas obtidas, a amostra CP1 obteve o maior valor para LR (659 MPa) e LE (581 MPa) e um menor valor de dureza (135 HV), a CP2 obteve um valor intermediário de LR (612 MPa) e LE (480 MPa) e um maior valor de dureza (191 HV), e a amostra CP3 o menor valor de LR (529 MPa) e LE (431 MPa) e um valor intermediário de dureza (158 HV). Os valores da razão elástica (LE/LR)

obtidos foram de 0,88, 0,78 e 0,81 para as amostras CP1, CP2 e CP3, respectivamente. Os valores de alongamento para as amostras CP1 e CP3 são similares e os maiores encontrados, enquanto a CP2 apresentou um valor inferior, tal fato pode ser justificado pela maior presença de segunda fase na CP2. Sendo assim, fica caracterizado que a CP1 tem as melhores propriedades, maior resistência mecânica, altos valores de razão elástica e alta ductilidade.

#### 4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e discussões apresentadas, conclui-se que:

- O material apresenta uma tendência de formação de quantidades significativas de ilhas de martensita em conjunto com refinamento dos grãos da matriz ferrítica quando processado em temperaturas de bobinamento menores, ou seja, com o uso de maior taxa de resfriamento na etapa após a laminação de acabamento (CP2);
- Aumentos mais significativos de resistência mecânica (LE, LR e razão elástica) com alto valores de alongamento estão associados a condição de processamento com temperaturas de bobinamento menores, devido a uma homogeneidade microestrutural vinculada a formação de uma segunda fase mais dura e finamente dispersa (ilhas de martensita) e redução significativa no tamanho de grão ferrítico.
- No que diz respeito a obtenção de um aço *dual phase* (ferrítico-martensítico) as condições de processamento analisadas indicam que menores temperaturas de bobinamento tendem a atender este objetivo. Porém a fração de martensita formada ainda é diminuta para pode-se classificar o material de acordo com a condição de processamento 1 como um aço *dual phase*

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, a Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda (EEIMVR) da UFF, e ao Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica (LMME) da Universidade Federal Fluminense (UFF).

#### REFERÊNCIAS

- 1 Gorni, A. A.; Xavier, M. D.; Goldenstein, H.; Tschiptschin, A. P. Transformação da Austenita em Aços Microligados com Microestrutura Ferrítica-Bainítica. In: 62° CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2007, Vitória: ABM, 2007, p. 3262 – 3268.
- 2 Silva, A. L. C.; Mei, P. R. Aços e Ligas Especiais. Editora Edgard Blücher, 2ª edição, 2006.
- 3 Ogata, P. H.; Goldestein, H.; Gorni, A. A.; Landgraf, F. J. G. Caracterização Microestrutural de Aço API 5l x65, Austenitizado e Resfriado a Diferentes Taxas de Resfriamento. In: 18° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais – CBECiMat (2008), 2008, Porto de Galinhas: ABM, 2008.
- 4 Souza, A. C. A.; Paula, A. S.; Medrano, J. H. P.; Diniz, S. B.; Gurgel, M. A. M. G. Produtos de Transformações de Fases Obtidos sobre Distintas Condições de Resfriamento em Aço Baixo Carbono com Microadição de Molibdênio. In: 5° Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos - Internacional, 2014, Foz do Iguaçu: ABM, 2014, p. 238 – 249.
- 5 Rosa IA, Influência da Temperatura de Bobinamento nas Propriedades Mecânicas e Microestruturais para Produção de Chapas de Aço Dual Phase Laminadas a Quente, Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, UFF, Volta Redonda/RJ, Brasil, 2012