

DESENVOLVIMENTO DE MODELO ON-LINE DE RESULTADO DE PROPRIEDADE MECÂNICA NO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE DA ARCELORMITTAL TUBARÃO¹

Marden Valente de Souza²
Ricardo Porto³
Cristina Maria Oliveira Lima Roque⁴
Wellington Bermudes Merelles⁵
Vanessa Gomes Santanna⁶
Jean Jacques Huyssen⁷

Resumo

Desenvolvimento e implantação de um modelo on-line de previsibilidade de propriedade mecânica no LTQ da ArcelorMittal Tubarão. Este modelo foi desenvolvido em conjunto com o centro de pesquisa da ArcelorMittal na Europa e fornece os resultados referentes ao ensaio de tração de cada bobina a quente, logo após seu bobinamento. Com este modelo, é possível conhecer os resultados de propriedade mecânica ao longo de todo comprimento de cada bobina a quente produzida, trazendo um avanço nos procedimentos normatizados, pois este instrui ensaio um único ponto da bobina laminada a quente (por exemplo, região do início da BQ) e este representa um lote de x toneladas.

Palavras-chave: Modelo on-line; Propriedade mecânica.

DEVELOPMENT MODEL OF ONLINE OF RESULTS PROPERTY IN MECHANICAL HOT STRIP MILL ARCELORMITTAL TUBARÃO

Abstract

Development and implementation of online model to predict mechanical property in a Hot Coil produced at ArcelorMittal Tubarão. This model was developed together with the European ArcelorMittal research center and provides the tensile results of each hot coil produced, just after coiling. With this model, it is possible to predict the mechanical properties results in the full length of each hot coil produced. This system could be consider a step forward of normalized standards, that instruct to take samples in a single point in the hot coil to be tested (for example, initial region of the coil) and this result will represent a lot of n tons produced (usually more than 1 coil).

Keywords: Model online; Mechanical property.

¹ Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

² MSc em Engenharia Metalúrgica e Materiais, Especialista de Desenvolvimento de Produtos, ArcelorMittal Tubarão. Tubarão, MG, Brasil.

³ MSc em Engenharia de Materiais, Especialista de Desenvolvimento de Produtos, ArcelorMittal Tubarão. Tubarão, MG, Brasil.

⁴ MSc em Engenharia Mecânica, Especialista em Automação, ArcelorMittal Tubarão. Tubarão, MG, Brasil.

⁵ Especialista em Análise de Sistemas, Analista de Tecnologia da Informação, ArcelorMittal Tubarão. Tubarão, MG, Brasil.

⁶ Eng^o Metalúrgica, Especialista em Desenho Integrado de Processo, ArcelorMittal Tubarão. Tubarão, MG, Brasil.

⁷ Process Global Resources - Quality & Product, ArcelorMittal Global Research and Development, Maizières Les Metz, France.

1 INTRODUÇÃO

Para os aços ao carbono laminados a quente reconhece-se a grande influência dos parâmetros termomecânicos nas propriedades finais dos mesmos, estas propriedades estão associadas à morfologia e tamanho de grãos durante as etapas do processo. Os mecanismos estáticos e dinâmicos de refino de grão atuantes na laminação a quente variam em função da temperatura de laminação, da deformação aplicada, dos tempos entre passes e da composição química.⁽¹⁾

Usualmente para avaliar a propriedade mecânica dos materiais é realizado ensaios de laboratório em amostras físicas, principalmente o ensaio de tração que um ensaio destrutivo. Esta amostragem é realizada conforme instruído nas normas com intuito de avaliar o material e representar certo volume produzido, como por exemplo, a NBR 6655:2011.⁽²⁾ “Deve ser retirada uma amostra para ensaio de tração e de dobramento por lote de 90t ou fração. Cada lote deve conter somente materiais de mesma corrida”.

