

ESTUDOS COMPARATIVOS DOS MÉTODOS DE CÁLCULO COM RESULTADO EXPERIMENTAL DO ALARGAMENTO NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO A QUENTE DO AÇO AISI1020*

Matheus Fortes Stiborski¹
Luana De Lucca de Costa²
André Rosiak³
Lucas Antônio Gonçalves³
Kíssia Carolina Bertoluci Cardoso³
Rodrigo Prestes Limberger⁴
Lírio Schaeffer⁵

Resumo

Este estudo descreve a aplicação de três métodos de cálculos teóricos pelos modelos matemáticos de Tafel e Sedlaczek, Siebel e Köster, com o objetivo de calcular o alargamento na laminação a quente de barras em aço AISI 1020 em um laminador tipo duo e definir quais dos modelos de alargamento se aproxima mais dos resultados obtidos experimentalmente. Foram utilizadas amostras com dimensões iniciais de largura (b_0), 37,7 mm, altura (h_0), 15,7 mm, e comprimento (l_0), 300,00 mm onde se ajustou a luz dos cilindros para que fossem obtidas reduções aproximadas de 15% e 20% em altura. Os resultados obtidos indicam que o modelo de Siebel apresenta melhores resultados comparado com os valores experimentais.

Palavras-chave: Laminação a quente; Modelos matemáticos.

COMPARISON OF EXPANSION BETWEEN MEASURED EXPERIMENTALLY AND MATHEMATICAL MODELS FOR AISI 1020 HOT ROLLING PROCESS

Abstract

This study describes the application of three mathematical models by Tafel, Sedlaczek, Siebel and Köster models to find the expansion in the hot rolling AISI 1020 steel bars in a Duo rolling mill and explain which of these models is closer to the experimental results. The samples with initial dimensions of a width (b_0), 37.7 mm, height (h_0), 15.7 mm, and length (l_0), 300.00 mm have been compressed approximately to 15% and 20% of initial length by adjusting the cylinder opening. The results indicate that the Siebel model performs approximations closed to the experimental result.

Keywords: Hot rolling; Mathematical models.

¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Transformação Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

² Engenharia Mecânica, Mestre em Engenharia, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais (PPGE3M), UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico, Mestrando do PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁵ Dr.Ing., Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A laminação é um processo de conformação mecânica que consiste na passagem de um corpo sólido por cilindros metálicos que giram em sentidos opostos com a mesma velocidade que tem como objetivo a redução secção transversal de blocos ou barras, ocasionando aumento no comprimento e melhoria nas propriedades dos materiais [1,2]. A Figura 1 mostra as principais variáveis no processo de laminação.

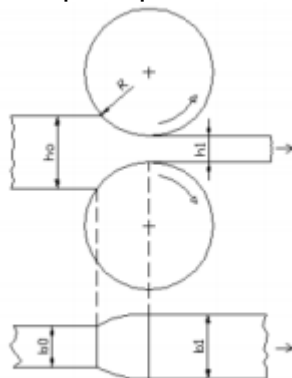


Figura 1 – Ilustração das principais variáveis do processo de laminação. Onde R é raio do cilindro, v_0 é a velocidade de saída da barra, h_0 é altura inicial da barra e h_1 é a altura final da barra [2].

Na laminação o material é submetido a esforços compressivos resultantes da ação de prensagem dos rolos e a esforços cisalhantes superficiais resultantes do atrito entre os rolos e o material laminado.

Na laminação a quente é realizada a redução inicial dos lingotes em blocos, tarugos ou placas e, posteriormente, é realizada uma nova etapa de laminação a quente para transformar o produto em chapas grossas, tiras, vergalhões, barras, tubos, trilhos ou perfis estruturais. A laminação a frio que ocorre após a laminação de tiras a quente e produz tiras de excelente acabamento superficial, com boas propriedades mecânicas e controle dimensional do produto final bastante rigoroso [3].

A laminação é utilizada tanto para a produção de produtos planos, como, chapas finas e grossas; e na fabricação de produtos não-planos, como, vergalhões, tubos e perfis estruturais. Os produtos planos são laminados com cilindros lisos enquanto os não-planos em cilindros com canais, conforme Figura 2. A laminação não-plana é mais complexa e é caracterizada por mais parâmetros geométricos [4].

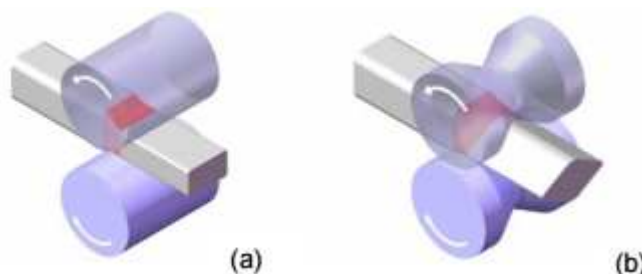


Figura 2 – Laminação plana (a) e laminação em canais (b) [4].

