

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DO ALARGAMENTO DURANTE OS PASSES EM UM LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE*

Altair Lúcio de Souza¹
Jacson Moraes Borges²
João Júnio Pereira Lino⁴
Willy Schuwarten Júnio⁵

Resumo

Este estudo descreve a comparação de seis métodos de cálculos teóricos pelos modelos matemáticos de Beese, Hill, Hemli, Shibahara, El-Kalay e Ekelund, com o objetivo de estimar o alargamento na laminação a quente de tiras de aço em um laminador tipo Steckel, de cadeira única quadro reversível, e definir quais dos modelos de alargamento se aproximam mais dos resultados obtidos no produto final. Para análise dos resultados foram utilizados os dados das medições de largura inicial e final de diversas tiras processadas no Laminador de Tiras a Quente da Gerdau Ouro Branco, comparando os resultados com os valores calculados a partir desses modelos para diversas condições de processo como diferentes dimensionais de placas e escala de passes. Os resultados obtidos indicam que os modelos de Beese e Ekelund foram os que apresentaram melhores resultados calculados em relação aos valores medidos no produto.

Palavras-chave: modelo matemático, alargamento, tiras a quente, largura

STUDY OF LATERAL SPREAD EVOLUTION DURING PASSES ON A HOT STRIP MILL

Abstract

This study describes the comparison of six methods of theoretical calculations by the mathematical models of Beese, Hill, Hemli, Shibahara, El-Kalay and Ekelund, with the aim of estimating the lateral spread in the hot rolling of steel strips in a Steckel rolling mill, of reversible single-stand, and define which of the lateral spread models approximate the results obtained in the final product. For comparison, the data of the width measurements of several strips processed in the Gerdau OuroBranco Hot Strip Mill was used comparing with the results calculated from these models for different process conditions such as different plate sizes and passes scale. The results indicate that the Beese and Ekelund models presented the best calculated results in relation to the values measured in the product.

Keywords: mathematical model;lateral spread;hot strip mill, width.

¹ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Metalurgia, Assessor Técnico, Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, UFOP e UFMG, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.

² Graduando em Engenharia de Produção, Assessor Técnico, Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, UFMG, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Mestre em Metalurgia, Assessor Técnico, Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco e UFOP, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil..

⁴ Engenheiro Mecânico, Mestre em Metalurgia, Gerente da Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, Unileste MG e Universidade Federal de Minas Gerais, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O processo de laminação de tiras a quente é dividido em duas etapas, a etapa de desbaste, onde a placa, inicialmente com espessura de 220 ou 250 mm no caso da Gerdau Ouro Branco, é submetida a grandes reduções em altas temperaturas, acima de 1000°C, eliminando a heterogeneidade da estrutura de fusão da placa ao longo da secção transversal e também com refino de grão austenítico, até atingir a espessura entre 25 e 30 mm formando o esboço, e a etapa de acabamento ocorre em temperaturas mais baixas e com menor redução absoluta, onde o esboço formado é reduzido até a espessura do produto final^[1]. Os limites de ângulo de mordida, força e torque do laminador são os principais fatores que determinam a quantidade de passes em cada uma dessas etapas. A Figura 1 mostra uma representação esquemática das etapas no processo de laminação.

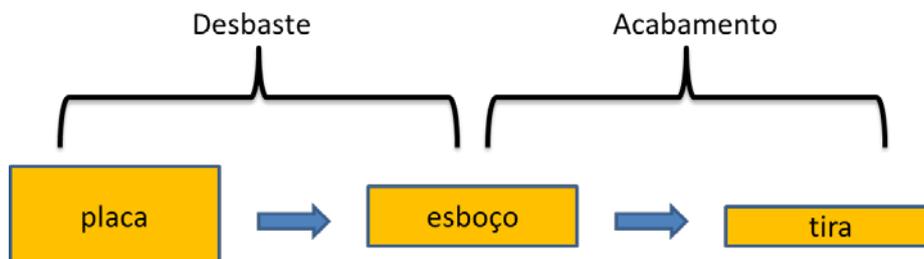


Figura 1. Etapas do processo de laminação de tiras a quente.