Utilização de ferramentas de simulação pode permitir que o projeto do produto seja realizado de forma otimizada (tempo e custo) utilizando as diversas variáveis operacionais. Quanto mais preciso for o modelo mais eficiente e poderosa será esta ferramenta.⁽³⁾

No fluxo de produção, o resultado de propriedade mecânica normalmente é obtido após resfriamento da bobina e retirada da amostra nas linhas de acabamento/amostragem e ensaio no laboratório certificado. Todo este fluxo dura entre 8 a 12 dias. Com o uso do EPC o resultado de propriedade mecânica é obtido logo após o processo de bobinamento da tira, disponibilizando a bobina laminada a quente para despacho após o resfriamento (3 a 4 dias).

A ArcelorMittal seguindo a nova abordagem global de desenvolvimento de modelos integrados que predizem propriedades mecânicas, vem desenvolvendo modelos, em seus centros de pesquisas, para suas linhas industriais de aços ao carbono (planos) com esta finalidade. A partir dos dados do processo de laminação a quente e composição química é predita pelos modelos a evolução da microestrutural da tira ao longo da linha e, conseqüentemente, a microestrutura e propriedades mecânicas finais. Estes são amplamente utilizados de forma on-line e/ou off-line para acompanhar a qualidade dos produtos laminados e para otimizar as rotas metalúrgicas.⁽⁴⁾

O modelo on-line utilizado na ArcelorMittal Tubarão foi desenvolvido em conjunto com os centros de pesquisas da Europa e contempla um modelo físico (TACSI) juntamente com estágio estatístico que visa ajustar o modelo aos resultados obtidos em ensaios físicos, pois existem características difíceis de se implementar no modelo físico. Este modelo recebe o nome de EPC (Expert Process Control) e permite avaliar a propriedade mecânica (tração) ao longo de todo comprimento da bobina laminada a quente (BQ), conforme mostrado na Figura 1.

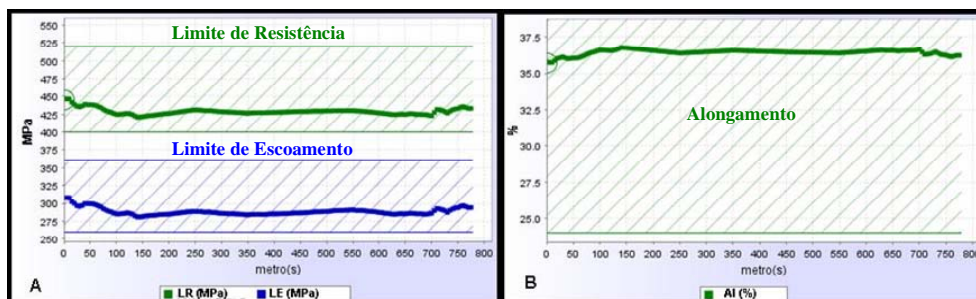


Figura 1: Resultados gráficos das propriedades mecânicas para uma bobina laminada a quente no laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão. A: gráficos de limite de resistência (LR - MPa) e limite de escoamento (LE - MPa). B: gráfico do alongamento (Al - %)

2 MATERIAL E MÉTODOS

O sistema EPC (*Expert Process Control*) permite avaliar a propriedade mecânica (tração) ao longo de todo comprimento da bobina laminada a quente (BQ) obtendo-se, desta forma, uma avaliação mais completa das propriedades. Deve-se destacar ainda que este sistema é modelado para atender as características específicas de cada linha de laminação a quente, ou seja, o modelo é personalizado para cada linha. A Figura 2 apresenta um resumo esquemático destes modelos.

