

ESTUDO DA VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DE AÇOS BIFÁSICOS NO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE *

João Marcos Moreira da Silva¹
Thiago Vieira Lopes²
Fabiane Roberta Freitas da Silva³

Resumo

Frente ao atual cenário de avanços tecnológicos na produção de aços para a indústria automobilística, a CSN busca manter a competitividade e qualidade marcantes em seus produtos. Portanto, a produção de aços avançados na laminação a quente é de suma importância para as projeções da empresa. Este trabalho tem como motivação o entendimento dos fenômenos metalúrgicos envolvidos na produção de aços bifásicos, em especial o ferrítico-bainítico. Do mesmo modo, aprofundar o conhecimento operacional e apontar as modificações técnicas necessárias para o início da produção no laminador de tiras a quente da CSN.

Palavras-chave: Laminação a quente; Laminador de tiras a quente; Conformação; Aços Bifásicos.

FEASIBILITY STUDY OF THE DUAL PHASE STEELS PRODUCTION BY HOT STRIP MILL

Abstract

In front of technological advances especially in relation to steel production for the automotive industry, CSN seeks to maintain the competitiveness based on the quality of its products and services. Therefore, it is vitally important for the company that manufacturing advanced steels obtained directly by hot rolled are included in its portfolio. The key motivation behind this work is the investigation of metallurgical phenomena related to dual phase steels process, in particular the ferritic-bainitic steels. And also to know the appropriate technical changes involved to initiate the production in the CSN hot strip mill.

Keywords: Hot-Rolled; Hot Strip Mill; Forming; Dual Phase Steels.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Mestrando, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, Laminador de Tiras a Quente, Companhia Siderúrgica Nacional, Volta Redonda, RJ, Brasil.

³ Prof^a Dr^a Fabiane Roberta Freitas da Silva, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A contínua evolução tecnológica dos bens de consumo duráveis e a necessidade de se implantar uma infraestrutura adequada para atender as necessidades vitais da humanidade impôs o desenvolvimento de materiais de custo relativamente baixo cujo desempenho atendesse aos requisitos mecânicos, químicos e físicos necessários às mais variadas aplicações.

Podem-se citar alguns exemplos: Chapas grossas destinadas à construção civil precisam apresentar alta resistência mecânica para viabilizar a construção de edificações cada vez maiores e aços para construção naval precisam apresentar fácil soldagem, uma vez que esse processo é intensamente aplicado neste caso e seu custo é muito alto. Porém, é a indústria automobilística que tem promovido enormes avanços na evolução metalúrgica dos aços ao longo das últimas décadas. Basta lembrar que os primeiros automóveis possuíam feitiço quadrado basicamente em função da inadequada estampabilidade das chapas dos aços ferrítico-perlíticos da época, uma consequência não só da incipiente ciência metalúrgica da época, bem como das limitações dos processos industriais de refino e conformação.

As usinas siderúrgicas tiveram de reagir, buscando na ciência metalúrgica novos meios para produzir aços mais resistentes que permitissem a fabricação de componentes com os mesmos níveis de resistência mecânica, mas com menor quantidade de material. Surgiram então os chamados aços de Alta Resistência e Baixa Liga – ARBL (*High Strength Low Alloy – HSLA*), contendo micro adições de Nb, Ti e V, cuja microestrutura ferrítica-perlítica mais refinada e capacidade de endurecimento por precipitação lhe proporcionavam maior resistência mecânica. Contudo, a contrapartida por essas vantagens foi uma ligeira perda de estampabilidade nesses novos produtos.

A reação a isso foi o surgimento dos aços bifásicos (*dual phase*), cuja microestrutura peculiar minimizava as perdas de estampabilidade decorrentes dos maiores níveis de resistência mecânica. Portanto, a indústria automobilística continuou demandando por avanços nos materiais por ela adotados, visando diminuir o preço de aquisição e manutenção de seus produtos.

A resposta da siderurgia mundial a essa situação de permanente stress foi o desenvolvimento contínuo de novos tipos de chapas de aço com características cada vez mais adequadas aplicações específicas, cujas propriedades são mostradas na *figura 1*, já consagrada. Esta figura permite comparar as características de resistência mecânica e ductilidade dessa nova família de aços. Pode-se deduzir a partir dessa figura que o aumento do nível de resistência mecânica do produto leva quase inevitavelmente à redução de seu alongamento total, ou seja, de sua estampabilidade. Contudo, o uso de microestruturas adequadas permite minimizar a perda de ductilidade sob maiores níveis de resistência mecânica.

Frente ao atual cenário de avanços tecnológicos na produção de aços para a indústria automobilística, a CSN busca manter a competitividade e qualidade marcantes em seus produtos. Portanto, a produção de aços avançados na laminação a quente é de suma importância para as projeções da empresa. Este trabalho tem como motivação o entendimento dos fenômenos metalúrgicos envolvidos na produção de aços bifásicos, em especial o ferrítico-bainítico, e as devidas alterações estruturais e de automação necessárias para o início da produção no laminador de tiras a quente.