A Linha de Tiras a Quente da Gerdau é dotada de modernos equipamentos com seus sistemas de automação e respectivos modelos matemáticos e atuadores dinâmicos para atender a produção de bobinas de aço carbono e microligados de faixa de espessura 1,80 a 25,40 mm e largura 860 a 2100 mm. A Linha apresenta uma cadeira única de laminação quadro-reversível do tipo Steckel (com dois fornos bobinadeira na entrada e saída do laminador) onde é executada tanto a etapa de desbaste e acabamento para obtenção das tiras a quente^[2]. A Figura 2 mostra um desenho esquemático da Linha de Tiras a Quente da Gerdau.

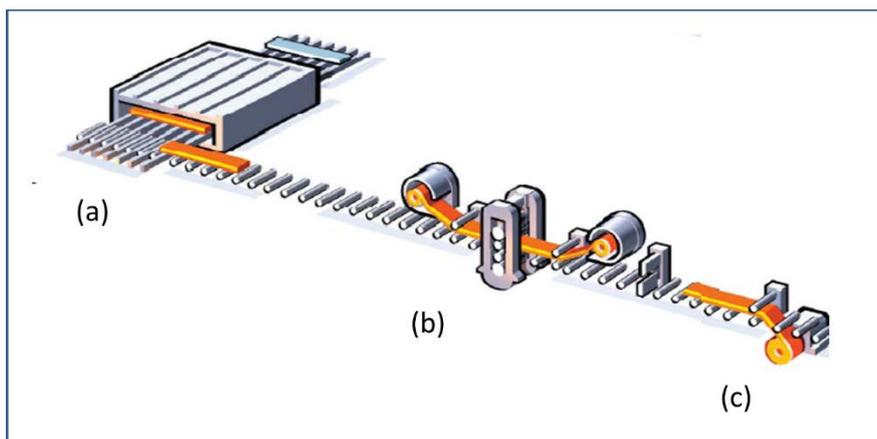


Figura 2. Linha de Tiras a Quente da Gerdau: (a) Forno de Reaquecimento; (b) Laminador Quadro Reversível tipo Steckel com seus fornos bobinadeira na entrada e saída do laminador; (c) Bobinadeira.

Para melhor controle da laminação, as escalas de passes são padronizadas em função da espessura do produto final, podendo ser executada em 6 ou 8 passes de laminação na etapa de desbaste e 3 ou 5 passes na etapa de acabamento.

A etapa de desbaste é onde ocorre maior alargamento do produto, devido às grandes reduções absolutas nessa fase. É de suma importância conhecer a evolução do alargamento durante os passes de laminação devido a necessidade de se planejar, de forma mais assertiva, as receitas de largura de placa para obter a largura do produto (bobina) dentro das tolerâncias do cliente.

1.1 Alargamento na laminação

Durante o passe de laminação de uma placa, a redução de espessura é acompanhada com alongamento nas direções transversal e longitudinal. O alongamento na direção transversal promove um incremento na largura e é referido na laminação como alargamento. Esse alargamento, ΔW , pode ser expressado matematicamente pela seguinte equação^[3]:

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (1.0)$$

Onde W_2 é a largura média final e W_1 é a largura média inicial do passe de laminação.

O alargamento (alongamento lateral) é frequentemente expressado em termos relativos pelo coeficiente de alargamento S_w , igual a seguinte equação:

$$S_w = \frac{\ln \frac{W_2}{W_1}}{\ln \frac{h_1}{h_2}} \quad (1.1)$$

Onde h_2 é a espessura final e h_1 é a espessura inicial do passe de laminação.