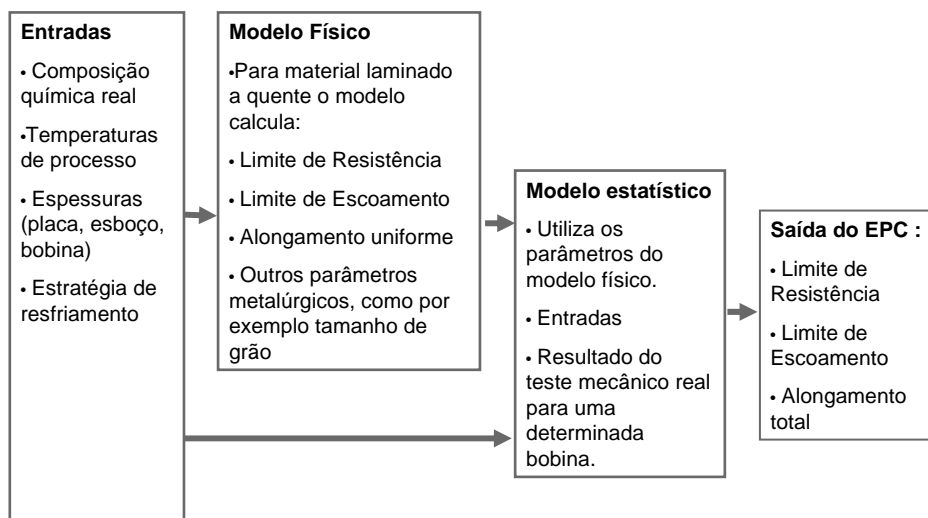


Figura 2: Representação esquemática das entradas e saídas do modelo físico e estatístico.

2.1 Modelo Físico – TACSI

A base do modelo físico (TACSI) é focada nas condições de resfriamento da tira na mesa de resfriamento, bem como a evolução da temperatura após o bobinamento com previsão das transformações de fases resultantes. Este modelo é uma integração de vários modelos elementares para prever evolução da microestrutura e das propriedades mecânicas da tiras a quente ao longo do processo, conforme Figura 3.

Assumindo-se longos tempos de reaquecimento, apenas as condições de equilíbrio termodinâmico entre a solução sólida e fases precipitadas serão considerados. Será assumido também que não há interação entre os diferentes precipitados. Do ponto de

vista prático, como o equilíbrio termodinâmico é assumido, os cálculos iniciam a partir de um estado de dissolução completa de cada elemento.⁽⁵⁾

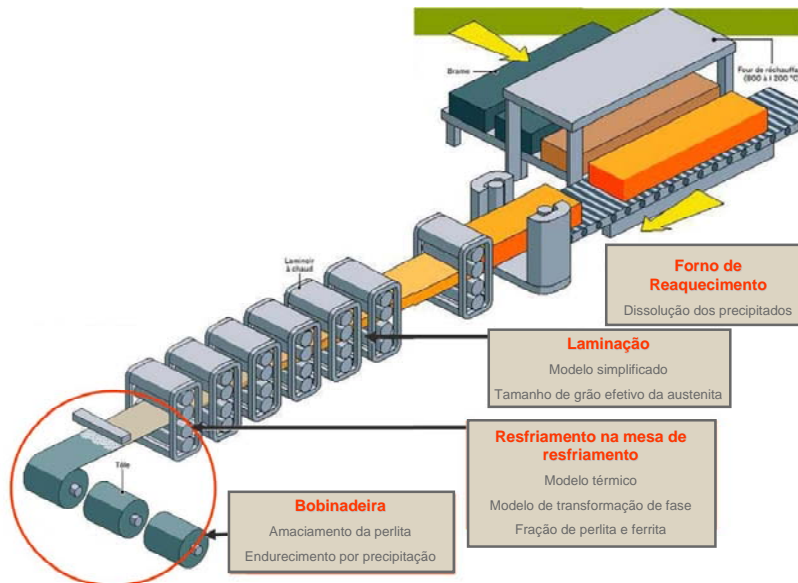


Figura 3: Representação esquemática integrada do modelo TACSI para a previsão da microestrutura e propriedades mecânicas.⁽⁵⁾

Durante a laminação a quente, vários fenômenos metalúrgicos ocorrem, especialmente o endurecimento, a deformação, recuperação e recristalização dinâmica e estática da austenita deformada, além do crescimento do grão austenítico. O modelo desenvolvido pela ArcelorMittal, propõe uma abordagem simples sem afetar significativamente a previsão das propriedades mecânicas finais. O tamanho de grão austenítico no final da laminação de acabamento é previsto com base na temperatura de laminação, na composição química e na taxa de redução realizada na tira no laminador de acabamento. Para exemplificar, o Nióbio apresenta grande influência no tamanho dos grãos, uma vez que retarda a recristalização e aumenta a tensão residual na austenita.⁽⁴⁾

