

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

Matheus Fortes Stiborski<sup>1</sup>  
Luana De Lucca de Costa<sup>2</sup>  
André Rosiak<sup>3</sup>  
Lucas Antônio Gonçalves<sup>3</sup>  
Kíssia Carolina Bertoluci Cardoso<sup>3</sup>  
Rodrigo Prestes Limberger<sup>4</sup>  
Lírio Schaeffer<sup>5</sup>

## 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.

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

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

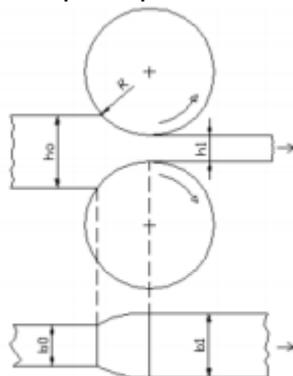
<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico, Mestrando do PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>5</sup> 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.

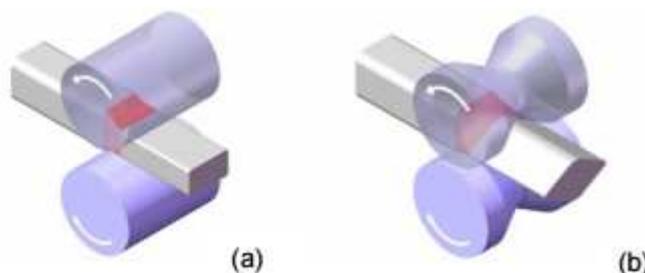


**Figura 1** – Ilustração das principais variáveis do processo de laminação. Onde  $R$  é raio do cilindro,  $v_0$  é a velocidade de saída da barra,  $h_0$  é altura inicial da barra e  $h_1$  é a altura final da barra [2].

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.

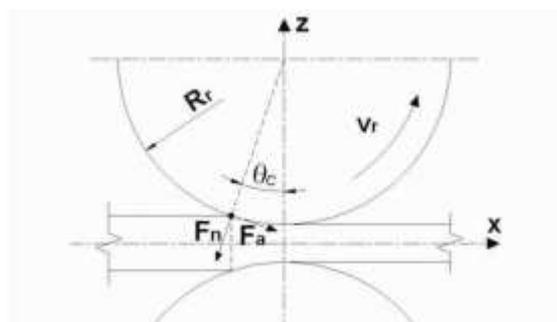
## 1.2 Estimativa do Coeficiente de Atrito

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  $\Delta b$  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),  $\Delta h$  é a variação da altura e  $h_0$  é a altura antes da entrada no cilindro.

#### 1.4.2 Modelo de Tafel e Sedlaczek

Tafel e Sedlaczek 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  $\Delta b$  é a variação absoluta em altura,  $\Delta h$  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):

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

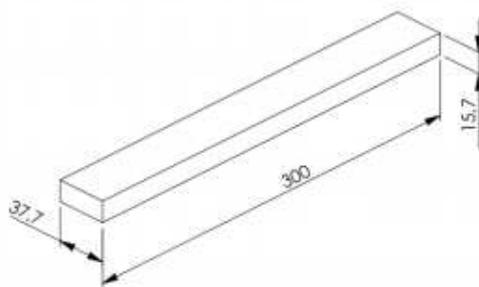
Sendo  $k_f$  a tensão de escoamento calculada por (17):

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

Onde  $\sigma$  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

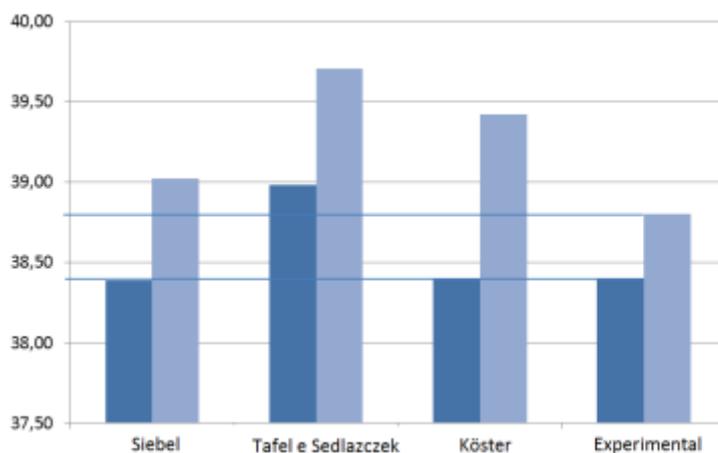
A partir da fórmula de Ekelund (equação 10), obteve-se o valor do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) de 0,55. Também foi encontrado o valor do ângulo de agarre ( $\alpha$ ) para as duas reduções, tanto para 9,04° quanto para 11,24° e, com isso, foi possível determinar a condição de agarre ( $\mu > \text{tg}\alpha$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

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.