A partir da derivada dessa equação é obtido a relação entre o valor absoluto do alargamento e o coeficiente de alargamento S_w , que é dado pela expressão^[3,4]:

$$\Delta W_s = W_1 \left[\left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{S_w} - 1 \right] \quad (1.2)$$

Assim, o valor absoluto do alargamento é uma função não somente do coeficiente de alargamento S_w , mas também da largura inicial W_1 e da relação entre as espessuras no passe de laminação h_1/h_2 ^[3].

1.2 Modelos para cálculo de alargamento

Vários autores fizeram estudos para estimativa de alargamento em laminação, a seguir serão apresentados os modelos utilizados nesse trabalho^[3,4]:

1.2.1 Modelo de Hill

O modelo de Hill propõe que o coeficiente de alargamento diminui com o aumento da razão entre a largura inicial W_1 e o comprimento do arco de contato L :

$$S_w = 0,5 \exp \left[0,3535 \frac{W_1}{L} \right] \quad (1.3)$$

Onde L é o comprimento do arco de contato e R é o raio do cilindro de trabalho. L é obtido pela seguinte equação:

$$L = \sqrt{R (h_1 - h_2)} \quad (1.4)$$

1.2.2 Modelo de El-Kalay

O modelo de El-Kalay apresenta constates levantadas a partir de dois fatores: superfície do cilindro de trabalho e condição da superfície da peça laminada em consequência da carepa formada. Para esse trabalho foi considerado as constantes referentes a um cilindro desbastador, pois, como a mesma cadeira faz o desbaste e acabamento, a rugosidade do cilindro é mais próxima a de um cilindro desbastador:

$$S_w = 0,851 \exp \left[-1,776 \left(\frac{W_1}{h_1} \right)^{0,643} \left(\frac{h_1}{R} \right)^{0,386} r^{-0,104} \right] \quad (1.5)$$

Onde r é a redução relativa de espessura, dada pela equação:

$$r = \left(\frac{h_1 - h_2}{h_1} \right) \quad (1.6)$$

1.2.3 Modelo de Hemli e Alexander

Hemli e Alexander propuseram a seguinte fórmula para cálculo do coeficiente de alargamento, a partir de validação do modelo em vários testes experimentais:

$$S_w = 0,95 \left(\frac{h_1}{W_1} \right)^{1,1} \exp \left[-0,707 \left(\frac{W_1}{L} \right)^{1,1} \left(\frac{h_1}{W_1} \right)^{0,971} \right] \quad (1.7)$$

1.2.4 Modelo de Beese

Beese propôs o seguinte modelo a partir de ensaios industriais em aços de baixo carbono:

$$S_w = 0,61 \left(\frac{h_1}{W_1} \right)^{1,27} \exp \left[-0,38 \left(\frac{h_1}{L} \right) \right] \quad (1.8)$$

1.2.5 Modelo de Shibahara

O modelo de Shibahara é uma das equações matemáticas do modelo de redução de largura, desenvolvido por esse pesquisador, aplicado em laminadores desbastadores em linha de tiras a quente:

$$S_w = \exp \left[-1,64m^{0,376} \left(\frac{W_1}{L} \right)^{0,016m} \left(\frac{h_1}{R} \right)^{0,015m} \right] \quad (1.9)$$

Onde $m = W_1/h_1$

1.2.1 Modelo de Ekelund

O modelo de Ekelund apresenta a influência do atrito do cilindro de trabalho com a superfície da peça laminada através da equação^[3,4,5]:

$$W_2^2 - W_1^2 = 8mL(h_1 - h_2), -4mL(h_1 + h_2) \left(\frac{W_2}{W_1} \right) \quad (1.10)$$

Onde m é definido por:

$$m = \frac{1,6\mu L - 1,2(h_1 - h_2)}{h_1 + h_2} \quad (1.11)$$

μ , o coeficiente de atrito:

$$\mu = 0,55 - [0,0005(T - 1000)] \quad (1.12)$$

e T é a temperatura em Graus Celsius.