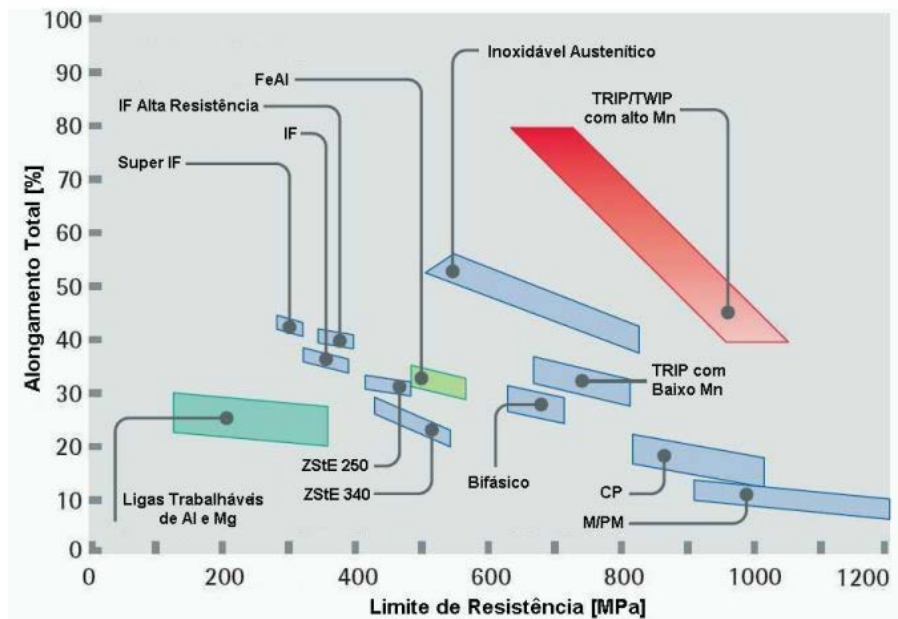


Figura 1. Relação entre limite de resistência e alongamento total entre os vários tipos de Aços¹.

2 DESENVOLVIMENTO

Tratando-se de estudo de viabilidade, diversas etapas devem ser desenvolvidas antes da oferta do produto ao mercado. A produção deve ser controlada, repetitiva e estatisticamente confiável. Este projeto se posiciona ainda no início de toda cadeia de desenvolvimento dos aços avançados via LTQ.

Antes do processamento de materiais experimentais em escala industrial, um estudo prévio foi realizado em escala piloto² para determinação de certos parâmetros de processo que potencializariam a formação de aços ferrítico-bainítico e bifásicos. A literatura³ cita determinadas composições químicas, taxas de resfriamento, temperaturas de processamento e taxas de redução capazes de formar o aço ferrítico-bainítico. Neste contexto, se desenvolveu, inicialmente, o trabalho em escala laboratorial.

Após o trabalho piloto e a definição de variáveis prévias de processo, foi laminada uma placa visando obter as propriedades inerentes ao aço ferrítico-bainítico. No entanto, por se tratar de procedimento experimental, muitos cuidados foram tomados e diversas variáveis manipuladas de modo a preservar a integridade do equipamento ante a obtenção das propriedades finais do aço. Dessa maneira, apesar de gerar preciosas informações pertinentes ao estudo de viabilidade, a placa laminada é apenas o primeiro passo para a real oferta ao mercado.

2.1 Desenvolvimentos em Escala Industrial

2.1.1. Análise de processo

Após o processamento em escala piloto e a análise dos resultados, iniciaram-se as reflexões sobre qual estratégia adotar para o processamento da placa teste no LTQ#2. O fator principal para a obtenção do resultado é atingir a dinâmica de resfriamento ideal para a obtenção da estrutura ferrítico-bainítica. Sendo assim, todo o processo de laminação no trem acabador foi configurado para permitir maior troca de calor entre o aço e a água, visando temperaturas de bobinamento da ordem de

400°C e dinâmica de resfriamento em dois patamares como orienta a literatura³. Para algumas variáveis, o modelo matemático do laminador foi desativado ficando o a cargo da equipe forçar os fenômenos necessários.

As dimensões objetivadas foram escolhidas de modo a permitir uma laminação segura e viável do ponto de vista dos fenômenos objetivados. Portanto, as dimensões foram 2mm de espessura por 800mm de largura. No entanto, o mercado requer larguras maiores, que exigem mais capacidade de cargas de laminação e tecnologia de processo. Nesse ponto, encontra-se uma limitação deste trabalho, pois quanto mais próximo o experimento da realidade demandada, mais relevantes são os resultados. Porém, o processo de desenvolvimento é lento, e como já citado, presou-se pela cautela e segurança durante todo o processo teste.

Como cita Bhadeshia³, a produção de aços bifásicos, em especial o ferrítico-bainítico, requer dois estágios de resfriamento. Dada a disponibilidade de bancos da mesa de saída e o sistema de automação vigente no laminador, a equipe atuou de maneira a forçar os patamares necessários para a produção do aço. Sendo assim, foram bloqueados os bancos situados no meio da mesa de resfriamento e disponibilizados os bancos iniciais e finais (**Erro! Fonte de referência não encontrada. figura 3 e Erro! Fonte de referência não encontrada.4**). Nas figuras, verde claro representam bancos abertos e capazes de realizar resfriamento, enquanto verde escuro representa bancos fechados. O sentido de laminação é realizado do banco 1 para o 14. Pela experiência da equipe, pelo conhecimento doutrinário existente e pelo projeto de concepção original, cada banco do laminador fornece 35 °C/s de resfriamento. Nesse ponto, são extremamente relevantes as dimensões finais objetivadas e a velocidade de laminação, fatores que alteram a capacidade de troca térmica do aço na mesa de saída.

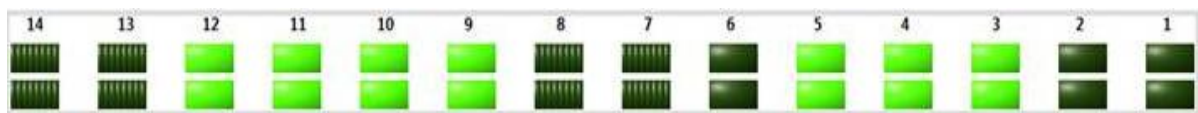


Figura 2. Disponíveis para resfriamento. Topo (CT=400°C).

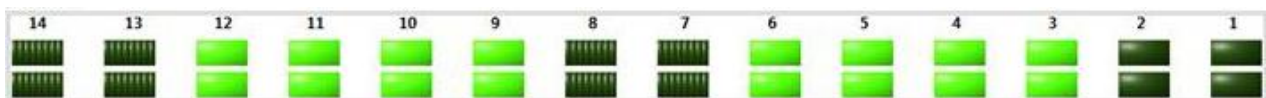


Figura 3. Disponíveis para resfriamento. Meio (CT=300°C).