A evolução térmica da tira sobre a mesa de resfriamento pode ser descrito, com precisão, utilizando diversas fórmulas de transferência de calor, dependendo das condições de processo (resfriamento por água, zonas unidas e secas). A equação de transferência de calor deverá considerar também a espessura da tira e o calor gerado pela transformação de fase.⁽⁵⁾

O modelo de transformação de fase de austenita para ferrita poligonal, em seguida, para perlita, leva em conta o efeito da composição química, tamanho de grão austenítico e o resfriamento aplicado na tira na mesa de resfriamento.⁽⁵⁾

Para o material bobinado, a evolução térmica de cada ponto na bobina é obtido pela interpolação linear entre três perfis térmicos típicos (topo, meio e cauda da tira) derivados a partir de um modelo mais complexo de duas dimensões (2D). Na Figura 4 ilustra estes três perfis térmicos. Dependendo da posição na bobina, várias evoluções microestruturais podem ser previstos:⁽⁴⁾

- amolecimento da perlita devido a globulização;
- endurecimento por precipitação do NbC, TiC e VC;
- teor de nitrogênio em solução sólida após a precipitação do TiN, BN e / ou AlN.

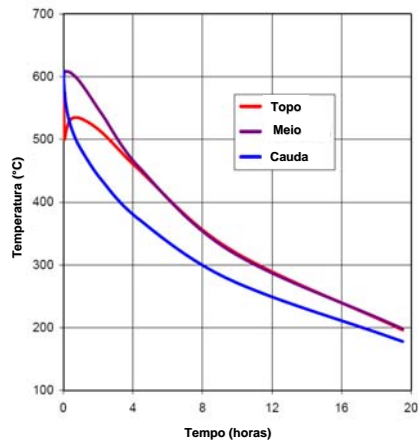


Figura 4: Evoluções de temperatura ao longo da bobina descrito por modelo térmico 2D.⁽⁵⁾

A curva de endurecimento do aço ferrita-perlita é previsto por uma abordagem na física baseada na competição entre a acumulação e aniquilação da recuperação dinâmica das discordâncias. Isso implica que as tensões da ferrita e perlita estão relacionadas com as características microestruturais tais como o tamanho de grãos ferrítico e espaçamento interlamelar, respectivamente. A partir da curva completa, é possível prever o limite de escoamento, coeficiente de endurecimento, alongamento uniforme e o limite de resistência.⁽⁴⁾

A comparação entre o previsto pelo modelo e resultado medido pela amostragem física da bobina está mostrado na Figura 5, onde foram avaliados os aços C-Mn e microligados ao Ti e Nb. Os dados foram obtidos na linha de laminação a quente da ArcelorMittal Carinox.

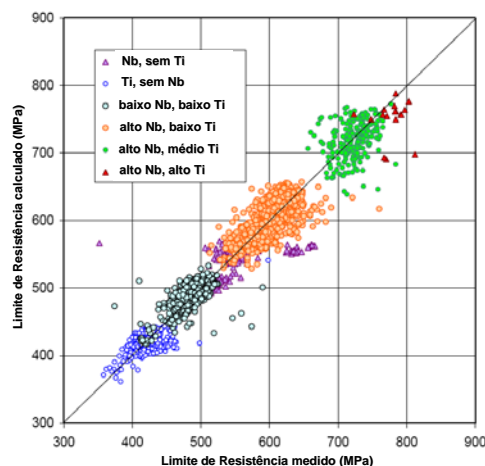


Figura 5: Comparação do limite de resistência previsto e medido para os aços C-Mn e microligados na Nb e Ti.⁽⁵⁾

A Figura 6 apresenta a interface do modelo físico TACSI adaptado para restrições da linha da ArcelorMittal Tubarão, mostrando as entradas e saídas do modelo.