Análise dessas equações mostram que o coeficiente de alargamento é função dos seguintes fatores geométricos relativos^[3,4]:

- Razão entre a largura inicial e comprimento de arco de contato w_1/L
- Razão entre a largura inicial e espessura inicial w_1/h_1
- Razão entre a espessura inicial e raio do cilindro de trabalho h_1/R
- Redução relativa r

O atrito no arco de contato é o principal fator não-geométrico que afeta o alargamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir dos dados reais de processo, como largura medida na placa, largura medida no esboço, largura medida na tira, escala de passe, temperatura por passe, diâmetro de cilindros, foram feitas simulações utilizando os modelos de cálculo de alargamento apresentados para verificar qual ou quais modelos apresentam-se mais aderentes aos resultados medidos. Alguns dos resultados obtidos estão apresentados nesse trabalho.

Abaixo apresenta a característica dos materiais avaliados:

Tipo de material: SAE1012

Espessura de placa: 220 e 250 mm

Largura de produto visada: 1000, 1200, 1500 e 1800 mm

Temperatura de processo: entre 1150 e 1200°C

Escala de passes: Desbaste: 6 e 8 passes / Acabamento: 3 e 5 passes

Foram armazenados os dados de largura das peças medidas em três posições, como mostrado na Figura 3:

(a) medidor laser instalado na mesa de entrada do forno de reaquecimento medindo a largura da placa;

(b) medidor com câmera CCD instalado na entrada do laminador medindo a largura do esboço;

(c) medidor a laser instalado na saída do laminador medindo a largura da tira.

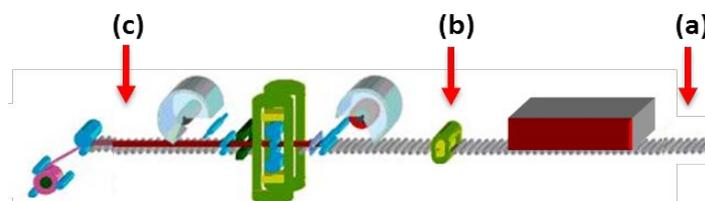


Figura 3. Disposição dos medidores de largura na linha.

O alargamento real considerado como alargamento medido foi calculado pelas seguintes equações:

$$\text{Alargamento 1} = (b) - (a)$$

$$\text{Alargamento 2} = (c) - (a)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram plotados os resultados de alargamento final (largura da tira – largura da placa) para 4 larguras visadas de produto, 1000, 1200, 1500 e 1800 mm, Figura 4, para bobinas com as seguintes características:

