

Tema: Produtos metálicos ferrosos

USO DO EPC, SISTEMA DE PREVISIBILIDADE DE PROPRIEDADE MECÂNICA, COMO FERRAMENTA PARA MELHORIA DE QUALIDADE*

Marden Valente de Souza¹
Juliana Gomes dos Santos²
Larissa Firme Trabach³

Resumo

Com o início da utilização do EPC, modelo matemático de previsibilidade de propriedade mecânica, no laminador de tiras a quentes da ArcelorMittal Tubarão em 2012 como ferramenta de acompanhamento da qualidade, pode-se verificar o comportamento das propriedades mecânicas ao longo do comprimento das bobinas logo após sua laminação. Baseado nestes resultados verificou-se que, principalmente, para material com espessura superior a 9,50 mm ocorria uma queda de propriedade mecânica do topo, região indicada para amostragem conforme norma, para o centro de aproximadamente 30 MPa, apresentando todos os valores aprovados conforme especificação da norma. Após verificação por ensaio físico na região central e comprovação da indicação do modelo, modificou-se o processo para garantir um produto com propriedade mais uniforme mantendo a garantia de atendimento às normas ao longo de todo comprimento.

Palavras-chave: Modelo; Propriedade mecânica; Bobina a quente.

USE OF EPC, PREDICTIVE MECHANICAL PROPERTY SYSTEM, AS A TOOL FOR QUALITY IMPROVEMENT

Abstract

In 2012 we started to use the EPC, mathematical model to predict the mechanical properties, in the hot strip mill of ArcelorMittal Tubarão as a quality tool; with this model we can evaluate the behavior of the mechanical properties along the full coils length just after rolling. Based on these results, especially for materials with thickness greater than 9.50 mm, we can observe a decrease in mechanical property from coil head (sampling position) to coil center around 30MPa, with all values approved according to specifications. After verification by physical testing in central region evidencing the indication of the model, the process route was modified to ensure a product with more uniform property ensuring the standard specifications over the whole coil length.

Keywords: Model; Mechanical property; Hot coil.

¹ MSc em Engenharia Metalúrgica e Materiais, Especialista de Desenvolvimento de Produtos, ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil.

² Engenheira de Metalurgia e Materiais, Técnica de Controle de Qualidade, ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil.

³ Técnico em Metalurgia e Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Vitória, ES, Brasil.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Com a implantação do modelo de previsibilidade de propriedade mecânica EPC na linha de laminação a quente (LTQ) da ArcelorMittal Tubarão possibilitou uma avaliação e acompanhamento do comportamento das propriedades mecânicas de alguns materiais durante seus processamentos.

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) e um estágio estatístico que visa ajustar o modelo aos resultados obtidos em ensaios em amostras físicas. 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) obtendo-se, desta forma, uma avaliação mais completa das propriedades [1].

O acompanhamento é realizado através de uma tela, num sistema informatizado de acompanhamento da produção, onde apresenta a classificação dos resultados do EPC de cada bobina produzida logo após sua laminação. Esta tela está representada na figura 1 abaixo.

Coil Classify											EP Pedido	LG Pedido
	ESP	LARG	TB	TA	COROA	CUNHA	PL	ESPCW40	EPC			
302172	BQ								P		12,500	1.500
302174	BQ								P		12,500	1.500
302173	BQ								P		12,500	1.500
302169	BQ				P	P	P		P		12,500	1.500
302170	BQ				P	P	P		P		12,500	1.500
303243	BQ				P	P	P		H		12,500	1.500
302763	BQ				P	B	H		P		12,500	1.850
303257	BQ				P	P	P		P		12,500	1.500
303255	BQ								R		12,500	1.500
303242	BQ								P		12,500	1.500
303241	BQ								P		12,500	1.500

Figura 1. Exemplo de parte da tela do sistema de acompanhamento da produção indicando a classificação o EPC.

Durante avaliação e acompanhamento da produção verificou-se um elevado número de bobinas que estavam sendo classificadas pelo EPC como Holding (H) ou Recovery (R). Esta classificação indicava uma variação das propriedades ao longo do comprimento da BQ, principalmente dentro de uma zona de segurança especificada, mas ainda mantendo-se dentro do limite especificado pela norma. Na figura 2, pode-se verificar a variação na curva do Limite de Escoamento (LE) previsto pelo EPC para uma bobina com espessura de 9,50mm.

A variação apresentada pelo modelo ao longo de todo comprimento da BQ, possibilita um ganho em termos de controle de qualidade uma vez que esta variação não era percebida, pois além da amostragem ser por um determinado lote/volume de produção, normalmente é realizado em um único ponto da bobina, este ponto está representado na figura 2. Um exemplo desta instrução pode ser visto na NBR

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

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”.

