

INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO CILINDRO NO ALARGAMENTO DE BARRAS CHATAS NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO ¹

Ricardo Luis Bento ²
Paula Luíza Pelucio Silva ³
Jose Felipe Dias ⁴

Resumo

Demonstra-se a influência do diâmetro dos cilindros no alargamento de barras chatas e nova proposta de modelamento matemático que calcule esse fenômeno dentro das dimensões aplicáveis à empresa através da pesquisa experimental.

Palavras-chave: Laminação; Diâmetro do cilindro; Alargamento; Barra chata.

INFLUENCE OF DIAMETER OF ROLL IN THE SPREAD OF FLAT BARS IN THE HOT ROLLING MILL PROCESS

Abstract

The work shows the influence of the diameter of roll in the spread of flat bars and proposed a new mathematical model that calculates the phenomenon of enlargement within the dimensions applicable to a company through experimental research.

Key words: Rolling mill; Diameter of roll; Spread; Flat bar.

¹ *Contribuição técnica ao 47º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 26 a 29 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.*

² *Administrador, Mestre Engenharia de Produção - ArcelorMittal S/A – Itaúna/MG*

³ *Engenheira de Produção - ArcelorMittal S/A – Itaúna/MG*

⁴ *Professor, Doutor, Engenheiro Ind. Mecânico - Universidade de Itaúna, Faculdade de Engenharia*

1 INTRODUÇÃO

O aço, com sua extensa gama de aplicação, tem um papel importante no contexto da economia globalizada. As empresas deste nicho de negócios precisam ser competitivas e estarem preparadas para rápidas tomadas de decisão em caso de variações expressivas em seus indicadores de desempenho.

O trabalho apresentado envolve o setor produtivo de laminação da empresa Arcelormittal Itaúna, com premissas que cobrem desde o planejamento e a execução dos câmbios (*setup*), acertos de bitola (posta em marcha), segurança e qualidade, com redução de perdas metálicas e temporais.

Inseridos neste contexto, a proposta deste estudo centra-se na obtenção de um modelo matemático capaz de prever a influência do diâmetro dos cilindros no fenômeno de alargamento de barras, específico para a planta estudada.

No processo de laminação, após cada campanha, os cilindros de laminação utilizados no processo produtivo são retificados com o intuito de se manter uma qualidade superficial dentro de padrões internos, logo seu diâmetro é alterado. Na retomada de produção após câmbios, observou-se uma variação do alargamento no produto acabado, sendo necessários constantes ajustes nas gaiolas de laminação para a obtenção de uma produção de barras dentro dos padrões aceitáveis.

O fenômeno do alargamento, ilustrado na Figura 1, pode ser considerado um dos mais complexos e importantes fatores a ser levado em consideração no processo de laminação a quente de não planos, sendo calculado pela diferença entre a largura final pela inicial, conforme demonstra a Equação 1.

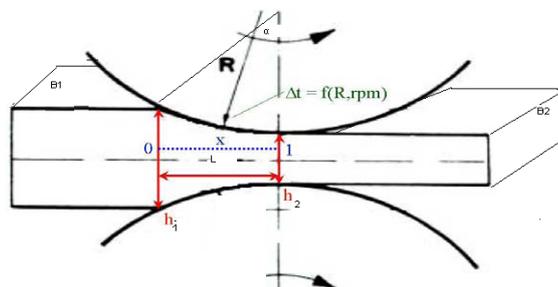


Figura 1: Esquemática do fenômeno de alargamento.⁽¹⁾

$$\Delta b = b_2 - b_1 \quad (1)$$

Onde,

Δb = Alargamento;

b_1 = Largura Inicial da Barra;

b_2 = Largura Final da Barra;

As primeiras considerações acerca dos fatores que afetam o alargamento eram simples e variadas e isto é refletido na literatura especializada existente sobre a questão. As equações utilizadas são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Modelamentos matemáticos disponíveis em literatura técnica

