



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais

PPGEM

ESTUDO DA CALIBRAÇÃO DE BARRAS CHATA LAMINADAS A
QUENTE EM UM LAMINADOR TRIO

ALEXANDRE MILANEZ

Engenheiro Mecânico

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre

2006



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais

PPGEM

ESTUDO DA CALIBRAÇÃO DE BARRAS CHATA LAMINADAS A
QUENTE EM UM LAMINADOR TRIO

ALEXANDRE MILANEZ

Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2006

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de processos de fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Lírio Schaeffer
Co-Orientadora: Prof. Dra Ângela Beatriz Arnt

Banca Examinadora:

Prof. Dr Carlos Augusto Silva de Oliveira

Prof. Dr .Alexandre da Silva Rocha

Dr Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela
Coordenador do PPGEM

Dedico este trabalho a meus pais que não mediram esforços para que seu filho tivesse estudo de qualidade, mesmo com todas as dificuldades, mas com muito amor e perseverança, sem em nenhum momento desistir ou fraquejar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr Lírío Schaeffer pelo apoio, dedicação e paciência na realização deste trabalho.

A Prof. Dr. Ângela B. C. Arnt pela sua dedicação em guiar este estudante na realização deste trabalho.

A Metalúrgica Spillere Ltda pelo seu apoio na realização dos experimentos e uma de suas unidades de laminação e especialmente aos colaboradores da empresa que ajudaram a realizar os experimentos com as amostras.

Ao colega de profissão Arnaldo Aguiar pela sua ajuda com um conhecimento profundo sobre o processo de laminação.

A todos que ajudaram de forma direta e indireta na elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	XII
RESUMO.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
OBJETIVOS	XVIII
1 INTRODUÇÃO	19
2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO	20
2.1 Introdução	20
2.2 Deformações na Laminação.....	21
2.3 Condição de Agarre	23
2.4 Arco de Contato	25
2.5 Velocidade de Deformação.....	26
2.6 Alargamento na Laminação	28
2.6.1 Modelos de Cálculo de Alargamento.....	29
2.6.1.1 Modelo de Wusatowski	30
2.6.1.2 Modelo de Köster.....	31
2.6.1.3 Modelo de Siebel	32
2.6.1.4 Modelo de Ekelund.....	33
2.7 Canais de Laminação	35
2.8 Variação de Temperatura na Laminação	36
2.8.1 Ganho de Calor na Laminação.....	37
2.8.1.1 Modelos de Cálculo para o Ganho de Temperatura.....	38
2.8.1.1.1 Cálculo do Aumento de Temperatura pelo Processo de Conformação	38
2.8.1.1.2 Cálculo do Aumento da Temperatura pelo Atrito entre a Barra e o Cilindro.....	41
2.8.2 Perda de Calor na Laminação	43
2.8.2.1 Perda por Condução Térmica	43
2.8.2.1.1 Modelos de Cálculo da Perda de Temperatura por Condução.....	44
2.8.2.2 Perda por convecção	48
2.8.2.2.1 Cálculo da Perda de Temperatura por Refrigeração de Água.....	48
2.8.2.3 Perda por Radiação	49

2.8.2.3.1 Cálculo da Perda de Calor por Radiação	50
2.8.3 Modelos de Cálculo da Variação Total da Temperatura na Laminação	53
2.9 Força de Laminação.....	54
2.9.1 Tensões de laminação	55
2.9.2 Tensão de Escoamento.....	56
2.9.3 Resistência à Conformação.....	58
2.9.4 Modelos de Cálculo da Força de Laminação	58
2.9.4.1 Modelo de Sims	58
2.9.4.2 Modelo de Ekelund	61
2.9.4.3 Modelo de Geleji	64
2.10 Equipamentos de Laminação	67
2.11 Defeitos de Laminação	70
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	74
3.1 Laminação das amostras	74
3.1.1 Equipamentos Utilizados	74
3.1.2 Recursos Humanos	79
3.1.3 Metodologia Empregada na Obtenção das amostras	79
3.2 Cálculo dos Modelos Matemáticos Teóricos.....	87
4 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS E DISCUSSÃO	90
4.1 Medidas Retiradas das Amostras.....	90
4.1.2 Avaliação das Amostras a cada Passe.....	91
4.1.3 Análise das amostras retiradas do laminador.....	96
4.2 Resultados dos Cálculos de Alargamento.....	98
4.2.1 Cálculo de Alargamento por Wusatowski	98
4.2.2 Cálculo de Alargamento por Köster	99
4.2.3 Cálculo de Alargamento por Siebel	100
4.2.4 Cálculo de Alargamento por Ekelund.....	101
4.2.5 Comparação entre Modelos de Alargamento.....	102
4.2.6 Análise dos Cálculos de Alargamento	105
4.3 Resultado dos Cálculos de Temperatura.....	108
4.3.1 Cálculo de Temperatura pelo Modelo de Hensel e Spittel	108
4.3.2 Cálculo de Temperatura por Geleji.....	112
4.3.3 Comparação entre Modelos de Cálculo de Temperatura.....	113
4.3.4 Análise dos Cálculos de Distribuição de Temperatura.....	114

4.3.5 Aplicação da Variação de Temperatura nos Modelos Matemáticos para Alargamento	116
4.4 Resultados dos Cálculos da Força de Laminação	118
4.4.1 Cálculo da Velocidade de Deformação	118
4.4.2 Cálculo da Resistência a Deformação	119
4.4.3 Cálculo da Força de Laminação	119
4.4.5 Análise do Cálculo da Força de Laminação	120
4.6 Mudanças Realizadas no Equipamento de Laminação	123
5 CONCLUSÃO	125
6 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
REFERÊNCIAS	128
ANEXO A Fotos ilustrativas do laminador de barras utilizado	134
ANEXO B Certificado de qualidade da usina	137
ANEXO C Memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Wusatowski	138
ANEXO D Memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Köster	139
ANEXO E Memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Siebel	140
ANEXO F Memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Ekelund	141
ANEXO G Memória de cálculo de temperatura segundo o modelo de Hensel e Spittel	143
ANEXO H Memória de cálculo da perda de temperatura segundo o modelo de Geleji	148
ANEXO I Memória de cálculo da velocidade de deformação segundo o modelo de Ekelund	150
ANEXO J Memória de cálculo da resistência à deformação segundo o modelo de Ekelund	151
ANEXO K Memória de cálculo da força de laminação segundo o modelo de Ekelund	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração do processo de laminação.	20
Figura 2.2 – Deformações na barra.	21
Figura 2.3 – Ângulo de agarre.	23
Figura 2.4 – Representação geométrica do arco de contato.	25
Figura 2.5 – Variação da velocidade de deformação.	27
Figura 2.6 – Velocidade tangencial do cilindro, deformação logarítmica e velocidade de deformação ao longo do arco de contato.	27
Figura 2.7 – Alargamento da barra no cilindro.	28
Figura 2.8 – Ilustração das variáveis utilizadas no cálculo.	29
Figura 2.9 – Seqüência de canais para formação de uma barra quadrada.	36
Figura 2.10 – Ganho de calor na laminação.	37
Figura 2.11 – Perda de calor na laminação.	43
Figura 2.12 – Distribuição de tensões na laminação de perfil chato.	54
Figura 2.13 – Curva da tensão de escoamento de um aço com 0,15 % de carbono.	57
Figura 2.14 – Valores práticos para a função Q_P	60
Figura 2.15 – Perfil da cadeira de um laminador duo (esquemático).	68
Figura 2.16 – Perfil da cadeira de um laminador trio (esquemático).	69
Figura 2.17 – Disposição das cadeiras de um trem laminador.	69
Figura 2.18 – Disposição das cadeiras de um trem laminador em linha.	69
Figura 2.19 – Defeito de falta de alargamento.	71
Figura 2.20 – Defeito de falta de alargamento na barra final.	71
Figura 2.21 – Defeito de excesso de alargamento.	71
Figura 2.22 – Defeito de excesso de alargamento.	72
Figura 2.23 – Defeito de dobra de laminação.	72
Figura 2.24 – Defeito de desalinhamento de canal.	72
Figura 2.25 – Defeito de tombamento da barra.	73
Figura 3.1 – Perfil lateral do forno de aquecimento de barras.	74
Figura 3.2 – Croqui do forno de aquecimento de barras.	75
Figura 3.3 – Laminador utilizado no experimento.	76
Figura 3.4 – Posicionamento do laminador (esquema).	77
Figura 3.5 – Croqui da caixa de transmissão.	77

Figura 3.6 – Perfil dos cilindros de laminação utilizados.....	78
Figura 3.7 – Perfil dos canais do cilindro.....	78
Figura 3.8 – Fluxograma do processo para laminação das amostras.....	79
Figura 3.9 – Fluxograma das barras laminadas.....	82
Figura 3.10 – Fluxograma da 1° barra laminada.....	82
Figura 3.11 – Croqui do 1° passe.....	83
Figura 3.12 – Fluxograma da laminação da 2° barra.....	83
Figura 3.13 – Croqui do 5° passe.....	84
Figura 3.14 – Fluxograma da laminação da 3° barra.....	84
Figura 3.15 – Croqui do 9° passe.....	85
Figura 3.16 – Fluxograma da laminação da 4° barra.....	85
Figura 3.17 – Fluxograma dos cálculos teóricos.....	87
Figura 4.1 – Fluxograma das análises realizadas.....	90
Figura 4.2 – Carimbo do 1° passe.....	91
Figura 4.3 – Carimbo do 2° passe.....	92
Figura 4.4 – Carimbo do 3° passe.....	92
Figura 4.5 – Carimbo do 4° passe.....	93
Figura 4.6 – Carimbo do 5° passe.....	93
Figura 4.7 – Carimbo do 6° passe.....	94
Figura 4.8 – Carimbo do 7° passe.....	94
Figura 4.9 – Carimbo do 8° passe.....	94
Figura 4.10 – Carimbo do 9° passe.....	95
Figura 4.11 – Carimbo do 10° passe.....	95
Figura 4.12 – Carimbo do 11° passe.....	96
Figura 4.13 – Croqui demonstrativo do passe de número 10.....	97
Figura 4.14 – Gráfico comparativo de cálculo para passe em calibre.....	102
Figura 4.15 – Gráfico comparativo de cálculo para passe em mesa lisa.....	103
Figura 4.16 – Deformação verdadeira na altura e na área.....	103
Figura 4.17 – Deformação verdadeira na largura medido e calculado.....	104
Figura 4.18 – Gráfico comparativo entre os modelos de Köster e Siebel com os valores medidos.....	106
Figura 4.19 – Variação de temperatura por passe.....	113
Figura 4.20 – Temperatura depois de cada passe.....	114

Figura 4.21 – Comparação entre modelo de Köster com temperatura fixa e variada.....	116
Figura 4.22 – Comparação entre modelo de Ekelud com temperatura fixa e variada.	117
Figura 4.23 – Curva da velocidade de deformação.	120
Figura 4.24 – Curva de resistência à deformação do material laminado.	121
Figura 4.25 – Curva da força de laminação.	121
Figura 4.26 – Curva de potência calculada por passe.	122
Figura A.1 – Cilindro montado no laminador.....	134
Figura A.2 – Foto entrada 1° passe.....	134
Figura A.3 – Foto do forno de aquecimento de barras.	135
Figura A.4 – Entrada de palanquilha no forno.....	135
Figura B1 – Certificado de qualidade da matéria prima.	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores práticos para a função Q_p em Tabela.....	60
Tabela 2.2 – Tabela de valores para c	64
Tabela 3.1 – Plano de passe do perfil 16 x 130 mm.	80
Tabela 3.2 – Composição química do aço utilizado no experimento.	80
Tabela 3.3 – Composição química exigida pela norma ASTM A36/A-36 M 04.	81
Tabela 3.4 – Valores iniciais utilizados nos cálculos.	88
Tabela 4.1 – Resultados obtidos.	90
Tabela 4.2 – Valores dos cálculos de alargamento por Wusatowski.....	99
Tabela 4.3 – Valores dos cálculos de alargamento por Köster.....	100
Tabela 4.4 – Valores dos cálculos de alargamento por Siebel.....	100
Tabela 4.5 – Valores dos cálculos de alargamento por Ekelund.	101
Tabela 4.6 – Melhor modelo de cálculo por passe.	105
Tabela 4.7 – Média e desvio padrão dos valores calculados para alargamento.....	105
Tabela 4.8 – Comparativo percentual entre os modelos com o valor medido.....	106
Tabela 4.9 - Valores de ganho de temperatura por conformação por passe.	108
Tabela 4.10 - Valores de ganho de temperatura por atrito.....	108
Tabela 4.11 - Valores de perda de temperatura por condução.....	109
Tabela 4.12 - Valores de perda de temperatura por convecção da água de refrigeração.....	110
Tabela 4.13 - Valores de perda de temperatura por radiação da barra para o ambiente.	110
Tabela 4.14 - Valores da variação de temperatura e temperatura final em cada passe.....	111
Tabela 4.15 - Valores da variação de temperatura por Geleji.....	112
Tabela 4.16 – Comparativo entre os modelos de Hensel e Spittel e Geleji.....	114
Tabela 4.17 – Valores dos cálculos de alargamento por Köster com variação de temperatura.	116
Tabela 4.18 – Valores dos cálculos de alargamento por Ekelund com variação de temperatura.	117
Tabela 4.19 - Valores dos cálculos para velocidade de deformação.	118
Tabela 4.20 - Valores dos cálculos para resistência à deformação.....	119
Tabela 4.21 - Valores dos cálculos para força de laminação.....	119

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- A_0 = Área da seção transversal da barra antes do passe.
 A_1 = Área da seção transversal da barra depois do passe.
 A [-] = Termo usado para a resolução da fórmula de Ekelund;
 A_d [mm²] = Área de contato projetada;
 A_R [m²] = Área radiante;
 a_{st} [K⁴] = Gradiente de temperatura;
 B [-] = Termo usado para a resolução da fórmula de Ekelund;
 b_0 [mm] = Largura antes de a barra passar no cilindro;
 b_1 [mm] = Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro;
 b_1' [mm] = 1° Interpolação da fórmula de Ekelund;
 b_1'' [mm] = 2° Interpolação da fórmula de Ekelund;
 b_m [mm] = Largura média da barra;
 b_3 [J/mm².(s)^{1/2}.K] = Coeficiente de transferência de calor na barra.
 b_{ko} [mm] = Largura de exposição da barra na refrigeração da água superior;
 b_{ku} [mm] = Largura de exposição da barra na refrigeração da água inferior;
 br [mm] = Largura real;
 C_S [-] = Coeficiente de correção da fórmula de Siebel para a temperatura de laminação;
 $C_{b\mu}$ [-] = Correção da fórmula de Köster para temperatura;
 c_p [J/kg.K] = Calor específico do material da barra;
 C_{sr} [J/mm².s.K⁴] = Coeficiente de transferência de calor;
 C [J/mm².s.K⁴] = Coeficiente de condutibilidade térmica;
 C_w [J/kg.K] = Calor específico da água;
 C_v = Fator de correção do modelo de Ekelund;
 C_G = Fator de correção pelo modelo de Geleji;
 $C\%$ = Porcentagem de carbono presente na barra;
 $Ca\%$ = Porcentagem de cálcio presente na barra;
 D_c = Distância entre centros dos cilindros;
 e = Diferença relativa entre o valor calculado e o medido;
 F_w [kN] = Força de laminação;
 F_a [kN] = Força de Atrito;
 F_n [kN] = Força normal;

F_r = Força de resultante;
 G [kg] = Massa da barra;
 h_0 [mm] = Altura antes de a barra passar no cilindro;
 h_1 [mm] = Altura após de a barra passar no cilindro;
 h_n = Altura da barra na zona sem escorregamento;
 h_m [mm] = Altura média do calibre;
 h_{max} [mm] = Altura máxima do fundo de canal;
 h_{0m} [mm] = Altura média da secção de entrada;
 h_{1m} [mm] = Altura média da secção de saída;
 k_{wm} [N/mm²] = Resistência à deformação da barra;
 k [J/mm².s.K] = Fator de condutibilidade térmica;
 k_e = Fator de influência da geometria;
 k_w [N/mm²] = Resistência à deformação;
 k_{fm} [N/mm²] = Tensão de escoamento média;
 k_f [N/mm²] = Tensão de escoamento;
 l_d [mm] = Arco de contato;
 L [mm] = Distância entre laminadores;
 l_0 [mm] = Comprimento inicial da barra;
 l_1 [mm] = Comprimento final da barra;
 m [-] = Fator que corrige a fórmula de Ekelund para ângulo de entrada da barra no cilindro;
 $Mn\%$ = Percentual de manganês presente na barra;
 M_{dGES} [kN/mm.s] = Momento;
 n [-] = Argumento da função de Gauss;
 P_μ [W] = Potência de Atrito;
 P_{GES} [W] = Potência total;
 P_u [W] = Potência;
 Q [kcal/h] = Fluxo de calor entre barra e cilindro;
 Q_p [-] = Fator de correção do modelo de Sims para o fator de colamento;
 R [mm] = Raio do Cilindro de laminação;
 r [J/kg] = Calor de vaporização da água;
 R_m [mm] = Raio médio;
 s [mm] = Espessura da carepa;
 $T_{ref.}$ [K] = Temperatura de referência;
 t_B [s] = Tempo de contato entre cilindro e barra;

T_L [°C] = Temperatura da barra;

T_c [°C] = Temperatura do cilindro de laminação;

T_a [K] = Temperatura ambiente;

V_a [mm³/s] = Vazão de material da barra;

v [mm/s] = Velocidade tangencial do cilindro;

v_t = Velocidade periférica no fundo do canal em mm/s.

v_1 [mm/s] = Velocidade de saída da barra;

V_d = Velocidade de deslizamento da barra.

Y [-] = Termo usado para solução da fórmula de Ekelund por Newton;

Y' [-] = Derivada de 1° da fórmula de Ekelund;

Y_w [-] = Água evaporada;

w [-] = Fator de correção da fórmula de Wusatowski que corrige a deformação;

w_t [RPM] = Velocidade angular do cilindro;

W_μ [kJ/mm.s] = Energia gasta no atrito;

W_{SPEZ} [mm²/s] = Vazão de água específica de refrigeração;

W_e [J/kg] = Fator de evaporação;

W_{to} [mm³/s] = Vazão de água de refrigeração superior;

W_{tu} [mm³/s] = Vazão de água de refrigeração inferior;

z [h] = Tempo de radiação;

α [-] = Ângulo de agarre;

α_N = Ângulo do ponto neutro;

β [-] = Relação de deformação de Wusatowski;

Δh [mm] = Variação absoluta da altura;

Δh_m = Variação absoluta da altura média;

Δb [mm] = Variação absoluta da largura;

Δl [mm] = Variação absoluta do comprimento;

$\Delta\theta$ [K] = Variação de temperatura na barra;

$\Delta\theta_u$ [K] = Variação de temperatura pelo processo de conformação;

$\Delta\theta_\mu$ [K] = Variação de temperatura por atrito;

$\Delta\theta_L$ [K] = Variação de temperatura por condução;

$\Delta\theta_Z$ [K] = Variação de temperatura por refrigeração de água;

$\Delta\theta_S$ [K] = Variação de temperatura por radiação;

ε_w [-] = Fator da fórmula de Wusatowski que leva em consideração ângulo de entrada da barra no cilindro de laminação;

ε [-] = Coeficiente de irradiação da barra;

ε_h [-] = Deformação relativa na altura;

ε_b [-] = Deformação relativa na largura;

ε_l [-] = Deformação relativa no comprimento;

$\phi(n)$ [-] = Função de Gauss;

ϕ [$W/m^2.K$] = Coeficiente de transferência de calor;

γ [kg/mm^3] = Massa específica da barra;

γ_w [kg/mm^3] = Massa específica da água;

η [$kgf.s^2/mm^2$] = Coeficiente de plasticidade do material;

ϕ_b [-] = Deformação verdadeira da largura;

ϕ_h [-] = Deformação verdadeira da altura;

ϕ_l [-] = Deformação verdadeira no comprimento;

$\dot{\phi}$ [s^{-1}] = Velocidade de deformação;

λ_2 [$kcal/mm.s.^{\circ}C$; $W/m.k$] = Fator de condução térmica da carepa;

μ [-] = Coeficiente de atrito;

π [-] = Pi;

θ_B [K] = Temperatura no interior da barra;

θ_w [K] = Temperatura média do cilindro;

θ_{ab} [K] = Temperatura de saída da água;

θ_{zu} [K] = Temperatura de entrada da água;

σ [kgf/mm^2] = Resistência ao escoamento;

RESUMO

Este trabalho descreve a aplicação de modelos de alargamento teóricos de Wusatowski, Köster, Siebel e Ekelund com o objetivo de calcular o alargamento na laminação a quente de barras chatas em um laminador tipo trio e definir qual dos modelos de alargamento se aproxima mais de amostras retiradas do laminador. Amostras em cada passe foram retiradas de um perfil chato 16 x 130 mm de aço ASTM A36/A-36 M 04, com plano de passe apresentando uma bitola de entrada quadrada de 130 x 130 mm, em onze passes no laminador para uma bitola final de 16 x 130 mm.. O modelo teórico de Ekelund para força de laminação foi aplicado ao modelo de Hensel e Spittel para variação de temperatura na laminação a fim de se estimar a temperatura a cada passe. Os resultados teóricos de variação de temperatura obtidos foram aplicados nos modelos de alargamento de Köster e Ekelund com a finalidade de verificar a influencia da temperatura nos resultados finais dos modelos de alargamento. Os resultados obtidos indicam que os modelos de Köster e Siebel apresentam melhores resultados comparando com os valores experimentais e os valores calculados nas equações teóricas, sendo que o modelo de Siebel mostrou-se de melhor utilização, pela sua simplicidade na aplicação. A influencia da temperatura nos modelos de alargamento de Köster e Ekelund foi de pequena magnitude.

ABSTRACT

This dissertation describes the application of Wusatowski's spread theoretical model, Köster's spread theoretical model, Siebel's spread theoretical model, and Ekelund's spread theoretical model with the purpose of calculating the spread on hot rolling mill band in a single line three high rolling mill, and define which spread model is closer to the samples taken from the rolling mill. Samples were withdrawn pass by pass from a 16 x 130 mm band with steel norm ASTM A36/A-36 M 04, with a pass design showing a square section with 130 x 130 mm, in eleven passes in the rolling mill to turn into a band section with 16 x 130 mm. Ekelund's theoretical model for rolling force was applied on Hensel and Spittel's theoretical model to temperature variation on rolling mill to estimate the temperature on each pass. The theoretical results of temperature variation calculated were applied in Köster's spread model and Ekelund's spread model to get the temperature influence on the final results of the spread models. The results indicate that Köster's model and Siebel's model present better result comparing to the experimental values and the ones calculated on the theoretical equations. Siebel's model showed a better result, due to its simplicity on the application. The temperature influence on Köster's spread model and Ekelund's spread model were small.

OBJETIVOS

Principal:

- Determinar um modelo matemático otimizado para alargamento no processo de laminação a quente.

Secundários:

- Determinar a bitola a ser laminada.
- Promover o corte da matéria prima.
- Laminar as barra e retirar amostras a cada passe.
- Retirar as medidas de espessura e largura de cada amostra.
- Calcular o alargamento teórico segundo o modelo de Wusatowski.
- Calcular o alargamento teórico segundo o modelo de Köster.
- Calcular o alargamento teórico segundo o modelo de Siebel.
- Calcular o alargamento teórico segundo o modelo de Ekelund.
- Calcular a variação teórica de temperatura segundo o modelo de Hensel e Spittel.
- Calcular a variação teórica de temperatura segundo o modelo de Geleji.
- Calcular teoricamente a força de laminação segundo o modelo de Ekelund.
- Analisar cada amostra retirada dos passes para determinar possíveis defeitos de laminação.
- Comparar o resultado dos modelos de alargamento com o valor medido.
- Aplicar a variação de temperatura nos modelos de alargamento de Köster e Ekelund.
- Analisar os melhores modelos de alargamento.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e o aperfeiçoamento de métodos de controle de laminação a quente é um trabalho de pesquisa tanto na indústria quanto nas universidades. As pesquisas desenvolvidas nas universidades têm como objetivo um aperfeiçoamento dos processos produtivos e estudos dos mecanismos envolvidos no processo de laminação que contribuem para melhoria da qualidade dos produtos manufaturados.

