

Alargamento em laminação a quente

Este trabalho compara quatro modelos teóricos de alargamento com processo real realizado em uma laminadora trio de barras chatas laminadas a quente

Lírio Schaeffer (*) e Alexandre Milanez (**)

► Todos os modelos matemáticos encontrados nas literaturas técnicas sobre alargamento em laminadores a quente são baseados em dados coletados em experiências controladas, com laminadoras experimentais.

Para utilizar estes cálculos em laminadores na indústria, necessita-se avaliar os resultados entre teoria e prática e criar uma relação entre eles, onde as variáveis do processo, suas peculiaridades são englobadas nos cálculos, a fim de se ter os melhores resultados em cálculos de alargamento, que são parâme-

tros importantes nos cálculos em calibração de cilindros. Nos cálculos teóricos, existe uma série de variáveis que influenciam no resultado final do alargamento teórico, como tipo de cilindro de laminação, refrigeração empregada, temperatura dos cilindros nos passes, dureza do cilindro, velocidade de laminação entre outros.

O objetivo deste trabalho é comparar quatro modelos teóricos de alargamento: o de Wusatowski, o de Köster, o de Siebel e o de Ekelud, com o alargamento real de uma laminadora trio de barras

chatas laminadas a quente na Metalúrgica Spillere Ltda.

Com os dados teóricos e os dados reais pode-se comparar e visualizar qual dos modelos matemáticos se enquadra melhor no processo de laminação em questão.

1 . MODELOS DE CÁLCULOS

1.1 CONDIÇÕES GERAIS

O alargamento no processo de laminação é um dos mais importantes e complexos fatores de deformação no

Lista de Símbolos

R [mm] =	Raio do Cilindro de laminação;	w [-] =	Fator de correção da fórmula de Wusatowski que corrige a deformação;	Δh [mm] =	Varição de altura na compressão pelo laminador : $h_1 - h_0$; A
h_0 [mm] =	Altura antes da barra passar no cilindro;	β [-] =	Relação de deformação de Wusatowski;	Δb [mm] =	Varição da largura na deformação pela laminação : $b_1 - b_0$;
b_0 [mm] =	Largura antes da barra passar no cilindro;	φ_b [-] =	Deformação verdadeira da largura;	C [-] =	Coefficiente de correção da fórmula de Siebel para a temperatura de laminação;
h_1 [mm] =	Altura após da barra passar no cilindro;	φ_h [-] =	Deformação verdadeira da altura;	m [-] =	Fator que corrige a formula de Ekelud para ângulo de entrada da barra no cilindro;
b_1 [mm] =	Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro;	$C_{b\mu}$ [-] =	Correção da fórmula de Köster para temperatura;	μ [-] =	Fator que corrige a fórmula de Ekelud para o material de construção do cilindro de laminação;
ε_w [-] =	Fator da fórmula de Wusatowski que leva em consideração ângulo de entrada da barra no cilindro de laminação;	T_{ref} [K] =	Temperatura de referência : 1000 K;	U [°C] =	Temperatura da barra na laminação;
		$T_{Laminação}$ [K] =	Temperatura de laminação;		
		l_d [mm] =	Fator da fórmula de Köster que leva em consideração ângulo de entrada da barra no cilindro de laminação;		

processo de calibração de um perfil laminado. Quando o metal passa por dois cilindros paralelos, existe um aumento da largura da barra. Este fenômeno chama-se de alargamento na laminação.

Para um processo de laminação ideal, o efeito da redução de altura seria transmitido completamente para o comprimento da barra laminada e a largura não sofreria alterações dimensionais, ou seja, alargamento seria igual a zero. Como existem vários fatores que influenciam no processo, este alargamento existe e a sua intensidade varia, dependendo do perfil geométrico do canal de laminação, do atrito do cilindro de laminação com o material laminado, do tipo de material laminado, da temperatura de laminação, do diâmetro do cilindro, da velocidade de laminação e outros.

Neste trabalho, utiliza-se os métodos de cálculos teóricos para alargamento em laminação pelo método de Wusatowski /1/, de Köster /2/, de Siebel /3/ e de Ekelud /4/.