1.1 Deformações Ocorridas no Processo de Laminação

A deformação na laminação pode ser expressa em deformação relativa, deformação absoluta e deformação verdadeira em altura, largura e comprimento, expressas nas equações abaixo [2,4].

	Deformação absoluta	Deformação relativa	Deformação verdadeira
Altura	$\Delta h_i = h_i - h_{i-1}$ (1)	$\varepsilon_{hi} = \frac{\Delta h_i}{h_{i-1}}$ (4)	$\varphi_{hi} = \ln\left(\frac{h_i}{h_{i-1}}\right)$ (7)
Largura	$\Delta b_i = b_i - b_{i-1}$ (2)	$\varepsilon_{bi} = \frac{\Delta b_i}{b_{i-1}}$ (5)	$\varphi_{bi} = \ln\left(\frac{b_i}{b_{i-1}}\right)$ (8)
Comprimento	$\Delta l_i = l_i - l_{i-1}$ (3)	$\varepsilon_{li} = \frac{\Delta l_i}{l_{i-1}}$ (6)	$\varphi_{li} = \ln\left(\frac{l_i}{l_{i-1}}\right)$ (9)

Onde, em uma barra retangular com área de secção transversal inicial, A_{i-1} , altura inicial, h_{i-1} , largura inicial, b_{i-1} , comprimento inicial, l_{i-1} , é laminada no passe i , alterando sua área de secção transversal final, A_i , altura final, h_i , largura final, b_i , e comprimento, l_i [4].

O volume na laminação não sofre variação, obedecendo a lei da constância de volume. Entretanto, ao passar pelo laminador, a barra sofre redução na direção da altura, aumento sua largura e seu comprimento.

1.2 Estimativa do Coeficiente de Atrito

A fórmula de Ekelund, para determinação do coeficiente de atrito, varia com a qualidade do material do cilindro e com a temperatura de laminação (T_{lam}), onde para cilindros de aço:

$$\mu = 1,05 - 0,005 \cdot T_{lam} \quad (10)$$

1.3 Condição De Agarre

Para que ocorra o agarre na barra, é necessário que o ângulo de contato seja menor que o coeficiente de atrito. Como o ângulo de contato aumenta à medida a seção da barra sofre redução, é preciso aumentar o atrito ou buscar forças auxiliares para assegurar a condição de agarre no início da laminação [3] a Figura 3 apresenta o esquema simplificado das forças na laminação.

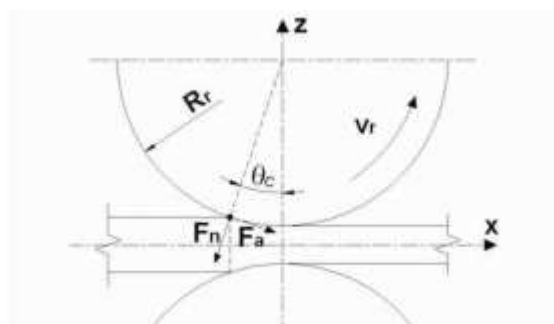


Figura 3 – Esquema simplificado das forças que atuam no plano de entrada da zona de deformação [4].

1.4 Modelos para o Cálculo de Alargamento

Os modelos teóricos para estimar o alargamento a cada passe são ferramentas indispensáveis para a previsão do comportamento do material ao passar pelo laminador.

1.4.1 Modelo de Siebel

O modelo de Siebel propõe que o alargamento é diretamente proporcional ao comprimento da projeção do arco de contato.

$$\Delta b = C_s \cdot l_d \cdot \frac{\Delta h}{h_0} \quad (11)$$

Onde Δb é a variação absoluta em altura, l_d é o arco de contato, C_s é o coeficiente de correlação da fórmula de Siebel para temperatura de laminação (0,35 para aço de construção à 1000°C), Δh é a variação da altura e h_0 é a altura antes da entrada no cilindro.

1.4.2 Modelo de Tafel e Sedlacek

Tafel e Sedlacek propuseram uma equação para a laminação de perfis planos, em sua forma ampliada [1]:

$$\Delta b = \frac{0,435 \cdot b_0 \cdot \Delta h \cdot \sqrt{b_0 \cdot r}}{b_0 + h_0 \cdot h_1} \quad (12)$$

Onde Δb é a variação absoluta em altura, Δh é a variação da altura e h_0 é a altura antes da entrada nos cilindros, h_1 é altura após a saída, e b_0 é a largura antes da entrada nos cilindros.