A aproximação da indústria com a universidade acontece em muitos casos quando a empresa enfrentava problemas em sua linha de produção, e necessite de auxílio para solucionar esses problemas. Um trabalho de pesquisa e melhoria de produtos entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Conformação Mecânica e a empresa Metalúrgica Spillere Ltda de Santa Catarina foi realizado, onde os produtos laminados da empresa apresentavam problemas de qualidade, seu processo de laminação não possuía ferramentas de controle e seus colaboradores responsáveis pela laminação com pouco conhecimento teórico do processo de laminação.

Um perfil laminado de 16 x 130 mm que representa 60% da produção do laminador foi escolhido para análise, onde amostras em cada passe foram retiradas e suas medidas em espessura e largura levantadas. Foram aplicados quatro modelos teóricos empíricos de alargamento sobre o perfil laminado, comparando os valores obtidos com as medidas retiradas nas amostras em cada passe, com a finalidade de verificar qual dos modelos de alargamento se aproxima melhor dos valores medidos. Um modelo teórico de variação de temperatura foi aplicado nos modelos de alargamento para analisar a variação dos resultados de alargamento. Um modelo para o cálculo da força de laminação também foi aplicado sobre o modelo para variação de temperatura, pois este necessita da força de laminação a cada passe para o cálculo da variação de temperatura.

Para melhor aplicação dos modelos matemáticos empíricos e análise dos resultados obtidos com o experimento, dados sobre o processo de laminação desde o princípio fundamental do processo, como atrito entre barra e cilindro, ângulo de agarre, deformação da barra no cilindro e conceitos sobre alargamento na laminação, ganho e perda de calor no processo de laminação e força de laminação foram estudados.

2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO

2.1 Introdução

A laminação é um processo de conformação mecânica que consiste na passagem de um corpo sólido, no caso a palanquilha, por cilindros metálicos que giram em sentidos opostos com a mesma velocidade a fim de reduzir a secção transversal do material ⁽¹⁾.

A Figura 2.1 mostra em perfil o processo de laminação.

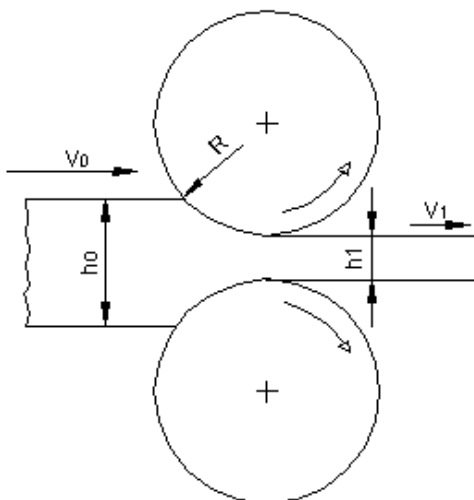


Figura 2.1 – Ilustração do processo de laminação. Onde R = raio do cilindro, v_0 = velocidade de entrada da barra, v_1 = velocidade de saída da barra, h_0 = altura inicial da barra e h_1 = altura final da barra.

A Figura 2.1 mostra que a altura de entrada (h_0) é maior que a altura de saída (h_1) e esta redução ocorre pelo efeito do cilindro que gira no mesmo sentido de movimento da barra no laminador.

A deformação na barra causada pela diferença entre o h_0 e o h_1 , é chamada redução por passe. Quanto maior a redução, maior a energia necessária para deformar o material, maior será o alargamento resultante do passe e o aumento da temperatura devido ao processo de conformação. Existe um limite de redução devido às características de resistência mecânica do equipamento, cilindro e potência de motor. Além destas limitações, existe também a limitação da redução em um passe devido às condições de agarre do material nos cilindros de laminação.

As forças de laminação, alargamento na laminação e variação de temperatura a cada passe serão tratadas em capítulos específicos neste trabalho.

2.2 Deformações na Laminação

A deformação da barra na laminação ocorre de maneira rápida em pequenos espaços de tempo com grandes reduções. Esta deformação na barra ocorre nas mais variadas formas empregando canais ao cilindro de laminação, sendo que quanto maior a diferença entre o tamanho da seção transversal da palanquilha (matéria prima) e da barra final, maior o grau de deformação necessária a fim de moldar a barra.

A Figura 2.2 mostra as deformações na barra com a redução na altura e o aumento na largura ao passar a barra pelos cilindros.

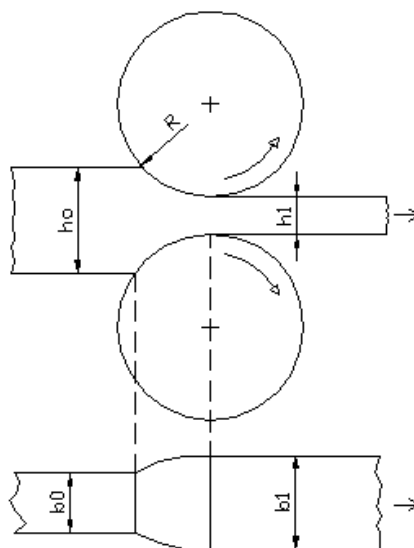


Figura 2.2 – Deformações na barra. Onde R = raio do cilindro, b_0 = largura inicial da barra, b_1 = largura final da barra, h_0 = altura inicial da barra e h_1 = altura final da barra.

Analisando a Figura 2.2 pode-se verificar que ao passar a barra no laminador, parte da deformação vai para a largura e o restante desta deformação irá para o comprimento da barra.

Para efeito de cálculo, a deformação na laminação pode ser expressa como deformação relativa e deformação absoluta.

A deformação relativa na altura pode ser expressa pela equação 2.1 ⁽²⁾.

$$\varepsilon_h = \frac{h_1 - h_0}{h_0} \quad (\text{eq. 2.1})$$

Com a equação 2.1 é possível ter o percentual de redução em altura por passe no laminador. Para os cálculos, a deformação verdadeira é utilizada e está descrita na equação 2.2 ⁽³⁾.

$$\varphi_h = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) \quad (\text{eq. 2.2})$$

A equação 2.2 mostra que deformação verdadeira do material no cilindro de laminação depende da relação logarítmica entre as alturas antes e depois dos passes. Da mesma maneira, a deformação que ocorre na largura pode ser expressa pela equação 2.3 para a deformação relativa ⁽²⁾ e 2.4 para a verdadeira ⁽³⁾.

$$\varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \quad (\text{eq. 2.3})$$

$$\varphi_b = \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) \quad (\text{eq. 2.4})$$

Como acontece na altura e na largura, a deformação no comprimento pode ser calculada na forma relativa pela equação 2.5 ⁽²⁾ e verdadeira pela equação 2.6 ⁽³⁾.

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (\text{eq. 2.5})$$

$$\varphi_l = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (\text{eq. 2.6})$$

Nas equações 2.5 e 2.6, o termo l_1 representa o comprimento da barra depois do passe e l_0 o comprimento da barra antes do passe. As equações de 2.7 a 2.9 representam as variações absolutas das alturas, larguras e comprimentos, respectivamente.

$$\Delta h = h_0 - h_1 \quad (\text{eq. 2.7})$$

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad (\text{eq. 2.8})$$

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad (\text{eq. 2.9})$$

A deformação causada pelo laminador na barra é resultado do trabalho dos cilindros de laminação sobre a barra, sendo alguns aspectos do processo observados como o volume dentro do processo de laminação não sofrendo variação, sendo este volume constante chamado de lei da constância de volumes ⁽⁴⁾. A lei deduz que ao passar a barra no laminador, a barra sofre redução no sentido da altura, aumento na largura e no comprimento, ou seja na deformação da altura da barra parte desta deformação é transferida para a largura e parte para

o comprimento. A soma das deformações na altura, largura e comprimento é igual a zero, sendo assim, não existe variação de volume da peça ao longo do processo. A equação 2.10 representa a lei de constância de volumes.

$$\varphi_h + \varphi_b + \varphi_l = 0 \quad (\text{eq. 2.10})$$

Além da lei da constância dos volumes, alguns aspectos no processo de conformação são verificados como a tendência do material deslocar-se para os pontos de menor resistência ao movimento na secção transversal. Isto quer dizer que ao passar a barra pelo cilindro de laminação com canais, a barra tende a moldar seu formato com o formato do canal.

A deformação que os cilindros executam ocorrem em uma faixa de contato entre o cilindro e a barra, chamada de arco de contato.

2.3 Condição de Agarre

No processo de laminação, a barra ao tocar o cilindro de laminação é agarrada e passa pelos cilindros de laminação. Este agarre depende do atrito que o cilindro faz com a barra, salientado que quanto maior o atrito, maior a condição de agarre. Outra condição observada está na redução, pois quanto menor a redução empregada, maior será a condição de agarre.

Existe neste ponto um limite de agarre, sendo que à medida que a redução ou a velocidade periférica do cilindro aumenta, o agarre fica cada vez mais difícil a ponto da barra não conseguir passar pelos cilindros. Na prática a condição de agarre opera no limite, sendo este um fator que limita a produção do equipamento de laminação ⁽⁵⁾.

A Figura 2.3 mostra a condição de agarre da barra no cilindro.

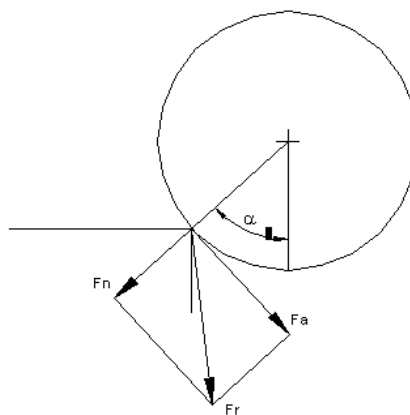


Figura 2.3 – Ângulo de agarre. Onde F_a = força de atrito, F_n = força normal, F_r = força resultante e α = Ângulo de agarre.

A Figura 2.3 mostra uma condição favorável de agarre, onde a força de atrito (F_a) é maior que a força normal (F_n) exercida pelo cilindro sobre a barra, ou seja:

$$F_a > F_n$$

A força de atrito depende do tipo de material utilizado no cilindro, da rugosidade superficial do material, temperatura da barra, velocidade do cilindro e da redução por passe ⁽⁶⁾. A força normal depende do ângulo de agarre, que é influenciada pelo diâmetro do cilindro e pela redução empregada no passe. É possível dizer que para ocorrer o agarre, a condição abaixo deve ser seguida ⁽²⁾:

$$\mu > \operatorname{tg} \alpha$$

Onde:

μ = coeficiente de atrito;

$\operatorname{tg} \alpha$ = tangente do ângulo de agarre;

Na condição onde o coeficiente de atrito (μ) é maior que a tangente do ângulo de agarre é possível calcular o ângulo de agarre pela equação 2.11 ⁽³⁾:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{h_0 - h_1}{2 \times R} \quad (\text{eq. 2.11})$$

Onde:

α = Ângulo de agarre;

h_0 = Altura antes de a barra passar no cilindro;

h_1 = Altura após de a barra passar no cilindro;

R = Raio do cilindro.

Quando o coeficiente de atrito for menor que a tangente do ângulo de agarre, a barra não consegue passar pelos cilindros de laminação. A condição de agarre pode sofrer diminuição pela utilização de lubrificantes no processo de laminação com a finalidade de aumentar a vida útil do cilindro. O óxido de ferro na superfície da barra pode ser também considerado um lubrificante ⁽⁷⁾, e este está presente na de laminação desde o início até o fim do processo ⁽⁸⁾. Em casos onde o ângulo de agarre é crítico uma boa caracterização da camada de carepa se faz necessária na de laminação ⁽⁹⁾ não somente porque afeta a condição de agarre, mas porque afeta também a qualidade superficial da barra.

Além da camada de carepa afetar o agarre da barra pelo cilindro, em alguns casos, uma tensão residente na barra também pode facilitar a perda da habilidade do cilindro de

laminação agarrar a barra, podendo tornar o processo de laminação instável ⁽¹⁰⁾.

2.4 Arco de Contato

O arco de contato é uma parte do cilindro de laminação que começa no toque da barra no cilindro de laminação até a saída da barra do cilindro. No arco de contato é que ocorre a deformação da barra. A Figura 2.4 mostra a representação geométrica do arco de contato no cilindro de laminação.

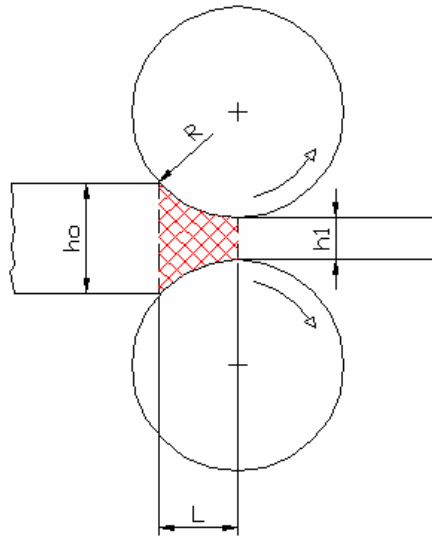


Figura 2.4 – Representação geométrica do arco de contato. Onde R = raio do cilindro, h_0 = altura inicial da barra, h_1 = altura final da barra e L = Projeção horizontal do arco de contato.

Através da Figura 2.4 é possível visualizar a zona de deformação na laminação desde o contato da barra no cilindro até a saída, sendo a superfície de contato entre a barra e o cilindro chamado arco de contato, definido matematicamente como:

$$L = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2} \quad (\text{eq. 2.12})$$

$$L = \sqrt{R \times \Delta h - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2}$$

$$ld = R \times Ld$$

$$Ld = \arcsen\left(\frac{L}{R}\right)$$

$$ld = R \times \arcsen \frac{\sqrt{R \times \Delta h - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2}}{R}$$

como $(\Delta h/2)^2 \ll R \times \Delta h$, então é possível simplificar a equação para:

$$ld = \sqrt{R \times \Delta h} \quad (\text{eq. 2.13})$$

A equação 2.13 é utilizada na prática pois os seus erros de cálculo são menores de 1%, desde que $\Delta h < 0,08 \times R$ ⁽¹⁾.

2.5 Velocidade de Deformação

A velocidade de deformação é a quantidade de material deformado por unidade de tempo representada matematicamente como:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt_B} \quad (\text{eq. 2.14})$$

Desenvolvendo a equação 2.14 ⁽³⁾:

$$\dot{\varphi} = \frac{v \times \varphi}{ld} \quad (\text{eq. 2.15})$$

Onde:

v = Velocidade tangencial do cilindro.

φ = Deformação logarítmica.

ld = Arco de contato.

A velocidade tangencial do cilindro (v) é dada pela equação 2.16.

$$v = R \times w_t \quad (\text{eq. 2.16})$$

Onde:

w_t = Velocidade angular do cilindro.

R = Raio do cilindro.

A velocidade de deformação do material ($\dot{\varphi}$) possui grande influência sobre a força necessária para laminar um material, salientando que para uma mesma temperatura, quanto maior a velocidade de deformação, maior a força exigida no equipamento ⁽⁴⁾.

A Figura 2.5 mostra através de um gráfico a variação da velocidade de deformação ao longo do arco de contato.

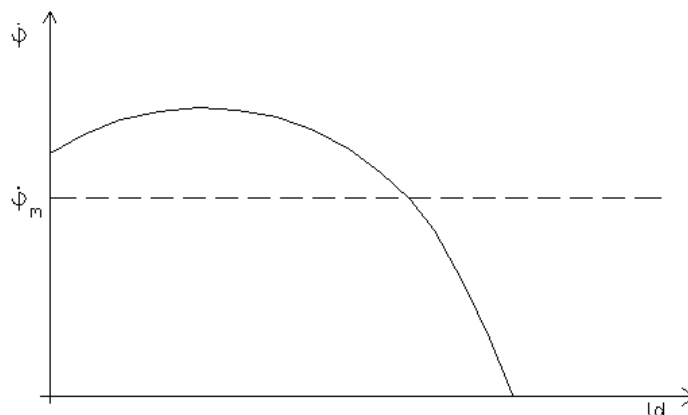


Figura 2.5 – Variação da velocidade de deformação ⁽³⁾.

A Figura 2.5 mostra que existe um aumento da velocidade de deformação e logo após uma diminuição até zero no final do arco de contato. O aumento ocorre pela restrição ao movimento antes do ponto neutro, fazendo com que a velocidade seja maior para compensar esta restrição. A diminuição ocorre pelo movimento avante do material após o ponto neutro. A diferença nas velocidades de entrada, saída da barra e da velocidade periférica do cilindro, devido à restrição do escoamento ⁽¹²⁾ está presente na curva da velocidade de deformação da Figura 2.5. Nos cálculos é considerado o valor de $\dot{\phi}_m$ que representa uma média da velocidade ao longo do arco de contato.

A Figura 2.6 mostra um comparativo entre as velocidades tangenciais do cilindro, do material, de deformação e a deformação logarítmica ao longo do arco de contato.

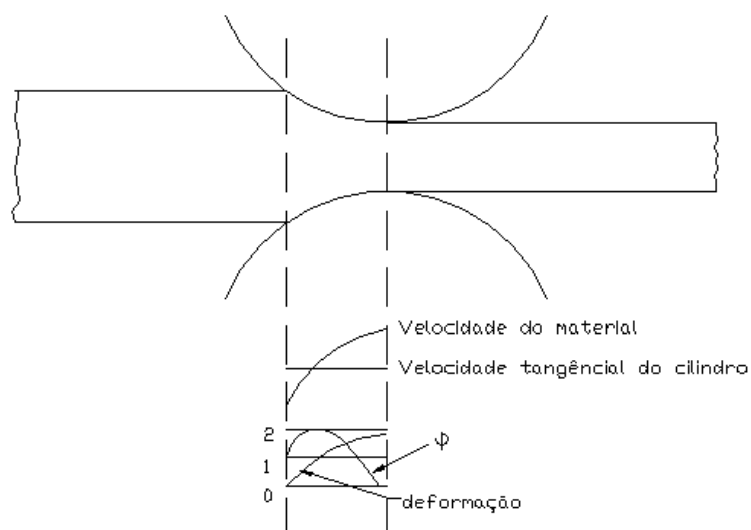


Figura 2.6 – Velocidade tangencial do cilindro, deformação logarítmica e velocidade de deformação ao longo do arco de contato ⁽³⁾.

Um comparativo entre velocidade e deformação ao longo do arco de contato é apresentado na Figura 2.6. A deformação logarítmica inicia do zero no agarre da barra e tem seu ponto máximo no final do arco de contato. A velocidade de deformação aumenta no início e depois diminui gradualmente como mostrado na Figura 2.5. A velocidade tangencial do cilindro não varia ao longo do arco de contato devido à constância do raio do cilindro.

Existe um ponto onde a velocidade periférica do cilindro se iguala a da barra, chamado de ponto neutro. Este ponto é visualizado pela Figura 2.6 no ponto de intersecção das curvas de velocidade do material e da tangencial do material. O ângulo onde ocorre o ponto neutro depende do coeficiente de atrito entre a barra e o cilindro e do ângulo do arco de contato α (Figura 2.2). O ângulo neutro pode ser calculado pela equação 2.17 ⁽¹²⁾:

$$\alpha_N = \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{\mu} \times \left(\frac{\alpha}{2} \right)^2 \quad (\text{eq. 2.17})$$

Onde:

α_N = Ângulo do ponto neutro.

α = Ângulo do arco de contato.

μ = Coeficiente de atrito entre barra e cilindro.

Devido à diferença de velocidade de deformação ao longo do arco de contato, o processo de deformação no arco de contato pode ser considerado heterogêneo ⁽¹²⁾, isto é, a deformação não é constante ao longo do arco de contato.

2.6 Alargamento na Laminação

O alargamento na laminação é um fenômeno que ocorre quando a barra sofre uma diminuição pela deformação nos cilindros de laminação, onde parte do material é transferida para a largura, fazendo com que a largura final fique maior que a largura inicial. A Figura 2.7 mostra o fenômeno do alargamento sobre em dois tipos de perfis laminados.

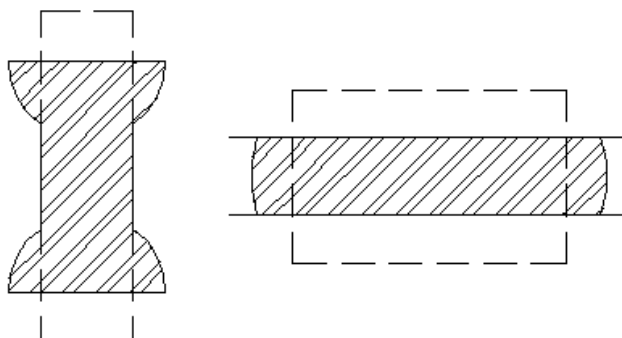


Figura 2.7 – Alargamento da barra no cilindro ⁽¹⁰⁾.

A Figura 2.7a mostra um perfil de material que sofre uma redução sendo a altura maior que a largura do material, deformando apenas a região próxima à extremidade. Na Figura 2.7b a redução ocorre com a altura menor que a largura e a deformação ocorre em toda a largura.

O alargamento pode ocorrer de forma livre ou contida. O alargamento livre ocorre quando a barra passa pelos cilindros com superfície plana, chamada de mesa lisa. O alargamento contido ocorre quando a barra é laminada em cilindros que possuem canais. Estes canais restringem o movimento de alargamento da barra, sendo o alargamento neste caso menor que no alargamento livre.

O fenômeno do alargamento na laminação não representa grandes valores devido à resistência à deformação no sentido de laminação ser menor que na direção lateral ⁽¹³⁾, onde esta diferença na deformação é introduzida em diferentes direções de laminação e paralela ao cilindro ⁽¹⁴⁾. O pequeno valor do alargamento a cada passe no laminador não pode ser desprezado e sim bem quantificado, pois um erro em relação à previsão do valor de alargamento pode causar defeitos na seção transversal da barra laminada ⁽¹⁵⁾.

2.6.1 Modelos de Cálculo de Alargamento

Um modelo teórico para previsão de alargamento a cada passe no laminador é uma importante ferramenta para prever o comportamento da barra ao passar pelo cilindro de laminação. As variáveis utilizadas nos modelos de alargamento estão descritas na Figura 2.8:

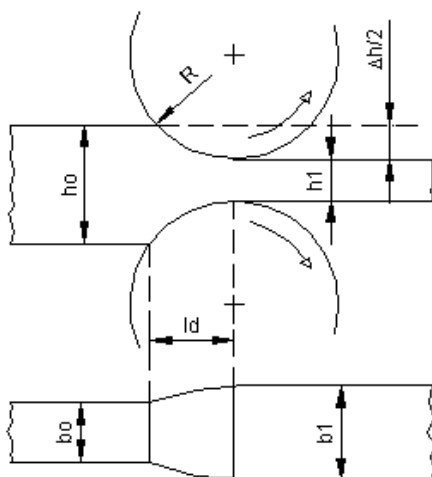


Figura 2.8 – Ilustração das variáveis utilizadas no cálculo. Onde R = raio do cilindro, b_0 = largura da barra antes de laminada, b_1 = largura da barra depois de laminada, Δh = variação absoluta da altura, h_0 = altura antes do passe, h_1 = altura depois do passe e l_d = arco de contato

Os cálculos teóricos de alargamento são analisados na área que compreende o arco de contato ⁽¹⁶⁾. As equações dos modelos de alargamento segundo Wusatowski, Köster, Siebel e Ekelund estão descritas a seguir.

2.6.1.1 Modelo de Wusatowski

O modelo de Wusatowski ⁽⁴⁾ usa as seguintes expressões para cálculo de alargamento.

Para o cálculo de fator de forma, utiliza-se a equação 2.18:

$$ew = \frac{h_0}{2} \times R \quad (\text{eq. 2.18})$$

Onde:

ew = Fator da fórmula de Wusatowski que leva em consideração ângulo de entrada da barra no cilindro de laminação.

h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.

R = Raio do Cilindro de laminação.

Para o cálculo do fator de correção para deformação, utiliza-se a equação 2.19:

$$-w = -10^{-1,269 \times ew \times \exp\left(0,556 \times \frac{b_0}{h_0}\right)} \quad (\text{eq. 2.19})$$

Onde:

w = Fator de correção da fórmula de Wusatowski que corrige a deformação.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

ew = Fator da fórmula de Wusatowski que leva em consideração ângulo de entrada da barra no cilindro de laminação.

h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.