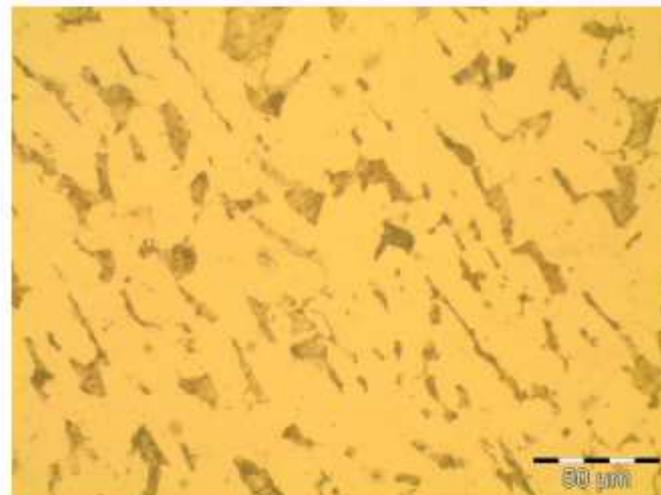
	Redução Aprox. 15%	Redução Aprox. 20%
Ângulo de agarre ( $\alpha$ )	9°	11,2°
Arco de contato ( $l_d$ )	14,02mm	17,43mm
Área de Contato ( $A_d$ )	533,46mm <sup>2</sup>	666,69mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Plasticidade ( $\eta$ )	0,4	0,4
Força de Laminação (F)	57 KN	76 KN
Largura média ( $b_m$ )	38,05mm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

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.



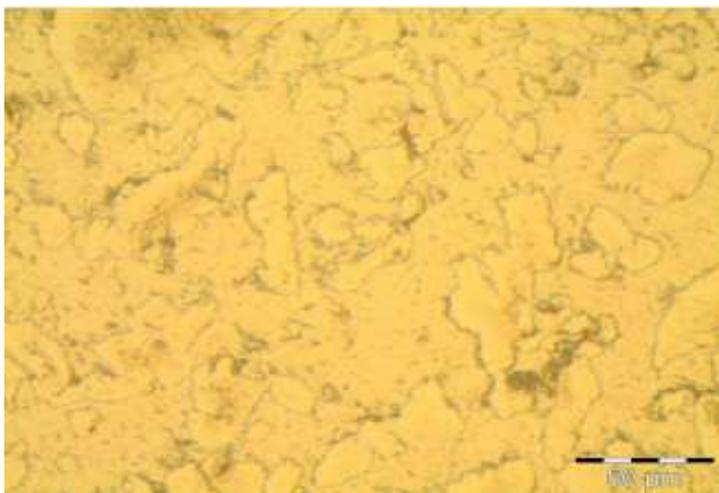
**Figura 7** – Microestrutura inicial da barra de aço AISI 1020 (50x).

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.



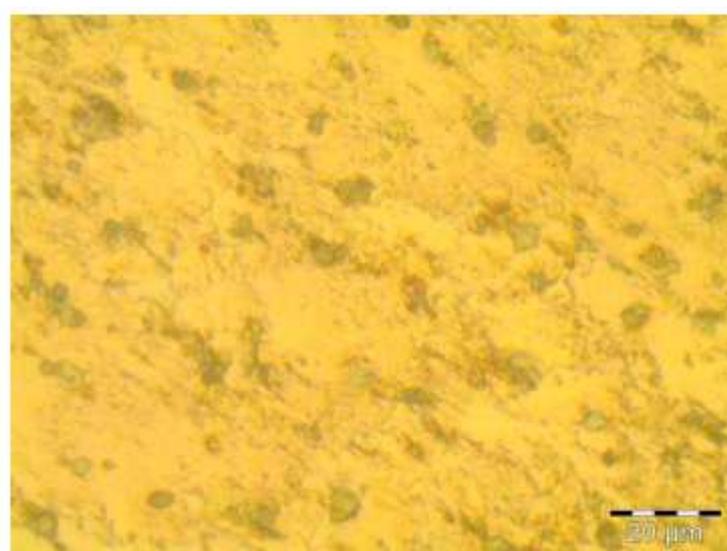
**Figura 8** – Microestrutura inicial da barra de aço AISI 1020 (500x).

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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  totalmente dispersos com uma distribuição homogênea sobre a matriz ferrítica com tamanho de grão entre 10 e 20  $\mu\text{m}$ .

#### 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](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.