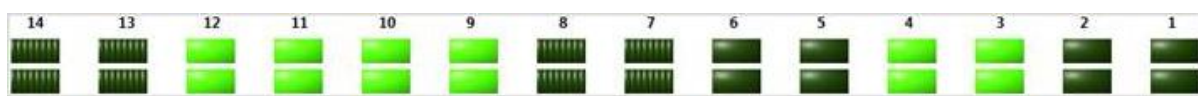


Figura 4. Bancos de resfriamento. Base (CT=500°C).

A figura 5 mostra as velocidades de laminação praticadas durante o processo da placa teste. Nota-se que praticamente foram extintas as taxas de aceleração A e B (Estas taxas são variáveis de processo que aceleram a laminação visando melhor produtividade) visando aumentar o tempo de permanência da tira sobre a mesa de resfriamento e, assim, forçar as trocas térmicas.

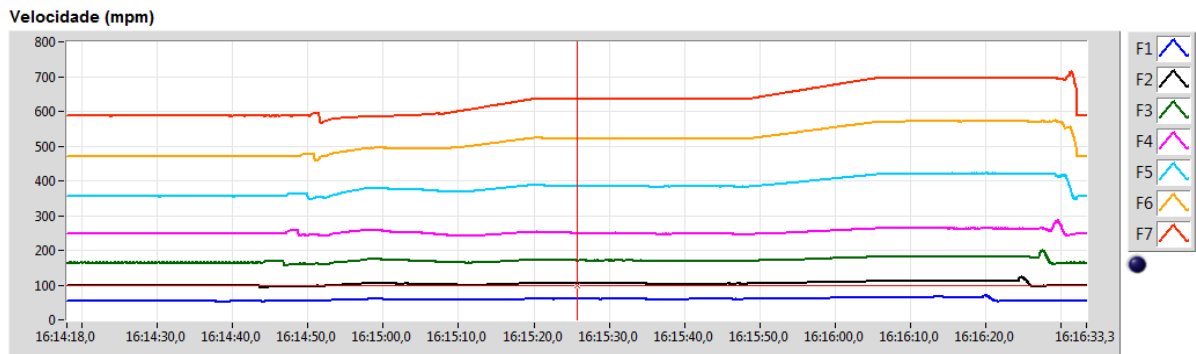


Figura 5. Velocidade de laminação das cadeiras do trem acabador.

A figura 6 mostra a temperatura de bobinamento ao longo do teste. Bhadeshia⁴ cita que a temperatura de bobinamento para a faixa de composição em teste deve ficar em torno de 400°C. A variabilidade da temperatura se deve ao fato de a dinâmica de abertura/fechamento dos bancos de resfriamento terem sido feitas de modo manual. Na região central do gráfico, percebe-se que a temperatura se manteve constante em 300°C. Este fenômeno se deve pelo fato do medidor não estar calibrado para medições abaixo desta temperatura. Sendo assim, pela experiência da equipe e pelo fenômeno observado durante a laminação, assume-se, para fins práticos, que a temperatura nesta região se deu em torno de 300°C.

A temperatura final de bobinamento não mostra a dinâmica de resfriamento durante a passagem pela mesa de saída, apenas a temperatura de bobinamento. Apesar de não haver meio automatizado de obtenção dessa informação, a disponibilidade de bancos em determinado momento nos dá referência da rampa de resfriamento desempenhada no processo.

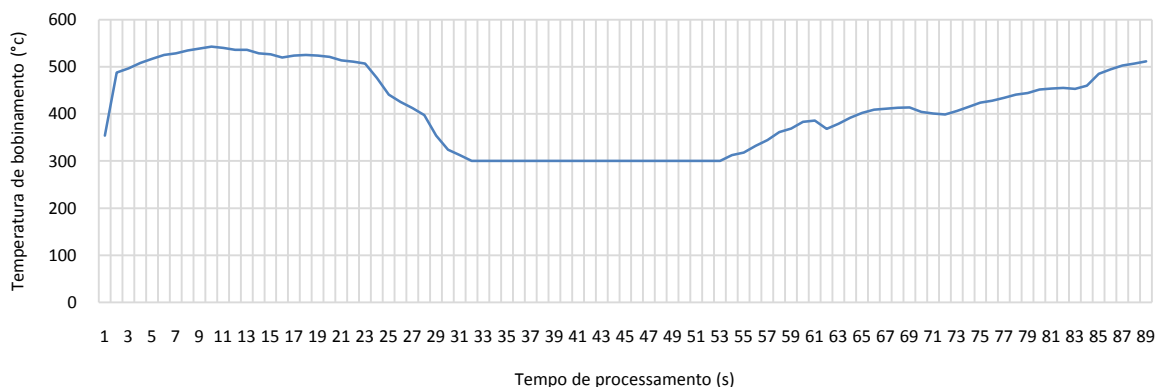


Figura 6. Temperatura de bobinamento

A figura 7 mostra as correntes dos motores de acionamento durante o processo de laminação. Existe uma preocupação quanto à corrente de laminação uma vez que a composição do aço escolhido para o teste ocasiona elevada resistência mecânica e conseqüentemente exige elevadas cargas de laminação. A linha pontilhada vermelha acima das linhas de corrente mostra o limite a partir do qual os motores estão em risco. Portanto, fica claro que este fator não apresentou criticidade relevante durante o teste. Vale ressaltar que as dimensões (2mm x 800mm) também são influentes nas cargas de laminação, testes posteriores com larguras maiores e espessuras menores devem se atentar a este fator.

As correntes se mostram crescentes com o tempo porque enquanto a tira é laminada, a parte restante fica sobre a mesa de entrada do laminador e, conseqüentemente, perde temperatura. Sendo assim, com temperaturas mais baixas a resistência aumenta, aumentando também as correntes de laminação no fim da tira.