Na Figura 1, está representado o alargamento, que se dá quando o material

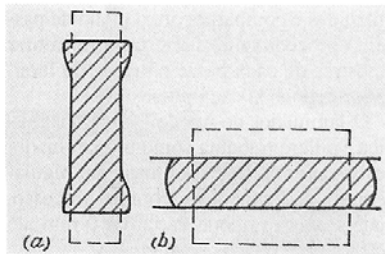


Figura 1 - Alargamento da barra de cilindro /1/

- a) passe em pé
- b) passe deitado

passa pelo cilindro de laminação, sofrendo deformação em altura e, por consequência, redução de área da seção transversal do material laminado.

1.2 MODELOS TEÓRICOS DE CÁLCULO DE ALARGAMENTO

Para se prever o alargamento que a barra sofre ao passar pelo cilindro de laminação, muitos estudiosos do assunto desenvolveram - por meio de experimentos - fórmulas matemáticas. A seguir, os autores e as fórmulas utilizadas para este experimento.

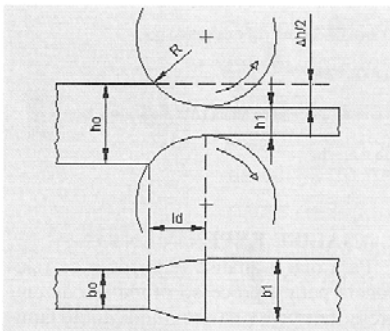


Figura 2 - Croqui ilustrativo das variáveis utilizadas nos cálculos

1.2.1 Modelo de Wusatowski /1/

O alargamento por Wusatowski é representada pela equação:

$$\beta = b_1/b_0 = (h_1/h_0)^{-w}$$

onde

$$-w = -10^{(-1,269 * \epsilon_w * \exp(0,556 * t_0/h_0))}$$

$$\epsilon_w = h_0/2 * R$$

1.2.2 Modelo de Köster /2/

O alargamento por Köster é representado pela equação:

$$\phi_b/\phi_h = -e^{C_{\text{ba}} * t_0/h_0}$$

onde

$$C_{\text{ba}} = T_{\text{ref}}/T_{\text{laminação}}$$

$$T_{\text{ref}} = 1000 \text{ K}$$

$$T_{\text{laminação}} = \text{Temperatura expressa em Kelvin}$$

e

O arco de contato (l_d) é calculado por:

$$l_d = (R * \Delta h)^{1/2}$$

Varição absoluta da largura (Δh) é calculada por:

$$\Delta h = h_0 - h_1$$

A deformação verdadeira da largura (ϕ_b) é calculada por:

$$\phi_b = \ln(b_1/b_0)$$

A deformação verdadeira da altura (ϕ_h) é calculada por:

$$\phi_h = \ln(h_1/h_0)$$

1.2.3 Modelo de Siebel /3/

O alargamento por Siebel é representada pela equação com resultado expres-

$$\Delta b = C * l_d * \Delta h/h_0$$

onde:

$$C = 0,35 \text{ para aço de construção, à temperatura de } 1000 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

e

Varição absoluta da largura (Δb) é calculada por:

$$\Delta b = b_1 - b_0$$

Varição absoluta da altura (Δh) é calculada por:

$$\Delta h = h_1 - h_0$$

O arco de contato (l_d) é calculado por:

$$l_d = (R * \Delta h)^{1/2}$$

so por variação absoluta da largura:

1.2.4 Modelo de Ekelud /4/

O alargamento por Ekelud é representada pela equação:

$$b_1^2 - b_0^2 = 8 * m * l_d * \Delta h - 4 * m * (h_0 + h_1) * l_d * \ln(b_1/b_0)$$

onde

$$m = (1,6 * \mu * l_d - 1,2 * \Delta h) / (b_0 + b_1)$$

$$\mu = 0,8 * (1,05 - 0,0005 * v) \text{ - para cilindros de ferro fundido}$$

v = temperatura da barra laminada - °C

e

O arco de contato (l_d) é calculado por:

$$l_d = (R * \Delta h)^{1/2}$$

Variação absoluta da altura (Δh) é calculada por:

$$\Delta h = h_1 - h_0$$

2. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para que a análise feita fosse de relevância para o processo produtivo da empresa, retirou-se da programação de laminação o perfil de barra de maior produção em tonelagem/mês e seu respectivo plano de passes para o experimento. Após pesquisa no sistema de PCP, verificou-se que a bitola de maior produção era de perfil chato de 16 x 130 mm.