Tipo de Aço: SAE1012

Espessura final: 4,75 mm

Espessura da placa: 250 mm

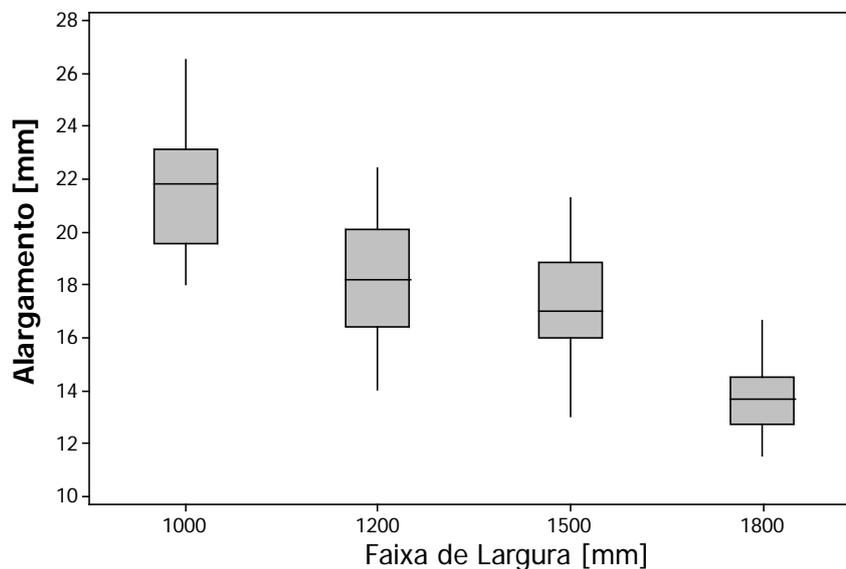


Figura 4. Alargamento em quatro diferentes larguras de produto, para aço SAE1012 laminado a partir da espessura inicial de 250 até o produto final de espessura 4,75 mm.

Os resultados mostram que o alargamento tem uma grande influência da largura inicial da peça, onde quanto maior a largura inicial menor o alargamento obtido.

Desse mesmo conjunto de dados analisados, foram selecionadas 3 placas de mesmas características para cada largura visada de produto (mesma espessura, mesma temperatura de desenformamento e laminadas com mesmo conjunto de cilindros e escala de passes) e o resultado de alargamento médio dessas placas foram comparados com os resultados simulados pelos modelos apresentados, Figura 5:

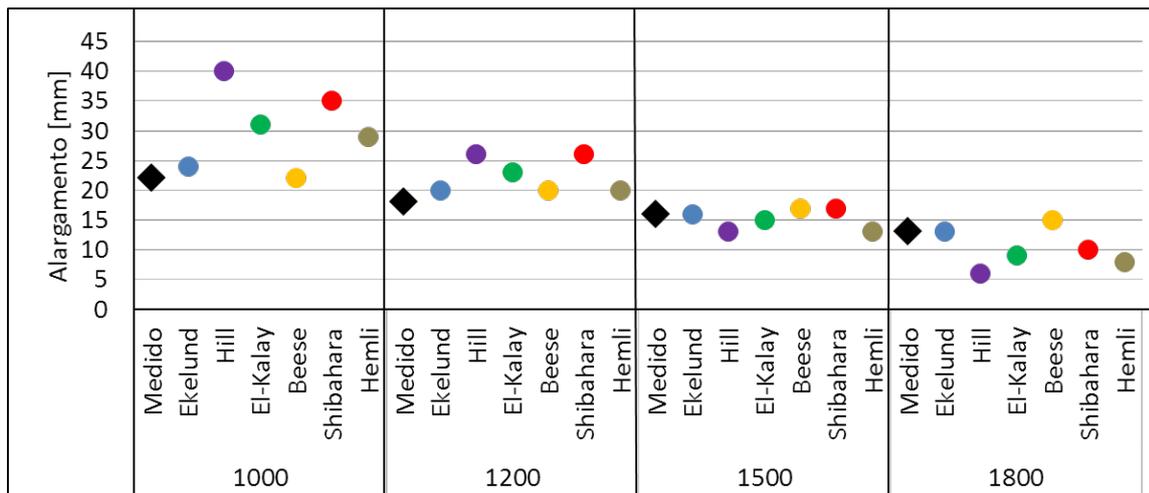


Figura 5. Comparação entre alargamento medido com calculados pelos seis modelos estudados nesse trabalho, para 4 diferentes larguras de produto.

Os resultados mostraram que:

- A influência da largura inicial da placa também é percebida pelos modelos estudados;
- Na menor largura (1000 mm) é a que apresentou maior discrepância, em milímetros, entre os valores calculados pelos modelos
- Os modelos de Beese e Ekelund foram os que apresentaram melhor resultado para todas as faixas de largura

Para comparar a evolução do alargamento ao longo dos passes, foi pesquisado no software IBA, onde ficam armazenados todos os dados de processo, como os gráficos de medição de cada medidor da linha, os dados de largura de algumas peças e comparado o resultado com os modelos de Beese e Ekelund. Na Figura 6 é apresentado o resultado de uma das peças analisadas, onde estão plotados em (a) a largura de entrada, medida na entrada do forno de reaquecimento (passe 0), as larguras dos passes intermediários no desbaste (passes 2, 4, 6 e 8), e a largura final da saída do laminador (passe 13) e em (b) a escala de passe onde pode ser visualizado a espessura por passe, desde a espessura da placa 250 mm, no passe 0, até a espessura da BQ 4,75 mm no passe 13.