Autores das equações e referências	Equações de previsão do alargamento
Geuze apud Bueno ⁽²⁾	$\Delta b = k(h_2 - h_1) = k\Delta h$ (2) Onde: k = 0,35 para aço estrutural k = 0,48 para aço soldável
E. M. Scheld apud Bueno ⁽²⁾	$\Delta b = \Delta h \times L \times \left(\frac{\text{sen} \alpha}{h_1} \right)$ (3)
W. Tafel E H. Sedlazeck apud Bueno ⁽²⁾	$K = \frac{\Delta b}{\Delta h} \times 100\% = \frac{c}{6} \sqrt{\frac{R_t}{h_1}} \times 100\%$ (4) Onde: C = constante (depende da geometria do canal e varia de 0,6 a 3,5) R _t = raio de trabalho (calculado em função da geometria do canal)
Siebel apud Bueno ⁽²⁾	$\Delta b = C \times L \times \frac{\Delta h}{h_1} = C \times \sqrt{R \times \Delta h} \times \frac{\Delta h}{h_1}$ (5) Onde: R = raio de trabalho C = 0,35 para temperaturas acima de 1000°C C = 0,35 ~ 0,40 para temperatura abaixo de 1000°C
S. Ekelund apud Bueno ⁽²⁾	$\frac{1}{2}(b_2^2 - b_1^2) = 4m\sqrt{R \times \Delta h} \times \Delta h - 2m(h_1 - h_2) \times \sqrt{R \times \Delta h} \times \ln \frac{b_2}{b_1}$ (6) Onde: $m = (1,6\mu \times \sqrt{R \times \Delta h} - 1,2\Delta h) \times \frac{1}{h_1 + h_2}$ μ = 1,05 - 0,0005T para cilindros de aço e μ = 0,8 (1,05 - 0,0005T) para cilindros de ferro coquilhado
Wusatowski, Z Zygmunt ⁽³⁾	$\beta = b_f/b_o = (h_f/h_o)^{\Lambda((-10)^{\Lambda(-1,269x(ho/D)^{\Lambda 0,56x(bo/ho)})}}$ (7) Onde: b _f = largura final b _o = largura inicial

Legenda: L = comprimento do arco de contato; h₁ = altura inicial; h₂ = altura final; Δh = variação de altura; T = temperatura da barra em °C

As equações de previsão de alargamento disponíveis na literatura técnica não apresentaram resultados dentro de tolerâncias aceitáveis, promovendo impacto negativo tanto no rendimento metálico quanto na utilização da planta da usina. Justificando a realização de uma pesquisa experimental para obter uma equação capaz de prever a influência do diâmetro do cilindros no fenômeno de alargamento de barras chatas laminadas à quente, que representam 29% do mix produtivo da planta estudada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi constituído de quatro testes, resumidos na Figura 2, onde 50% das atividades foram realizadas em linha alternativa de testes, o que disponibilizou o laminador para seu fluxo normal e contínuo de produção. O restante dos testes foi realizado na própria linha de produção.

Cada passo macro contou com um objetivo específico com o intuito de reduzir erros tanto do planejamento quanto na execução. Os testes 1 (tipo piloto) e o 2 (tipo *screen experiment*) simularam o processo produtivo. Desta forma, foi possível avaliar o procedimento, bem como detectar influências de variáveis não incluídas nos modelos listados no Quadro 1.

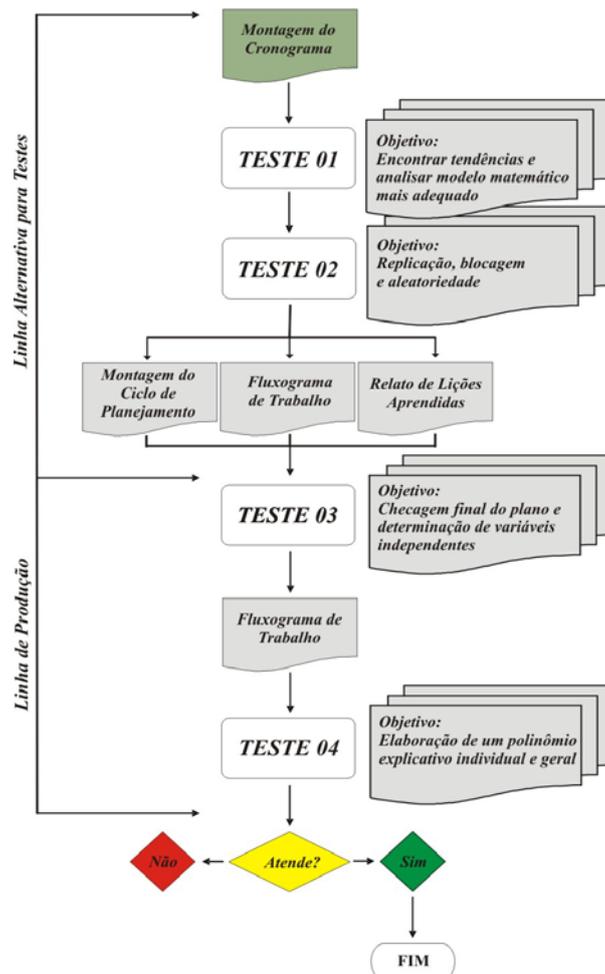


Figura 2: Passos macro do Projeto.