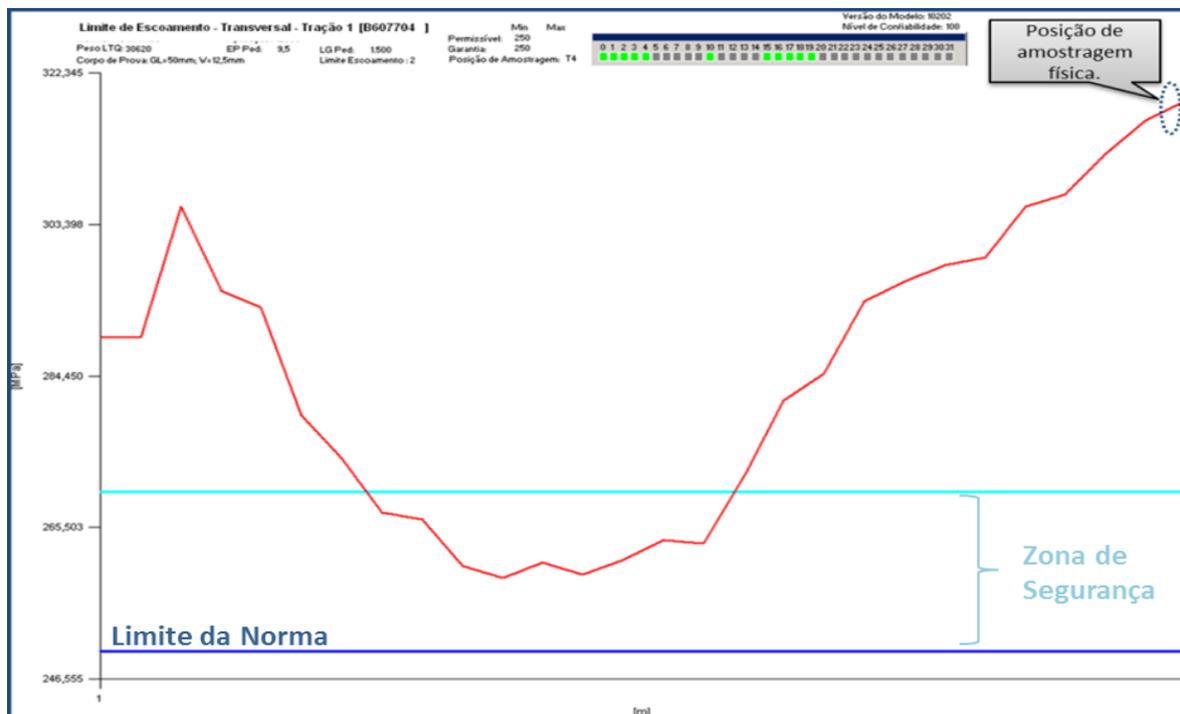


Figura 2. Gráfico de Limite de Escoamento para uma bobina laminada a quente, indicando a variação prevista pelo modelo e ponto normalmente amostrado.

Esta variação não foi observada para materiais similares com espessuras inferiores. Os gráficos de Limite de Escoamento e de Limite de Resistência apresentaram-se mais estáveis, fazendo com que o foco deste trabalho fosse voltado para materiais com espessura superiores a 9,50mm. A figura 3 mostra o comportamento para uma bobina com 6,00mm de espessura.

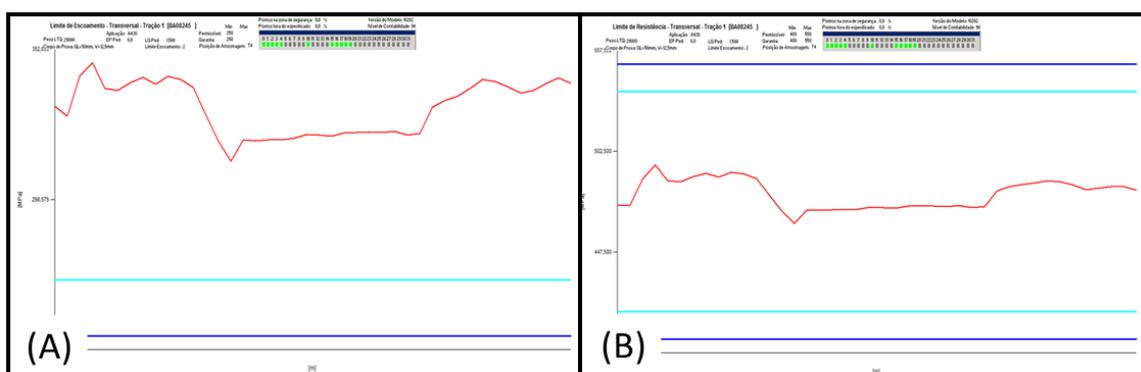


Figura 3. Gráficos para uma bobina de 6,0mm indicando um comportamento mais estável pra o Limite de Escoamento (A) e Limite de Resistência (B)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando comprovar as variações nos valores de Limite de Escoamento e de Resistência, nas bobinas com espessura superiores a 9,50mm, observadas pelo