1.4.3 Modelo de Köster

Köster apresentou a seguinte fórmula para o cálculo do alargamento:

$$\frac{\varphi_b}{\varphi_h} = -e^{(-C_{b\mu} \frac{b_0}{l_d})} \quad (13)$$

Onde a correlação da fórmula de Köster para temperatura, $C_{b\mu}$, pode ser calculado (14):

$$C_{b\mu} = \frac{T_{ref}}{T_{lam}} \quad (14)$$

Sendo que b_0 corresponde a largura antes da entrada nos cilindros, l_d corresponde o arco de contato, a T_{ref} é a temperatura de referência e T_{lam} é a temperatura de laminação.

1.5 Cálculo da Força de Laminação

A força é calculada em função da tensão que atua sobre um elemento de área (15):

$$F = A_d \cdot k_w \quad (15)$$

Onde A_d é a área de contato entre a barra e o cilindro e k_w é a resistência a deformação. k_w é determinada a partir da equação (16):

$$k_w = k \cdot k_f \quad (16)$$

Sendo k_f a tensão de escoamento calculada por (17):

$$K_f = \sigma \cdot (1 + 0,05 \cdot \dot{\varphi}) \quad (17)$$

Onde σ é a tensão de escoamento e $\dot{\varphi}$ é a velocidade de deformação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir das barras de aço AISI 1020 foram confeccionados os corpos de prova nos formatos e dimensões apresentados na Figura 4.

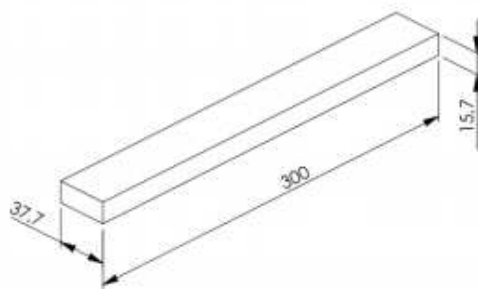


Figura 4 – Representação das dimensões iniciais da barra de aço AISI 1020.

A composição do aço AISI 1020 se encontra na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 1020.

AISI	C	Si	P	S
1020	0,21	0,42	0,01	0,02

Foram confeccionados 6 corpos de prova onde foram verificadas as dimensões finais após 1 passe de laminação, sem adição de lubrificantes.

Os testes experimentais de laminação foram realizados em um laminador tipo Duo, GarbeLahmayer&Co AG, com diâmetro dos cilindros lisos de 178,8mm, a uma temperatura de laminação de 1000°C e luz regulada com o auxílio de um relógio comparador para reduções de 15% e 20% em altura, assim, buscou-se alturas finais de 13,34mm e 12,56mm, respectivamente.

Os corpos de prova foram aferidos com auxílio de paquímetro, antes e após a laminação para verificação do alargamento, comprimento e altura alterados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da fórmula de Ekelund (equação 10), obteve-se o valor do coeficiente de atrito (μ) de 0,55. Também foi encontrado o valor do ângulo de agarre (α) para as duas reduções, tanto para 9,04° quanto para 11,24° e, com isso, foi possível determinar a condição de agarre ($\mu > \text{tg}\alpha$).

Na Tabela 2 estão apresentados os valores calculados a partir dos modelos matemáticos de Siebel, Tafel e Sedlaczek, e Köster para o alargamento com reduções aproximadas de 15% e 20% em relação à altura da barra laminada e os valores obtidos experimentalmente.

Tabela 2 – Larguras obtidas a partir dos modelos teórico e experimental.

b (mm)	Inicial	Alargamento							
		Siebel		Tafel e Sedlaczek		Köster		Experimental	
		15%	20%	15%	20%	15%	20%	15%	20%
	37,7	38,39	39,02	38,98	39,71	38,40	39,42	38,4	38,8

Os valores estão representados em gráfico de barras para melhor visualização comparativa dos resultados teóricos com os experimentais conforme exibido na Figura 5.