Para o cálculo da relação de deformação, utiliza-se a equação 2.20:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{-w} \quad (\text{eq. 2.20})$$

Onde:

β = Relação de deformação de Wusatowski.

b_1 = Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

h_1 = Altura após da barra passar no cilindro.

h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.

Para o cálculo da largura final, utiliza-se a equação 2.21:

$$\beta = b_0 \times \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^{-w} \quad (\text{eq. 2.21})$$

Onde:

b_1 = Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

h_1 = Altura após da barra passar no cilindro.

h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.

w = Fator de correção da fórmula de Wusatowski que corrige a deformação.

2.6.1.2 Modelo de Köster

O modelo de Köster ⁽³⁾ usa as seguintes expressões para cálculo de alargamento:

Para o cálculo das deformações verdadeiras, utiliza-se a equação 2.22:

$$\frac{\varphi_b}{\varphi_h} = -e^{\left(C_{b\mu} \times \frac{b_0}{ld} \right)} \quad (\text{eq. 2.22})$$

Onde:

φ_b = Deformação verdadeira da largura.

φ_h = Deformação verdadeira da altura.

$C_{b\mu}$ = Correção da fórmula de Köster para temperatura.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

ld = Arco de contato.

Para o cálculo do fator de correção para temperatura, utiliza-se a equação 2.23:

$$C_{b\mu} = \frac{T_{\text{ref.}}}{T_L} \quad (\text{eq. 2.23})$$

Onde:

$C_{b\mu}$ = Correção da fórmula de Köster para temperatura.

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

T_L = Temperatura expressa em Kelvin.

Cálculo da largura final:

Para se determinar o valor de b_1 , utiliza-se à equação 2.24 desenvolvida abaixo:

$$\varphi_b = -\varphi_h \times e^{\left(C_{b\mu} \times \frac{b_0}{ld} \right)}$$

$$\ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) = -\varphi_h \times e^{\left(C_{b\mu} \times \frac{b_0}{ld}\right)}$$

$$\frac{b_1}{b_0} = e^{\left[-\varphi_h \times e^{\left(C_{b\mu} \times \frac{b_0}{ld}\right)}\right]}$$

$$b_1 = b_0 \times e^{\left[-\varphi_h \times e^{\left(C_{b\mu} \times \frac{b_0}{ld}\right)}\right]}$$

(eq. 2.24)

Onde:

b_1 = Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

φ_h = Deformação verdadeira da altura.

$C_{b\mu}$ = Correção da fórmula de Köster para temperatura.

ld = Arco de contato.

2.6.1.3 Modelo de Siebel

O modelo de Siebel ⁽¹⁷⁾ usa as seguintes expressões para o cálculo do alargamento:

Para o cálculo da variação absoluta da deformação na largura, utiliza-se a equação 2.25:

$$\Delta b = C_s \times ld \times \frac{\Delta h}{h_0}$$

(eq. 2.25)

Onde:

Δb = Variação absoluta da largura.

ld = Arco de contato.

C_s = Coeficiente de correção da fórmula de Siebel para a temperatura de laminação.

Δh = Variação absoluta da altura.

h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.

$C_s = 0,35$ para aço de construção, à temperatura acima de 1000 °C.

$C_s = 0,35$ a 0,4 para temperatura abaixo de 1000 °C.

Para o cálculo da largura final, utiliza-se a equação 2.26:

Para se determinar b_1 :

$$b_1 = b_0 + C_s \times ld \times \frac{\Delta h}{h_0}$$

(eq. 2.26)

Onde:

l_d = Arco de contato.

C_s = Coeficiente de correção da fórmula de Siebel para a temperatura de laminação.

Δh = Variação absoluta da altura.

h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.

b_1 = Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

2.6.1.4 Modelo de Ekelund

O modelo de Ekelund ⁽¹⁸⁾ usa as seguintes expressões para o cálculo do alargamento:

Para o cálculo do alargamento, utiliza-se uma equação transcendente 2.27:

$$b_1^2 - b_0^2 = 8 \times m \times l_d \times \Delta h - 4 \times m \times (h_0 + h_1) \times l_d \times \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) \quad (\text{eq. 2.27})$$

Onde:

b_1 = Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

m = Fator que corrige a fórmula de Ekelund para ângulo de entrada da barra no cilindro.

l_d = Arco de contato.

Δh = Variação absoluta da altura.

h_1 = Altura após da barra passar no cilindro.

h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.

Para o cálculo do fator de forma, utiliza-se a equação 2.28:

$$m = \frac{1,6 \times \mu \times l_d - 1,2 \times \Delta h}{h_0 + h_1} \quad (\text{eq. 2.28})$$

Onde:

μ = Coeficiente de atrito.

m = Fator que corrige a fórmula de Ekelund para ângulo de entrada da barra no cilindro.

l_d = Arco de contato.

Δh = Variação absoluta da altura.

b_1 = Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

Para o cálculo do coeficiente de atrito, utiliza-se a equação 2.29 ou a 2.30 dependendo do tipo de material do cilindro de laminação:

$$\mu = 0,8 \times (1,05 - 0,0005 \times T_L) \quad \text{para cilindros de ferro coquilhado.} \quad (\text{eq. 2.29})$$

$$\mu = 1,05 - 0,0005 \times T_L$$

para cilindros de aço.

(eq. 2.30)

Onde:

μ = Coeficiente de atrito.

T_L = temperatura de laminação - °C

Para calcular os alargamentos pela equação de Ekelund, que é uma equação transcendente, se faz necessário utilizar métodos de cálculo. Para solucionar a equação, foi utilizada o Método de Cálculo de Newton ⁽¹⁹⁾.

Método de Newton:

Isolando a equação transcendente para o cálculo do alargamento e igualando a zero:

$$b_1^2 - b_0^2 = 8 \times m \times ld \times \Delta h - 4 \times m \times (h_0 + h_1) \times ld \times \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)$$

$$b_1^2 - b_0^2 - 8 \times m \times ld \times \Delta h + 4 \times m \times (h_0 + h_1) \times ld \times \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) = 0$$

Nomeando as variáveis que são constantes em cada passe:

$$A = 8 \times m \times ld \times \Delta h$$

(eq. 2.31)

$$B = 4 \times m \times (h_0 + h_1) \times ld$$

(eq. 2.32)

Onde:

A = Termo usado para a resolução da fórmula de Ekelund.

B = Termo usado para a resolução da fórmula de Ekelund.

m = Fator que corrige a fórmula de Ekelund para ângulo de entrada da barra no cilindro.

ld = Arco de contato.

Δh = Variação absoluta da altura.

h_1 = Altura após da barra passar no cilindro.

h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.

Então:

$$b_1^2 - b_0^2 - A + B \times \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) = 0$$

Com as constantes substituídas, iguala-se a equação 2.33 a Y

$$b_1^2 - b_0^2 - A + B \times \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) = Y \quad (\text{eq. 2.33})$$

Onde:

Y = Termo usado para solução da fórmula de Ekelund por Newton.

b_1 = Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

A = Termo usado para a resolução da fórmula de Ekelund.

B = Termo usado para a resolução da fórmula de Ekelund.

Derivando a equação 2.33 em dY/db_1 , gerando a equação 2.34:

$$Y' = 2 \times b_1 + \frac{B}{b_1} \quad (\text{eq. 2.34})$$

Onde:

Y' = Derivada de 1° da fórmula de Ekelund.

b_1 = Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro.

B = Termo usado para a resolução da fórmula de Ekelund.

Com os dados de Y e Y', é possível ajustar os valores de b_1 , através da equação 2.35 :

$$b_1' = b_1 - \frac{Y}{Y'} \quad (\text{eq. 2.35})$$

Onde:

b_1' = 1° Interpolação da fórmula de Ekelund.

b_1 = Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro.

Y' = Derivada de 1° da fórmula de Ekelund.

Y = Termo usado para solução da fórmula de Ekelund por Newton.

Para encontrar a solução da equação, o valor de b_1 é estimado no primeiro cálculo, depois através dos cálculos é possível encontrar o novo valor de b_1' . O valor de b_1' passa a valer como valor de b_1 na próxima interação.

São necessárias várias interações para convergir o resultado, sendo que a quantidade de interações varia de acordo com a precisão necessária para os cálculos.

2.7 Canais de Laminação

Os canais de laminação servem para dar forma às barras laminadas, restringindo o alargamento e dando forma final à barra laminada. Para isso são utilizados canais das mais variadas formas seguindo o perfil final da barra.

A forma dos canais de laminação é desenvolvida desde o primeiro passe até o último, deformando a barra em seqüência pré-determinadas, chamada de seqüência de passes. A Figura 2.9 mostra seqüência de passes para laminação de barra quadrada de uma polegada.

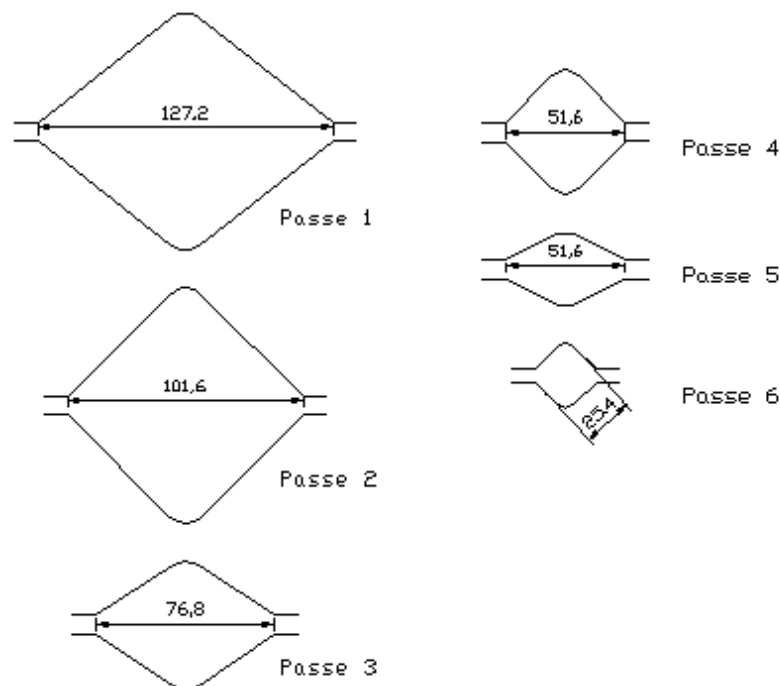


Figura 2.9 – Seqüência de canais para formação de uma barra quadrada.

A Figura 2.9 mostra a o formato dos canais de laminação para uma barra quadrada, sendo esta calibração utilizada na empresa onde foi realizado o experimento.

2.8 Variação de Temperatura na Laminação

O processo laminação pode ser dividido em laminação à quente, a morno e a frio. O que diferencia é a temperatura da matéria prima na entrada do laminador. Para ser considerado laminação à quente, a temperatura da matéria prima deve ser maior que a temperatura de recristalização do material da barra.

A temperatura de recristalização é a temperatura onde os grãos do material começam a se reorganizar a fim de eliminar as tensões internas. A temperatura de recristalização é referência sobre a definição de deformação a quente, sendo que para uma deformação onde a temperatura de trabalho é superior a de recristalização é chamado de deformação a quente e abaixo de deformação a morno.

A temperatura da matéria prima tem influência direta sobre a resistência à deformação do material, sobre o atrito entre a barra e o cilindro e o desgaste do cilindro de laminação.

Quando a temperatura da barra no laminador estiver diferente da especificada para a laminação, quebras de equipamentos podem ocorrer devido a esforços de laminação superiores ao que o equipamento está projetado. Deformações de alargamento diferentes das que foram projetadas ou até mesmo a quebra de cilindros de laminação quando os esforços ultrapassarem a resistência à flexão do cilindro são outros problemas causados por temperatura diferentes das que foram projetadas inicialmente.

A velocidade de rotação cilindro na laminação da barra também tem influência na perda ou ganho de temperatura, pois quanto menor a velocidade de laminação, maior a perda de temperatura da barra para os cilindros de laminação por condução térmica ⁽²¹⁾.

Qualquer problema com o laminador que cause interrupção da laminação em meio ao processo de laminação, resultam em perdas térmicas elevadas no laminador, causando o resfriamento excessivo da barra, impedindo que a esta possa prosseguir normalmente no processo após a causa da falha ser solucionado ⁽²²⁾.

A temperatura de laminação a quente é influenciada basicamente por três fatores: transferência de calor por radiação, transferência por condução entre a barra e o cilindro e ganho de energia pelo processo de conformação mecânica ⁽²³⁾. Para uma melhor visualização, o capítulo foi dividido entre ganhos e perdas de temperatura.

2.8.1 Ganho de Calor na Laminação

O ganho de calor no processo de laminação ocorre com o processo de deformação do material e com o atrito entre barra e cilindro. A Figura 2.10 mostra de forma esquemática como ocorre o aumento de temperatura na barra.

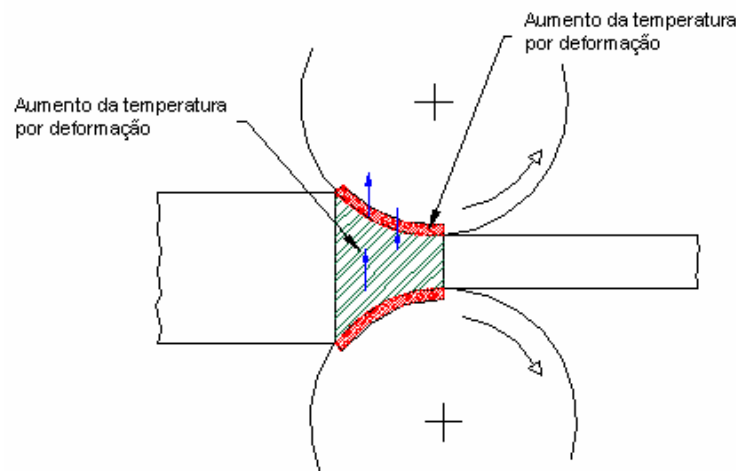


Figura 2.10 – Ganho de calor na laminação.

Através da Figura 2.10 é possível visualizar que o ganho de calor ocorre com a deformação da barra no arco de contato.

No processo de deformação são realizados trabalhos sobre o material para alterar suas características dimensionais. Parte desta energia despendida é transformada em calor pelo movimento dos planos cristalinos na microestrutura, sendo que de 85% a 90% do trabalho realizado é convertido em calor. A intensidade deste aumento de calor na barra provocado pela deformação está ligada a variáveis que influenciam nesta geração de calor. Fatores como a velocidade de deformação do material, onde um aumento da velocidade faz com que a energia necessária para transformar o material seja maior, aumenta o ganho de calor da barra pelo processo de conformação.

A resistência à deformação do material laminado também influencia, pois quanto maior a energia necessária para deformar o material, maior será o ganho de calor da barra. Outra fonte de incremento da temperatura é originada pelo atrito do cilindro com a barra na laminação, devido à diferença de velocidade entre cilindro e barra ao laminar antes e depois do ponto neutro.

Com o aumento da temperatura do material laminado, o coeficiente de atrito aumenta também, aumentando o desgaste dos canais no cilindro de laminação. A redução do efeito do atrito utilizando lubrificantes pode atenuar o efeito do aumento do coeficiente de atrito e aumentar a vida útil do canal de laminação entre 20% e 40%, diminuindo a energia gasta para laminar entre 15% e 25% ⁽²⁴⁾, contudo a condição de agarre sofre uma diminuição.

2.8.1.1 Modelos de Cálculo para o Ganho de Temperatura

O modelamento matemática para previsão do ganho de temperatura no laminador é de grande importância, sendo assim são apresentados neste capítulo o modelo de Hensel e Spittel e o modelo de Geleji.

2.8.1.1.1 Cálculo do Aumento de Temperatura pelo Processo de Conformação

a) Modelo de Hensel e Spittel:

Os cálculos do ganho de temperatura por conformação mecânica estão dispostos abaixo ⁽²⁵⁾ na equação 2.36:

$$\Delta\theta_u = \frac{F_w \times \varphi_h}{b_m \times ld \times \gamma \times c_p} \quad (\text{eq. 2.36})$$

Onde:

$\Delta\theta_u$ = Variação de temperatura pelo processo de conformação.

F_w = Força de laminação.

φ_b = Deformação verdadeira da largura.

b_m = Largura média da barra.

ld = Arco de contato.

γ = Massa específica da barra.

c_p = Calor específico do material da barra.

Para o cálculo da largura média, utiliza-se a equação 2.37:

$$b_m = \frac{b_1 + b_0}{2} \quad (\text{eq. 2.37})$$

Onde:

b_1 = Largura teórica da barra após esta passar pelo cilindro.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

b_m = Largura média da barra.

A massa específica do material laminado utilizado no experimento, está colocado abaixo e este varia conforme a temperatura do material ⁽³⁾:

$$\gamma = 7840 \text{ kg/m}^3 \rightarrow T_L = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\gamma = 7570 \text{ kg/m}^3 \rightarrow T_L = 900 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\gamma = 7380 \text{ kg/m}^3 \rightarrow T_L = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$$

O calor específico do material da barra utilizado nos cálculos está disposta abaixo sendo que esta depende da temperatura da barra laminada ⁽²⁶⁾::

para $T_L = 300 \text{ k} \rightarrow c_p$:

$$c_p = 434 \text{ J/kg.K}$$

para $T_L = 1000 \text{ k} \rightarrow c_p$:

$$c_p = 1169 \text{ J/kg.K}$$

b) Modelo de Geleji:

Os cálculos do ganho de temperatura por conformação mecânica estão dispostos

abaixo ⁽²³⁾ na equação 2.38:

$$\Delta\theta_u = \frac{A_d \times k_w \times v \times t_B}{G \times c_p \times 427} \quad (\text{eq. 2.38})$$

Onde:

$\Delta\theta_u$ = Variação de temperatura por conformação.

A_d = Área de contato projetada.

k_w = Resistência à deformação.

c_p = Calor específico do material da barra.

v = Velocidade tangencial do cilindro.

G = Massa da barra.

t_B = Tempo de contato entre cilindro e barra.

Para o cálculo do tempo de contato, utiliza-se a equação 2.39:

$$t_B = \frac{l_d}{v} \quad (\text{eq. 2.39})$$

Onde:

t_B = Tempo de contato entre cilindro e barra.

l_d = Arco de contato.

v = Velocidade tangencial do cilindro.

Para o cálculo da massa da barra, utiliza-se a equação 2.40:

$$G = h_0 \times b_0 \times l_0 \times \gamma \quad (\text{eq. 2.40})$$

Onde:

G = Massa da barra.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.

l_0 = Comprimento inicial da barra.

γ = Massa específica da barra.

O calor específico do material da barra utilizado nos cálculos está disposta abaixo sendo que esta depende da temperatura da barra laminada ⁽²⁶⁾:

para $T_L = 300 \text{ k} \rightarrow c_p$:

$$c_p = 460,5 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$$

para $T_L = 1000 \text{ k} \rightarrow c_p$

$$c_p = 1252 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$$

2.8.1.1.2 Cálculo do Aumento da Temperatura pelo Atrito entre a Barra e o Cilindro

a) Modelo de Hensel e Spittel:

O cálculo do ganho de temperatura pelo atrito do cilindro com a barra segundo o modelo de Hensel e Spittel está dispostos abaixo ⁽²⁵⁾ na equação 2.41, sendo que o modelo de Geleji não prevê o aumento da temperatura pelo atrito.

$$\Delta\theta_{\mu} = \frac{W_{\mu} \times b_m \times ld}{V_a \times \gamma \times c_p} \quad (\text{eq. 2.41})$$

Onde:

$\Delta\theta_{\mu}$ = Variação de temperatura por atrito.

W_{μ} = Energia gasta no atrito.

b_m = Largura média da barra.

ld = Arco de contato.

V_a = Vazão de material da barra.

γ = Massa específica da barra.

c_p = Calor específico do material da barra.

Para o cálculo da energia gasta no atrito, utiliza-se a equação 2.42:

$$W_{\mu} = \frac{P_{\mu}}{A_d} \quad (\text{eq. 2.42})$$

Onde:

W_{μ} = Energia gasta no atrito.

P_{μ} = Potência de Atrito.

A_d = Área de contato projetada.

Para o cálculo da potência de atrito, utiliza-se a equação 2.43:

$$P_{\mu} = P_{GES} - P_u \quad (\text{eq. 2.43})$$

Onde:

P_{μ} = Potência de Atrito.

P_{GES} = Potência total.

P_u = Potência.

Para o cálculo da potência total, utiliza-se a equação 2.45 desenvolvida a partir da equação 2.44:

$$P_{GES} = \frac{M_{dGES} \times v}{R} \quad (\text{eq. 2.44})$$

$$P_{GES} = \frac{F_w \times ld \times v}{R} \quad (\text{eq. 2.45})$$

Onde:

P_{GES} = Potência total.

M_{dGES} = Momento.

v = Velocidade tangencial do cilindro.

R = Raio do Cilindro de laminação.

F_w = Força de laminação.

Para o cálculo da potência utilizada, utiliza-se a equação 2.46:

$$P_u = K_{wm} \times \varphi_h \times b_m \times h_1 \times v \quad (\text{eq. 2.46})$$

Onde:

P_u = Potência de Atrito.

K_{wm} = Resistência à deformação da barra.

φ_h = Deformação verdadeira da altura.

b_m = Largura média da barra.

h_1 = Altura após da barra passar no cilindro.

v = Velocidade tangencial do cilindro.

Para o cálculo da resistência a deformação, utiliza-se a equação 2.47:

$$K_{wm} = \frac{F_w}{b_m \times ld} \quad (\text{eq. 2.47})$$

Onde:

K_{wm} = Resistência à deformação da barra.

F_w = Força de laminação.

b_m = Largura média da barra.

ld = Arco de contato.

Para o cálculo da vazão de material, utiliza-se a equação 2.48:

$$V_a = b_m \times h_1 \times v \quad (\text{eq. 2.48})$$

Onde:

V_a = Vazão de material da barra.

b_m = Largura média da barra.

h_1 = Altura após da barra passar no cilindro.

v = Velocidade tangencial do cilindro.

2.8.2 Perda de Calor na Laminação

A barra no processo de laminação perde calor por condução térmica entre barra e cilindro, radiação térmica da barra para o meio e por convecção do ar em volta da barra e do sistema de refrigeração do cilindro de laminação. A Figura 2.11 mostra o processo de perda de calor de forma análoga, levando em consideração que no processo de laminação a quente, sistemas de resfriamento a base de água são utilizados para baixar a temperatura do cilindro de laminação.

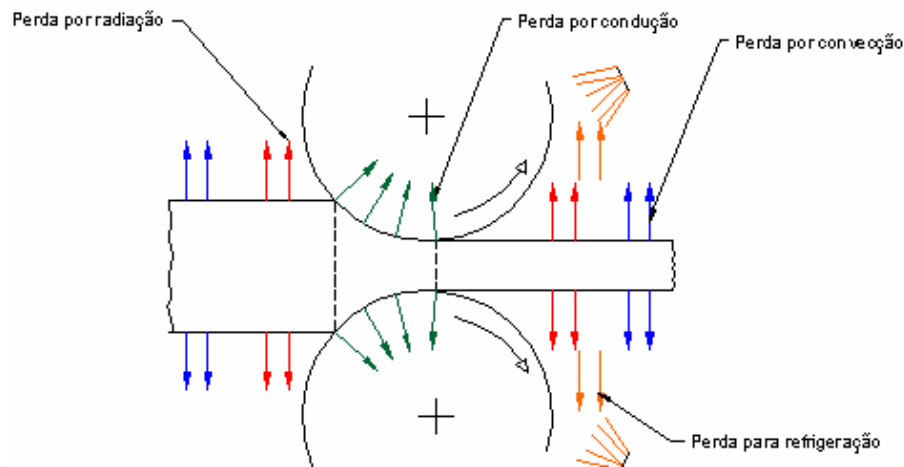


Figura 2.11 – Perda de calor na laminação.

Na Figura 2.11 é possível verificar a perda de calor para a refrigeração do cilindro de laminação. A refrigeração se faz necessária para que a temperatura do cilindro de laminação não cresça a ponto de alterar as propriedades mecânicas de resistência à flexão. Contudo o uso da água na refrigeração pode causar aumento da corrosão superficial do cilindro, criando porosidade no cilindro ⁽²⁷⁾.