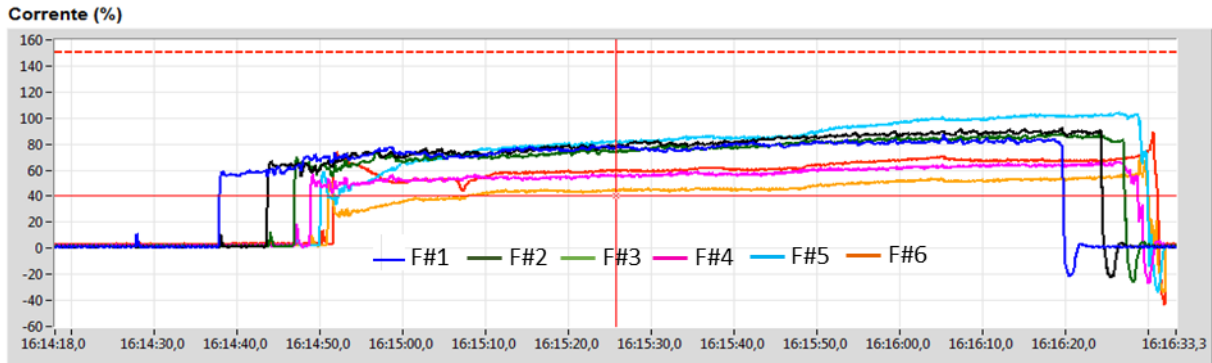


Figura 7. Corrente dos motores de acionamento das cadeiras do trem acabador.

2.1.1. Análise Microestrutural

As amostras para a análise das propriedades mecânicas e metalúrgicas foram obtidas de acordo com a *figura 8* sendo três no topo, três no meio e três na base (uma em cada borda e uma no centro da tira), totalizando nove amostras. Os pontos de amostragem foram escolhidos de modo a analisar diferentes temperaturas de bobinamento, abrangendo de maneira integral a bobina teste.

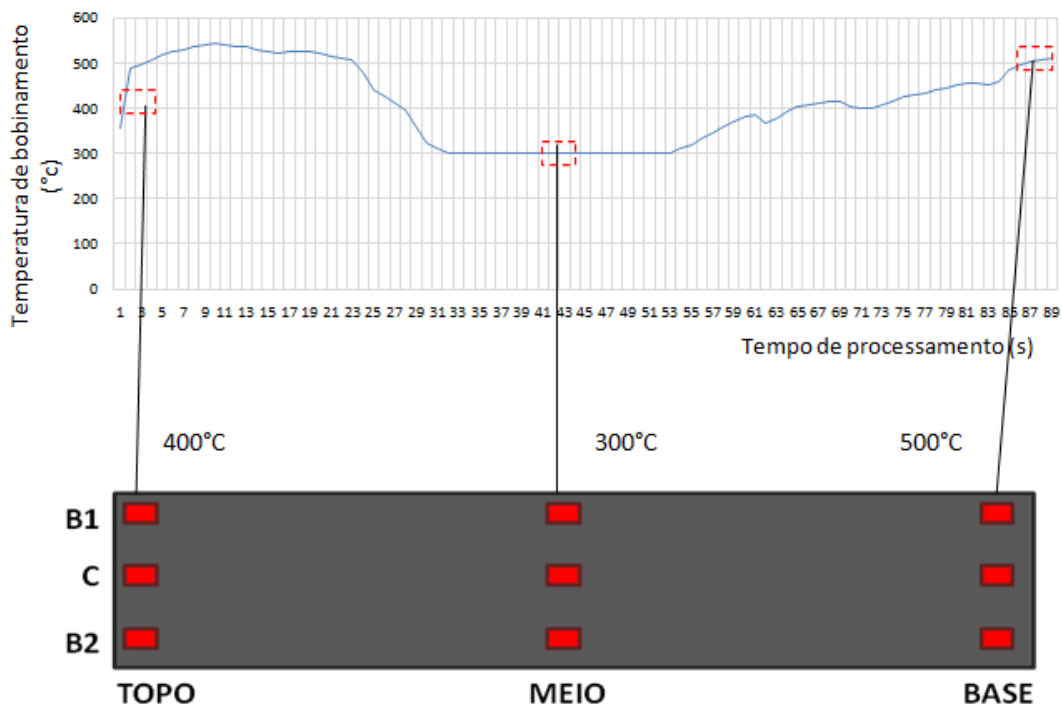


Figura 8. Esquema de amostragem.

As propriedades mecânicas foram, como esperado, fortemente influenciadas pela dinâmica de resfriamento. Em concordância com a *figura 8*, as amostras com temperaturas de bobinamento mais baixas, portanto com maior taxa de resfriamento,

apresentaram as propriedades mecânicas mais elevadas (Erro! Fonte de referência não encontrada.1).

Tabela 1. Propriedades mecânicas do teste em escala industrial

	Meio (300°C)	Topo (400°C)	Base (500°C)
Alongamento (%)	20,2% ± 1,7%	20,9% ± 2,0%	25,3% ± 1,4%
LE (MPa)	550 ± 16	528 ± 12	519 ± 9
LR (MPa)	645 ± 7	608 ± 7	592 ± 6
Dureza (HB)	93,0 ± 0,5	91,7 ± 0,3	90,0 ± 0,5
Razão elástica	85%	86%	87%

A fim de adequar o produto à demanda de mercado, exige-se limite de resistência acima de 600MPa e razão elástica (LR/LE) baixo de 85%. Sendo assim, o bobinamento a 300°C atendeu com certa margem de erro as propriedades mecânicas demandadas enquanto o bobinamento a 400°C apresentou propriedades na região limite, ou seja, com baixa confiabilidade. A 500°C as propriedades mecânicas não foram satisfatórias. Esses dados dão um ponto de partida para as estratégias a serem adotadas em experimentos futuros.

Apesar de não registrado de maneira automática, o comportamento da tira durante a laminação foi muito instável exatamente na região de menor temperatura de bobinamento. A *figura 9* mostra como a dinâmica de bobinamento foi fortemente influenciada pela temperatura e pelos fenômenos ocorridos no trem acabador.