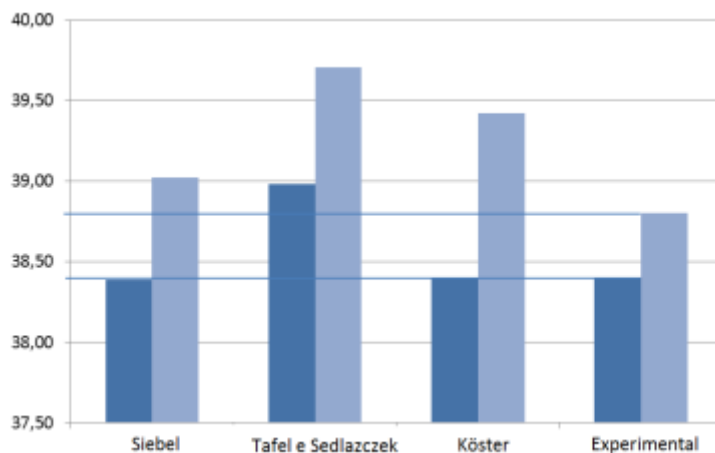


Figura 5 – Representação gráfica dos resultados para alargamento.

As barras laminadas estão apresentadas na Figura 6, onde se visualiza a lei de constância de volume, pois onde há maior redução em altura houve maior alargamento e alongamento.



Figura 6 – Barras antes da laminação, laminada com redução aproximada de 15% e laminada com redução aproximada de 20%.

Os dados relacionados à determinação da força e de tensões no processo foram calculados a partir de modelos teóricos e estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Variáveis obtidas a partir de modelos teóricos.

	Redução Aprox. 15%	Redução Aprox. 20%
Ângulo de agarre (α)	9°	11,2°
Arco de contato (l_d)	14,02mm	17,43mm
Área de Contato (A_d)	533,46mm ²	666,69mm ²
Coefficiente de Plasticidade (η)	0,4	0,4
Força de Laminação (F)	57 KN	76 KN
Largura média (b_m)	38,05mm	38,25
Resistência à deformação (k_w)	108 N/mm ²	114 N/mm ²
Tensão de Escoamento (k_f)	82 N/mm ²	82 N/mm ²

As barras estudadas foram analisadas metalograficamente para avaliar sua modificação microestrutural. A Figura 7 mostra a metalografia da barra comercial antes do estudo de laminação executado.

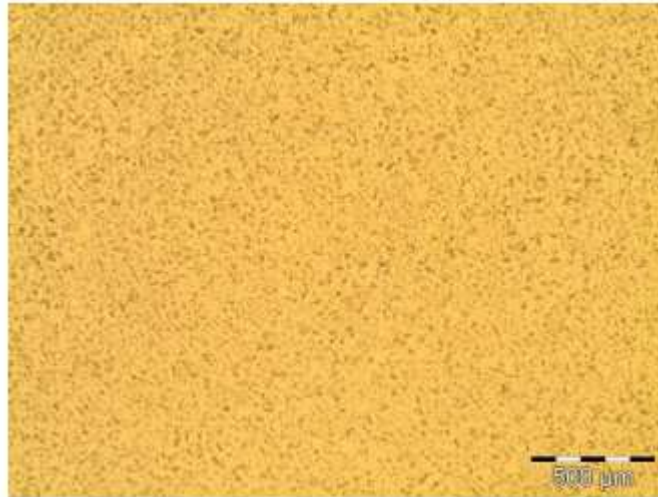


Figura 7 – Microestrutura inicial da barra de aço AISI 1020 (50x).

A metalografia mostra uma microestrutura homogênea típica do aço AISI 1020 com pouco percentual de perlita dentro de uma matriz de ferrita devido ao baixo teor de carbono da composição. A Figura 8 exibe a microestrutura da barra inicial com magnificação de 500x.

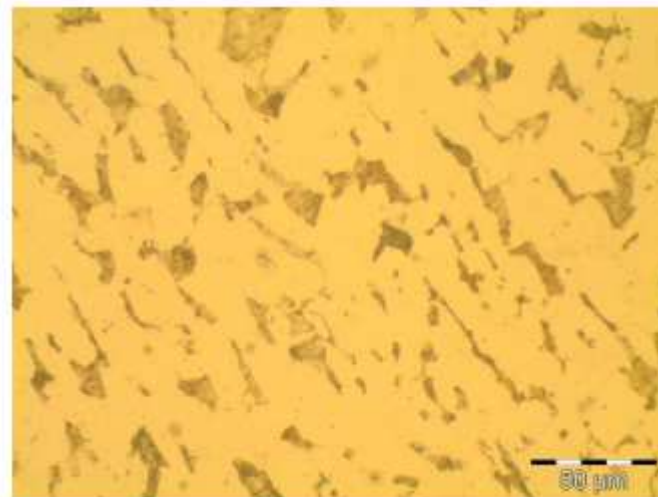


Figura 8 – Microestrutura inicial da barra de aço AISI 1020 (500x).

Pode-se observar o tamanho de grão médio de 50μm de ferrita e um grão refinado de perlita entre 20 e 30 μm com um leve alinhamento em diagonal da anisotropia proveniente do processo de conformação anterior. A Figura 9 apresenta a microestrutura da barra laminada com redução de 15% na altura com Ângulo de agarre de 9° e magnificação de 500 vezes.