O procedimento de laminação deste perfil se constitui em aberturas ou espaçamentos entre cilindros de laminação que se chama de luz de laminação. Outro aspecto que o procedimento traz é o material de entrada do laminador. Neste caso o procedimento pede material de bitola 130 x 130 mm.

Os dados de produção como a luz e a bitola do material de entrada foram deduzidos após muitos pedidos feitos neste laminador. Segundo os operadores de laminação, chegou-se nestes dados através de muitas tentativas onde o equipamento teve uma maior produtividade sem desligar por excesso de carga. Na realidade o plano de passe foi feito sem nenhum cálculo, somente tendo como parâmetro e desligamento ou não do equipamento.

A Tabela 1 mostra o plano de passe utilizado pelos operadores de laminação, onde estão somente descritos a luz de laminação para cada passe.

	Passes										
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
Luz de laminação	110,2	87,0	70,4	54,6	124,8	42,4	32,0	24,3	121,8	19,3	16,5

Tabela 1 - Plano de passe do perfil laminado 16 x 130 mm

Para este experimento, utilizou-se 4 peças de palanquilha de bitola 130 x 130 mm por 500 mm de comprimento de propriedades químicas segundo a norma ASTM A36 /5/ e de composição química segundo a Tabela 2.

% C	0,12
% Mn	0,67
% Si	0,158
% P	0,032
% S	0,039
% Cu	0,16
% Cr	0,06

Tabela 2 - Composição química do aço utilizado no experimento (retirado do certificado de Qualidade da Usina)

A palanquilha neste caso é o material de entrada como estava descrito no procedimento de laminação. A intenção é verificar o alargamento ocorrido, reduções utilizadas e comparar com o plano de passe. O procedimento neste caso foi retirar amostras de cada passe na saída do laminador depois de cada passe.

O laminador de número 4 da Metalúrgica Spillere trabalha como um laminador desbastador do tipo trio, mas com regulação de luz dinâmica com o processo, onde a abertura pode variar de 0 mm até 160 mm em poucos segundos.

O cilindro de laminação possui canais cantilhadores (Figura 3 e Figura 4), onde se pode acertar a largura da barra laminada. A profundidade dos canais são de 22 e 13 mm, para os passes de número 5 e 9,

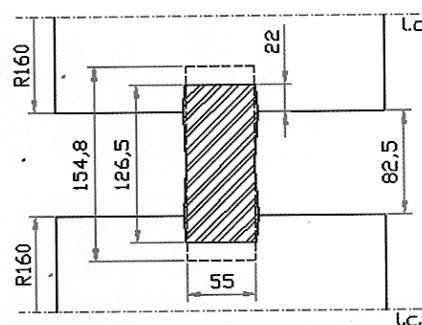


Figura 3 - Modelo do canal do passe 5

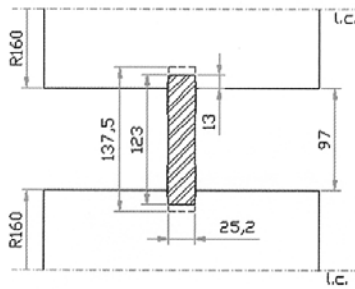


Figura 4 - Modelo do canal do passe 9

respectivamente. No restante dos passes foi utilizado a mesa lisa do cilindro.

No início do experimento colocou-se as palanquilhas dentro do forno de aquecimento do laminador de número 4 da Metalúrgica Spillere e aqueceu-se até a temperatura de 1.186°C. Esta temperatura foi medida com o auxílio de um controlador de temperatura do modelo 6150 da empresa West Equipamentos de Controle e de um termopar do tipo S com cobertura de cerâmica.

Com a equalização da temperatura

das barras de amostra com o forno de aquecimento, deu-se início ao processo de laminação.

O processo para a laminação das amostras foi dividido em quatro etapas:

1. Retirar a barra do forno;
2. Introduzir a barra no laminador com redução conforme procedimento de laminação descrito na Tabela 1;
3. Retirada de um pedaço da barra com a ajuda de um maçarico na saída do laminador após cada passe realizado;
4. Colocar a barra novamente no laminador para uma outra passe.

A primeira barra laminada gerou 4 amostras que foram catalogadas como 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4. Estas quatro amostras representam cada uma os passes

realizados.