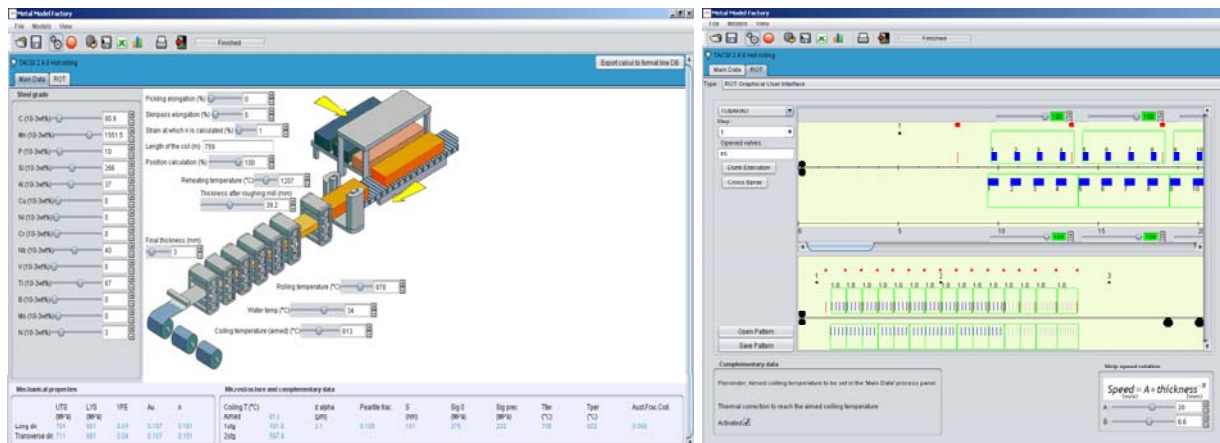


Figura 6: Interface do modelo TACSI com as entradas e saídas.

2.2 Modelo Estatístico – EPC

Com base nas análises estatísticas são selecionados os coeficientes das equações do modelo, conforme exemplo abaixo, considerando os fatores que apresentam maior influência na referida propriedade (limite de resistência, Limite de Escoamento e Alongamento). Na análise estatística é feita comparação entre os valores calculados pelo modelo físico na posição de amostragem e os resultados reais destas propriedades medidos nas bobinas laminadas a quente.

$$LE_long = C1 + C2 * TBob + C3 * epCoil + C4 * B + C5 * C + C6 * Si + C7 * Phys.ReL$$

Onde : C1, C2, C3, C4, C5, C6 e C7: constantes encontradas a partir da matriz de influência que considera a variação entre cada dado previsto e calculado.

TBob: temperatura de bobinamento

epCoil: espessura final da bobina

B: boro

C: carbono

Si: silício

Phys.ReL : Limite de escoamento na longitudinal calculado pelo modelo físico.

Com base nas equações geradas, que contemplam os ajustes estatísticos, foi possível calcular a desempenho do modelo como um todo. Este desempenho está mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Desempenho estatístico do modelo para o ensaio na longitudinal

Propriedade	Desvio padrão	Correlação linear
LE (MPa)	17,25	0,97
LR (MPa)	10,09	0,98
Al (%)	2,3	0,86

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados calculados pelo EPC podem ser utilizados para acompanhamento do comportamento mecânico ao longo de todo comprimento do material, além de possibilitar a comparação entre os valores calculados e obtidos através de amostra física. Na Figura 7 estão indicadas as propriedades mecânicas para um aço microligado Nb com os respectivos valores calculados (linha) e os dados reais (pontos).