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

EPC ao longo comprimento das mesmas, foi elaborada uma sistemática de acompanhamento e de amostragem física das bobinas nestas condições. As bobinas selecionadas tiveram resultados Holding (H) ou Recovery (R) conforme julgamento realizado pelo EPC durante sua produção, este acompanhamento foi realizado através do sistema de acompanhamento da produção, conforme figura 4. A amostragem física foi realizada na região onde normalmente é amostrada (conforme norma – topo da bobina) e no vale da curva da referida propriedade (centro da bobina), como indicado na figura 5. Estas amostras foram ensaiadas por uma máquina de tração universal e realizada análise metalográfica por microscopia ótica.

Coil Classify										EP
	ESP	LARG	TB	TA	COROA	CUNHA	PL	ESPCW40	EPC	Pedido
603324	BQ								P	9,500
603318	BQ								P	9,500
603316	BQ								P	9,500
603315	BQ								P	9,500
603314	BQ								R	9,500
603306	BQ								R	12,500
603303	BQ								P	9,500
605374	BQ								R	9,500
602855	BQ								H	12,500
602853	BQ								R	12,500
607705	BQ								R	9,500
609939	BQ								R	9,500
607704	BQ								R	9,500
605752	BQ								R	9,500

Figura 4. Tela do sistema de acompanhamento da produção indicando as bobinas alvo de avaliação com classificação pelo EPC de Holding (H) ou Recovery (R).

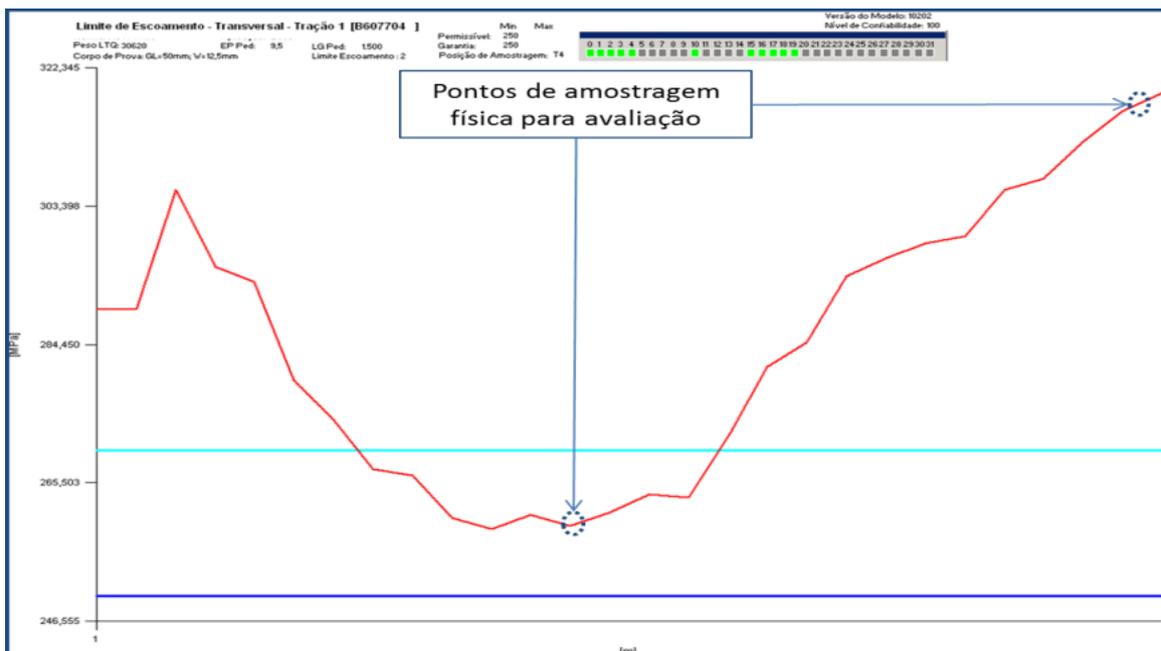


Figura 5. Pontos de retirada de amostra física para realização de ensaios visando verificação do modelo EPC.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realização dos testes físicos pelo Laboratório de Teste Mecânico, o resultado do teste de tração pode ser avaliado via sistema EPC, possibilitando verificar o desvio do mesmo em relação ao resultado real. Na figura 6, abaixo, mostra o resultado gráfico para limite de resistência, limite de escoamento e alongamento. A linha pontilhada representa o resultado do EPC e os pontos, um no meio e outro no topo, representam os testes físicos nas respectivas posições. Na tabela 1 é possível verificar uma diferença das propriedades medidas entre o topo desta bobina e a região central, vale de propriedade conforme modelo EPC, de 35 MPa para o Limite de Escoamento, 29 MPa para o Limite de Resistência e -3% para o Alongamento. Estes valores confirmam a variação de propriedade ao longo do comprimento da bobina, porém sem prejuízo para a aplicação final, devido aos resultados, tanto o calculado quanto o medido, estarem acima da especificação da norma contratada. Como o resultado para o alongamento está confortavelmente acima do especificado +10%, o mesmo não estará sendo o foco deste trabalho.