O mesmo procedimento de laminação foi seguido para a segunda barra, somente coletando as amostras 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4. Como estas amostras representam os passes de 5 a 8, dos primeiros quatro passes não se retirou amostras.

Laminou-se então a terceira barra e coletou-se as amostras de número 3.1, 3.2, 3.3, e 3.4.

A quarta barra gerou as amostras de número 4.1, 4.2 e 4.3.

No total foram retirados 11 amostras que representam os 11 passes. Com as amostras em mãos, pôde-se analisar o resultado dos passes, seus defeitos, suas dimensões e comparar com o resultado dos modelos matemáticos. O resultado dimensional das amostras está descrito na Tabela 3.

		Amostra por passe										
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
h		110,2	87	70,4	55	59	44,5	32	25,2	26,1	19,5	17
b		136,2	146,2	151,5	154,8	126,5	132	137,1	139,4	123	130	130,5

Tabela 3 - Dimensão das amostras por passe

Depois da coleta das medidas das amostras, iniciou-se processo de cálculo teórico com os modelos matemáticos propostos neste trabalho. Como existiu uma diferença entre o valor de luz de laminação proposto pelo procedimento e o que foi medido nas amostras, para efeito de cálculo, foi utilizado como altura ini-

cial os valores que foram medidos. Esta diferença se deu por excesso de folga no sistema de regulagem de luz de laminação do equipamento, somente detectado depois deste experimento. A Tabela 4 mostra os valores que foram utilizados para os cálculos.

		Amostra por passe										
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
h_0		130	110,2	87	70,4	154,8	59	44,5	32	139,4	26,1	19,5
h_1		110,2	87	70,4	55	126,5	44,5	32	25,2	123	19,5	17
b_0		130	136,2	146,2	151,5	55	126,5	132	137,1	25,2	123	130
b_1		136,2	146,2	151,5	154,8	59	132	137,1	139,4	26,1	130	130,5

Tabela 4 - Medidas utilizadas nos cálculos

cial os valores que foram medidos. Esta diferença se deu por excesso de folga no sistema de regulagem de luz de laminação do equipamento, somente detectado depois deste experimento. A Tabela 4 mostra os valores que foram utilizados para os cálculos.

O primeiro a ser realizado foi o cálculo

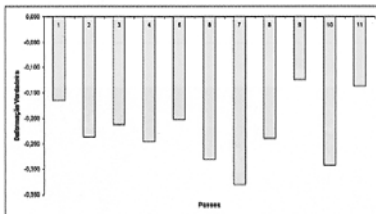


Figura 5 - Deformação Verdadeira (valores medidos)

$$Bh = \ln(h_1/h_0)$$

O resultado da redução em altura por

passe está apresentado na Figura 5.

Calcula-se então os alargamentos con-

		Valores das variáveis por passe										
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
l_d		56,3	60,9	51,5	49,6	62,5	48,2	44,7	32,9	46,2	32,5	20
Δh		19,8	23,2	16,6	15,4	28,3	14,5	12,5	6,8	16,4	6,6	2,5
E_w		0,41	0,34	0,27	0,22	0,57	0,18	0,14	0,10	0,47	0,08	0,06
-w		-0,17	-0,25	-0,42	-0,62	-0,07	-0,68	-0,89	-0,99	-0,07	-0,99	-0,99
b_1		133,7	144,3	159,8	176,6	56,3	153,1	177,2	173,6	25,2	164,4	149,1

Tabela 5 - Valores calculados pela fórmula de Wusatowski

		Valores das variáveis por passe										
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
l_d		56,3	60,9	51,5	49,6	62,5	48,2	44,7	32,9	46,2	32,5	20
Δh		19,8	23,2	16,6	15,4	28,3	14,5	12,5	6,8	16,4	6,6	2,5
ϕ_b		-0,16	-0,24	-0,21	-0,25	-0,21	-0,28	-0,33	-0,23	-0,13	-0,29	-0,14
ϕ_b		0,033	0,05	0,029	0,03	0,109	0,05	0,04	0,013	0,08	0,02	0,02
b_1		134,3	143,2	150,6	156,1	61,4	132,4	138,9	138,9	27,5	125,6	130,2

Tabela 6 - Valores calculados pela formula de Köster

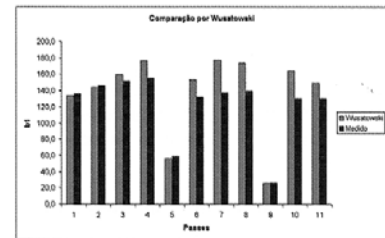


Figura 6 - Gráfico comparativo de alargamento por Wusatowski

forme os modelos matemáticos propostos neste trabalho e compara-se com o valor real medido nas amostras.