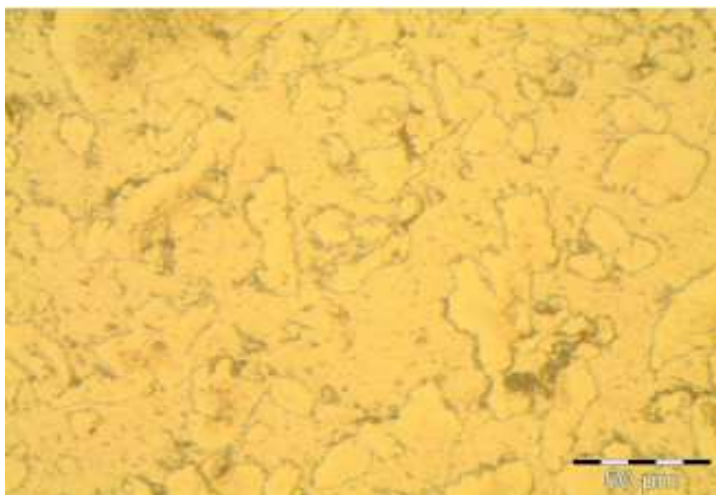


Figura 9 – Microestrutura da barra de aço AISI 1020 com 15% de redução (500x).

Nota-se a diminuição do tamanho de grão entre 10 e 20 μm da ferrita e não ficou evidente a orientação da laminação juntamente com a difusão de diversos grãos. A Figura 10 exhibe a microestrutura da barra laminada com 20% de redução da altura.

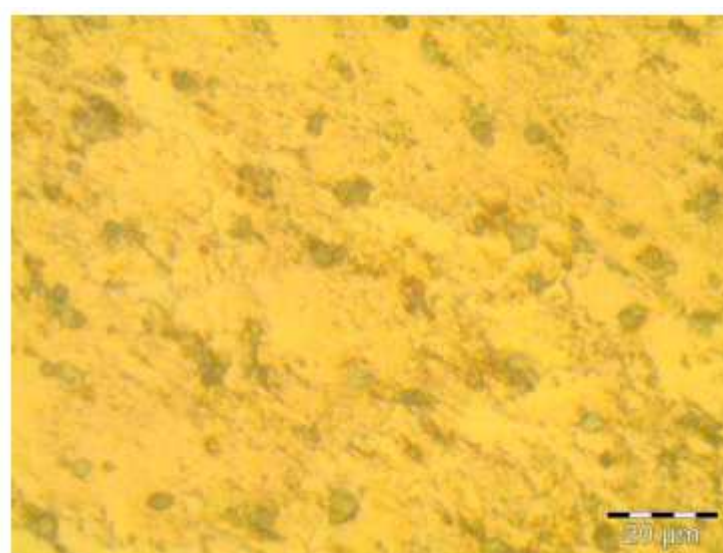


Figura 10 – Microestrutura da barra de aço AISI 1020 com 20% de redução (1000x).

Na Figura 10 evidencia-se que a microestrutura tem uma leve orientação e os grãos médios da Perlita ficaram entre 5 e menor que 10 μm totalmente dispersos com uma distribuição homogênea sobre a matriz ferrítica com tamanho de grão entre 10 e 20 μm .

4 CONCLUSÃO

O modelo matemático que mais se aproximou dos resultados experimentais foi o modelo de Siebel, considerando as duas reduções (redução de 15% e 20%), porém, o modelo de Köster foi o mais preciso na redução aproximada de 15%. O modelo de Tafel e Sedlaczek apresentou valores mais divergentes comparados com os resultados experimentais, podendo ser descartado para calcular a redução de uma barra laminada. Conforme o percentual de redução é aumentado, os resultados teóricos se distanciam mais dos experimentais, podendo ser originado em função da

dificuldade de obtenção dos dados para equação. Observa-se que as microestruturas das barras laminadas com redução de 15 e 20% na altura refinaram-se, quando comparadas com a microestrutura da barra inicial.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das bolsas de estudo, ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

REFERÊNCIAS

- 1 SCHAEFFER, L. *Conformação Mecânica*. 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- 2 MILANEZ, A. *Estudo da Calibração de barras chatas laminadas a quente em um laminador Trio*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- 3 *Processo de laminação*. Disponível em: <
http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont_html/laminacao.htm>. Acesso em: 17/05/2013.
- 4 MORAES, A. S. *Estudo teórico-experimental da calibração de barras redondas laminadas a quente*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.