2.8.2.1 Perda por Condução Térmica

A condução de calor é a troca de energia entre sistemas ou partes do mesmo sistema, no caso entre a barra e o cilindro em diferentes temperaturas que ocorre pela interação molecular, onde moléculas de alto nível energético transferindo energia às outras de menor nível. Nos metais os elétrons livres se movem na estrutura cristalina, aumentando a

intensidade da difusão energética ⁽²⁸⁾.

A transferência de calor aplicado na laminação, apresenta condições extras para análise, pois o sistema opera sem geração interna de calor, com efeitos multidirecionais variando ao longo do tempo. Como a transferência de calor depende do tempo, é possível enquadrar a laminação a quente como problema do tipo não estacionário, ou transiente, com mudanças no sistema de análise ⁽²⁶⁾.

A condução térmica ocorre na laminação entre barra e o cilindro e no interior da barra para a superfície desta. A superfície da barra também perde energia por radiação e convecção. A troca de calor entre a barra e o cilindro é grande devido a grande diferença de temperatura entre as duas superfícies, sendo que na zona de contato a mudança de temperatura é muito maior ⁽²⁹⁾, devido à alta temperatura da barra em relação ao cilindro ⁽³⁰⁾. Na laminação de aços com baixo carbono, a temperatura do cilindro na região de contato entre cilindro e peça pode variar entre 400 e 600 °C ⁽²⁴⁾.

Um fator determinante para a transferência de calor por contato é a resistência térmica de contato, que é a passagem calor da barra para o cilindro de laminação. Neste caso, substâncias que ficam entre o cilindro e a barra diminuem a transferência de calor. A oxidação do material da barra e a utilização de lubrificantes para a diminuição do atrito são exemplos de substâncias que interferem na transferência de calor por condução.

2.8.2.1.1 Modelos de Cálculo da Perda de Temperatura por Condução

O modelo matemático empírico de Hensel e Spittel e o modelo de Geleji prevêm a perda de temperatura pela condução térmica entre o cilindro e a barra. Estes modelos estão descritos abaixo.

a) Modelo de Hensel e Spittel:

O modelo matemático de Hensel e Spittel para cálculo das perdas de temperatura por condução é mostrado abaixo na equação 2.49 ⁽²⁵⁾:

$$\Delta\theta_L = \frac{2 \times k \times ld \times (\theta_B - \theta_w)}{v \times h_1 \times \gamma \times c_p} \quad (\text{eq. 2.49})$$

Onde:

$\Delta\theta_L$ = Variação de temperatura por condução.

k = Fator de condutibilidade térmica.

l_d = Arco de contato.
 θ_B = Temperatura no interior da barra.
 θ_w = Temperatura média do cilindro.
 v = Velocidade tangencial do cilindro.
 h_1 = Altura após da barra passar no cilindro.
 γ = Massa específica da barra.
 c_p = Calor específico do material da barra.

Para o cálculo do fator de condutibilidade térmica, tem-se a equação 2.50:

$$k = \frac{b_3}{2 \times \sqrt{t_B}} \times \left[e^{n^2} \times (1 - \phi(n)) \right] - \left(\frac{1}{n} \right) + \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \quad (\text{eq. 2.50})$$

Onde:

k = Fator de condutibilidade térmica.
 b_3 = Coeficiente de transferência de calor na barra.
 t_B = Tempo de contato entre cilindro e barra.
 n = Argumento da função de Gauss.
 $\phi(n)$ = Função de Gauss.
 π = Pi.

Para o cálculo do argumento da função de Gauss, tem-se a equação 2.51:

$$n = \frac{2 \times \lambda_2}{b_3} \times \frac{\sqrt{t_B}}{s} \quad (\text{eq. 2.51})$$

Onde:

n = Argumento da função de Gauss.
 λ_2 = Fator de condução térmica da carepa.
 b_3 = Coeficiente de transferência de calor na barra.
 t_B = Tempo de contato entre cilindro e barra.
 s = espessura da carepa.

Para o cálculo do tempo de contato, utiliza-se a equação 2.52:

$$t_B = \frac{l_d}{v} \quad (\text{eq. 2.52})$$

Onde:

t_B = Tempo de contato entre cilindro e barra
 l_d = Arco de contato.
 v = Velocidade tangencial do cilindro.

Para o cálculo da função de Gauss, utiliza-se a equação 2.53:

$$\phi(n) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \int_0^n e^{(-t)^2} \times dt \quad (\text{eq. 2.53})$$

Onde:

$\phi(n)$ = Função de Gauss.

n = Argumento da função de Gauss.

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor da barra, tem-se a equação 2.54:

$$b_3 = \sqrt{\phi \times c_p \times \gamma} \quad (\text{eq. 2.54})$$

Onde:

b_3 = Coeficiente de transferência de calor na barra.

ϕ = Coeficiente de transferência de calor.

c_p = Calor específico do material da barra.

γ = Massa específica da barra.

onde:

O fator de condução térmica da carepa (do aço), utilizado nos cálculos está disposto abaixo, sendo que esta depende da temperatura de laminação da barra ⁽³⁾:

$$\lambda_2 = 39 \text{ W/m.K} \rightarrow T_L = 20^\circ\text{C.}$$

$$\lambda_2 = 27 \text{ W/m.K} \rightarrow T_L = 900^\circ\text{C.}$$

$$\lambda_2 = 32 \text{ W/m.K} \rightarrow T_L = 1300^\circ\text{C.}$$

O valor do coeficiente de transferência de calor está disposto abaixo e este depende do tipo de contato existente entre a barra e cilindro de laminação ⁽³⁾:

$$\phi = 200 \text{ a } 20000 \text{ W/m}^2.\text{K} \rightarrow \text{Para contato metal-metal.}$$

$$\phi = \text{até } 100000 \text{ W/m}^2.\text{K} \rightarrow \text{Para condições externas.}$$

$$\phi = 2000 \text{ a } 8000 \text{ W/m}^2.\text{K} \rightarrow \text{Para contato aço-aço.}$$

b) Modelo de Geleji:

O cálculo da perda de temperatura por condução térmica entre barra e cilindro de laminação está disposto abaixo ⁽²³⁾ na equação 2.55:

$$\Delta\theta_L = \frac{2 \times ld \times b_m \times (T_L - T_c) \times t_B \times \phi}{G \times c_p} \quad (\text{eq. 2.55})$$

Onde:

$\Delta\theta_L$ = Variação de temperatura por condução.

ld = Arco de contato.

b_m = Largura média.

T_c = Temperatura do cilindro de laminação.

T_L = Temperatura da barra.

t_B = Tempo de contato entre cilindro e barra.

ϕ = Coeficiente de transferência de calor.

G = Massa da barra.

c_p = Calor específico do material da barra.

Para o cálculo da largura média, utiliza-se a equação 2.56:

$$b_m = \frac{b_1 + b_0}{2} \quad (\text{eq. 2.56})$$

Onde:

b_m = Largura média.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

b_1 = Largura depois da barra passar no cilindro.

Para o cálculo do tempo de contato, tem-se a equação 2.57:

$$t_B = \frac{ld}{v} \quad (\text{eq. 2.57})$$

Onde:

t_B = Tempo de contato entre cilindro e barra.

v = Velocidade tangencial do cilindro.

ld = Arco de contato.

Para o cálculo da massa da barra, utiliza-se a equação 2.58:

$$G = h_0 \times b_0 \times l_0 \times \gamma \quad (\text{eq. 2.58})$$

Onde:

G = Massa da barra.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.

l_0 = Comprimento inicial da barra.

γ = Massa específica da barra.

Onde:

O valor do coeficiente de transferência de calor utilizado nos cálculos está disposto abaixo, sendo que este trabalha em uma faixa de valores, no caso o valor utilizado seguiu a pior condição que era o valor máximo de transferência ⁽²³⁾:

$$\phi = 1000 \text{ a } 5000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

2.8.2.2 Perda por convecção

A convecção pode ser definida como a transmissão de calor entre um contorno sólido e um fluido, combinando condução com transporte de massa. Se o contorno está a uma temperatura maior que a do fluido, o calor se transmite, primeiramente, por condução do sólido para as partículas do fluido na vizinhança da parede, aumentando a energia interna do fluido, ocorrendo um movimento no fluido com as partículas de maiores temperaturas subindo e a de menores descendo. Quando as partículas fluidas aquecidas atingem uma região de menor temperatura, o calor é transferido por condução do fluido mais quente para o fluido mais frio ⁽³¹⁾.

A troca de calor por convecção entre a barra e a atmosfera pode ser desprezada devido à troca de calor ser muito maior com um fluido que com ar, ou seja com o fluido de refrigeração.

A convecção ocorre com parte do fluido de refrigeração dos cilindros que cai sobre a barra na saída do laminador. Como a vazão de água é grande, parte desse líquido cai sobre a barra, retirando calor da superfície do material.

2.8.2.2.1 Cálculo da Perda de Temperatura por Refrigeração de Água

A perda de temperatura por refrigeração do cilindro está prevista no modelo matemático de Hensel e Spittel, expresso na equação 2.59 ⁽²⁵⁾:

$$\Delta\theta_z = \frac{W_{\text{SPEZ}} \times \gamma_w \times W_e}{h_1 \times \gamma \times c_p \times v} \quad (\text{eq. 2.59})$$

Onde:

$\Delta\theta_z$ = Variação de temperatura por refrigeração de água.

W_{SPEZ} = Vazão de água específica de refrigeração.

γ_w = Massa específica da água.

W_e = Fator de evaporação.

h_1 = Altura após da barra passar no cilindro.

γ = Massa específica da barra.

c_p = Calor específico do material da barra.

v = Velocidade tangencial do cilindro.

Para o cálculo da vazão específica de água, utiliza-se a equação 2.60:

$$W_{\text{SPEZ}} = \frac{W_{\text{to}}}{b_{\text{ko}}} + \frac{W_{\text{tu}}}{b_{\text{ku}}} \quad (\text{eq. 2.60})$$

Onde:

W_{SPEZ} = Vazão de água específica de refrigeração.

W_{to} = Vazão de água de refrigeração superior.

W_{tu} = Vazão de água de refrigeração inferior.

b_{ko} = Largura de exposição da barra na refrigeração da água superior.

b_{ku} = Largura de exposição da barra na refrigeração da água inferior.

Para o cálculo do fator de evaporação, utiliza-se a equação 2.61:

$$W_e = (1 - Y_w) \times C_w \times (\theta_{\text{ab}} - \theta_{\text{zu}}) + Y_w \times r + Y_w \times (100 - \theta_{\text{zu}}) \times C_w \quad (\text{eq. 2.61})$$

Onde:

W_e = Fator de evaporação.

Y_w = Água evaporada.

C_w = Calor específico da água.

θ_{ab} = Temperatura de saída da água.

θ_{zu} = Temperatura de entrada da água.

r = Calor de vaporização da água.

Onde:

O valor da massa específica da água ⁽²⁶⁾ utilizada nos cálculos está descrita abaixo depende da temperatura da água de refrigeração, no caso a temperatura ambiente:

$$\gamma_w = 1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow T_L = 285 \text{ K.}$$

$$\gamma_w = 0,998 \text{ kg/m}^3 \rightarrow T_L = 295 \text{ K.}$$

$$\gamma_w = 0,997 \text{ kg/m}^3 \rightarrow T_L = 305 \text{ K.}$$

2.8.2.3 Perda por Radiação

A radiação térmica é o fluxo de radiação eletromagnética emitida por um material (corpo sólido, banho de líquido, mistura de gases) devido à temperatura absoluta do material. A temperatura e a radiação térmica emitida são reflexos do grau de agitação das moléculas ⁽²¹⁾. Na laminação a quente a temperatura do material está acima da temperatura ambiente, com isso a quantidade de energia despendida pelo material é maior que a recebida por irradiação do meio ambiente.

A quantidade da transferência de calor entre barra e o meio é dada pelo gradiente de temperatura da barra e do meio elevado a quarta potência, isto quer dizer que quanto maior a diferença de temperatura entre barra e o meio, maior a perda por radiação. Quando o material estiver à temperatura ambiente, a quantidade de energia radiada vai ser igual à quantidade de energia recebida por irradiação e a perda de temperatura por radiação cessa.

Para laminações onde a distância entre o laminador e o forno são grandes, e o tempo de transporte supera os 20 segundos, a perda de temperatura por radiação entre a barra e o meio passa a ser significativa ⁽³²⁾. Neste caso a camada de carepa influencia na perda de temperatura por radiação por ser um isolante térmico.

2.8.2.3.1 Cálculo da Perda de Calor por Radiação

Os modelos matemáticos empíricos de Hensel e Spittel e o modelo de Geleji prevêem a perda de temperatura pela condução térmica entre o cilindro e a barra. Estes modelos estão descritos abaixo.

a) Modelo de Hensel e Spittel:

A perda de temperatura por radiação térmica da barra pode ser calculada pela equação 2.62 ⁽²⁵⁾:

$$\Delta\theta_s = \frac{2 \times L \times C_{sr} \times a_{st}}{v \times h_1 \times \gamma \times c_p} \quad (\text{eq. 2.62})$$

Onde:

$\Delta\theta_s$ = Variação de temperatura por radiação.

L = Distância entre laminadores.

C_{sr} = Coeficiente de transferência de calor.

a_{st} = Gradiente de temperatura.

h_1 = Altura após de a barra passar no cilindro.

γ = Massa específica da barra.

c_p = Calor específico do material da barra.

v = Velocidade tangencial do cilindro.

Para o cálculo do gradiente de temperatura, tem-se a equação 2.63:

$$a_{st} = \sqrt[4]{(\theta_B + \Delta\theta_u + \Delta\theta_\mu - \Delta\theta_L)} - \sqrt[4]{\frac{T_a}{100}} \quad (\text{eq. 2.63})$$

Onde:

a_{st} = Gradiente de temperatura.
 θ_B = Temperatura no interior da barra.
 $\Delta\theta_u$ = Variação de temperatura por conformação.
 $\Delta\theta_\mu$ = Variação de temperatura por atrito.
 $\Delta\theta_L$ = Variação de temperatura por condução.
 T_a = Temperatura ambiente.

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor, utiliza-se a equação 2.64:

$$C_{sr} = \varepsilon \times C \quad (\text{eq. 2.64})$$

Onde:

C_{sr} = Coeficiente de transferência de calor.
 ε = Coeficiente de irradiação da barra.
 C = Coeficiente de condutibilidade térmica.

Onde os valores de emissividade, constante de radiação do corpo negro e a constante de Stefan – Boltzmann utilizados nos cálculos estão dispostos abaixo.

Emissividade do material da barra ⁽²³⁾: $\varepsilon = 0,8$

Constante de radiação do corpo negro ⁽²³⁾: $C = 4,96 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{k}^4$

Constante de Stefan - Boltzmann ⁽²⁶⁾: $C = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}^4$

b) Modelo de Geleji:

Para o cálculo de perda de temperatura por radiação da barra foi utilizada a equação 2.65 ⁽²³⁾:

$$\Delta\theta_s = \frac{Q}{G \times c_p} \quad (\text{eq. 2.65})$$

Onde:

$\Delta\theta_s$ = Variação de temperatura por radiação.
 Q = Fluxo de calor entre barra e cilindro.
 G = Massa da barra.
 c_p = Calor específico do material da barra.

Para o cálculo do fluxo de calor, utiliza-se a equação 2.66:

$$Q = \varepsilon \times C_G \times z \times A_R \times \left(\sqrt[4]{\frac{T_L}{100}} - \sqrt[4]{\frac{T_a}{100}} \right) \quad (\text{eq. 2.66})$$

Onde:

Q = Fluxo de calor entre barra e cilindro.

ε = Coeficiente de irradiação da barra.

C_G = Fator de correção pelo modelo de Geleji.

z = Tempo de radiação.

A_R = Área radiante.

T_L = Temperatura da barra.

T_a = Temperatura ambiente.

Para o cálculo da área radiante, tem-se a equação 2.67:

$$A_R = (2 \times h_0 \times l_0) + (2 \times b_0 \times l_0) + (2 \times h_0 \times b_0) \quad (\text{eq. 2.67})$$

Onde:

A_R = Área radiante.

h_0 = Altura antes da barra ao passar pelo cilindro.

b_0 = Largura antes da barra ao passar pelo cilindro.

l_0 = Comprimento inicial da barra.

Para o cálculo da massa da barra, utiliza-se a equação 2.68:

$$G = h_0 \times b_0 \times l_0 \times \gamma \quad (\text{eq. 2.68})$$

Onde:

G = Massa da barra.

b_0 = Largura antes da barra passar no cilindro.

h_0 = Altura antes de a barra passar no cilindro.

l_0 = Comprimento inicial da barra.

γ = Massa específica da barra.

Onde os valores de emissividade e constante de radiação do corpo negro utilizados nos cálculos estão dispostos abaixo.

Emissividade do aço: $\varepsilon = 0,8$

Constante de radiação do corpo negro ⁽²³⁾: $C = 4,96 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{k}^4$

O valor do calor específico do material da barra utilizado nos cálculos está disposta abaixo, sendo que esta depende da temperatura de laminação da barra:

para $T_L = 300 \text{ k} \rightarrow c_p$:

$$C_p = 0,11 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

para $T_L = 1000 \text{ k} \rightarrow c_p$

$$C_p = 0,299 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

2.8.3 Modelos de Cálculo da Variação Total da Temperatura na Laminação

Os modelos matemáticos para o cálculo da temperatura a cada passe são a somatória dos ganhos e perdas de temperatura durante o processo de laminação. A somatória do ganho e perda de temperatura a cada passe está descrito abaixo segundo o modelo de Hensel e Spittel e o modelo de Geleji:

a) Modelo de Hensel e Spittel:

A variação de temperatura da barra ao laminar pode ser expressa pela equação 2.69 ⁽²⁵⁾ que é dividida em ganhos e perdas:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_u + \Delta\theta_\mu - \Delta\theta_L - \Delta\theta_Z - \Delta\theta_S \quad (\text{eq. 2.69})$$

Onde:

$\Delta\theta$ = Variação de temperatura na barra.

$\Delta\theta_u$ = Variação de temperatura pelo processo de conformação.

$\Delta\theta_\mu$ = Variação de temperatura por atrito.

$\Delta\theta_L$ = Variação de temperatura por condução.

$\Delta\theta_Z$ = Variação de temperatura por refrigeração de água.

$\Delta\theta_S$ = Variação de temperatura por radiação.

b) Modelo de Geleji:

A variação de temperatura da barra ao ser laminada, pode ser expressa pela equação 2.70 ⁽²³⁾, que também está dividida entre ganhos e perdas de temperatura:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_u - \Delta\theta_L - \Delta\theta_S \quad (\text{eq. 2.70})$$

Onde:

$\Delta\theta$ = Variação de temperatura na barra.

$\Delta\theta_u$ = Variação de temperatura pelo trabalho de conformação.

$\Delta\theta_L$ = Variação de temperatura por condução.

$\Delta\theta_s$ = Variação de temperatura por radiação.

2.9 Força de Laminação

A força de laminação é a força necessária para deformar o material entre os cilindros de laminação. Diferentemente da perda de temperatura que afeta a laminação desde a saída da barra do forno de aquecimento até o leito de resfriamento, a força de laminação ocorre somente no arco de contato. A Figura 2.12 mostra como a tensão de laminação está distribuída ao longo do arco de contato.

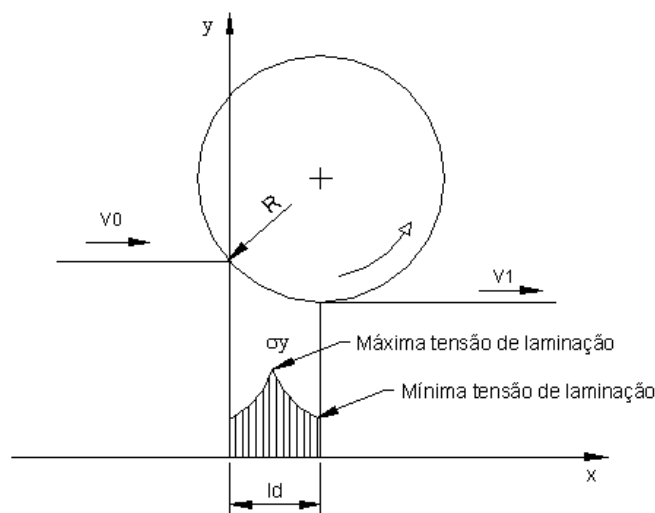


Figura 2.12 – Distribuição de tensões na laminação de perfil chato ⁽³⁾.

A Figura 2.12 mostra que as tensões menores estão nas extremidades do arco de contato. A força maior está aplicada no ponto neutro, onde não existe movimento relativo entre a barra e o cilindro e a força aplicada integralmente para reduzir a altura da barra. A força varia de acordo com a resistência do próprio material que está sendo laminado, da temperatura de laminação, do atrito entre a barra e o cilindro e da velocidade de deformação. Entretanto a própria resistência à deformação do material depende do caminho de deformação, da velocidade de deformação e do histórico de temperatura da barra ⁽³³⁾.

Os modelos matemáticos são utilizados para mensurar a força de laminação e com isso determinar o torque necessário para laminar o material, sendo estes modelos de difícil desenvolvimento, pois o processo de laminação não é linear, com parâmetros de força de laminação, velocidade, temperatura de laminação entre outros fatores interagindo entre si ⁽³⁴⁾. Contudo é possível estimar o valor do torque necessário para laminar a barra no laminador e a potência necessária por modelos empíricos, aplicando fatores de correção para

cada tipo de laminador ⁽³⁵⁾.

A temperatura de laminação influencia na força de laminação, onde quanto maior a temperatura, menor a energia gasta para deformar o material. Outro ponto de influência da temperatura está no atrito, pois quanto maior a temperatura, menor o coeficiente de atrito ⁽³⁶⁾.

A velocidade de deformação influencia no tempo total de laminação, ou seja, quanto maior a velocidade menor o tempo de laminação com a mesma massa de material passando pelos cilindros, e por conseqüência, maior será a força necessária para deformar o material. Com o aumento da velocidade de deformação, ocorre também um aumento efeito do atrito sobre o material desgastando os cilindros de laminação com maior velocidade.

A vibração no processo de laminação que ocorre quando a barra passa pelos cilindros de laminação e os fluxos restringidos de material no arco de contato, também influenciam na força de laminação e na velocidade de saída do material. A vibração no sistema de laminação pode ser prevista utilizando-se modelos dinâmicos de cálculo ⁽³⁷⁾, mas neste trabalho não foram aplicados devido à baixa influencia da vibração no processo de laminação analisado.

2.9.1 Tensões de laminação

Os materiais submetidos a carregamentos externos como no processo de laminação geram tensões devido à força de laminação feita pelo cilindro sobre uma determinada área. Esta área é expressa pela equação 2.71.

$$A_d = l_d \times b_m \quad (\text{eq. 2.71})$$

Onde:

l_d = Arco de contato.

b_m = Largura média.

Para o cálculo da largura média, utiliza-se a equação 2.72

$$b_m = \frac{b_1 + b_0}{2} \quad (\text{eq. 2.72})$$

Onde:

b_0 = Largura antes do passe.

b_1 = Largura depois do passe.

Com as equações 2.71 e 2.72 é possível determinar a força necessária para se laminar

um material, através da equação 2.73.

$$F_w = \int^d \sigma \times dA_d \quad (\text{eq. 2.73})$$

Onde:

σ = Resistência ao escoamento.

A_d = Área de contato projetada.

Na prática, utiliza-se a equação 2.74.

$$F_w = k_w \times A_d \quad (\text{eq. 2.74})$$

Onde:

k_w = Resistência à conformação.

A_d = Área de contato projetada.

A resistência à conformação depende do fator geométrico do arco de contato e atrito do atrito entre a barra e o cilindro e da tensão de escoamento do material da barra laminada.

2.9.2 Tensão de Escoamento

Cada material possui uma determinada resistência ao escoamento quando sofre deformação. Esta resistência à deformação varia com as condições encontradas na estrutura cristalina, onde um acúmulo de tensões de um ou vários processos anteriores podem aumentar a resistência do material ao escoamento.

No processo de laminação a quente, a barra ao passar pelo cilindro sofre deformação, e por conseqüência um aumento das tensões internas. Neste ponto tem início o processo de recristalização dos grãos, aliviando as tensões internas. Ao mesmo tempo em que o material é trabalhado, ocorre a recristalização dinâmica e um processo de recuperação dinâmica do material.