Além da avaliação padrão solicitada pelas normas, os produtos da ArcelorMittal Tubarão são periodicamente checados ao longo do seu comprimento para verificação do projeto de qualidade e acompanhamento do processo, sendo o EPC uma ferramenta aliada neste monitoramento contínuo de controle de qualidade.

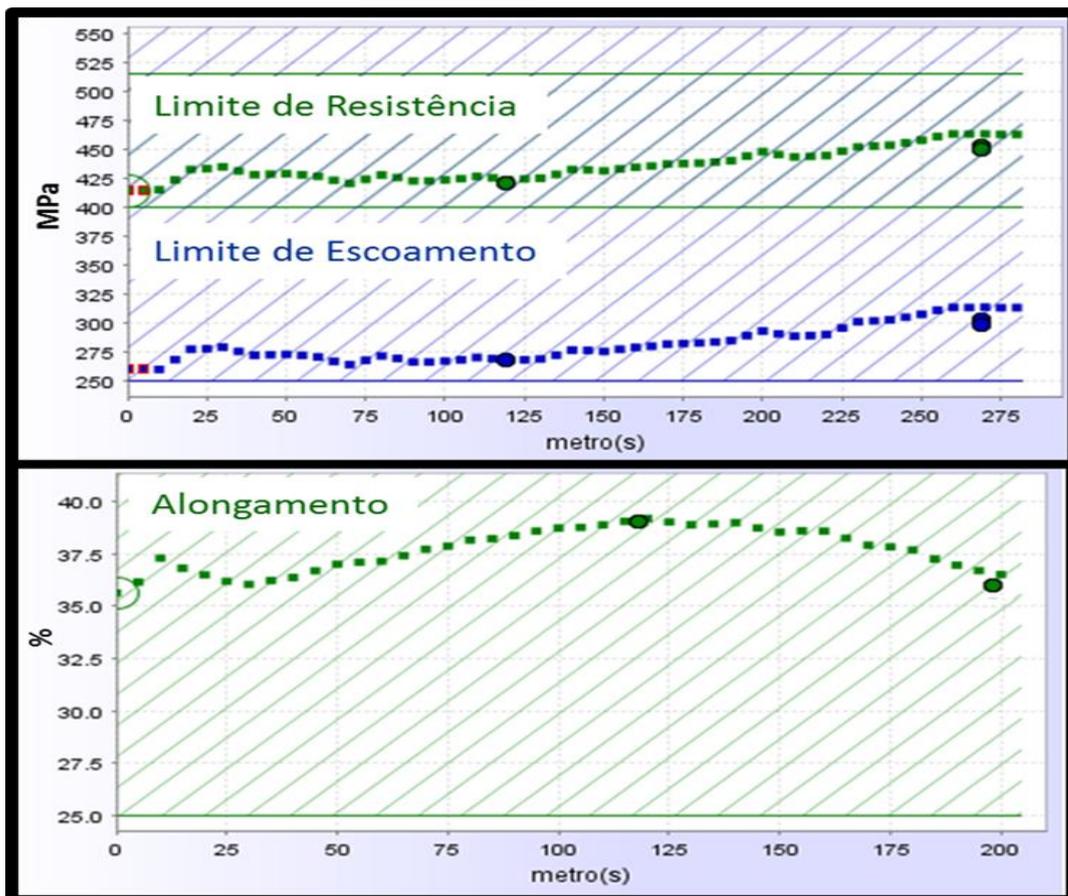


Figura 6. Avaliação dos resultados de tração em amostra física em relação ao previsto pelo modelo. As linhas são os dados previstos pelo modelo e os pontos os dados reais obtidos através de ensaios em amostras físicas da bobina.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 1. Comparação para os valores calculados pelo modelo EPC e real medido através de ensaio mecânico em amostra física (Real) para uma bobina no topo e meio (região central).

		Topo	Meio	Diferença (topo - meio)
LE	Modelo EPC	313	267	46
	Real	303	268	35
LR	Modelo EPC	463	424	39
	Real	450	421	29
AI	Modelo EPC	36	39	-3
	Real	36	39	-3

Foi realizada amostragem física em 20 bobinas, os resultados destes testes confirmaram a queda destas propriedades na região central da bobina, conforme pode ser visto pelas distribuições na figura 7. Esta queda, na média, foi de a 26 MPa para o Limite de escoamento e de 30 MPa para o Limite de Resistência.