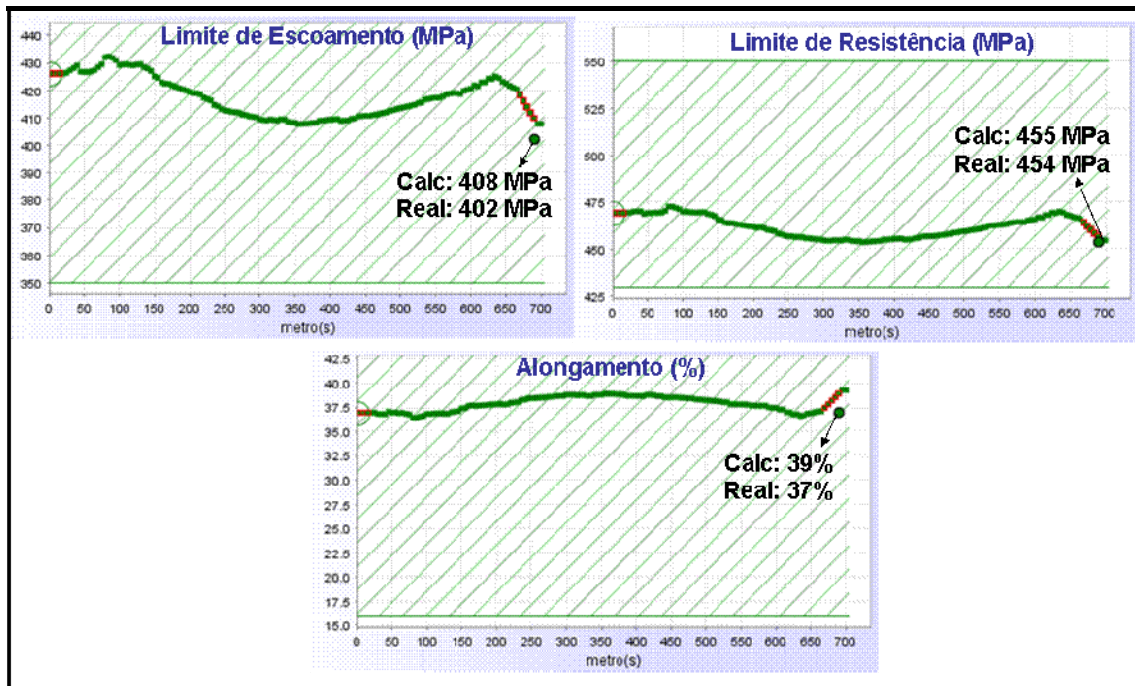


Figura 7: Resultados gráficos das propriedades mecânicas do modelo EPC e dos resultados reais da bobina de aço C-Mn-Nb.

Os dados gerados pelo EPC são enviados para os sistemas de julgamento da ArcelorMittal Tubarão, permitindo realizar a avaliação referente ao atendimento dos requisitos da norma ao longo de todo comprimento da bobina (Figura 7) e não somente em um único ponto, conforme exigência de norma.

Estes dados também auxiliam na análise de variações de alguns parâmetros de processo de laminação a quente que podem impactar na propriedade mecânica do produto, como por exemplo a temperatura de bobinamento (Figura 8). Nesta figura, pode-se verificar que o material atende aos requisitos da norma ao longo de todo seu comprimento, mesmo com a variação da temperatura de bobinamento. Na Figura 9, pode-se observar uma bobina onde se fez necessário o descarte de parte da mesma para garantir o atendimento completo das propriedades mecânicas especificadas.

Esta avaliação pelos sistemas de julgamento da ArcelorMittal Tubarão possibilita a liberação ou desclassificação do produto, garantido que todos os requisitos de propriedades mecânicas solicitados pelo cliente sejam atendidos.