Iniciou-se os cálculos pelo modelo de Wusatowski e os valores encontrados nos cálculos estão descritos na Tabela 5.

Para os cálculos foram utilizadas os dados da Tabela 4. Comparou-se os valores de largura medido que se encontram na Tabela 4 com os valores calculados na Tabela 5 e construiu-se um gráfico comparativo, que está representado na Figura 6.

Calculou-se então o alargamento pelo modelo de Köster e os valores encontrados nos cálculos estão descritos na Tabela 6.

Para os cálculos foram utilizadas os dados da Tabela 4.

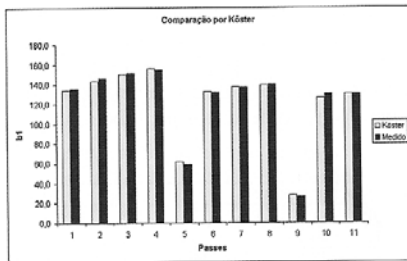


Figura 7 - Gráfico comparativo de alargamento por Köster

	Valores das variáveis por passe										
	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º
l_d	56,3	60,9	51,5	49,6	62,5	48,2	44,7	32,9	46,2	32,5	20
Δh	19,8	23,2	16,6	15,4	28,3	14,5	12,5	6,8	16,4	6,6	2,5
b_1	133	14,9	149,6	155,3	58,9	130,6	136,5	139,5	26,9	125,9	130,9

Tabela 7 - Valores calculados pela fórmula de Siebel.

Comparou-se os valores de largura medido que se encontram na Tabela 4 com os valores calculados na Tabela 6 e construiu-se um gráfico comparativo representado na Figura 7.

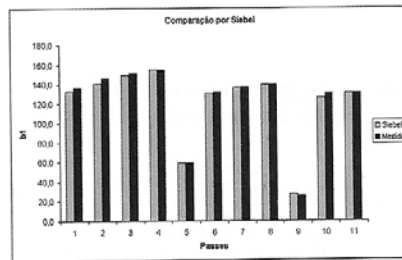


Figura 8 - Gráfico comparativo de alargamento por Siebel

Calculou-se, então, o alargamento pelo modelo de Siebel e os valores encontrados nos cálculos estão descritos na Tabela 7.

Para os cálculos foram utilizadas os

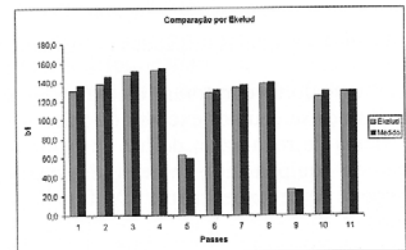


Figura 9 - Gráfico comparativo de alargamento por Ekelud

	Valores das variáveis por passe										
	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º
l_d	56,3	60,9	51,5	49,6	62,5	48,2	44,7	32,9	46,2	32,5	20
Δh	19,8	23,2	16,6	15,4	28,3	14,5	12,5	6,8	16,4	6,6	2,5
μ	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
m	3,8E-2	3,9E-2	6,5E-2	8,4E-2	0,25	0,10	0,14	0,19	3,6E-2	0,24	0,24
$b_1^2 - b_0^2$	320	420	424	490	1011	53	59	33	111	393	94
b_1	131,2	137,7	147,6	153,2	63,5	128,6	134,3	138,3	26,8	124,6	130,4

Tabela 8 - Valores calculados pela fórmula de Ekelud

dados da Tabela 4. Comparou-se os valores de largura medidos que se encontram na Tabela 4 com os valores calculados na Tabela 7 e construiu-se um gráfico com-

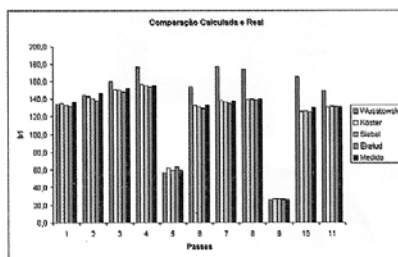


Figura 10 - Gráfico comparativo de larguras calculadas

parativo que está representado na Figura 8.