A recristalização dinâmica ocorre quando o material está no processo de laminação entre os cilindros, e a recuperação estática ocorre quando a barra está entre os intervalos de laminação e o final do processo de laminação. No trabalho a quente dos aços pode ocorrer uma recristalização dinâmica do material somado com uma recuperação dinâmica. Uma recuperação estática pode ocorrer junto com uma recristalização estática no material após o termino do processo de conformação a quente ⁽³⁸⁾. A temperatura de laminação e a

distribuição de tensões durante a laminação são os principais fatores que influenciam nos efeitos cinéticos de transformação estáticos e dinâmicos durante a deformação do material ⁽³⁹⁾.

Processos onde a velocidade de deformação é relativamente baixa, os efeitos dinâmicos são pequenos e estes podem ser desconsiderados, ficando o processo como quase-estático ⁽⁴⁰⁾. O histórico de deformação que a barra sofreu também afeta a recristalização do material e por conseqüência as propriedades mecânicas durante e depois da laminação ⁽⁴¹⁾.

Em conseqüência do processo de laminação, ocorre também o que se chama caminho de deformação (*strain path*), onde novos estudos indicam que o caminho de deformação tem significativa influência na evolução microestrutural da barra laminada ⁽⁴²⁾. Este efeito é causado pelo fluxo do material ao passar pelo laminador, onde a região central da barra tende a forçar o material para frente e as regiões laterais tendem a deslocar o material para a largura da barra, formando sentidos de deslocamento na barra. Para laminadores trios ou duo reversíveis, ocorre o efeito do caminho de deformação reverso. Quanto maior for a largura do material laminado, maior este efeito. O caminho de deformação afeta a recristalização do material e por conseqüência a força necessária para se laminar um material.

O caminho de deformação influencia na força de laminação porque altera a recristalização do material. Como a recristalização não ocorre instantaneamente, isto faz com que o alívio de tensões não ocorra de forma imediata, existindo um acúmulo de tensões no material, aumentando a força necessária para deformar o material.

A Figura 2.13 mostra um gráfico com os valores da tensão de escoamento utilizado no experimento.

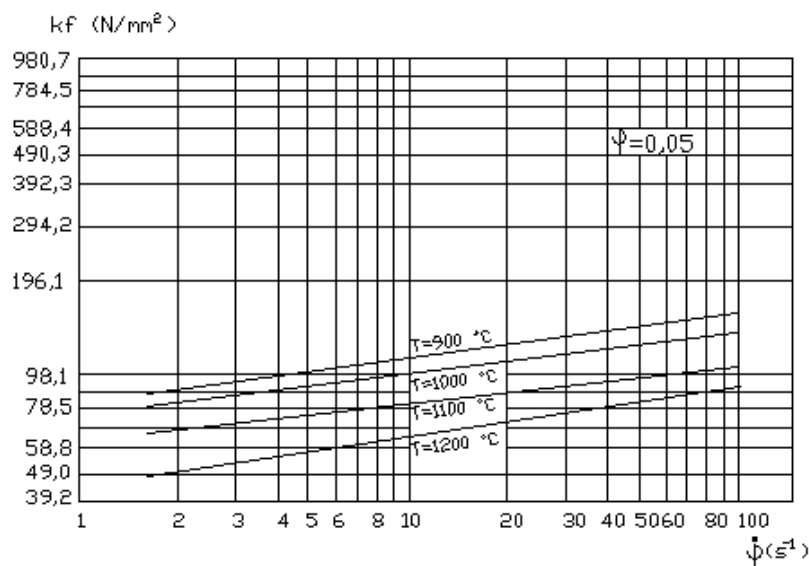


Figura 2.13 – Curva da tensão de escoamento de um aço com 0,15 % de carbono ⁽¹¹⁾.

O gráfico da Figura 2.13 representa as curvas da tensão de escoamento de um aço com

0,15 % de carbono que sofreu uma redução (ϕ_h) de 0,05. São representadas quatro curvas que determinadas pela temperatura de laminação da barra. Com os valores da temperatura da barra, deformação verdadeira sofrida pela barra e da velocidade de deformação, é possível encontrar o valor da tensão de escoamento.

A tensão de deformação pode ser expressa como uma função:

$$k_f = f(\phi, \dot{\phi}, T_L, \text{material, microestrutura})$$

2.9.3 Resistência à Conformação

Efeitos relacionados com temperatura de laminação, atrito entre a barra e o cilindro, tensões de escoamento e velocidade de deformação influenciam na resistência à conformação de um metal no laminador ⁽⁴³⁾. A heterogeneidade da resistência a conformação e do atrito entre a barra e o cilindro pode afetar a deformação da barra no laminador ⁽⁴⁴⁾. Em síntese, a resistência à conformação pode ser expressa por uma função de:

$$k_w = f(k_f, \text{atrito, geometria})$$

2.9.4 Modelos de Cálculo da Força de Laminação

Os modelos matemáticos para o cálculo da força de laminação são utilizados nos cálculos da variação de temperatura, além da projeção da potência necessária do conjunto de acionamento para laminar uma barra no laminador. Neste capítulo são descritos os modelos de Sims, Ekelund e o de Geleji.

2.9.4.1 Modelo de Sims

O cálculo de força de laminação pelo modelo de Sims pode ser executado utilizando-se a equação 2.75 ⁽¹¹⁾.

$$F_w = A_d \times k_w$$

(eq. 2.75)

Para o cálculo da resistência a deformação, tem-se a equação 2.76:

$$k_w = k_{fm} \times Q_p (R/h_1, \varepsilon_h)$$

(eq. 2.76)

Onde:

k_{fm} = Tensão de escoamento média.

Q_p = Fator de correção do modelo de Sims para o fator de colamento.

R = Raio do cilindro de laminação.

h_1 = Altura da barra depois do passe.

ε_h = Deformação relativa na altura.

Para o cálculo da tensão de escoamento média, utiliza-se a equação 2.77:

$$k_{fm} = 1,15 \times k_f$$

(eq. 2.77)

Onde:

k_{fm} = Tensão de escoamento média.

k_f = Tensão de escoamento.

Para o cálculo da função da geometria de deformação em condição de colamento, tem-se a equação 2.78:

$$Q_p = \left(\frac{\pi}{2}\right) \times \sqrt{\frac{1-\varepsilon_h}{\varepsilon_h}} \times \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon_h}{1-\varepsilon_h}} - \left(\frac{\pi}{4}\right) - \sqrt{\frac{1-\varepsilon_h}{\varepsilon_h}} \times \left(\frac{R}{h_1}\right) \times \ln\left(\frac{h_n}{h_1}\right) + 0,5 \times \sqrt{\frac{1-\varepsilon_h}{\varepsilon_h}} \times \sqrt{\frac{R}{h_1}} \times \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon_h}\right)$$

(eq. 2.78)

Onde:

Q_p = Fator de correção do modelo de Sims para o fator de colamento.

ε_h = Deformação relativa na altura.

R = Raio do Cilindro.

h_n = Altura da barra na zona sem escorregamento.

h_1 = Altura da barra depois do passe.

Para o cálculo da altura da barra na zona de escoamento, utiliza-se a equação 2.79:

$$h_n = h_1 \times \left(1 + \frac{v_1 - v_2}{v_t}\right)$$

(eq. 2.79)

Onde:

h_n = Altura da barra na zona de escoamento.

v_1 = Velocidade de saída da barra.

v_t = Velocidade periférica no fundo do canal em mm/s.

h_1 = Altura da barra depois do passe.

É possível encontrar o valor de Q_P sem a utilização da equação 2.78, utilizando as curvas para visualizar o valor de Q_P . A Figura 2.14 mostra uma série de curvas práticas para o valor de Q_P .

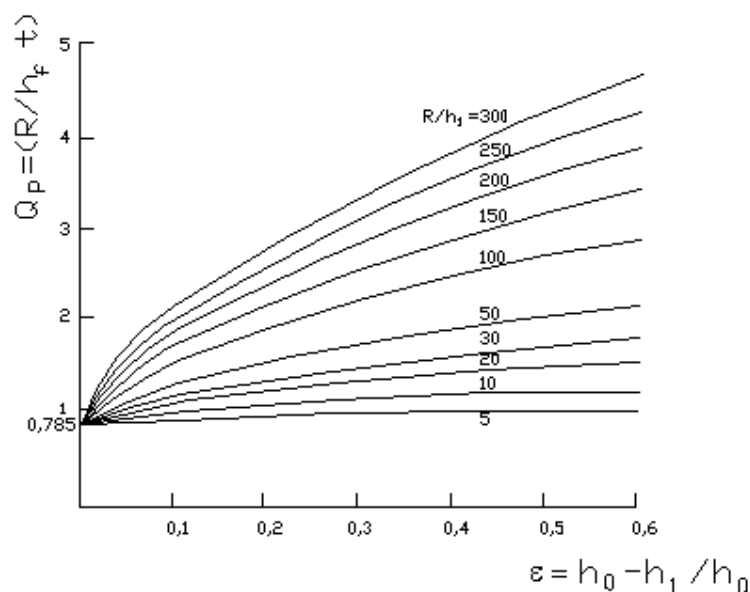


Figura 2.14 – Valores práticos para a função Q_P ⁽¹¹⁾.

No caso de se utilizar curvas para se determinar o Q_P , a Figura 2.14 mostra curvas em vez de valores tabelados. Utilizando os mesmos valores do exemplo anterior, como de $h_0 = 70,4$ mm, $h_1 = 55$ mm e $R = 160$ mm, o valor da relação $R / h_1 = 2,9$ (o valor mais próximo é 5) e o valor da redução absoluta $\varepsilon_h = 0,218$. Com estes valores, é retirar do gráfico o valor de $Q_P \cong 1$.

Outro método para o cálculo prático do fator de correção de colamento é a utilização de valores tabelados que estão descritos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores práticos para a função Q_P em Tabela ⁽¹¹⁾.

$\Delta h/h_0$	R/h_1	Q_P	$\Delta h/h_0$	R/h_1	Q_P	$\Delta h/h_0$	R/h_1	Q_P	$\Delta h/h_0$	R/h_1	Q_P
0,1	5	0,9513	0,4	10	1,2443	0,1	30	1,2219	0,4	50	1,9763
0,2	5	1,0109	0,5	10	1,2761	0,2	30	1,4093	0,5	50	2,1234
0,3	5	1,0485	0,6	10	1,2852	0,3	30	1,5567	0,6	50	2,2413
0,4	5	1,0685	0,1	20	1,1371	0,4	30	1,6795	0,1	100	1,5976
0,5	5	1,0719	0,2	20	1,2863	0,5	30	1,7792	0,2	100	1,9630
0,6	5	1,0545	0,3	20	1,4006	0,6	30	1,8528	0,3	100	2,2628
0,1	10	1,0285	0,4	20	1,4908	0,1	50	1,3521	0,4	100	2,5232
0,2	10	1,1257	0,5	20	1,5609	0,2	50	1,6044	0,5	100	2,7563
0,3	10	1,1952	0,6	20	1,6072	0,3	50	1,8066	0,6	100	2,9549

$\Delta h/h_0$	R/h_1	Q_p	$\Delta h/h_0$	R/h_1	Q_p	$\Delta h/h_0$	R/h_1	Q_p	$\Delta h/h_0$	R/h_1	Q_p
0,1	150	1,7814	0,1	200	1,9397	0,1	250	2,0776	0,1	300	2,2012
0,2	150	2,2387	0,2	200	2,4699	0,2	250	2,6694	0,2	300	2,8570
0,3	150	2,6129	0,3	200	2,9061	0,3	250	3,1678	0,3	300	3,3996
0,4	150	2,9422	0,4	200	3,2943	0,4	250	3,6066	0,4	300	3,8879
0,5	150	3,2407	0,5	200	3,6486	0,5	250	4,0103	0,5	300	4,3354
0,6	150	3,5021	0,6	200	3,9630	0,6	250	4,3684	0,6	300	4,7353

Na Tabela 2.1 o valor do Q_p é determinado pelo valor das relações $\Delta h / h_0$ e R / h_1 . Por exemplo sendo o valor de $h_0 = 70,4$ mm, $h_1 = 55$ mm e $R = 160$ mm, o valor de $\Delta h = 15,5$ mm, o valor da relação $\Delta h / h_0 = 0,22$ e o valor da relação $R / h_1 = 2,9$ (valor mais próximo é 5). Com estes valores, é retirado da Tabela 3.1 o valor de $Q_p = 1,0109$.

2.9.4.2 Modelo de Ekelund

O cálculo de força de laminação pelo modelo de Ekelund pode ser obtido utilizando-se a equação 2.80 ⁽¹¹⁾.

$$F_w = A_d \times k_w \quad (\text{eq. 2.80})$$

Para o cálculo da resistência a deformação, tem-se a equação 2.81:

$$k_w = k_e \times k_f \quad (\text{eq. 2.81})$$

Onde:

k_w = Resistência à deformação.

k_e = Fator de influência da geometria e atrito.

k_f = Tensão de escoamento.

Para o cálculo do fator geométrico, tem-se a equação 2.82:

$$k_i = 1 + \frac{1,6 \times \mu \times \sqrt{R \times (h_1 - h_0)} - 1,2 \times (h_0 - h_1)}{h_{0m} + h_{1m}} \quad (\text{eq. 2.82})$$

Onde:

k_e = Fator de influência da geometria e atrito.

μ = Coeficiente de atrito.

R = Raio do cilindro.

h_1 = Altura após de a barra passar no cilindro.
 h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.
 h_{0m} = Altura média da secção de entrada.
 h_{1m} = Altura média da secção de saída.

Para o cálculo da tensão de escoamento, tem-se a equação 2.83:

$$k_f = \sigma + \eta \times \dot{\varphi} \quad (\text{eq. 2.83})$$

Onde:

k_f = Tensão de escoamento.
 η = Coeficiente de plasticidade do material.
 $\dot{\varphi}$ = Velocidade de deformação.
 σ = Resistência ao escoamento.

Para o cálculo do coeficiente de atrito, tem-se a equação 2.84 e 2.85 dependendo do tipo de material do cilindro de laminação:

$$\mu = (1,05 - 0,0005 \times T_L) \quad \text{para cilindros de ferro fundido } (T_L = ^\circ\text{C}). \quad (\text{eq. 2.84})$$

$$\mu = 0,8 \times (1,05 - 0,0005 \times T_L) \quad \text{para cilindros de aço } (T_L = ^\circ\text{C}). \quad (\text{eq. 2.85})$$

Onde:

μ = Coeficiente de atrito.
 T_L = Temperatura da barra.

Para o cálculo da resistência ao escoamento, em um ensaio uniaxial, com $\dot{\varphi} = 0$, utiliza-se a equação 2.86:

$$\sigma = (14 - 0,01 \times T_L) \times (1,4 + \text{C}\% + \text{Mn}\% + 0,3 \times \text{Ca}\%) \quad \text{onde } T_L \text{ em } ^\circ\text{C}. \quad (\text{eq. 2.86})$$

Onde:

σ = Resistência ao escoamento.
 T_L = Temperatura da barra.
 $\text{C}\%$ = Quantidade de Carbono presente na barra.
 $\text{Mn}\%$ = Quantidade de Manganês presente na barra.
 $\text{Ca}\%$ = Quantidade de Cálcio presente na barra.

Para o cálculo do coeficiente de plasticidade do material laminado, tem-se a equação 2.87:

$$\eta = 0,01 \times (14 - 0,01 \times T_L) \times C_v \quad T_L = ^\circ\text{C}. \quad (\text{eq. 2.87})$$

Onde:

η = Coeficiente de plasticidade do material.

T_L = Temperatura da barra.

C_v = Fator de correção do modelo de Ekelund.

Para o cálculo da velocidade de deformação, utiliza-se a equação 2.88:

$$\dot{\phi} = \frac{2 \times v_t \times \sqrt{\frac{h_0 - h_1}{R}}}{h_{om} - h_{1m}} \quad (\text{eq. 2.88})$$

Onde:

R = Raio do cilindro no fundo do canal em mm.

v_t = Velocidade periférica no fundo do canal em mm/s.

b_m = Largura média da barra.

$\dot{\phi}$ = Velocidade de deformação.

h_1 = Altura após da barra passar no cilindro.

h_0 = Altura antes da barra passar no cilindro.

h_{om} = Altura média da secção de entrada.

h_{1m} = Altura média da secção de saída.

Para o cálculo do fator de correção da plasticidade, utiliza-se a equação 2.89, o conforme a velocidade tangencial do cilindro:

$$C_v = 1,094 \times e^{-0,03 \times v} \quad \text{para } v > 3 \text{ m/s.} \quad (\text{eq. 2.89})$$

$$C_v = 1 \quad \text{para } v < 3 \text{ m/s ou } v = 3 \text{ m/s.}$$

Onde:

C_v = Fator de correção do modelo de Ekelund.

v = Velocidade tangencial do cilindro.

Para cálculo de seções não retangulares, utilizam-se valores médios de altura através da equação 2.90.

$$h_m = c \times h_{max} \quad (\text{eq. 2.90})$$

Onde:

h_m = Altura média do calibre.

h_{max} = Altura máxima no fundo do canal.

c = Coeficiente c .

O valor de c é encontrado na Tabela 2.2 com valores para alguns tipos de canais.

Tabela 2.2 – Tabela de valores para c ⁽¹¹⁾.

Tipos de passe	Coefficiente C
Calibre com pequeno raio de concordância	0,63
Calibre com cantos vivos	0,55
Calibre redondo	0,79
Calibre oval	0,67 - 0,85
Calibres verticais	0,50 – 0,65

Os valores da Tabela 2.2 são para o cálculo da altura de fundo de canal devido aos variados tipos de canais existentes.

2.9.4.3 Modelo de Geleji

O cálculo de força de laminação pelo modelo de Geleji utiliza a equação 2.91 ⁽¹¹⁾.

$$F_w = A_d \times k_w \quad (\text{eq. 2.91})$$

Para o cálculo da resistência à deformação, tem-se a equação 2.92:

$$K_w = k \times k_f \quad (\text{eq. 2.92})$$

Onde:

k_w = Resistência à deformação.

k_i = Fator de influência da geometria.

k_f = Tensão de escoamento.

Para o cálculo da resistência ao escoamento, utiliza-se a equação 2.93:

$$k_f = \sigma \times \left(1 + 0,05 \times \dot{\varphi} \right) \quad (\text{eq. 2.93})$$

Onde:

k_f = Tensão de escoamento.

$\dot{\varphi}$ = Velocidade de deformação.

σ = Resistência ao escoamento.

Para o cálculo do fator de influência da geometria, tem-se a equação 2.94:

$$k_i = 1 + 0,1778 \times C \times \frac{ld}{h_m} \times \sqrt[4]{V_d} \quad (\text{eq. 2.94})$$

Onde:

k_f = Tensão de escoamento.

C = Fator de correção de Geleji.

ld = Arco de contato.

h_m = Altura média do calibre.

μ = Coeficiente de atrito.

V_d = Velocidade de deslizamento da barra.

Para o cálculo do fator de correção de Geleji, tem-se as equações 2.95, 2.96 e 2.97 dependendo da relação entre o arco de contato e da altura média do calibre:

$$C_{0,25-1} = 17,0 \times \left(\frac{ld}{h_m} \right)^2 - 29,85 \times \frac{ld}{h_m} + 18,34 \quad \text{para } 0,25 \leq \frac{ld}{h_m} \leq 1 \quad (\text{eq. 2.95})$$

$$C_{1-3} = 0,8 \times \left(\frac{ld}{h_m} \right)^2 - 4,9 \times \frac{ld}{h_m} + 9,6 \quad \text{para } 1 < \frac{ld}{h_m} < 3 \quad (\text{eq. 2.96})$$

$$C_{3-15} = 0,013 \times \left(\frac{ld}{h_m} \right)^2 - 0,293 \times \frac{ld}{h_m} + 2,262 \quad \text{para } 1 < \frac{ld}{h_m} < 3 \quad (\text{eq. 2.97})$$

Onde:

C = Fator de correção de Geleji.

ld = Arco de contato.

h_m = Altura média do calibre.

Para o cálculo do coeficiente de atrito, tem-se as equações 2.98, 2.99 e 2.100, conforme o tipo de material do cilindro de laminação:

$$\mu = 1,05 - 0,0005 \times T_L - 0,056 \times V_d \quad \text{para cilindros de aço } (T_L = ^\circ\text{C}). \quad (\text{eq. 2.98})$$

$$\mu = 0,94 - 0,0005 \times T_L - 0,056 \times V_d \quad \text{para cilindros de ferro fundido } (T_L = ^\circ\text{C}) \quad (\text{eq. 2.99})$$

$$\mu = 0,82 - 0,0005 \times T_L - 0,056 \times V_d \quad \text{para cilindros de aço polido } (T_L = ^\circ\text{C}). \quad (\text{eq. 2.100})$$

Onde:

T_L = Temperatura da barra.

μ = Coeficiente de atrito.

V_d = Velocidade de deslizamento da barra.

Para o cálculo da velocidade de deslizamento da barra, tem-se a equação 2.101:

$$V_d = R_m \times \pi \times \frac{n}{30} \quad (\text{em mm/s}). \quad (\text{eq. 2.101})$$

Onde:

V_d = Velocidade de deslizamento da barra.

n = rotação em RPM.

R_m = Raio médio.

Para o cálculo do raio médio, utiliza-se a equação 2.102:

$$R_m = \frac{1}{2} \times \left(D_C - \frac{A_1}{b_m} \right) \quad (\text{em mm}). \quad (\text{eq. 2.102})$$

Onde:

R_m = Raio médio.

D_C = Distância entre centros dos cilindros.

b_m = Largura média da barra.

A_1 = Área da secção transversal da barra depois do passe.

Para o cálculo da altura média do calibre, tem-se a equação 2.103:

$$h_m = \frac{h_{0m} + h_{1m}}{2} \quad (\text{eq. 2.103})$$

Onde:

h_m = Altura média do calibre.

h_{0m} = Altura média da secção de entrada.

h_{1m} = Altura média da secção de saída.

Para o cálculo da altura média da secção de entrada, utiliza-se a equação 2.104:

$$h_{0m} = \frac{A_0}{b_m} \quad (\text{eq. 2.104})$$

Onde:

h_{0m} = Altura média da secção de entrada.

A_0 = Área da secção transversal da barra antes do passe.

b_m = Largura média da barra.

Para o cálculo da altura média da secção de saída, tem-se a equação 2.105:

$$h_{1m} = \frac{A_1}{b_m} \quad (\text{eq. 2.105})$$

Onde:

h_{1m} = Altura média da secção de saída.

A_1 = Área da secção transversal da barra depois do passe.

b_m = Largura média da barra.

Para o cálculo da velocidade de deformação, utiliza-se a equação 2.106:

$$\dot{\varphi} = \frac{\Delta h_m \times V_d}{h_m \times l_d} \quad (\text{eq. 2.106})$$

Onde:

$\dot{\varphi}$ = Velocidade de deformação.

h_m = Altura média do calibre.

V_d = Velocidade de deslizamento da barra.

l_d = Arco de contato.

Δh_m = Variação absoluta da altura média.

Para o cálculo da variação absoluta da altura média, tem-se a equação 2.107:

$$\Delta h_m = h_{0m} - h_{1m} \quad (\text{eq. 2.107})$$

Onde:

Δh_m = Variação absoluta da altura média.

h_{0m} = Altura média da secção de entrada.

h_{1m} = Altura média da secção de saída.

2.10 Equipamentos de Laminação

Na laminação de barras a quente é necessária uma máquina robusta que suporte as altas cargas exigidas no processo de laminação. Os componentes principais de um laminador são:

- Cadeira ou gaiola (estrutura em ferro fundido que suporta a montagem dos componentes);
- Mancal de cilindro de laminação (para cada cilindro de laminação são utilizados dois mancais);
- Rolamentos para cilindros de laminação;
- Cilindros de laminação;
- Parafusos de regulagem de luz de laminação;

- Parafusos de regulação axial dos mancais;
- Eixos de transmissão de força (transferem a força da caixa de engrenagens para os cilindros);
- Caixa de engrenagens (Com um eixo de entrada e dois ou três de saída, dependendo do tipo do laminador);
- Motor elétrico (Pode ser de corrente contínua ou alternada).