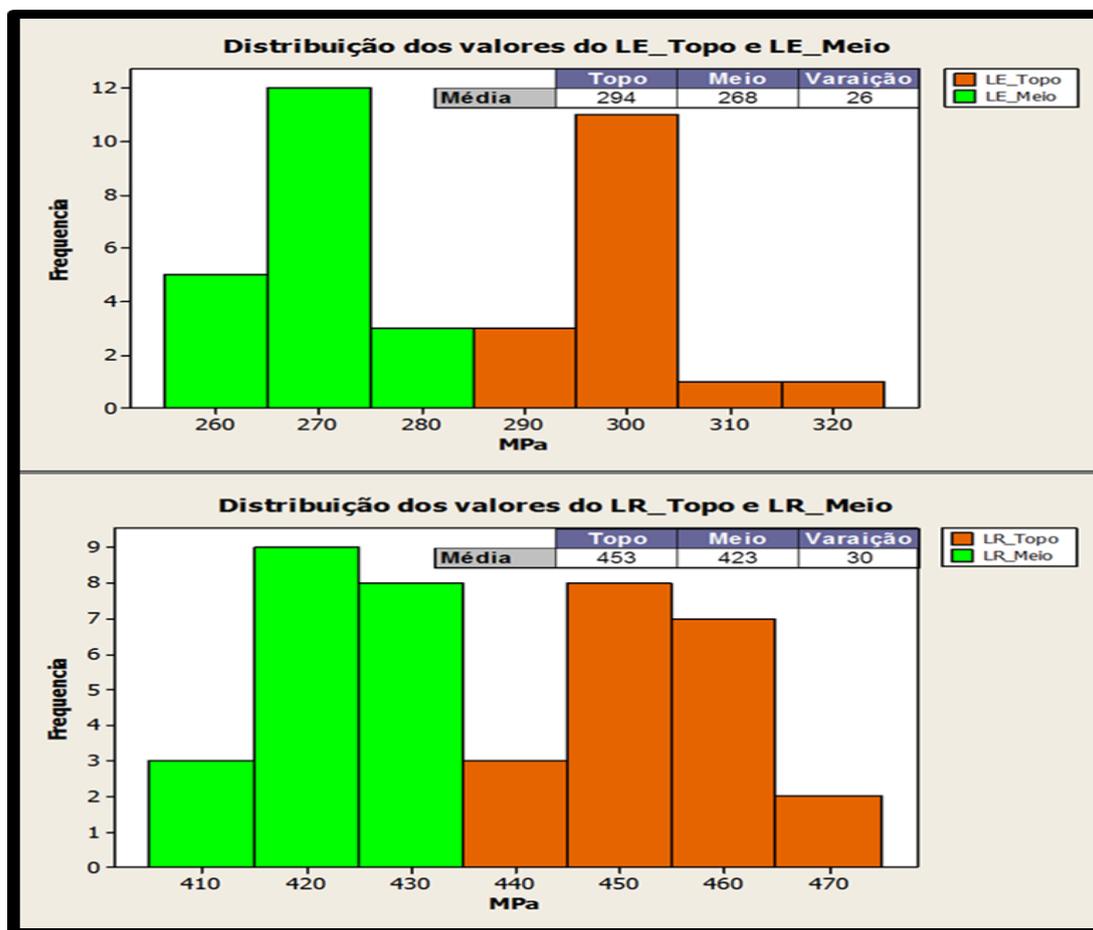


Figura 7. Distribuição dos resultados reais, originados pelas amostras físicas, confirmando a variação do Limite de Escoamento e do Limite de Resistência entre o topo e o meio.

Apesar da queda verificada na região central das bobinas avaliadas, nenhuma delas apresentou resultado inferior ao mínimo especificado como garantia, indicando uma robustez no projeto de qualidade. Os valores de máximos e mínimos para cada um dos pontos de amostragem, topo e meio, estão na tabela mostrados na tabela 2.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 2. Dados de mínimo, máximo e especificação das propriedades mecânicas no topo e meio para as bobinas avaliadas. Todas as bobinas atenderam as especificações.

		LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
Topo	Mín	270	443	33
	Máx	319	470	42
Meio	Mín	256	412	35
	Máx	280	434	43
Especificação		250 min	400~515	25 min

Como estamos tratando de um grupo único material, especificado e produzido de forma similar, não será levado em consideração o valor do coeficiente de determinação (R^2), pois quando se modela isoladamente espera-se um grau de dispersão mais elevado.