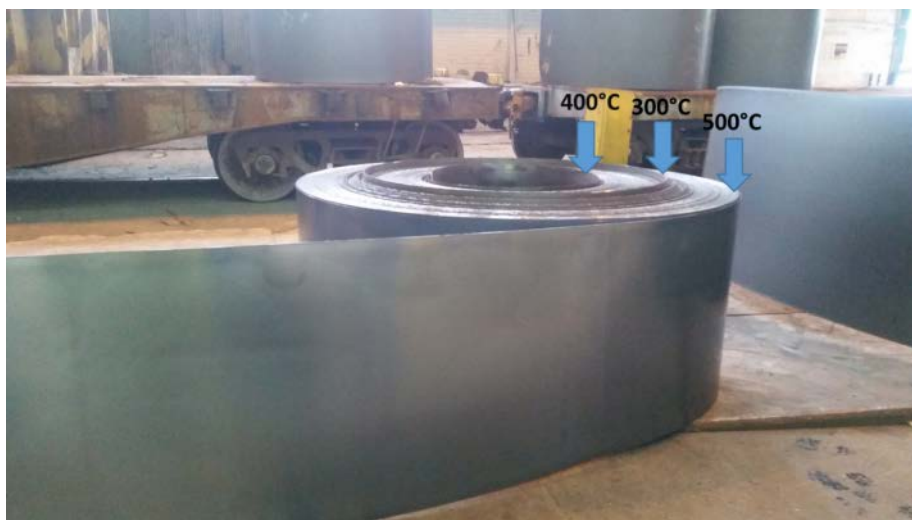


Figura 9. Interferência das temperaturas nas regiões de bobinamento

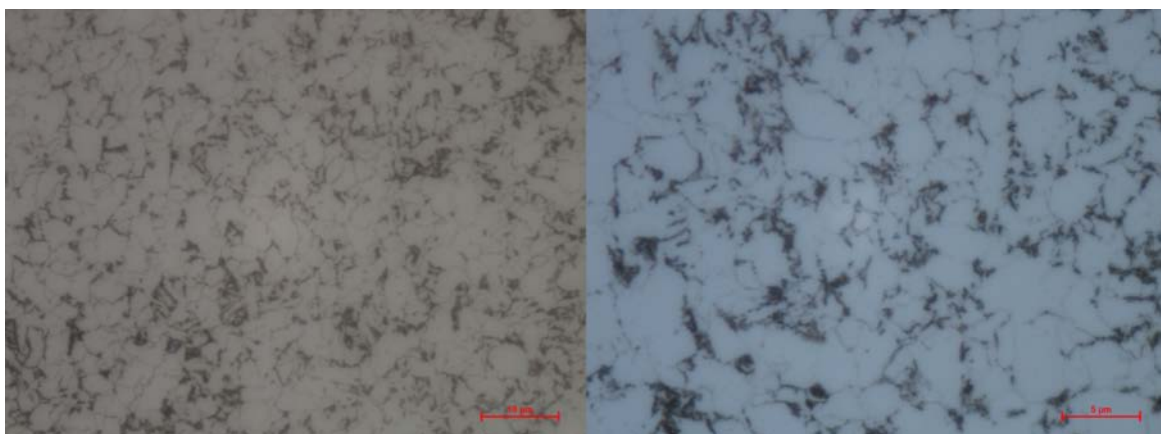


Figura 10. Micrografias ópticas. Nital 3% Amostra Topo B. 500X e 1000X.

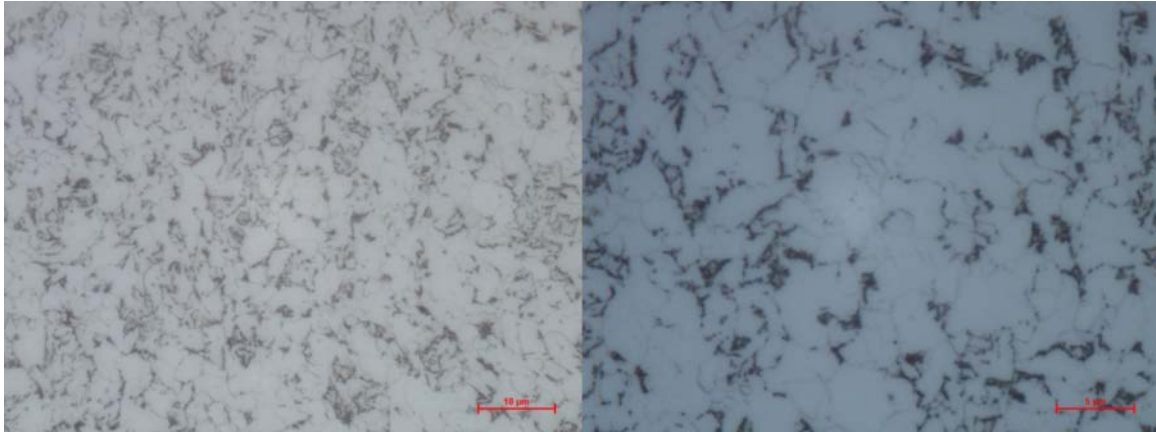


Figura 21. Micrografias ópticas. Nital 3%. Amostra Topo C. 500X e 1000X.

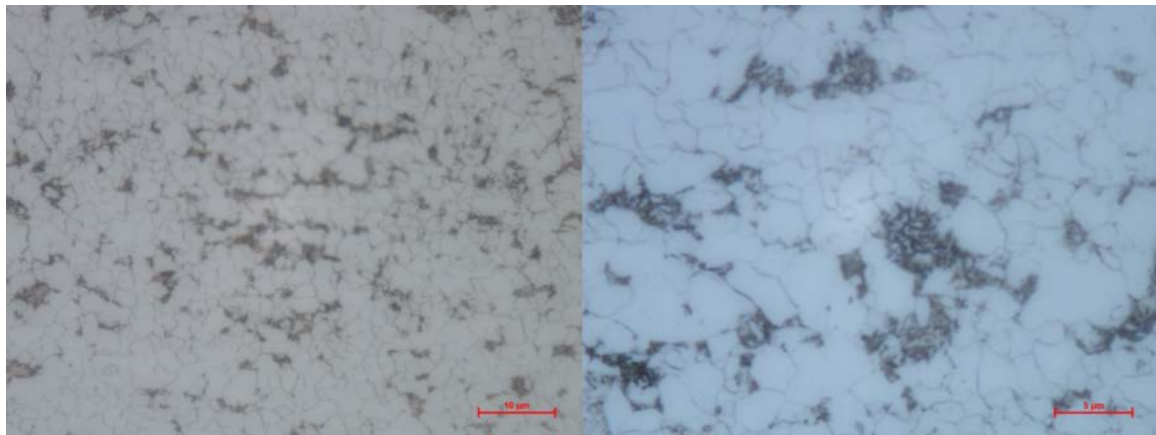


Figura 32. Micrografias ópticas. Nital 3%. Amostra Topo B1. 500X e 1000X.