No teste 3, aplicou-se a técnica estatística Planejamento de Experimentos. Adotou-se para tanto a experimentação fatorial 2^3 , limitando a linha de testes a 3 fatores e 2 níveis, além da inclusão de 1 ponto central para cada uma das 5 repetições executadas, totalizando 45 amostras.

O teste 4 (experimento final) ao contrário do teste 3, foi realizado utilizando amostras extraídas da própria linha de produção. Para cada tarugo laminado de aproximadamente 330 kg, foram retiradas 4 amostras de 500 mm de comprimento e selecionadas conforme cortes centrais de cada peça a fim de corrigir possíveis imperfeições na cabeça e cauda de cada tarugo, adicionando uma maior

confiabilidade nos resultados e possibilitando obter um modelo matemático mais próximo da realidade produtiva da usina, sendo coletadas um total de 180 amostras. Os equações de previsão do alargamento foram obtidas utilizando-se modelos de regressão simples e múltipla.

Uma apresentação detalhada do procedimento experimental é apresentada por Bento.⁽⁴⁾

3 RESULTADOS

As fórmulas usualmente adotadas para previsão do alargamento nem sempre se aproximam do valor real encontrado. Esta conclusão era um fato já levantado em históricos da empresa, mas que foi consumado ao comparar o alargamento obtido *versus* calculados através das equações resumidas no Quadro 1.

Como pode ser observado na Tabela 1, 70% dos cálculos extrapolam as tolerâncias adotadas pela empresa (+/- 0,3mm), mais uma vez justificando a necessidade de se encontrar um modelo matemático que atenda a realidade da empresa.

Tabela 1: Alargamento obtido *versus* teórico

Amostra n°	Alargamento (Δb) em milímetro (mm)							diâmetro do cilindro (mm)
	Obtido	EKELUND, Eq. 06	GEUZE Eq. 01	SHELD Eq. 03	TAFEL Eq. 04	SIEBEL Eq. 02	WUSAT. Eq. 07	
1	2,15	0,88	1,34	0,97	2,30	2,58	4,82	324
2	2,11	2,51	1,25	0,86	2,17	2,39	4,52	324
3	2,22	0,89	1,21	0,81	2,10	2,60	4,35	324
4	2,16	2,66	1,21	0,82	2,11	2,30	4,39	324
5	1,93	1,04	1,23	0,83	2,12	2,31	4,40	324
6	2,12	1,43	1,21	0,81	2,10	2,27	4,34	324
7	2,21	1,23	1,20	0,79	2,08	2,23	4,29	324
8	2,36	2,62	1,29	0,89	2,21	2,44	4,61	324
9	2,44	2,69	1,21	0,81	2,10	2,27	4,36	324
10	2,08	2,67	1,30	0,92	2,25	2,51	4,71	324

Durante experimentações, algumas suposições acerca de Siebel (eq. 5) e Ekelund (eq. 6) puderam ser comparadas, sendo as previsões de alargamento oriundas da equação de Siebel mais coerente com os experimentos que as propostas por Ekelund.

A fórmula de Siebel foi adaptada à realidade da usina, sendo sua constante recalculada ($C=0,32$) de forma que os resultados calculados se localizariam entre os limites de especificação adotados pela empresa (+/- 0,3mm).

Os resultados referentes a experimentação DOE e regressões lineares, últimos passos macro do estudo em linha de produção passaram por análises residuais antes do processamento dos dados e os *outliers* encontrados foram descartados e analisados pontualmente por se tratarem de interferências externas.

Foram realizadas regressões lineares simples e múltiplas para as 3 classes de produtos estudadas (BCH 1" x 3/16", BCH 1" x 1/4" e BCH 1 1/4" x 3/16") e 3 polinômios explicativos individuais foram propostos, entendendo-se b como alargamento e x_1 como diâmetro dos cilindros (Quadro 2).

Quadro 2: Polinômios explicativos gerados através da regressão linear simples.