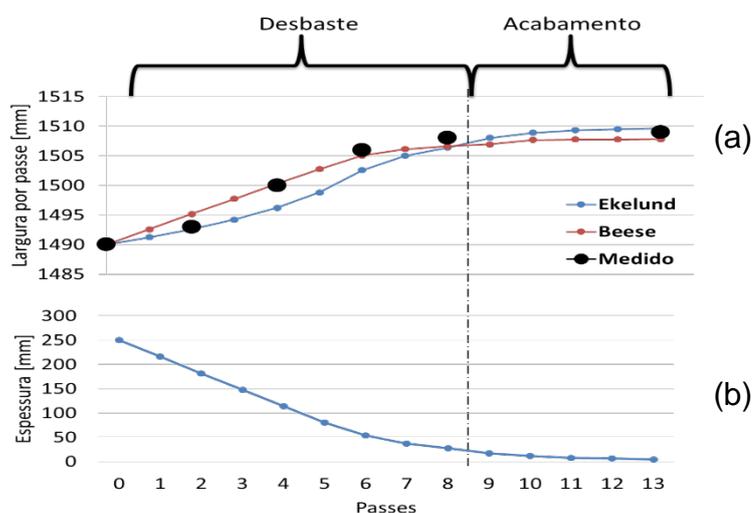


Figura 6. Comparação entre (a) evolução do alargamento prevista pelos modelos de Ekelund e Beese com os valores medidos no processo e (b) escala de passes do laminador.

Os resultados mostram que ambas equações apresentaram um perfil de alargamento compatível com o observado pelas medições, podendo as mesmas serem utilizadas para estimativa de alargamento na Linha de Tiras a Quente. É possível também observar que o alargamento aumenta significativamente na etapa de desbaste, apresentando um alargamento mínimo na etapa de acabamento, pois é diretamente afetado pela redução absoluta (Δh) no passe.

Para analisar o efeito da escala de passes, foram selecionadas no banco de dados, placas de aço SAE1012 na dimensão inicial 250x1496 mm e 220x1496 mm laminadas para a espessura de 4,75 mm. A escala de passe dessas peças foram utilizadas para simulação com os modelos de Beese e Ekelund. Na Figura 7 é apresentado o resultado de duas peças analisadas, uma obtida a partir de placa de 220 mm de espessura e a outra de 250 mm de espessura, onde estão plotados a largura de entrada, medida na entrada do forno de reaquecimento (passe 0), as larguras final de desbaste (passes 8), e a largura final da saída do laminador (passe 13) e a evolução da largura nos passes obtidas pelas simulação.