As *figuras 10, 11 e 12* mostram as microestruturas do topo da tira, que apresenta bobinamento a 400°C. É nítida a presença da matriz ferrítica e da segunda fase. A dispersão desta fase na matriz e a morfologia dos grãos ferríticos são uniformes. Sendo assim, as microestruturas não apresentam grandes diferenças entre borda e centro.

As *figuras 13, 14 e 15* **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostram as microestruturas do meio da tira, com temperatura de bobinamento a 300°C, a mais baixa do teste. A microestrutura de maneira geral também é uniforme. Os grãos interfásicos estão dispostos uniformemente e a matriz ferrítica tem grãos similares. A amostra Meio B apresenta um refino maior de grão, que pode ter sido causado por uma gradiente maior de temperatura nesta região em relação ao centro e à outra borda.

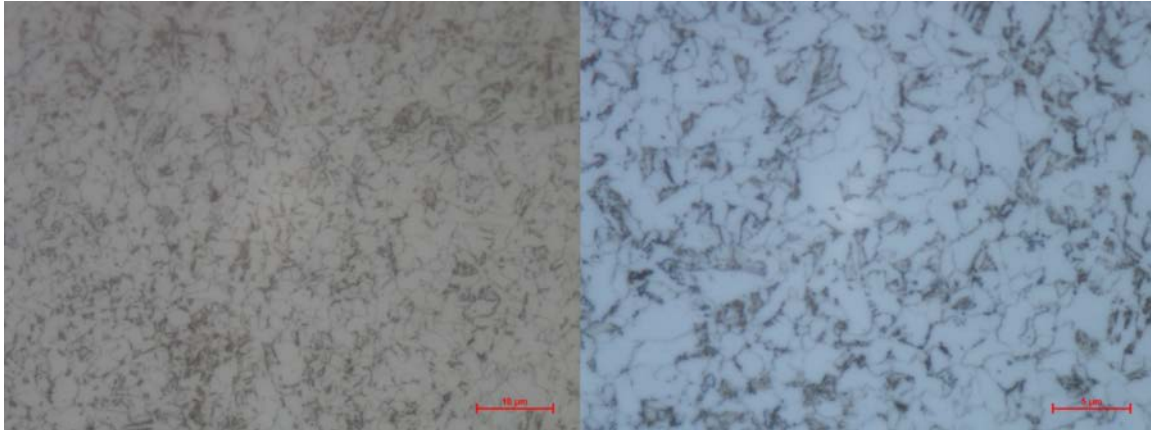


Figura 43. Micrografias ópticas. Nital 3% Amostra Meio B. 500X e 1000X.

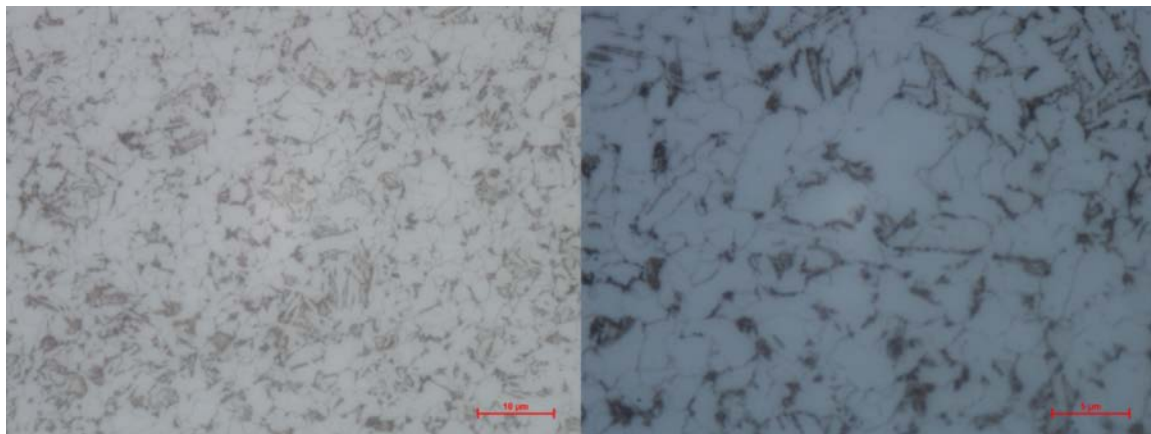


Figura 54. Micrografias ópticas. Nital 3%. Amostra Meio C. 500x e 1000X.

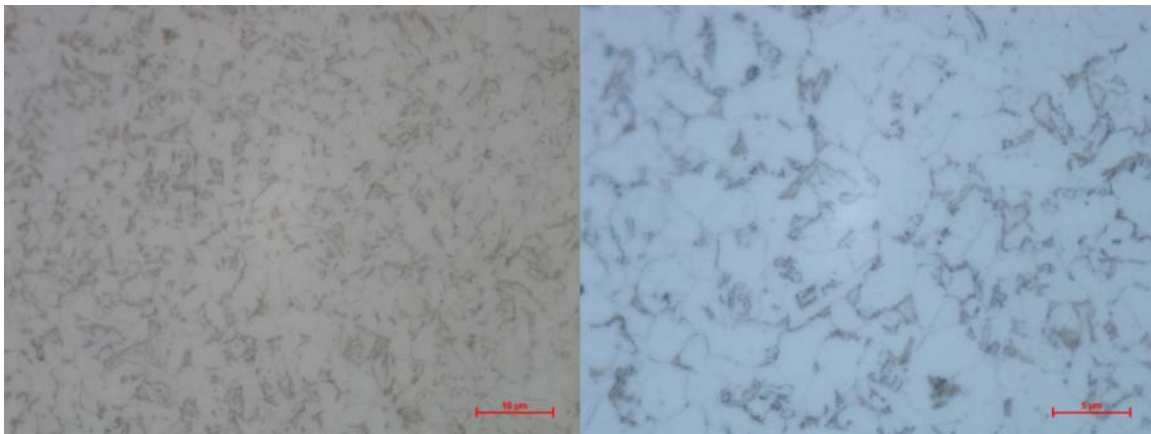


Figura 65. Micrografias ópticas. Nital 3%. Amostra Meio B1. 500X e 1000X.