Bitola	Polinômio Explicativo obtido pela Regressão Linear Simples	R ²
BCH 1" x 3/16"	$b = 23,3506 + 0,007741 x_1$	91,4%
BCH 1" x 1/4"	$b = 24,3189 + 0,00339 x_1$	84,5%
BCH 1 1/4" x 3/16"	$b = 29,0212 + 0,00816 x_1$	90,6%

Com incidência de erro experimental ($\alpha=0,05$), antes de virem a ser validadas certamente após a realização da regressão múltipla, houve a geração de uma equação explicativa (Eq. 8) e constatou-se variações menores que as estipuladas em meta do projeto (Figura 3).

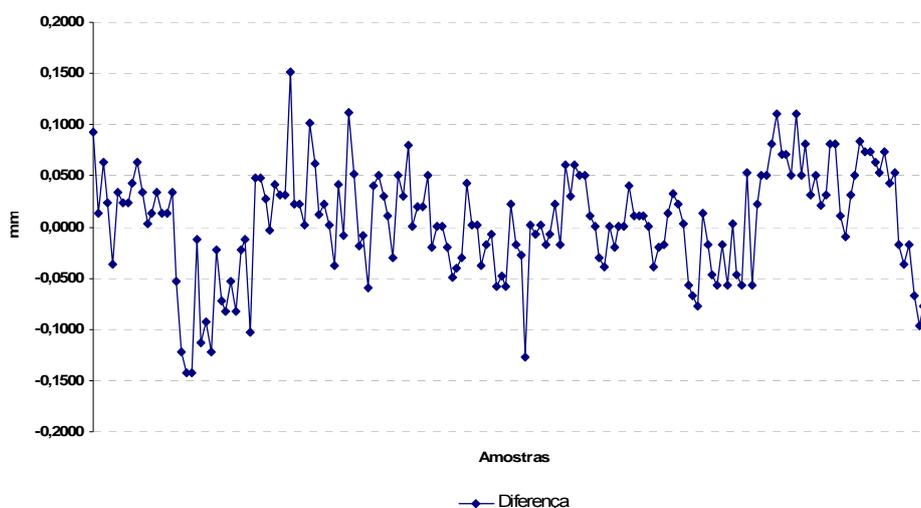


Figura 3- Variação dos resultados (%) com a utilização dos polinômios individuais em relação ao alargamento obtido.

$$b = 50,7 + 0,0122\varnothing + 28,4 \Delta h + 12,9 h_1 \quad (8)$$

onde:

\varnothing = diâmetro do cilindro

Δh = variação (delta) de altura

h_1 = altura inicial

4 DISCUSSÃO

Com o polinômio gerado através da regressão linear múltipla, 97,77% das amostras tiveram seus resultados num patamar de variação do alargamento experimental *versus* teórico menor que 5% e teor explicativo (R^2) de 98,6%, ou seja, a consideração do diâmetro dos cilindros, variação de altura e altura inicial explicam consideravelmente o fenômeno de alargamento, não descartando outras como temperatura, atrito, geometria dos canais, dentre outras.

Além da geração de um novo modelamento matemático, houve a necessidade de validação destes modelos. Ambos contaram com uma amostra de 100 elementos subdivida para as três bitolas estudadas.

O novo modelo matemático justapõe menores variações ao cálculo de alargamento quando comparado aos seis estudiosos levantados em revisão e podem ser comparados conforme demonstrado em Figura 4.