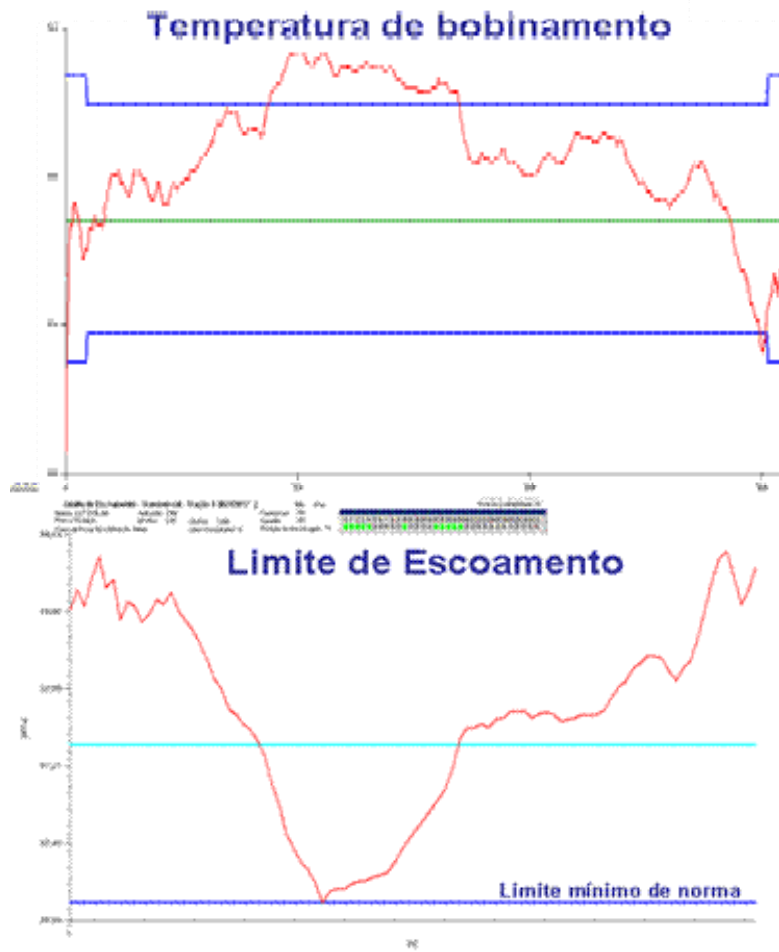


Figura 8: Verificação do impacto da temperatura de bobinamento no limite de escoamento para um aço C-Mn.

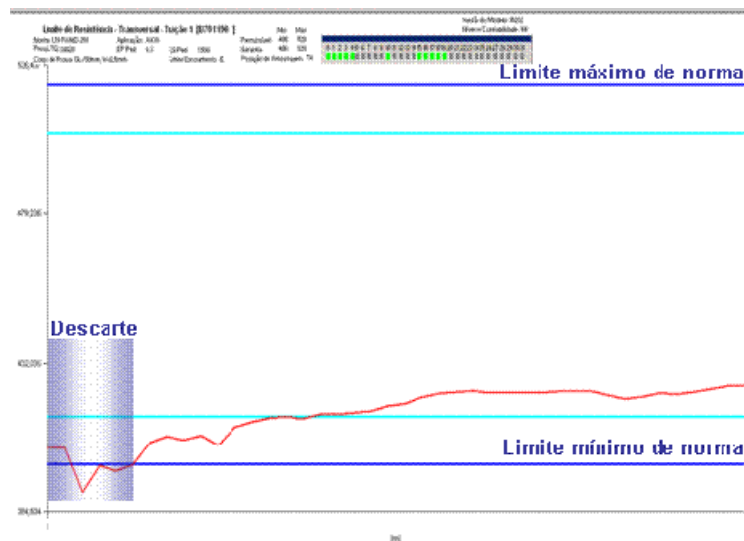


Figura 9: Exemplo do uso do EPC para definição do descarte em uma bobina de aço C-Mn por apresentar limite de resistência abaixo do especificado pela norma.

Como exemplo de validação do modelo, está mostrado na Figura 10 o comportamento das propriedades mecânicas (Limite de Resistência e Limite de Escoamento) calculada e real para a classe de material microligado ao Nb. Para este grupo de material, com limite de resistência entre 450 e 600 MPa, pode-se verificar que o modelo é capaz de simular os resultados de propriedades mecânicas em toda esta faixa de propriedade.

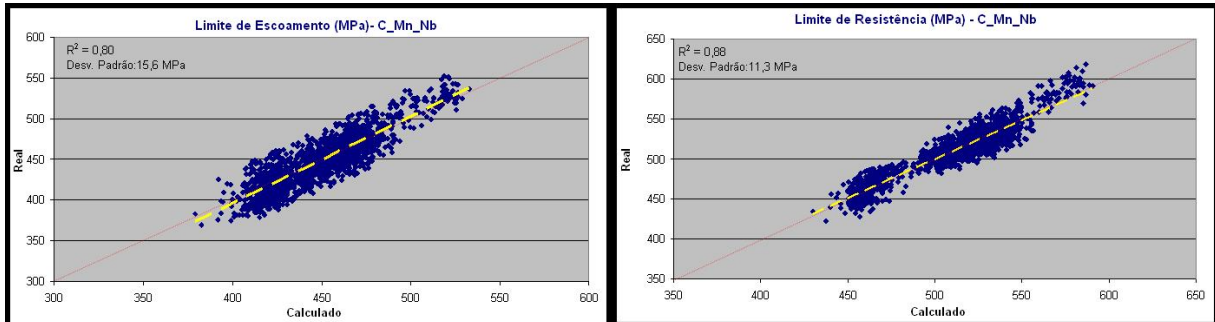


Figura 10: Dispersão dos resultados de Limite de Escoamento e do Limite de Resistência para os aços C-Mn-Nb.