As figuras 16, 17 e 18 mostram as microestruturas da base da tira, com temperatura de bobinamento de 500°C, a mais alta do teste. É nítido como a fração da fase dispersa decresce, fato esperado pela redução da taxa de resfriamento e conseqüentemente à capacidade de realizar transformações adifusionais. As microestruturas ainda mostram o material uniforme, com fase dispersa e matriz similar às outras regiões da tira.

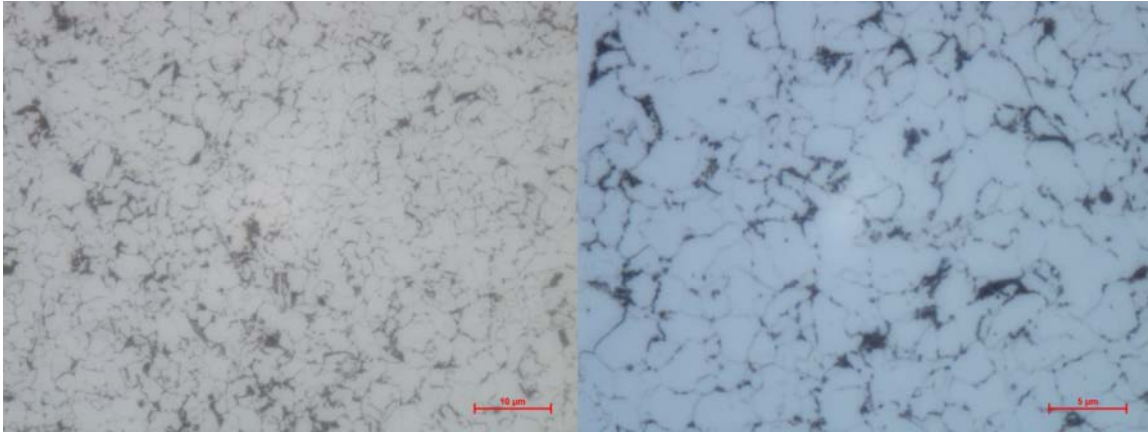


Figura 76. Micrografias ópticas. Nital 3%. Amostra Base B. 500X e 1000X.

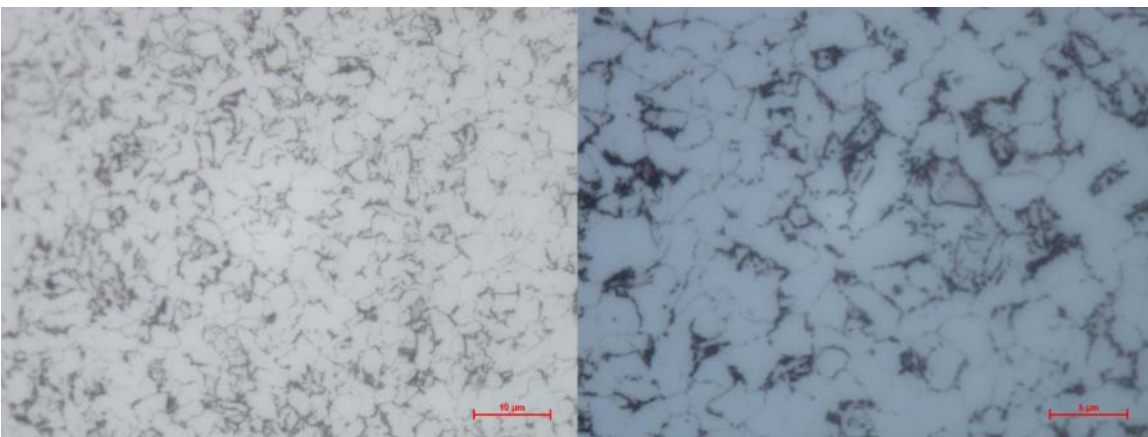


Figura 87. Micrografias ópticas. Amostra Base C. 500X e 1000X.

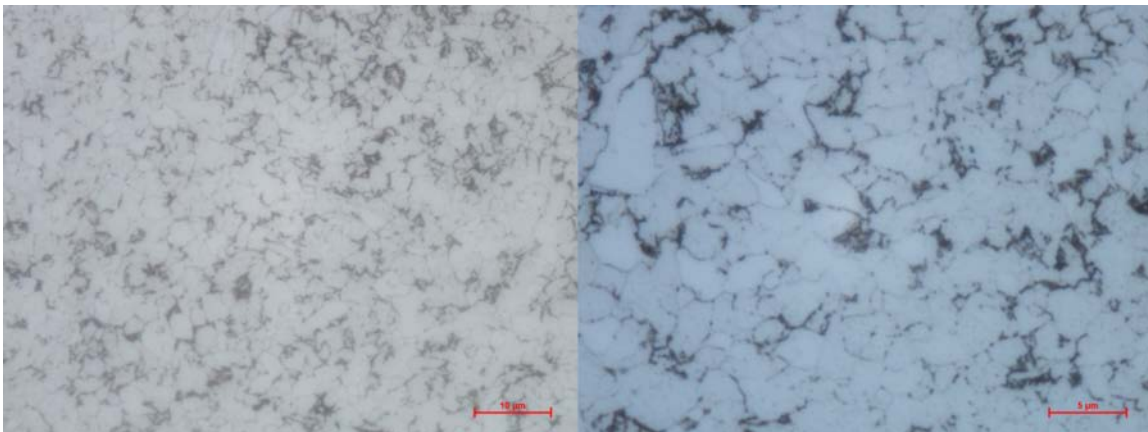


Figura 98. Micrografias ópticas. Amostra Base B1. 500X e 1000X.