Com estes dados também foi possível verificar o nível de aderência com os resultados do modelo EPC. Esta aderência é verificada pelo erro apresentado entre os valores calculados pelo modelo e o medido através do ensaio em amostra física. Conforme verificado na figura 8 e tabela 3 estes valores mostram uma boa aderência do modelo para este tipo de material, além de um baixo nível de erro. Para o aço estudado, o maior erro médio encontrado foi de 10,55 MPa para as medidas de Limite de Escoamento no meio. Esta maior dispersão obtida no Limite de Escoamento pode ser atribuída à maior dificuldade experimental na sua medição [3].

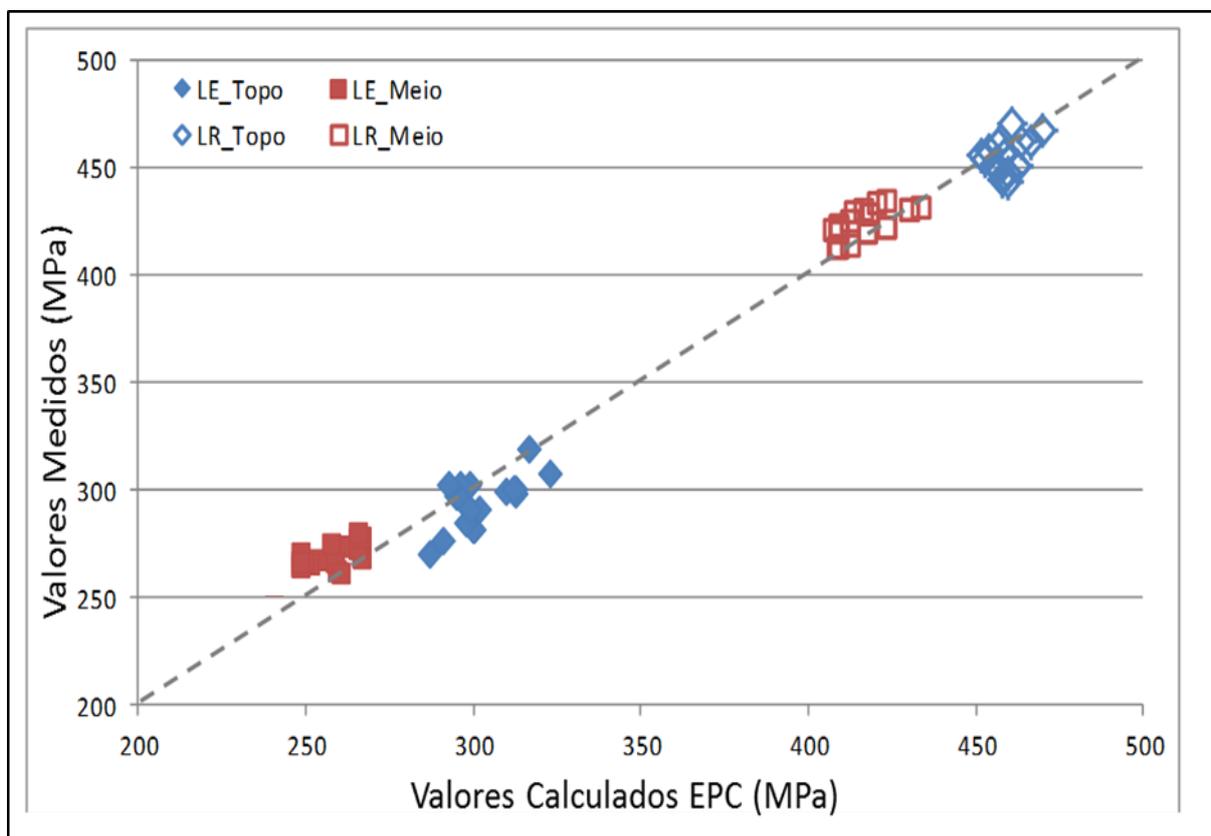


Figura 8. Distribuição dos resultados reais, originados pelas amostras físicas, confirmando a variação do Limite de Escoamento e do Limite de Resistência entre o topo e o meio.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Com base nos resultados apresentados na tabela 3 pode-se afirmar que o modelo EPC é capaz de prever o comportamento do material assegurando o atendimento aos requisitos da norma, uma vez que este tipo de ensaio possui uma base sólida na metalurgia sendo estimado utilizando os princípios metalúrgicos conhecidos [4]. O erro médio apresentado na tabela 3 será absorvido durante o julgamento realizado pelo sistema EPC na Zona de Segurança.

Tabela 3. Erro médio e desvio padrão do erro apresentado entre os valores medidos e calculados pelo EPC.