Na Figura 2.15 está representado uma cadeira de um laminador tipo duo, onde estão posicionados os cilindros de laminação, os mancais e a gaiola do laminador.

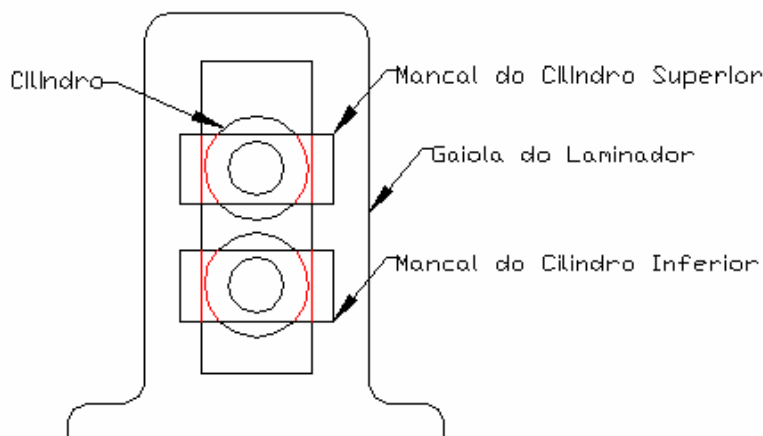


Figura 2.15 – Perfil da cadeira de um laminador duo (esquemático).

Para laminar a barra neste tipo de cadeira representado na Figura 2.15, a barra passa pelos cilindros e em alguns casos, volta por cima do cilindro superior. Nos laminadores duo reversível, a barra volta laminando pelos cilindros, pois este equipamento permite a reversão da rotação dos cilindros de laminação. Na Figura 2.16 está representada uma cadeira de laminação do tipo trio.

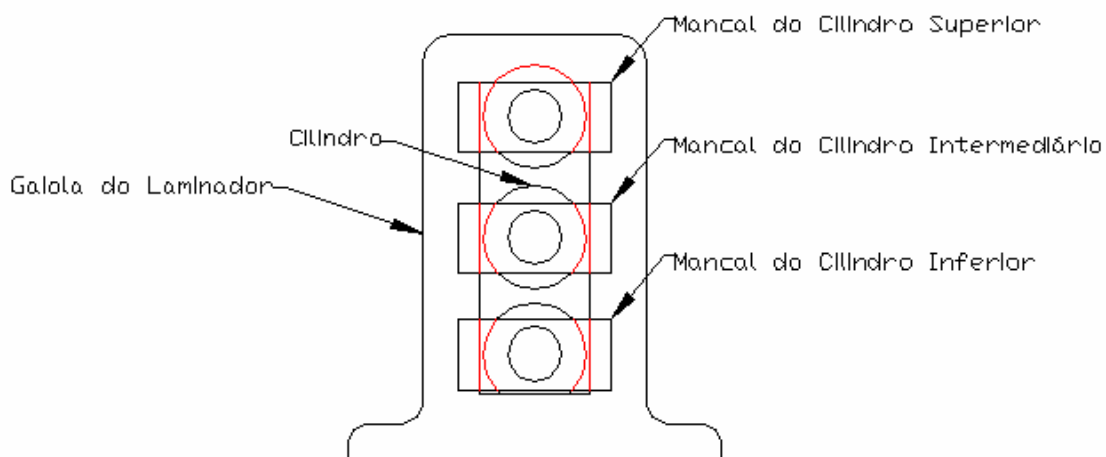


Figura 2.16 – Perfil da cadeira de um laminador trio (esquemático).

No tipo de cadeira representado na Figura 2.16, a barra lamina tanto na ida como na volta.

Na Figura 2.17, um tipo de montagem de um trem laminador. Este tipo de laminador utiliza um motor para todo o laminador que opera lado a lado, fazendo a barra se locomover depois de ser laminado na 1^o cadeira para a segunda assim por diante.

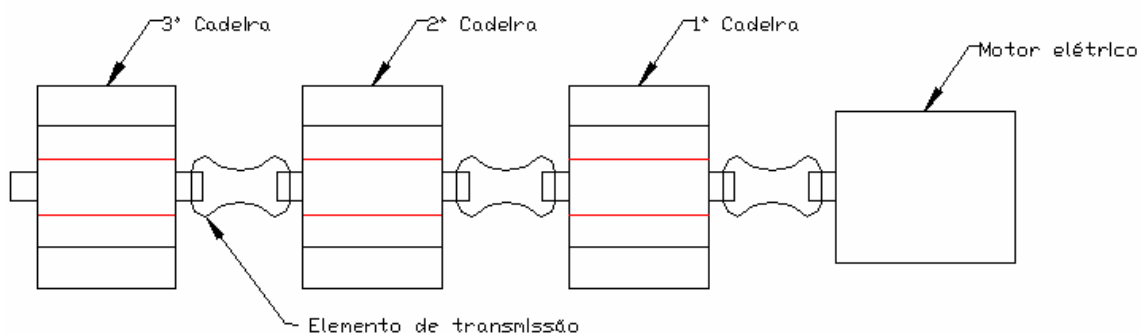


Figura 2.17 – Disposição das cadeiras de um trem laminador.

No tipo de montagem da Figura 2.17, as maiorias das cadeiras são formadas por cadeiras do tipo trio, com alguns laminadores tendo uma cadeira duo no final do trem a fim de ter um único passe de acabamento. Na Figura 2.18 está representada uma montagem de laminação do tipo trio em linha.

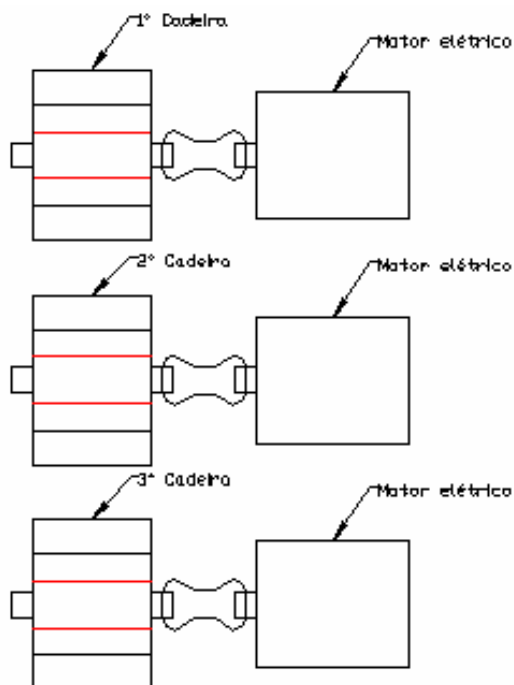


Figura 2.18 – Disposição das cadeiras de um trem laminador em linha.

A Figura 2.18 de montagem das cadeiras de laminação é a colocação destas em linha, sendo que este tipo de montagem permite a diminuição do tempo em que a barra não está sendo laminada, aumentando a produtividade do equipamento. Uma montagem em linha exige um sistema de controle muito maior devido às velocidades das cadeiras serem diferentes. Sistemas modernos de controle de laminação do tipo redes neurais utilizados em montagens em linha de laminadores possuem avançado sistema de automatização, mas mesmo estes sistemas necessitam de dados iniciais para que o sistema possa basear seus cálculos. No caso estes sistemas são abastecidos com dados iniciais retirados de modelos matemáticos empíricos ⁽³⁴⁾.

2.11 Defeitos de Laminação

No processo de laminação podem ocorrer inúmeros defeitos de laminação, problemas de montagem de equipamento, alinhamento dos cilindros de laminação, excesso de carepa na superfície do material, empenamento da barra e torção entre outros defeitos ⁽²⁰⁾. Em um processo de laminação onde ocorrem reduções diferentes da programadas, problemas no alargamento podem ocorrer, ocasionando o aparecimento de dobras de laminação e em alguns casos, falta de preenchimento de material, formações de bigodes entre outros defeitos comprometendo a qualidade da barra laminada ⁽⁴⁵⁾.

Existem defeitos ocasionados pela matéria prima de baixa qualidade como por exemplo o aparecimento de imperfeições na superfície da barra pela migração de impurezas presentes na palanquilha para a superfície do material laminado. Outros defeitos podem ser ocasionados pelo excesso de temperatura de laminação que forma camadas de óxidos por toda a superfície do material laminado. Além destes defeitos, existem os defeitos ocasionados pelo posicionamento errado dos cilindros de laminação e acessórios do laminador como as guias de laminação que posicionam a barra no canal de laminação.

Os defeitos de laminação estudados neste capítulo estão relacionados com problemas nos canais de laminação e com falta ou excesso de redução por passe. Estes problemas geram defeitos na superfície do material como o aparecimento de dobras de laminação e defeitos como a falta de material modificando as dimensões da seção transversal da barra. A calibração empregada no experimento propicia a formação destes defeitos como dobras e problemas com as dimensões das barras.

A Figura 2.19 mostra um defeito de falta de alargamento na laminação de uma barra dentro de um canal de laminação.

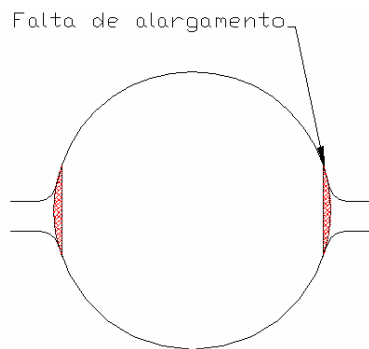


Figura 2.19 – Defeito de falta de alargamento.

A falta de redução ou um problema com o canal de laminação faz com que a barra da Figura 2.19 sofra uma deformação irregular, ficando o formato final diferente do mostrado na figura na parte hachurada. A Figura 2.20 mostra o formato da seção transversal depois de laminada.

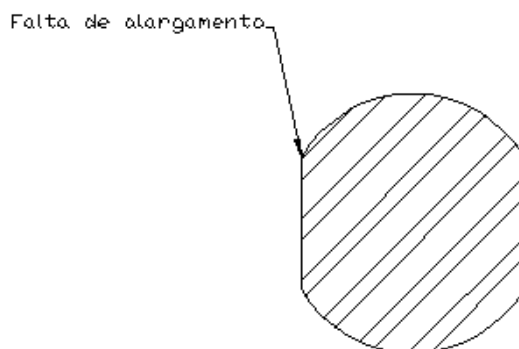


Figura 2.20 – Defeito de falta de alargamento na barra final.

Como houve falta de material na laminação, a barra redonda da Figura 2.20 ficou deformada, sem o aspecto arredondado que esta deveria ter. A Figura 2.21 mostra um defeito de excesso de alargamento na laminação de uma barra redonda.

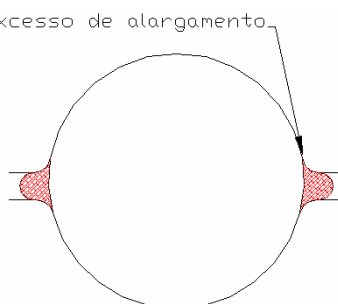


Figura 2.21 – Defeito de excesso de alargamento.

Na Figura 2.21 o excesso de alargamento ocasiona um escoamento do material entre o espaçamento dos cilindros (luz de laminação), formando um defeito chamado de bigode de laminação ou estouro de canal. A Figura 2.22 mostra o perfil da barra laminada com excesso de material dentro do canal de laminação.

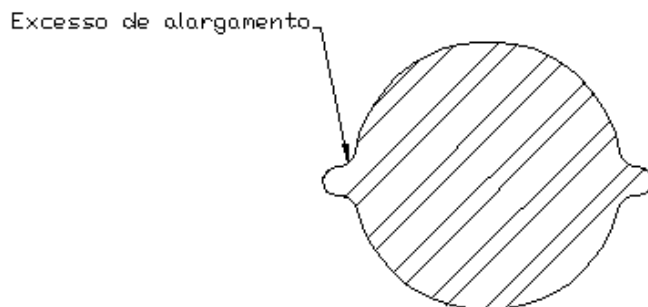


Figura 2.22 – Defeito de excesso de alargamento.

Na laminação de vergalhão de aço para a construção civil, o excesso de laminação mostrado na Figura 2.22 faz parte da norma de fabricação do vergalhão. A Figura 2.23 mostra um defeito de dobra de laminação.

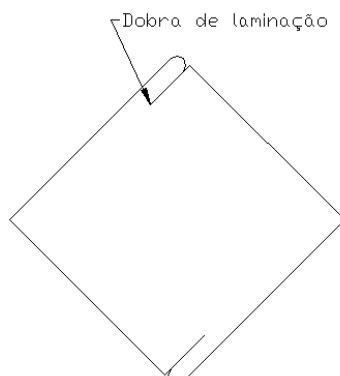


Figura 2.23 – Defeito de dobra de laminação.

O defeito de dobra de laminação mostrado na Figura 2.23 pode causar a formação de cantos vivos no interior da barra laminada, este sendo um problema sério de qualidade da barra, fazendo com que esta seja refugada da produção virando sucata.

Outra série de defeitos pode ser causada por uma regulação errada dos cilindros de laminação, como por exemplo o desalinhamento dos canais de laminação que formam defeito de tombamento na barra laminada, conforme Figura 2.24.

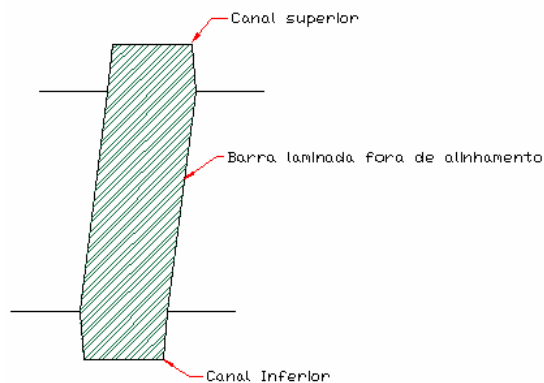


Figura 2.24 – Defeito de desalinhamento de canal.

O defeito de desalinhamento pode ocasionar também uma marca superfície da barra laminada, dependendo a magnitude do desalinhamento. Outro problema com o laminador que pode ocasionar um tombamento da barra está na utilização de mesa lisa no laminador, somado com folgas axiais nos cilindros, conforme Figura 2.25

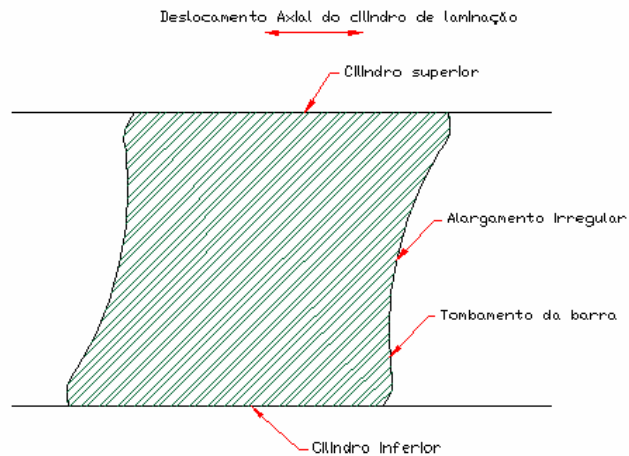


Figura 2.25 – Defeito de tombamento da barra.

Uma laminação em mesa lisa causa também uma deformação irregular no alargamento, como mostrado na Figura 2.25.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento realizado foi dividido em duas partes, a primeira parte realizada foi à laminação das amostras, com a definição da bitola a ser laminada, plano de passe, corte da matéria prima, laminação e retirada das amostras a cada passe.

Na segunda parte, foram executados os cálculos utilizando os modelos matemáticos descritos no Capítulo 2 de alargamento, variação de temperatura e força de laminação.

3.1 Laminação das amostras

3.1.1 Equipamentos Utilizados

- a) Um forno de aquecimento tipo empurrador fabricado na própria empresa.
- b) Um laminador trio de uma cadeira fabricado na própria empresa
- c) Um jogo com três cilindros de laminação.
- d) Uma empilhadeira da marca Hyster de capacidade de 7.000 kg.
- e) Um paquímetro Universal da marca Mitutoyo com resolução de 0,05 mm.

O forno utilizado para o aquecimento das barras foi fabricado e mostrado em perfil na Figura 3.1



Figura 3.1 – Perfil lateral do forno de aquecimento de barras.

Na Figura 3.1 mostra a dimensão do forno de aquecimento de barras que possui 8 m de comprimento e 2,5 m de largura com capacidade aproximada de 16.000 kg de material dentro do forno. O aquecimento das barras em seu interior leva em torno de 2 horas a temperatura aproximada de 1200 °C.

A Figura 3.2 mostra o croqui visto superior do forno de aquecimento de barras. Este croqui mostra a posição dos queimadores dentro do forno, a entrada de palanquilhas e a saída do forno de aquecimento.

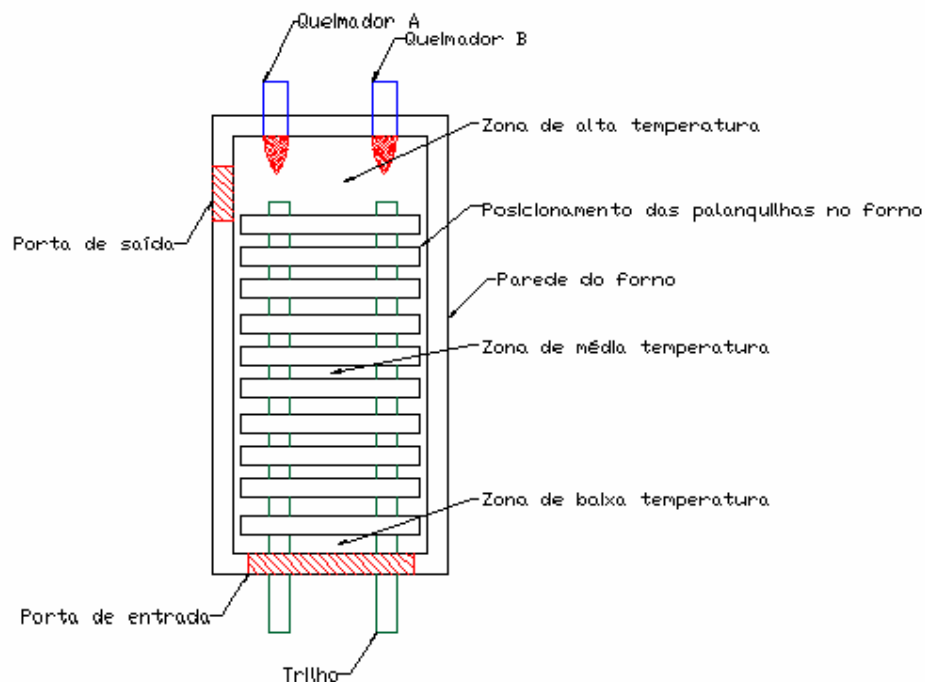


Figura 3.2 – Croqui do forno de aquecimento de barras.

O forno de aquecimento possui dois queimadores de 750.000 kcal/h de potência cada e estão posicionados na parte posterior da entrada de matéria prima. Devido ao posicionamento dos queimadores, o forno possui três zonas de aquecimento, onde a zona próxima aos queimadores é considerada de zona de alta temperatura. Na zona de alta temperatura está colocado o termopar que mede a temperatura e envia a informação para um controlador de temperatura, que controla a quantidade de gás natural injetada pelos queimadores dentro do forno. Os trilhos indicados na Figura 3.2 servem para que a palanquilha não arraste no fundo do forno quando esta estiver sendo empurrada dentro do forno.

A Figura 3.3 mostra o laminador de número 4 utilizado no experimento, com os cilindros de laminação montados na máquina, sistema de regulação e mesa de laminação preparada para receber a primeira barra antes do experimento.



Figura 3.3 – Laminador utilizado no experimento.

O laminador da Figura 3.3 tem capacidade de produção que varia de 2000 a 3000 kg / hora de material. A abertura de luz máxima do laminador gira em torno de 180 mm, dependendo do diâmetro do cilindro empregado. O sistema de abertura de luz é acionado por quatro motores hidráulicos, dois movimentam os parafusos de apoio do cilindro superior e dois acionam os inferiores. Estes parafusos são construídos em conjunto com porcas que servem de apoio, todos de aço SAE 1045 com camada superficial nitretada. Cada operador controla a luz de laminação através dos motores e de um relógio que marca a abertura do cilindro, este sistema é chamado na empresa de relógio ponto.

O laminador é acionado por um motor elétrico de 200 cv de potência e uma chave de partida eletrônica do tipo inversora pode suportar um motor de até 300cv, devido aos picos elevados de corrente elétrica na passagem da barra pelo laminador. O motor possui uma polia de diâmetro de 490 mm com seis canais para correia do tipo D420. Estas correias são ligadas a uma roda inercial de diâmetro de 2.450 mm e peso estimado de 12.000 kg. A ligação do motor com a roda inercial faz a primeira redução de velocidade, sendo a segunda redução feita entre duas engrenagens.

A segunda redução ocorre com a roda inercial ligada por um eixo a uma engrenagem motriz com diâmetro de 430 mm e 19 dentes. A engrenagem motora tem diâmetro de 2.355 mm e 113 dentes. O eixo de entrada da caixa de transmissão está ligado a engrenagem motora.

A Figura 3.4 mostra o laminador em esquema e seu posicionamento em relação ao forno de aquecimento.

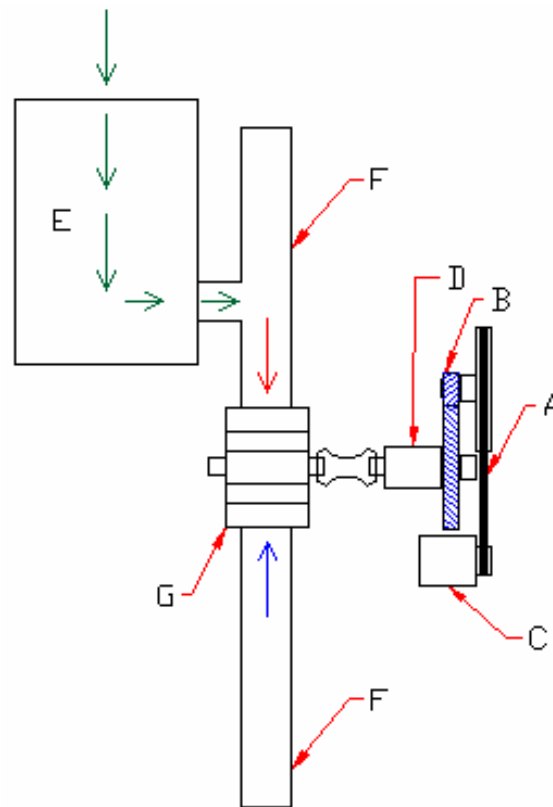


Figura 3.4 – Posicionamento do laminador (esquema).

Na Figura 3.4, a letra A representa a primeira redução, a letra B a segunda redução de velocidade, a letra C o motor de 200 cv de potência, a letra D a caixa de transmissão, a letra E o forno de aquecimento, a letra F as mesas de laminação e a letra G o laminador. As setas indicam o caminho que a palanquilha percorre dentro do forno até o laminador e nas mesas de laminação.

A Figura 3.5 mostra o eixo de entrada da caixa e a conversão em três saídas que a caixa proporciona.

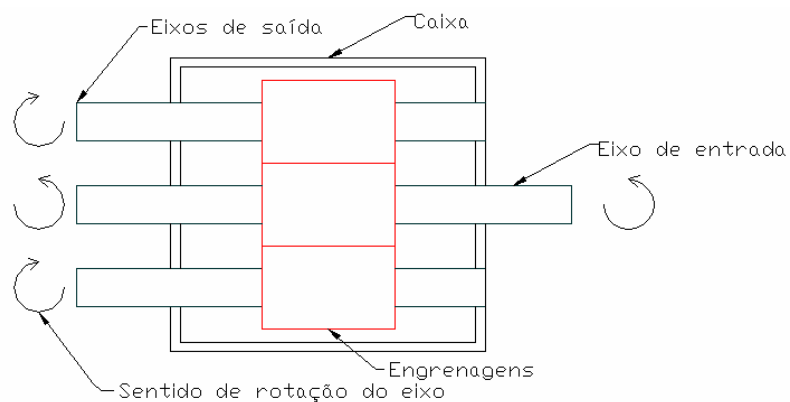


Figura 3.5 – Croqui da caixa de transmissão.