4 CONCLUSÕES

Conforme verificado, o EPC mostrou-se um ferramenta importante no controle das propriedades mecânicas das bobinas produzidas no laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão, possibilitando avaliação de sua variação ao longo de todo o comprimento da bobina a quente logo após sua laminação.

Este sistema apresenta ganhos direto de qualidade para o cliente final, uma vez que podemos garantir a propriedade ao longo do comprimento de todas as bobinas a quente produzidas.

Com o uso do EPC também é possível reduzir o tempo que material leva nos processos internos. Como resultados de propriedade mecânica (limite de resistência, limite de escoamento e alongamento) são obtidos logo após o bobinamento, não é necessário aguardar o processo de resfriamento (aproximadamente 96h), processamento em uma das linhas de amostragem para retirada da amostra física e realização do ensaio.

Além destes benefícios podemos também indicar os apresentados na Figura 11.

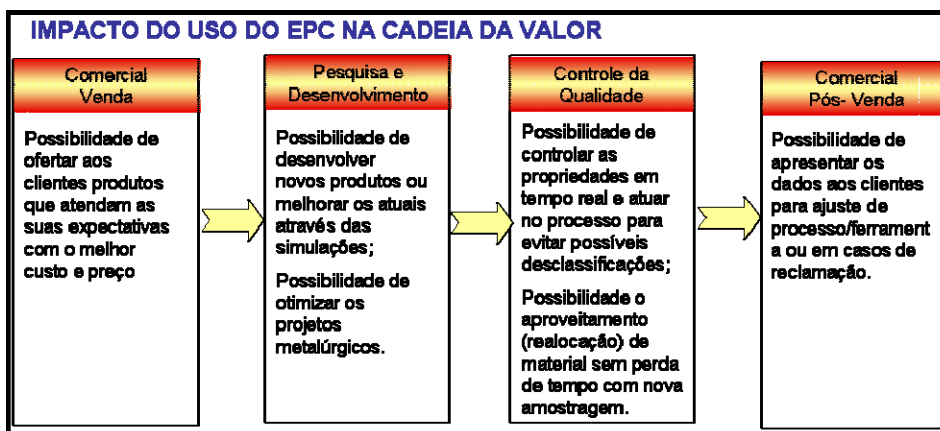


Figura 11: Impacto do uso do EPC na cadeia de valor.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo suporte para realização deste trabalho as equipes da ArcelorMittal Global Research and Development e ArcelorMittal Tubarão bem como aos laboratórios pela realização dos ensaios de caracterizações.

REFERÊNCIAS

- 1 EMANUELLE GARCIA REIS. Dissertação de Mestrado: Modelo Matemático para Previsão das Propriedades Mecânicas na Laminação a Quente de Perfis Estruturais. 2007.
- 2 ABNT NBR 6655: Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características melhoradas de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade – Especificação. Segunda Edição 24/08/2011.
- 3 ALISSON PAULO DE OLIVEIRA E PAULO JOSÉ MODENESI, Modelo de Previsão de Propriedades Mecânicas de Perfis Estruturais Laminados a Quente: Uma Abordagem em Redes Neurais Artificiais, 45º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 2008.
- 4 A.PERLADE, D. GRANDEMANGE and T. IUNG. Application of Microstructural Modelling for Quality Control and Process Improvement in Hot Rolled Steels. Ironmaking and Steelmaking, 2005-VOL:32/No:4
- 5 DIDIER HUIN, DANIEL GRANDEMANGE, PHILIPPE MAUGIS, GWENOLA HERMAN. Microstructural Modelling for Nb/Ti Micro-Alloying Adjustment on Hot Rolled HSLA Steels. ArcelorMittal Research Maizières, France.