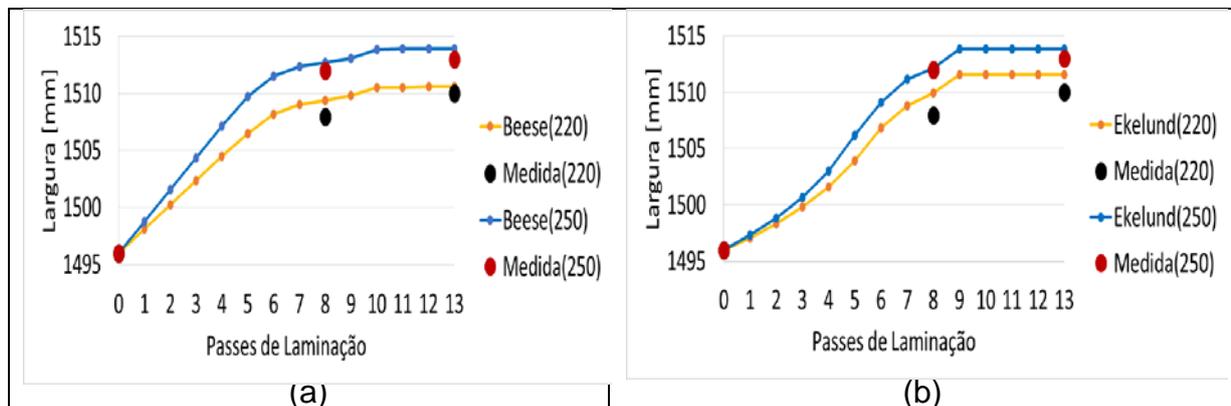


Figura 7. Comparação entre a evolução do alargamento teórico, a partir dos modelos (a) Beese e (b) Ekelund, e real, para laminação de placas de 220 e 250 mm de espessura de aço SAE1012 até a espessura final de 4,75 mm.

A diferença entre os valores medidos e os calculados apresentado na Figura 7, foram de no máximo 2 mm, demonstrando uma boa precisão do modelo. O resultado também mostra que ambos os modelos previram o aumento do alargamento final em consequência ao aumento da redução absoluta devido a maior espessura inicial da placa.

Com o estudo do alargamento foi possível ajustar as receitas de placas para atender ao produto final, bobinas, dentro das especificações dos clientes. A Figura 8 apresenta dois exemplos das faixas de largura de placa que foram ajustadas para produtos de largura nominal 1000 e 1800 mm, comparando a faixa anterior (A) e a faixa ajustada (B). Os limites inferiores e superiores das faixas de largura correspondem à tolerância de variação de largura garantida pela etapa de lingotamento (+/-12 mm).

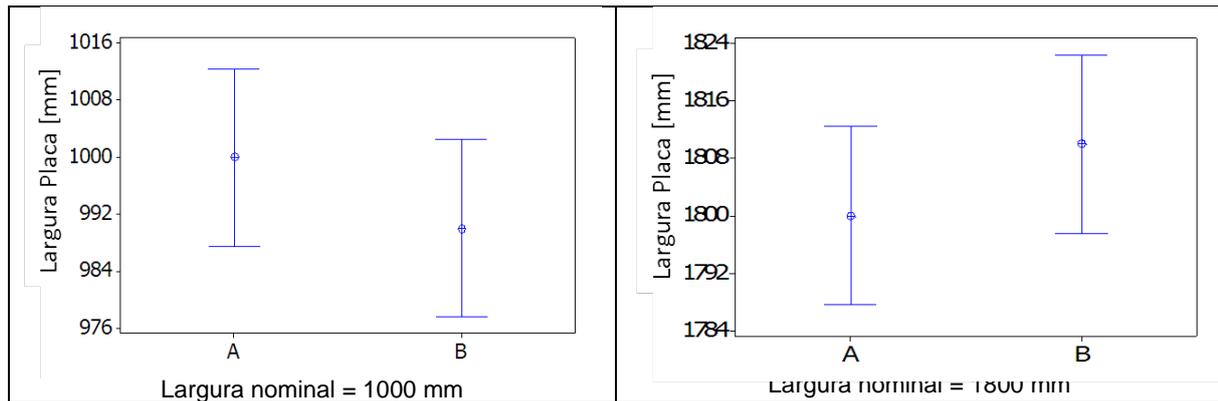


Figura 8. Comparação entre as receitas de placas para produtos de largura nominal 1000 mme 1800 mm, antes (A) e após ajuste (B)

Os gráficos da Figura 8 mostram que, para largura nominal menor de produto (1000 mm), pede-se uma placa com largura menor do que 1000 mm, devido maior alargamento no processo conforme já apresentado, e, para largura nominal maior de produto (1800 mm) pede-se uma placa com largura maior do que 1800 mm, devido menor alargamento. Após ajuste das receitas de placas de A para B melhorou o atendimento de produto dentro das especificações (LI=limite inferior e LS = limite superior), conforme apresentado na Figura 9, diminuindo os desvios de bobinas com largura abaixo do limite inferior e necessidade de retrabalho com aparado de bordas em bobinas com largura acima da faixa superior.