Na caixa existem mais dois eixos ligados por engrenagens mostrados na Figura 3.5 como eixos de saída. Na caixa o sentido de rotação é invertido pela ação das engrenagens de transmissão de rotação. Outras imagens do laminador estão presentes no Anexo A.

O laminador opera com três cilindros de laminação, onde na Figura 3.6 mostra os cilindros em perfil.

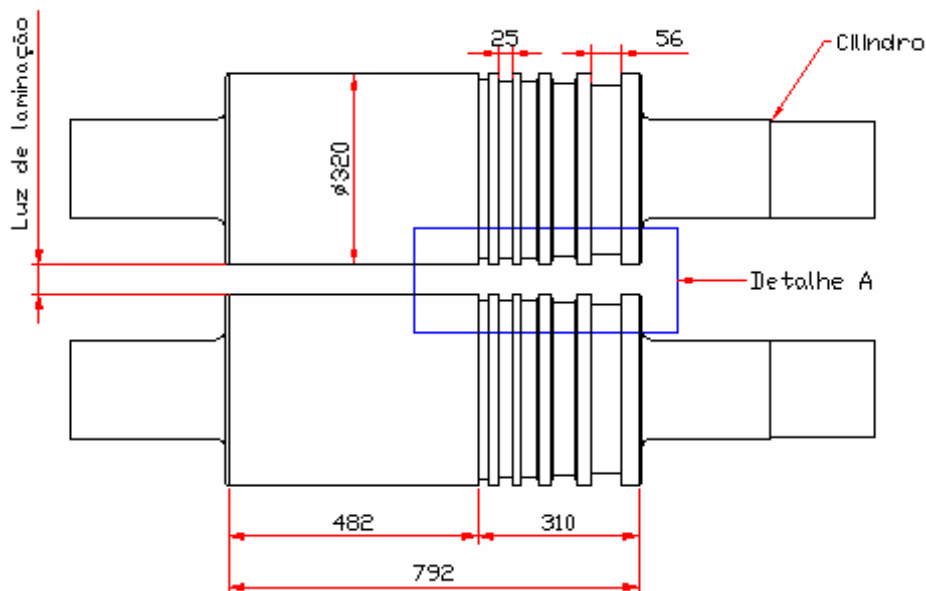


Figura 3.6 – Perfil dos cilindros de laminação utilizados.

As dimensões dos canais apresentados na Figura 3.6 como 56 mm e 25 mm, são os canais utilizados neste experimento. A Figura 3.7 mostra o detalhe A da Figura 3.6 com as dimensões de todos os canais do cilindro de laminação. Os canais foram numerados de 01 até 05 para facilitar a identificação dos canais utilizados no experimento.

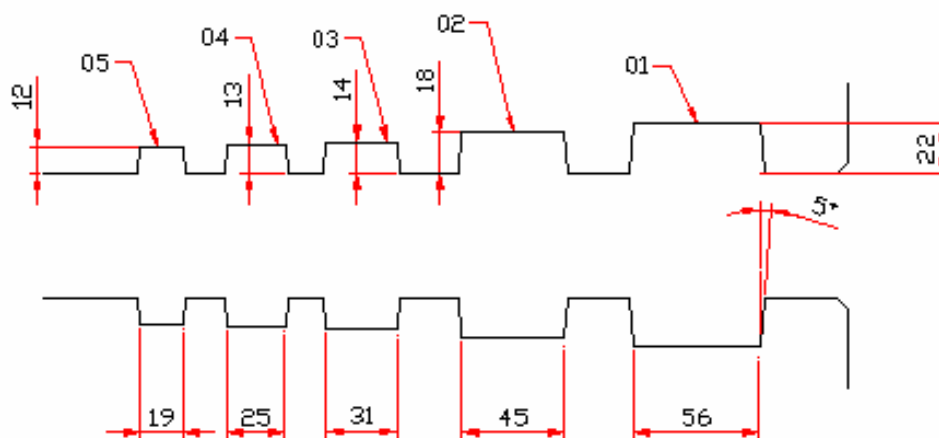


Figura 3.7 – Perfil dos canais do cilindro.

Os canais representados na Figura 3.7 foram usinados na empresa e suas medidas seguem um padrão adotado na empresa para o laminador de número 4. As medidas de largura dos canais de laminação são determinadas pelo fundo do canal e aumentando em ângulo de 5°.

Os cilindros de laminação utilizados no experimento foram fornecidos pela empresa Sidenor Villares Rolling Mill Rolls, com um material denominado de Nodulite B[®] e diâmetro inicial do cilindro de 360 mm. Após a produção de 800.000 kg, o cilindro apresenta desgaste acentuado nos canais e mesa lisa, sendo este usinado para a retirada das imperfeições.

3.1.2 Recursos Humanos

Os recursos utilizados foram dois operadores de abertura e fechamento de luz de laminação, quatro operadores de laminação, um operador de forno de aquecimento, um operador de maçarico e um ajudante para retirar a amostra cortada da mesa de laminação.

3.1.3 Metodologia Empregada na Obtenção das amostras

A metodologia para a obtenção da amostra segue o modelo do fluxograma da Figura 3.8.

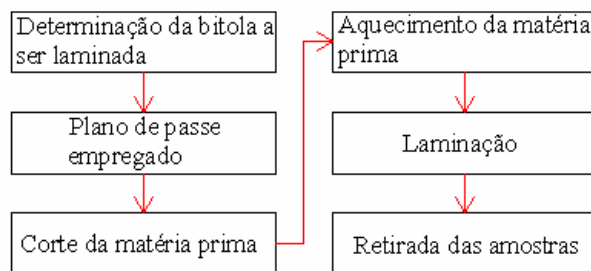


Figura 3.8 – Fluxograma do processo para laminação das amostras.

O fluxograma da Figura 3.8 apresenta a cronologia para a obtenção das amostras dos passes.

1º Etapa: Determinação da bitola a ser laminada.

A bitola mais laminada foi o perfil chato 16 x 130 mm de aço ASTM A36/A-36 M 04

com uma média de 60% da produção do laminador por mês. Estes dados são referentes ao planejamento de produção do laminador no período de um ano retirados do banco de dados do sistema de planejamento e controle de produção (PCP) que controla a produção dos quatro laminadores da empresa.

2º Etapa: Plano de passe a ser empregado.

Com o perfil a ser laminada definida, o próprio sistema de PCP forneceu os dados sobre a seqüência de laminação que deve ser obedecido. O plano de passe do perfil 16 x 130 mm para o laminador 4 está descrito na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Plano de passe do perfil 16 x 130 mm.

	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º
Luz de laminação	111,2	88,9	69,8	53,9	128,2	42,8	33,3	23,8	128,6	19,1	15,9

Os valores da Tabela 3.1 são os dados sobre a luz de laminação que foi colocado no laminador a cada passe. Os passes de número 5 e 9 foram realizados em canais e o restante ocorre na parte lisa dos cilindros.

3º Etapa: Corte da matéria prima.

O procedimento de laminação para o perfil 16 x 130 mm pedia uma palanquilha de 130 x 130 mm como matéria prima, seguindo a norma ASTM A36/A-36 M 04. A matéria prima foi fornecida pela aciaria da Votorantim Metais, Siderúrgica Barra Mansa e se encontrava no estoque regular da empresa, com a corrida da aciaria que controla sua qualidade de número 246157. Uma cópia deste certificado está no Anexo B.

A composição química da palanquilha retirada do certificado de qualidade da usina está descrito na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química do aço utilizado no experimento.

% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cu	% Cr	%Fe
0,12	0,67	0,158	0,032	0,039	0,16	0,06	98,761

Fonte: Anexo B.

A composição química do aço utilizado no experimento descrito na Tabela 3.2 mostrou um carbono baixo, mas comparando com a norma ASTM A36/A-36 M 04 em resumo na Tabela 3.3 está dentro da norma.

Tabela 3.3 – Composição química exigida pela norma ASTM A36/A-36 M 04 ⁽⁴⁶⁾.

% C _{max}	% Mn		% Si _{max}	% P _{max}	% S _{max}
	min	max			
0,29	0,60	0,90	0,40	0,032	0,05

Os dados apresentados na Tabela 3.3 representam a composição química e no caso do elemento químico carbono, este determina somente o máximo permitido que é de 0,29 %.

Foram cortadas 4 peças de 500 mm de comprimento, sendo este o comprimento mínimo possível para operar o equipamento. A quantidade de palanquilhas utilizadas no experimento foi determinada pelo processo de obtenção das amostras, que é lento neste tipo de equipamento, pela utilização de um maçarico de corte a gás para a retirada das amostras. Com o tempo de obtenção das amostras alto, o resfriamento muito acentuado da barra ocorre, colocando em risco a integridade do equipamento de laminação. Com a utilização de 4 barras, o tempo total gasto com a retirada das amostras fica dividido nas barras, diminuindo a perda de temperatura da barra parada no laminador.

4º Etapa: Aquecimento da matéria prima.

As quatro peças foram levadas do setor de corte para a entrada do forno de aquecimento com o auxílio de uma empilhadeira.

As quatro palanquilhas foram carregadas no forno e permaneceram dentro deste por aproximadamente uma hora e meia. A temperatura da barra dentro do forno atingiu 1165 °C, medida com o auxílio de um termopar, que está instalado dentro do forno de aquecimento de barras na zona de alta temperatura.

5º Etapa: Laminação.

O processo de laminação empregado utilizou quatro barras para retirada das amostras, conforme o fluxograma da Figura 3.9

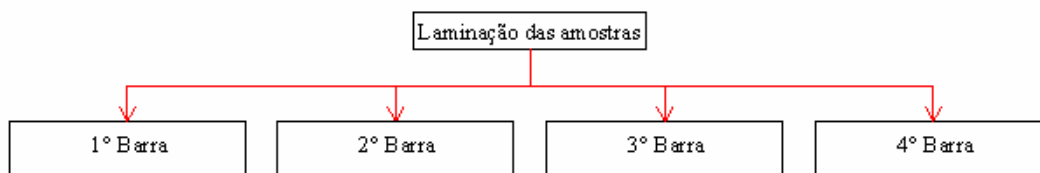


Figura 3.9 – Fluxograma das barras laminadas.

As 4 barras foram aquecidas por igual no forno, sendo a primeira barra retirada do forno de aquecimento e colocada sobre a mesa de laminação. A Figura 3.10 mostra o fluxograma da 1° barra laminada.

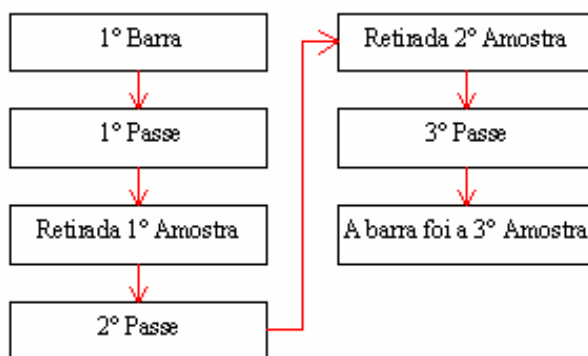


Figura 3.10 – Fluxograma da 1° barra laminada.

A Figura 3.10 mostra a seqüência de eventos na laminação da 1° barra em forma de fluxograma.

Dois operadores regularam as luzes de laminação para todos os passes seguindo a seqüência de passes pré-determinada. Outros três operadores operavam a barra no laminador. As amostras eram retiradas com a ajuda de uma alicate tipo tenaz, após a barra ter sofrido um passe no laminador, a ponta da barra a ser cortada era presa pela alicate e um pedaço da barra era cortado com a ajuda de um maçarico a gás. O tempo de corte das amostras girou em torno de 20 segundos.

O 1° passe foi dado com após a retirada da primeira barra do forno de aquecimento, com luz de laminação de 110,2 mm e esta gerou a primeira amostra.

A Figura 3.11 representa o croqui do 1° passe no laminador, onde o traçado pontilhado representa a barra antes do passe e a área hachurada a barra depois do primeiro passe, representando a redução em altura e o aumento da largura por alargamento.

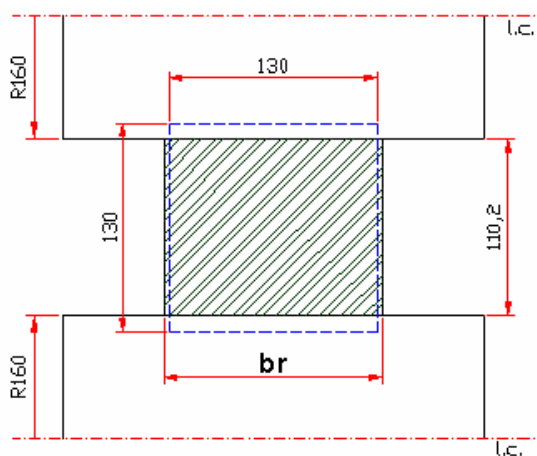


Figura 3.11 – Croqui do 1º passe.

A medida “br” representada na Figura 3.11 indica a largura após o passe. À distância de 110,2 mm representa a luz de laminação do primeiro passe, a medida R160 representa o raio do cilindro de laminação e as medidas da largura inicial e altura inicial representadas na cota como sendo de 130 mm.

No 2º passe a barra foi colocada novamente no laminador com luz de laminação de 88,9mm gerando uma 2ª amostra, retirada da mesma forma que na primeira amostra.

No 3º passe a barra foi colocada novamente no laminador com luz de laminação de 69,8 mm e a 3ª amostra não foi retirada, ficando a barra como a 3ª amostra.

A 2ª barra foi retirada do forno e laminada até o 3º passe com o mesmo plano de passe sem retirar nenhuma amostra.

A Figura 3.12 mostra o fluxograma da laminação da 2ª barra.

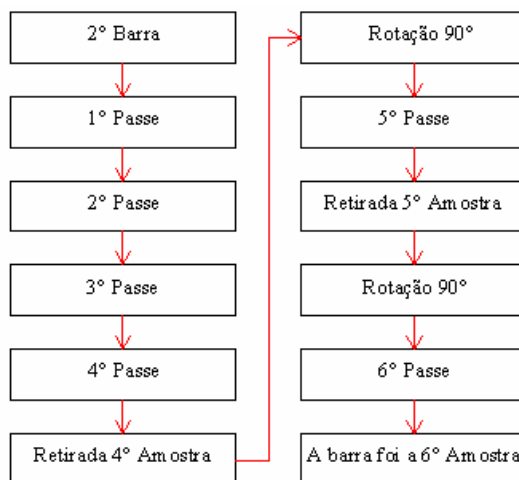


Figura 3.12 – Fluxograma da laminação da 2ª barra.

A Figura 3.12 mostra a seqüência de eventos na laminação da 2ª barra em forma de

fluxograma.

No 4º passe a barra foi colocada no laminador com luz de laminação de 53,9 mm e retirada a 4º amostra.

No 5º passe a barra sofreu rotação de 90º e foi colocada no laminador no canal de número 1 com luz de laminação de 128,2 mm e retirada a 5º amostra após o passe.

A Figura 3.13 representa o croqui do quinto passe no laminador, onde à parte tracejada em azul representa a barra antes do passe e a área hachurada em verde a barra depois do 1º passe.

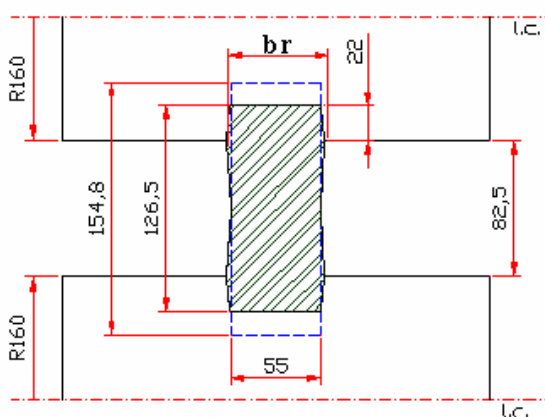


Figura 3.13 – Croqui do 5º passe.

A largura br representada na Figura 3.13 foi determinada pela média das larguras medidas em vários pontos da amostra.

No 6º passe a barra sofreu nova rotação de 90º e foi colocada novamente no laminador com luz de laminação de 42,8 mm e o 6º passe não foi retirado, ficando a barra como a 6º amostra.

A 3ª barra foi retirada do forno e laminada até o 6º passe com o mesmo plano de passe sem retirar nenhuma amostra. A Figura 3.14 mostra o fluxograma da laminação da 3ª barra.

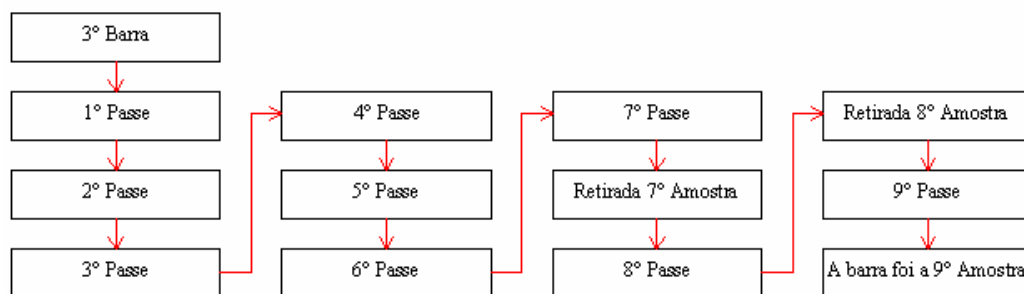


Figura 3.14 – Fluxograma da laminação da 3ª barra.

A Figura 3.14 mostra a seqüência de eventos na laminação da 3ª barra em forma de fluxograma.

No 7º passe a barra foi colocada no laminador com luz de laminação de 33,3 mm e retirada a 7ª amostra.

No 8º passe a barra foi colocada no laminador com luz de laminação de 23,8 mm e retirada a 8ª amostra.

No 9º passe a barra foi rotacionada em 90° e colocada no canal de número 4 com luz de laminação de 128,6 mm. Após laminada a barra não foi retirada a 9ª amostra, ficando a barra como a 9ª amostra.

A Figura 3.15 representa o croqui do 9º passe, onde a parte tracejada representa a barra antes do passe e a área hachurada a barra depois do primeiro passe.

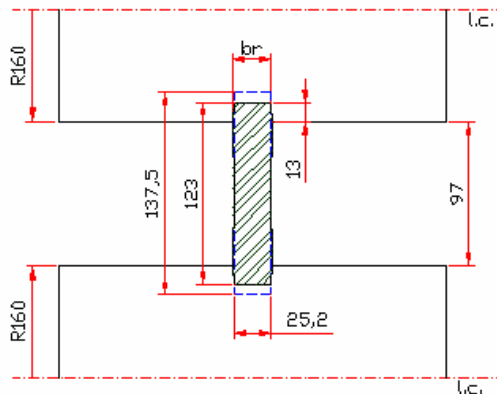


Figura 3.15 – Croqui do 9º passe.

A largura br representada na Figura 3.15 foi determinada pela média das larguras maiores e menores.

A 4ª barra foi retirada do forno e laminada até o 9º passe com o mesmo plano de passe sem retirar nenhuma amostra. A Figura 3.16 mostra o fluxograma da laminação da 4ª barra.

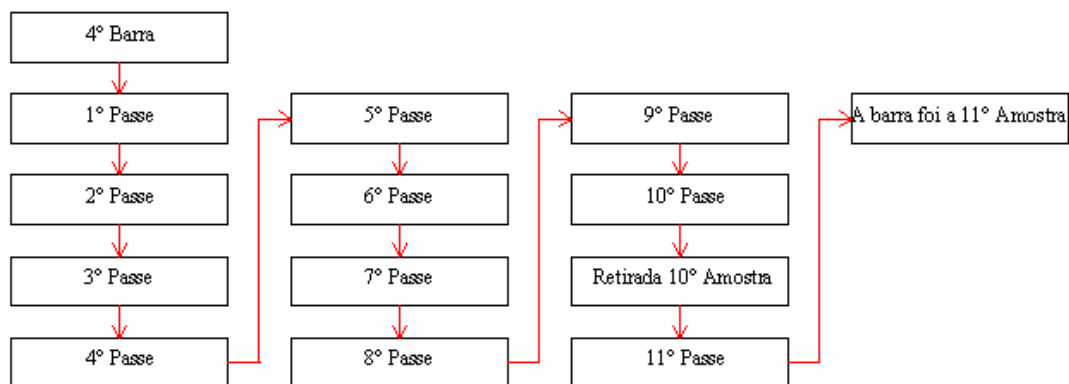


Figura 3.16 – Fluxograma da laminação da 4ª barra.

A Figura 3.16 mostra a seqüência de eventos na laminação da 4ª barra em forma de fluxograma.

No 10º passe a barra foi colocada no laminador com luz de laminação de 19,1 mm e retirada a 10ª amostra.

No 11º passe a barra foi colocada no laminador com luz de laminação de 15,9 mm e não foi retirada a 11ª amostra, ficando a barra como a 11ª amostra.

Após a laminação da última amostra, a máquina voltou a produzir normalmente e as amostras ficaram no piso da fábrica para que estas resfriassem e pudessem ser manuseadas. O tempo total de resfriamento de todas as amostras girou em torno de 1,5 Horas.

6ª Etapa: Retirada das amostras.

As amostras depois de resfriadas, foram serradas em uma serra de fita para que somente um pedaço de cada passe fosse analisado e este fosse de fácil manuseio. Por este motivo o comprimento máximo das amostras variaram de 50 mm considerada mínima para este experimento até 200 mm, valor máximo para este experimento de acordo com o tamanho disponível da amostra retirada com o maçarico.

Com o auxílio de uma escova de aço, foram retirados a carepa de cada amostra serrada e com um lixa d'água de granulometria 80 foram retirada à rebarba causada pela saída da serra fita na hora do corte. O processo de rebarbamento exigiu cuidado com os cantos da seção transversal de cada amostra para que não ocorresse o arredondamento, evitando desta forma que a medida da seção fosse alterada ao se carimbar as amostras em papel.

Com o processo de rebarbamento concluído, foi utilizado um paquímetro universal calibrado da marca Mitutoyo com resolução de 0,05 mm para retirar as medidas da espessura e largura de cada uma das 11 amostras.

Com os valores da espessura e largura de cada amostra retirada, iniciou-se um processo para gravar em papel o perfil encontrado em cada passe. Os carimbos foram feitos pegando-se grafite em pó e pintando as bordas da seção transversal das amostras. Logo após uma folha de papel A4 era colocado sobre a superfície que recebeu a grafite e com o auxílio do dedo, era feito o contorno da amostra, forçando o papel sobre a seção transversal que recebeu a grafite em pó. Com este procedimento, o perfil da amostra ficou gravado na folha de papel e permitiu que o perfil fosse digitalizado em formato de foto por um scanner de computador.

3.2 Cálculo dos Modelos Matemáticos Teóricos

Com os resultados das medições de altura e largura da seção transversal das amostras, foram realizados os cálculos de alargamento, temperatura e força de laminação. A Figura 3.17 mostra o fluxograma dos modelos adotados para os cálculos de alargamento, temperatura e força de laminação.

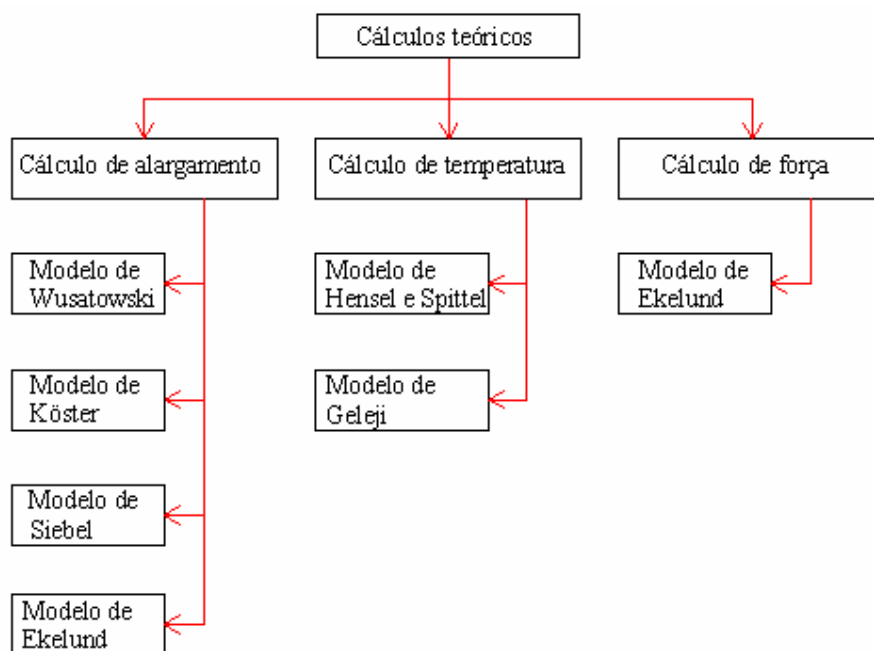


Figura 3.17 – Fluxograma dos cálculos teóricos.