		LE (MPa)	LR (MPa)
Topo	Erro Médio	7,95	5,35
	Desvio Padrão	8,89	7,77
Meio	Erro Médio	-10,55	-5,35
	Desvio Padrão	6,14	6,20

Estes valores de erro são inferiores ao apresentado por Gorni *et al* [5] onde o programa VaiQ-Strip adotado por ele como referência de benchmarking, consegue valores de erro padrão da estimativa para o LE e LR de aços C-Mn iguais a 17 MPa e 9 MPa, respectivamente. E a precisão do cálculo para as redes neurais apresentadas foi inferior a 27 MPa e 16 MPa para LE e LR, respectivamente.

Visando minimizar os impactos durante aplicação do material devido à variação de propriedade ao longo do comprimento da bobina e garantir um atendimento mais confortável, uma vez que obtivemos valores próximos aos limites inferiores, foi proposto alterações nos parâmetros de processo visando elevar e homogeneizar estas propriedades ao longo do comprimento da bobina.

Os resultados foram acompanhados principalmente pelo EPC, uma vez que o mesmo se mostrou uma ferramenta apropriada para tal.

Após testes, os resultados de propriedades mecânicas mostraram-se satisfatórios, indicando uma menor variação ao longo de todo comprimento da bobina além da elevação das mesmas na região central afastando do limite inferior da especificação, eliminando definitivamente o risco de obtenção de propriedade mecânica fora do especificado, bem como de obter bobinas com classificação Holding (H) ou Recovery (R).

Nos gráficos das figuras 9 e 10 abaixo estão mostrados, respectivamente, exemplos do comportamento para o Limite de Resistência e Limite de Escoamento destes aços antes e após os ajustes propostos para o projeto.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

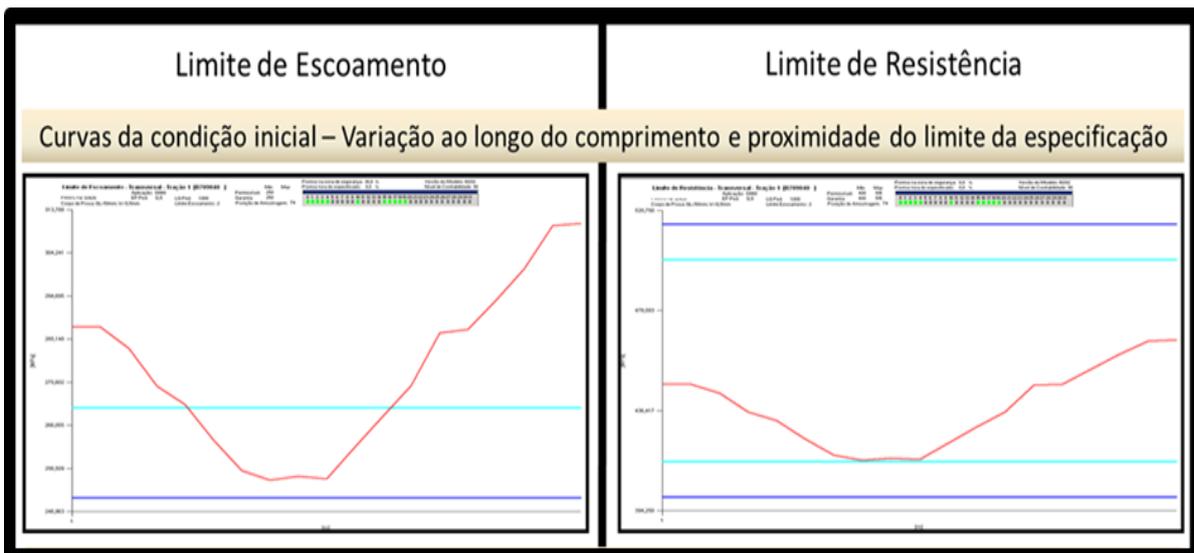


Figura 9. Comportamento das curvas do Limite de Escoamento e do Limite de Resistência antes dos ajustes no processo, mostrando a variação da propriedade ao longo do comprimento.