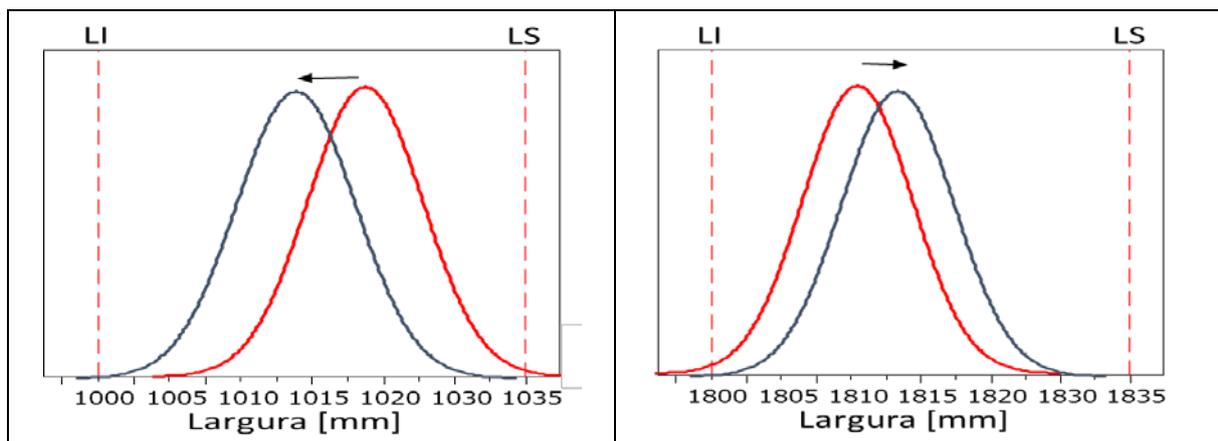


Figura 9. Resultado da distribuição de largura de produto em função do ajuste da receita de placa, sendo a curruva após ajuste em azul e curva anterior ao ajuste em vermelho.

3 CONCLUSÃO

Todos os modelos mostraram a grande influência da largura inicial no alargamento total do produto, indicando que quanto menor a largura maior o alargamento durante a laminação. Foi observado também que a maior parte do alargamento ocorre no desbaste, em consequência das grandes reduções absolutas de espessura nessa etapa.

Os modelos de Ekelund e Besse foram os que apresentaram os melhores resultados para todas as faixas de largura analisados e também mostraram uma boa previsibilidade do alargamento durante os passes de laminação. A utilização de modelos para cálculo de alargamento tem contribuído no planejamento de receitas de larguras máximas e mínimas de placas para atendimento às tolerâncias finais do produto.

REFERÊNCIAS

- 1 Barbosa. Ronaldo, Introdução à metalurgia física do tratamento termomecânico e aplicações a processos industriais
- 2 Souza, A. L.; Reis, E.G.; Silveira, J. H. D.; Pereira, M. M.; Modelos Matemáticos da Nova Linha de Tiras a Quente da Gerdau, 50º Seminário de Laminação, ABM, 2013.
- 3 Vladimir B. Ginzburg, Rolling Mill Technology Series, Volume 3, Width Change of Flat Rolled Products;
- 4 Steel Rolling Technologies Handbook, NIIR Board of Consultants & Engineers, 2n Edition, Asia Pacific Business Press Inc, 2016.
- 5 Schaeffer Lírio, Milanez Alexandre, Alargamento em Laminação a Quente, Idtm.