Calculou-se, então, o alargamento pelo modelo de Ekelud e os valores encontrados nos cálculos estão descritos na Tabela 8.

Para os cálculos foram utilizadas os dados da Tabela 4. Comparou-se os valores de largura medido que se encontram na Tabela 4 com os valores calculados na Tabela 8 e construiu-se um gráfico comparativo que está representado na Figura 9.

A Figura 10 mostra uma comparação entre os valores calculados da largura e o valor real medido.

A Tabela 9 mostra as diferenças entre o alargamento calculado e o que foi medido após a laminação das amostras por cada passe no laminador.

	Percentual			
	Wusatowski	Köster	Siebel	Ekelud
	1,9%	1,4%	2,4%	3,8%
	1,3%	2,1%	3,9%	6,1%
	5,2%	0,6%	1,2%	2,6%
	12,3%	0,8%	0,3%	1,1%
	5,7%	3,9%	0,0%	7,1%
	13,8%	0,3%	1,0%	2,6%
	22,6%	0,4%	0,5%	2,1%
	19,7%	0,3%	0,1%	0,8%
	2,7%	5,1%	4,2%	2,8%
	20,9%	3,5%	3,3%	4,3%
	12,5%	0,2%	0,3%	0,1%
Média	10,79%	1,69%	1,57%	3,04%
Desvio Padrão	7,56%	1,71%	1,59%	2,17%

Tabela 9 - Percentual de diferença entre o calculado e o medido

3. CONCLUSÃO

Visualizando o conjunto de dados descritos, pode-se concluir que dois modelos matemáticos para o cálculo do

alargamento tiveram um resultado que se aproximam dos dados reais deste laminador em que foram feitas as amostras. Os modelos matemáticos de Köster e de Siebel foram os que melhor representaram as distorções em alargamento, tanto em média como em desvio.

O modelo matemático de Köster se aproximou melhor do real nos passes de número um, dois, três, seis, sete e onze. O modelo de Siebel nos passes de número quatro, cinco, oito, nove e dez. Se for analisado por passes, o modelo de Köster se aproxima mais da realidade para este laminador que o modelo de Siebel, mas se for analisado uma média geral de toda a diferença percentual, o modelo de Siebel se mostrou melhor.

De maneira geral, os dois modelos apresentam boa aproximação da medida final em largura da amostra, portanto podendo ser utilizada ambos para determinação de alargamento para o laminador em questão.

O que se pode verificar é que o modelo matemático de Köster é mais complexo e leva em consideração a temperatura de laminação e o modelo matemático de Siebel é de uma simplicidade

de cálculo maior, mas leva em consideração fator do próprio cilindro de laminação com um fator de correção presente em sua formula.

A conclusão que se pode chegar neste caso é que as condições em que foram realizados os experimentos como material de cilindro, material da amostra, temperatura de laminação, laminação em mesa lisa, velocidade do laminador entre outros fatores que influenciam no alargamento do material se aproxima dos equipamento e materiais utilizados nos experimentos tanto de Köster e de Siebel, e neste caso em particular, pode-se utilizar tanto os dois modelos para determinação do cálculo de largura. ■

REFERÊNCIAS

[1] BURTSEV, K. : *Rolling practice*, Mir publishers, Moscow, 1973.

[2] SCHAEFFER, L. : *Conformação Mecânica*, Imprensa Livre, Porto Alegre, 2004.

[3] PERCY LUND, HUMPHRIES & COMPANY LIMITED. : *Roll Pass Design*, Sheffield, England, 1960.

[4] FERRAZ, M. J. de O. : *Calibração de Produtos Não Planos*, ABM, São Paulo, 1977.

[5] ASTM A36/A 36M Standard Specification for Carbon Structural Steel: *Annual Book of ASTM Standards*, Conshohocken, US, March 2005.

(*)Lírio Schaeffer é professor doutor engenheiro da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Transformação Mecânica, Porto Alegre

(**)Alexandre Milanez é engenheiro mecânico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Transformação Mecânica, Porto Alegre