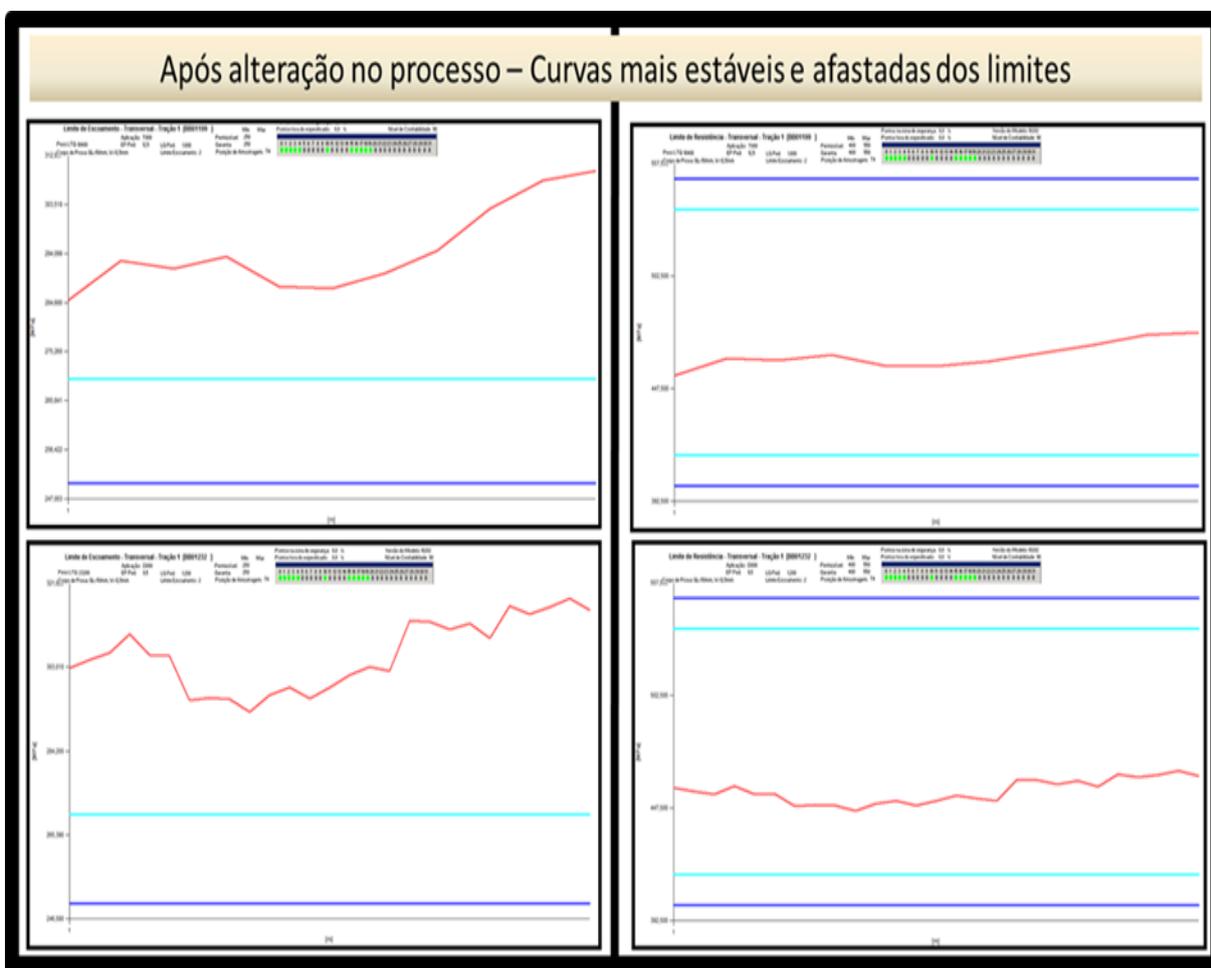


Figura 10. Comportamento das curvas do Limite de Escoamento e do Limite de Resistência depois dos ajustes no processo, mostrando um comportamento mais estável e um afastamento do limite da especificação.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

4 CONCLUSÃO

O uso do modelo EPC como uma ferramenta para melhoria e garantia da qualidade nos produtos da ArcelorMittal Tubarão mostrou ser excelente ferramenta, podendo promover melhorias e/ou ajustes nos projetos de qualidades dos aços fornecidos visando garantir um produto mais homogêneo com garantia de atendimento às exigências ao longo de todo o comprimento da bobina.

Também foi verificado que o Modelo EPC está ajustado para este grau de aço e dimensão em função da boa aderência apresentada pelo modelo, representado por um erro médio de 10 MPa para o Limite de Escoamento e de 5 MPa para o Limite de Resistência.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo suporte para realização deste trabalho as equipes da área de operação, programação e inspeção das linhas de amostragem e do laboratório de teste mecânico da ArcelorMittal Tubarão.

REFERÊNCIAS

- 1 Souza M, Porto, R Roque, Merelles C, Santanna W, Huyssen V, et al. Desenvolvimento de modelo on-line de resultado de propriedade mecânica no laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão. 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil, pg. 564-573.
- 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 Morais WA. Emprego estatístico de dados de resistência mecânica e ductilidade na modelagem das características mecânicas e estimativa da tenacidade de aços planos. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, 2011; 8(4): 215-222.
- 4 Bhadeshia HKDH. Models for the Elementary Mechanical Properties of Steel Welds. Mathematical Modelling of Weld Phenomena III, Institute of Materials, London, 1997, pp. 229–284.
- 5 Gorni AA; Silva MRS; Silveira, Dolabela JH. Previsão de propriedades mecânicas de bobinas laminadas a quente através de redes neurais. Tecnol. Metal. Mater., São Paulo, 2009; 5(4): 229-234.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.