De maneira geral, as diferentes porções da tira apresentam certa similaridade microestrutural, com matriz ferrítica e segunda fase dispersa, como esperado. A menor temperatura de bobinamento (Meio = 300°C) mostra a microestrutura com mais fração de segunda fase, fato que converge com as propriedades mecânicas obtidas.

Apesar de certa uniformidade, o número de amostras para a garantia de qualidade e fornecimento do aço deve ser maior, visando garantir a confiabilidade para fornecimento. Sendo assim, apesar de esclarecedoras, a análise das amostras no presente trabalho é apenas introdutória em toda cadeia de desenvolvimento.

A *figura 19* à direita mostra um aço FB/600 microligado laminado a quente visto ao MEV⁵. É notável a matriz ferrítica e a grande fração de bainita, bem caracterizada com superfície clara e com pequenos aglomerados em alto relevo. Buscando caracterizar a fase dispersa na matriz, as amostras do presente trabalho foram levadas ao MEV. A *figura 18* à esquerda mostra uma imagem da amostra Meio C, com menor temperatura de bobinamento (CT=300°C). Grosso modo, a microestrutura obtida destoa da apresentada pela literatura⁵. As regiões indicadas pelas setas em vermelho podem ser caracterizadas como bainita, pela semelhança apresentada com a literatura⁵. No entanto, o restante da microestrutura não se caracteriza como bainítica. Em princípio, a fase presente pode ser martensita, porém as durezas apresentadas (tabela 1) não confirmam essa hipótese. Desta maneira, a fase presente pode ser formada por carbonetos precipitados durante o resfriamento forçado. Uma análise química pode confirmar esta hipótese.

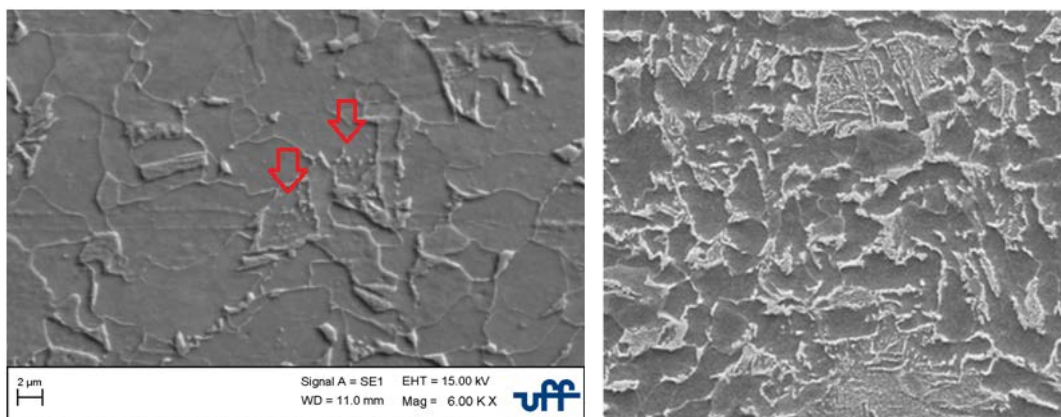


Figura 109. Esquerda: - Imagem microestrutural obtida no MEV – Amostra Meio C (CT=300°C). Direita: Microestrutura do aço FB/600.⁵

Diante disso, é nítido que mesmo com dimensões extremamente restritas e processamento não automatizado, o esforço para obter propriedades mecânicas e metalúrgicas aceitáveis foi muito custoso e arriscado do ponto de vista do processo de laminação. Para que o processo se torne estável e controlável, atendendo às propriedades requisitadas, diversas alterações e melhorias devem ser feitas seja na estrutura e equipamentos mecânicos, seja na automação e concepção do processo de laminação.

3 CONCLUSÃO

Do ponto de vista do processo de produção, as correntes dos motores de acionamento, que se mantiveram baixas, mostram um fator favorável para a produção deste tipo de aço. Já a capacidade e controle de resfriamento se mostram preocupantes. O comportamento da temperatura de bobinamento se mostrou muito instável, ainda necessitando de novos estudos e desenvolvimento para controle.

Do ponto de vista metalúrgico apenas as amostras com bobinamento a 300°C apresentaram propriedades mecânicas capazes de atender às especificações. Microestruturalmente, as amostras apresentaram resultado satisfatório, mostrando estrutura bifásica, mesmo que com frações de segunda fase ainda a serem desenvolvidas.

Dos fatos apresentados, conclui-se que a produção de aços bifásicos no laminador te tiras a quente ainda é inviável. Porém, este trabalho se situa no início do processo de desenvolvimento e compreensão da produção deste tipo de aço, sendo capaz de elucidar alguns fatos e direcionar os próximos testes a serem realizados.

REFERÊNCIAS

- 1 SCHRÖDER, T. Ausgekochter Stahl für das Auto von morgen. Max Planck Forschung, 3, 2004, 36-41.
- 2 PINHEIRO W., Estudo de Viabilidade Técnica de produção de aços Bifásicos Laminados à Quente na CSN- UPV - Projeto 2,2015,38-42.
- 3 BHADESHIA, H. K. D. H. Bainite in Steels, transformations, microstructure and properties, 2001, second edition, University of Cambridge.343-395
- 4 BHADESHIA, H. K. D. H. Aula sobre tratamento termomecânico de aços microligados. University of Cambridge. Disponível em <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjxbmsmYnVAhUHjZAKHacMDiAQtwlIJDA&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DlpAsQT2QnKo&usg=AFQjCNHMtcAC6wba zeQM5No7CLt2D1jcbQ>, sítio acessado em 30/03/2017.
- 5 AZO Materials, Characteristics of Ferritic-Bainitic (FB) Steel, disponível em <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11246>, acessado em 14/02/2017