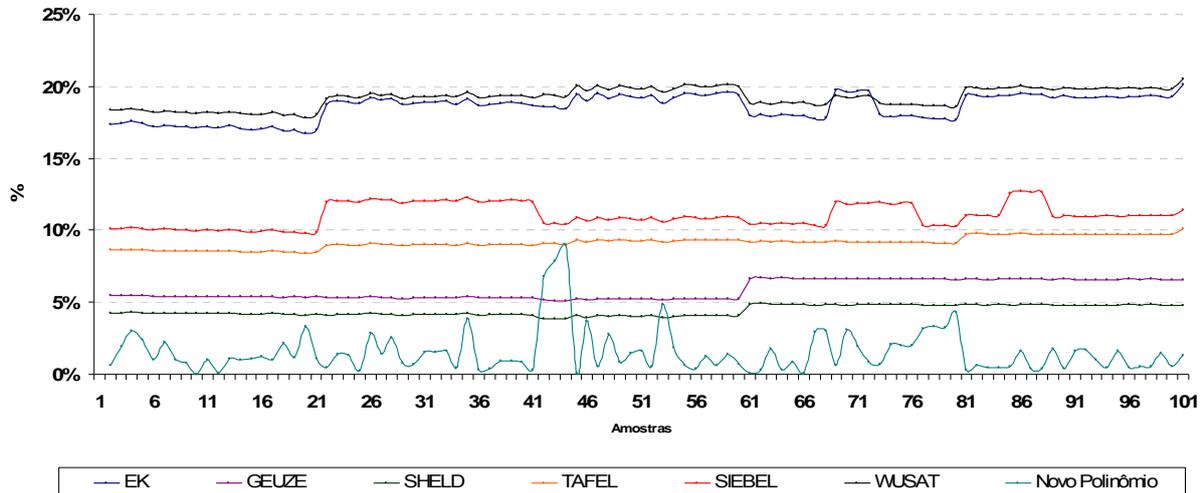


Figura 4: Comparação da Variação (%) do alargamento obtido com seis equações e previsão e com o novo polinômio gerado

Utilizando-se a mesma amostragem, houve também a validação dos polinômios individuais e um novo gráfico foi gerado para promover a demonstração da aderência dos resultados teóricos acerca dos reais, melhor demonstrados na Figura 5.

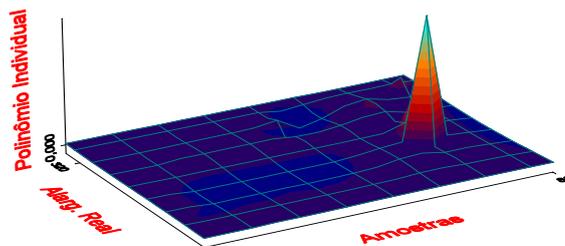


Figura 5: Variação do alargamento (mm) real versus calculados pelos polinômios individuais (regressão linear simples).

Em linhas gerais, a validação do projeto apresentou indicações relevantes de atendimento aos padrões internos da empresa, reduções de custos e temporais.

5 CONCLUSÃO

A criação de novos modelos matemáticos que explicam o fenômeno de alargamento permitiu a empresa prever o alargamento em função do diâmetro do cilindro utilizado em cada gaiola de laminação, possibilitando um planejamento mais certo em função de cada bitola a ser produzida.

Os erros procedentes das equações confeccionadas são presumíveis e estão dentro dos patamares aceitáveis de tolerância adotados pela empresa, sendo portanto coerentes com a proposta do estudo.

Mesmo as equações geradas a partir da regressão linear simples serem mais precisas para cada bitola, não desmerecem os resultados obtidos na equação gerada pela regressão linear múltipla, uma vez que promove erros em relação ao alargamento real obtido menores que os previstos por equações disponíveis em literatura técnica aplicável.

Com a utilização dos novos modelos matemáticos para previsão do alargamento de três bitolas da classe de produtos de barras chatas, a ArcelorMittal Itaúna conseguiu proporcionar melhorias tanto em seu rendimento metálico com uma redução de 0,55% de sucatas em relação ao ano de 2007 e 0,17% em relação a 2008, quanto no índice de utilização e perdas temporais para acertos de bitola, declinando 37 minutos e 48 segundos em relação a 2007 e 12 minutos e 46 segundos em relação a 2008.

Estes índices e valores percentuais conferem ganhos consistentes e competitivos diante as reduções de custos que automaticamente são arraigados aos mesmos e garantem o atendimento dos objetivos do projeto, sendo portanto, coerentes com a proposta inicial da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 HELMAN, H.; CETLIN, P.R.; **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. Editora Guanabara Dois, 1983.
- 2 BUENO, Aldair da Silva. **Laminação e Calibração de Produtos não Planos de Aço**. Capítulo 4: Projeto de Canais de Barras Redonda, Quadrada, Sextavada e Retangulares, p. 115-133. 2004.
- 3 ZYGMUNT, Wusatowski, D.Sc. **Fundamentals of Rolling**. Capítulo 6, p. 477-491. Associação Brasileira de Metais - Curso de Laminação. ABM,SP., 1978.
- 4 BENTO, Ricardo Luis. **Influência do Diâmetro do Cilindro no Alargamento de Barras Chatas no Processo de Laminação**. 2009. Tese (Mestrado em Gestão da Produção e da Informação) Universidade de Itaúna, MG.