A Figura 3.17 mostra a seqüência de cálculos realizados no experimento, ficando o resultado dos cálculos para uma descrição no capítulo seguinte.

O modelamento matemático foi executado seguindo primeiro a retirada das medidas, executando os cálculos de alargamento, os cálculos de variação de temperatura em conjunto com os cálculos de força de laminação. Este modelamento foi separado em etapas conforme o fluxograma presente na Figura 3.17.

1º Etapa: Cálculo do alargamento

O primeiro modelo calculado foi o modelo de Wusatowski, seguido do modelo de Köster de Siebel e de Ekelund utilizando as equações do capítulo 2.6. Os valores utilizados nos cálculos como altura inicial, altura final, largura inicial e diâmetro do cilindro estão colocados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Valores iniciais utilizados nos cálculos.

	Passe no Laminado										
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
h_0 (mm)	130,0	110,2	87,0	70,4	154,8	59,0	44,5	32,0	137,5	26,1	19,5
h_1 (mm)	110,2	87,0	70,4	55,0	126,5	44,5	32,0	25,2	123,0	19,5	17,0
b_0 (mm)	130,0	136,2	146,2	151,5	55,0	126,5	132,0	137,1	25,2	123,0	130,0
R (mm)	320	320	320	320	276	320	320	320	294	320	320

Para os modelos de Köster e Ekelund, a temperatura de laminação utilizada foi de 1165 °C, sendo que esta informação não está disponível na Tabela 3.4, pois somente foi utilizada nos cálculos de alargamento pelos modelos de Köster e Ekelund.

Os cálculos foram feitos utilizando uma planilha do programa Microsoft Excel e verificados por cálculos através de uma calculadora modelo HP 48 GX. Os cálculos de alargamento foram detalhados para o primeiro passe e colocados em anexo, sendo que no Anexo C está a memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Wusatowski, no Anexo D está a memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Köster, no Anexo E está a memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Siebel e no Anexo F está a memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Ekelund.

As memórias de cálculo dos demais passes não foram colocados em Anexo devido estes serem muito extensos e repetitivos, bastando o modelamento de apenas um passe para visualizar o procedimento adotado.

Após o modelamento dos cálculos de alargamento, foi feito o modelamento para os cálculos de variação de temperatura e força de laminação, sendo esta a 3° etapa.

2° Etapa: Cálculo da variação de temperatura e força de laminação.

Para o cálculo da variação de temperatura, foram utilizadas as equações segundo o modelo de Hensel e Spittel e o modelo de Geleji presentes no capítulo 2.8. Os valores da Tabela 3.4 foram utilizados para cada passe nos cálculos, sendo que o valor da temperatura inicial antes do passe utilizado foi de 1165 °C.

Os cálculos de variação de temperatura exigiram os cálculos de força de laminação para cada passe ao mesmo tempo.

Para os cálculos da força de laminação foi utilizado o modelo de Ekelund, devido que um trabalho anterior indica que este modelo apresenta melhores resultados que os modelos de Sims e de Geleji ⁽¹¹⁾.

Os valores da resistência a deformação utilizada nos cálculos da força de laminação foram retirados do gráfico de escoamento a quente da Figura 2.13.

Os cálculos também foram feitos utilizando uma planilha do programa Microsoft Excel e verificados por cálculos através de uma calculadora modelo HP 48 GX.

Como nos cálculos de alargamento, foi feito um detalhamento dos cálculos da variação de temperatura força de laminação para o primeiro passe e colocado em Anexo para consulta. No Anexo G está a memória de cálculo de temperatura segundo o modelo de Hensel e Spittel, no Anexo H está a memória de cálculo de temperatura segundo o modelo de Geleji, no Anexo I está a memória de cálculo de velocidade de deformação segundo o modelo de Ekelund, no Anexo J está a memória de cálculo da resistência à deformação segundo o modelo de Ekelund e no Anexo K está a memória de cálculo da força de laminação segundo o modelo de Ekelund.

Os resultados dos cálculos a cada passe geraram tabelas, sendo que estas estão inseridas no Capítulo que trata dos resultados do experimento junto com análise das amostras retiradas de cada passe no laminador.

4 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS E DISCUSSÃO

Os resultados do experimento são valores relacionados às medidas de altura e largura da seção transversal, valores sobre os cálculos de alargamento, variação de temperatura e força de laminação. A Figura 4.1 mostra a seqüência de análises realizadas neste capítulo.

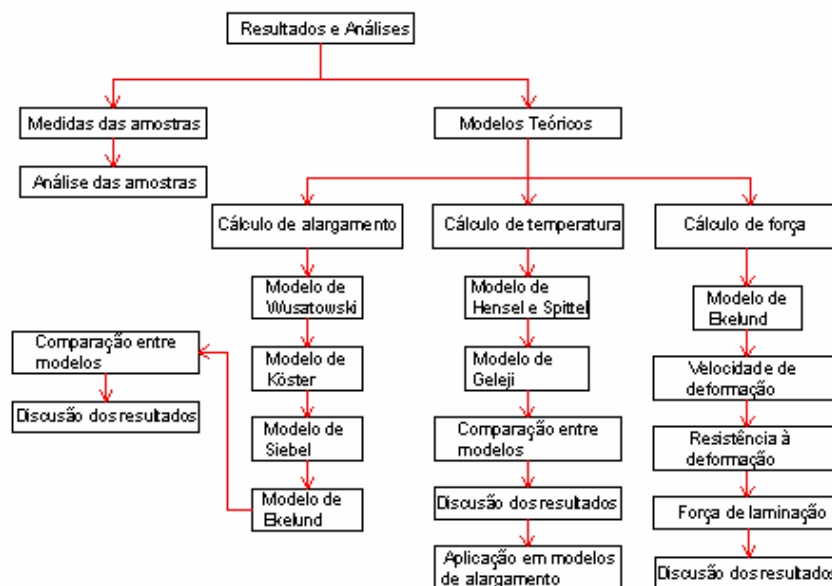


Figura 4.1 – Fluxograma das análises realizadas.

O fluxograma representado na Figura 4.1 está na mesma seqüência de eventos dos experimentos realizados.

4.1 Medidas Retiradas das Amostras

Os resultados obtidos com o experimento foram principalmente na altura e na largura da barra depois das amostras estarem a temperatura ambiente. A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos.

	Passes										
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
h_1 (mm)	110,2	87,0	70,4	55,0	126,5	44,5	32,0	25,2	123,0	19,5	17,0
br (mm)	136,2	146,2	151,5	154,8	59,0	132,0	137,1	139,4	26,1	130,0	130,5

Além das medidas das amostras por passe presentes na Tabela 4.1, foram analisados defeitos de processo em cada amostra retirada.

4.1.2 Avaliação das Amostras a cada Passe

Os experimentos realizados forneceram onze amostras, uma para cada passe no laminador, onde as medidas e os defeitos foram analisados passe por passe. Cada amostra foi impressa como um carimbo em papel e as figuras analisadas a cada passe são as imagens dos carimbos digitalizadas. A seguir são representadas as seções transversais de cada amostra e são detalhados defeitos de laminação encontrados.

a) 1° Passe:

A Figura 4.2 mostra o carimbo do 1° passe no laminador.

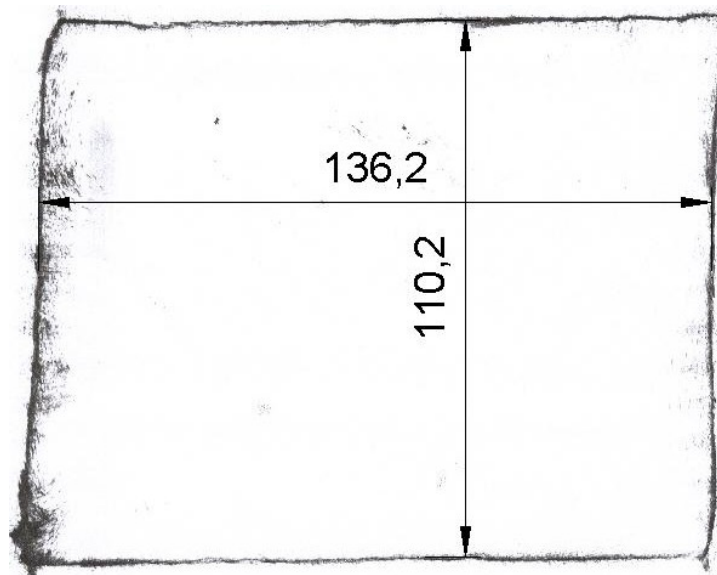


Figura 4.2 – Carimbo do 1° passe.

A Figura 4.2 mostra que houve um tombamento da barra ao passar pelo laminador e um alargamento desigual sofrido pela barra, ficando a lateral deformada diferente nos dois lados.

b) 2° Passe:

A Figura 4.3 mostra o carimbo do 2º passe no laminador.

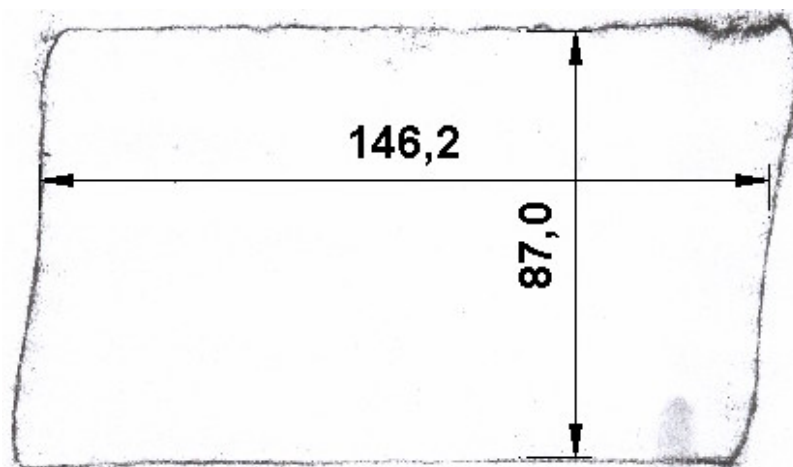


Figura 4.3 – Carimbo do 2º passe.

Na Figura 4.3 é verificado que o tombamento ficou mais acentuado no 2º passe. Foi encontrada diferença de medida na espessura na barra ao longo da seção transversal.

c) 3º Passe:

A Figura 4.4 mostra o carimbo do 3º passe no laminador.

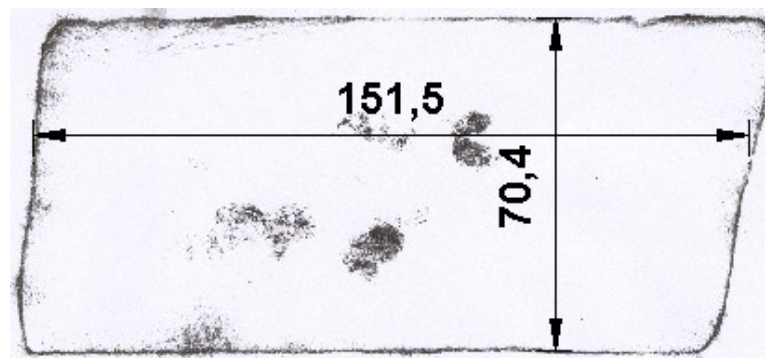


Figura 4.4 – Carimbo do 3º passe.

Na Figura 4.4 o defeito de tombamento da barra continua, mas em um dos lados da amostra é mais acentuada que no outro lado.

d) 4º Passe:

A Figura 4.5 mostra o carimbo do 4º passe no laminador.

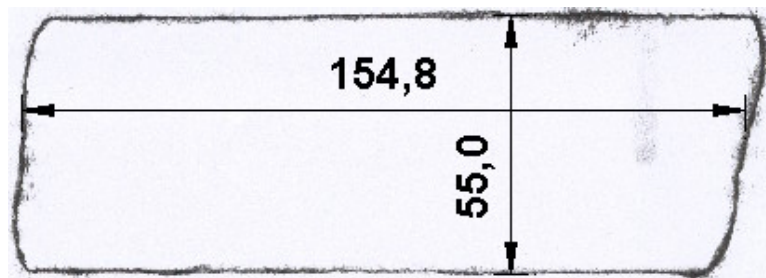


Figura 4.5 – Carimbo do 4º passe.

A Figura 4.5 mostra que houve uma diminuição do tombamento lateral, mas a diferença de medida da espessura continua ocorrendo.

e) 5º Passe:

A Figura 4.6 mostra o carimbo do 5º passe no laminador.

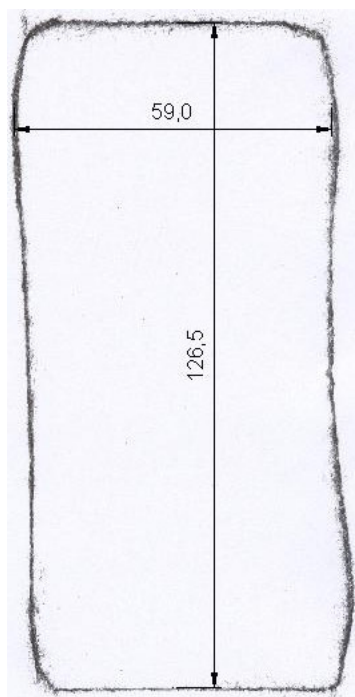


Figura 4.6 – Carimbo do 5º passe.

A Figura 4.6 mostra o primeiro passe em canal que apresentou um desvio acentuado entre as partes superior e inferior da peça laminada. A possível flambagem da barra não ocorreu, nem um estouro de canal que pudesse provocar uma dobra de laminação.

f) 6º Passe:

A Figura 4.7 mostra o carimbo do 6º passe no laminador.

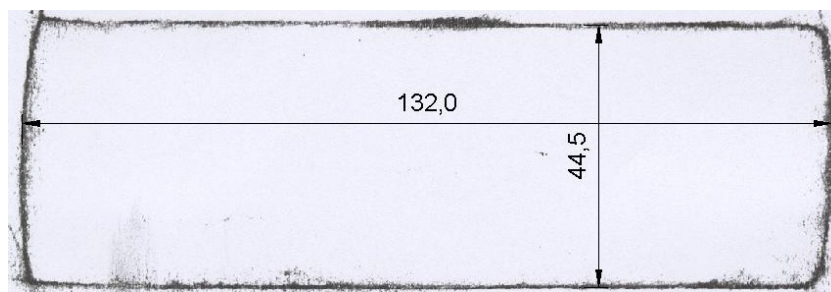


Figura 4.7 – Carimbo do 6º passe.

A amostra da Figura 4.7 mostra uma melhora significativa na lateral da amostra, junto com a diminuição do tombamento lateral.

g) 7º Passe:

A Figura 4.8 mostra o carimbo do 7º passe no laminador.

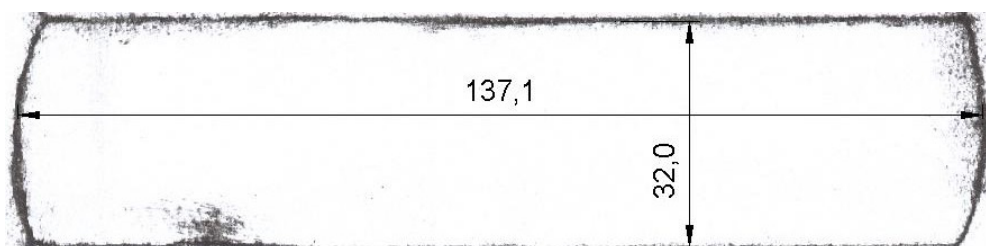


Figura 4.8 – Carimbo do 7º passe.

A Figura 4.8 mostra que no 7º passe, a barra ficou com um formato melhor, com a diminuição do tombamento lateral.

h) 8º Passe:

A Figura 4.9 mostra o carimbo do 8º passe no laminador.

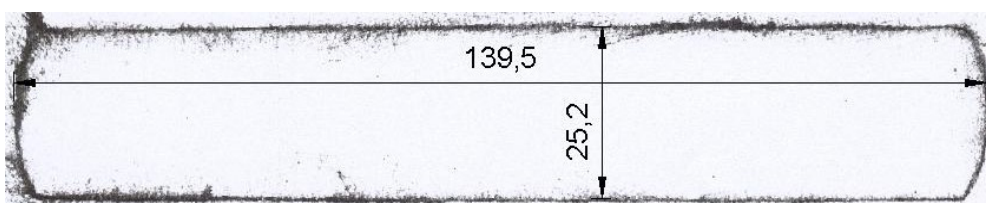


Figura 4.9 – Carimbo do 8º passe.

Na Figura 4.9 mostra o perfil da barra antes do 2º passe em canal. O defeito de tombamento não é perceptível.

i) 9º Passe:

A Figura 4.10 mostra o carimbo do 9º passe no laminador.

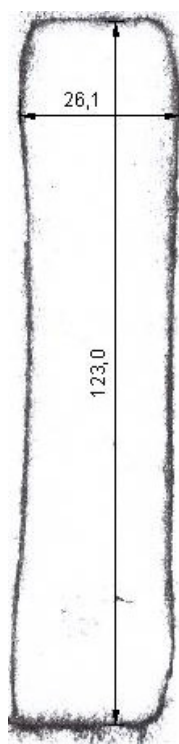


Figura 4.10 – Carimbo do 9º passe.

A Figura 4.10 mostra que o defeito apresentado no 5º passe voltou a se repetir no 9º passe com um desalinhamento da barra laminada. A amostra apresenta também sinais de flambagem ao longo da seção transversal.

j) 10º Passe:

A Figura 4.11 mostra o carimbo do 10º passe no laminador.

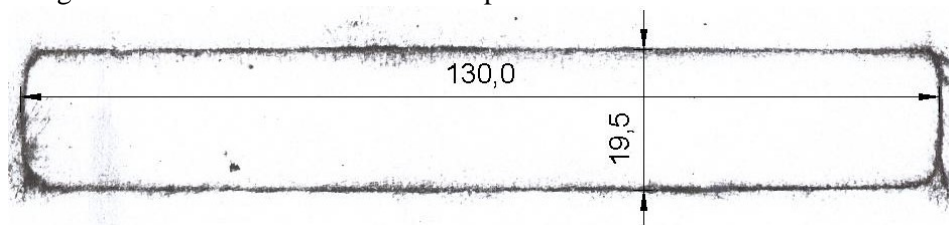


Figura 4.11 – Carimbo do 10º passe.

A Figura 4.11 mostra um aumento significativo na medida da largura de 123,0 mm para 130,0 mm. A ocorrência de tombamento da barra não ocorreu neste passe.

k) 11° Passe:

A Figura 4.12 mostra o carimbo do 11° passe no laminador.

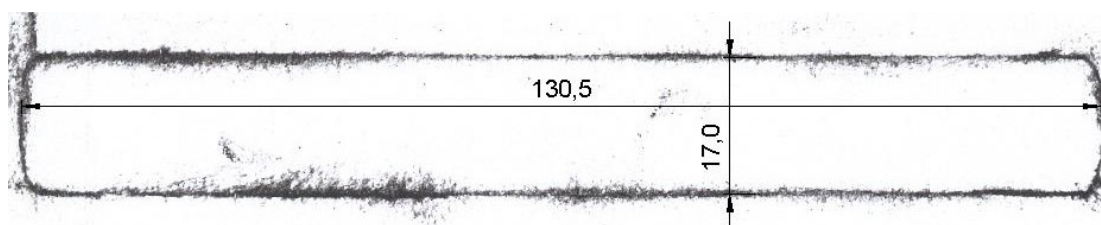


Figura 4.12 – Carimbo do 11° passe.

Na Figura 4.12 a lateral esquerda mostra as faces das laterais fora de esquadro, ou seja ocorreu um tombamento da barra no laminador. Ocorreu um desvio entre as medidas projetadas iniciais e finais, onde o planejado era 16 x 130 mm e ficou em 17 x 130,5 mm

4.1.3 Análise das amostras retiradas do laminador

Na primeira amostra o tombamento da barra aconteceu pelas folgas axiais existentes nos mancais dos cilindros de laminação superior e intermediário. Estas folgas permitiram que os cilindros se deslocassem um em relação ao outro formando o tombamento da barra.

Na segunda amostra ocorreu uma diferença de altura entre uma extremidade e outra provocada por uma diferença de paralelismo entre os cilindros de laminação intermediário e inferior. Neste caso aparecerem dois tipos de defeitos, uma ocasionada pelas folgas axiais dos cilindros e mancais de laminação e outra pelo não paralelismo entre os cilindros de laminação. A ocorrência do defeito de tombamento ocorreram nos passes realizados entre os cilindros superior e intermediário e as diferenças de espessura ocorreram nos passes laminados entre os cilindros intermediário e inferior.

Na terceira amostra ocorreu a diminuição de tombamento em apenas um dos lados da barra ocasionado pela diferença na espessura do segundo passe.

O tombamento diminuiu na quarta amostra, provocado pela diminuição da espessura da barra e pela menor folga entre os cilindros intermediários e inferior. Neste caso a maior folga axial está presente no cilindro superior e a diferença de paralelismo foi causada pelo

cilindro inferior. Estes defeitos poderiam ter sido sanados com a regulagem do laminador, mas como um trabalho de análise passe a passe nunca fora realizado para este laminador, estes defeitos não foram contabilizados ao longo do processo.

Na quinta amostra ocorreu um desvio da barra ocasionado pelo desalinhamento dos canais dos cilindros superior e intermediário somado ainda a folga axial excessiva dos mancais dos cilindros de laminação. Um terceiro defeito apareceu, neste caso o desalinhamento entre os canais de laminação do cilindro superior somado com a folga axial excessiva dos mancais.

Um pequeno tombamento ocorreu na sexta amostra, provocado pelo desalinhamento dos canais no quinto passe, afetando o perfil laminado no sexto passe.

Na sétima amostra ocorreu uma diminuição do tombamento lateral que se tornou imperceptível, mesmo com as folgas axiais dos mancais do cilindro superior.

Na oitava amostra o tombamento da barra foi eliminado, ficando a barra em boas condições para o passe em canal. O defeito do não paralelismo entre os cilindros intermediário e inferior continuou.

O desalinhamento dos canais de laminação na nona amostra causou uma deformação na barra acentuada, mas não chegando a ocasionar defeitos laterais na barra laminada. A barra sofreu flambagem ocasionado pela redução de 139,5 mm para 123,0 mm. Este flambamento não foi de grande magnitude, mas demonstra que para larguras menores que 25,2 mm esta flambagem tende a aumentar. Como não existe parede do cilindro para evitar este defeito, ocorreu em vez da redução de altura uma dobra da barra no laminador que interferiu diretamente na largura do décimo passe.

Na décima amostra o alargamento foi grande devido ao fato de que no 9º passe à parte do da barra que sofreu alargamento e parte um flambamento. Na Figura 4.13 mostra o croqui do 10º passe.

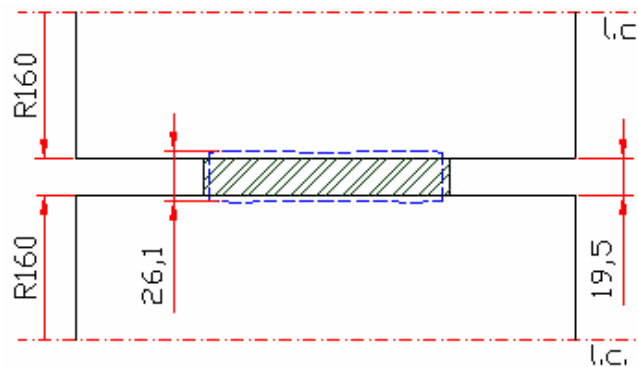


Figura 4.13 – Croqui demonstrativo do passe de número 10.

Na Figura 4.13 a linha tracejada mostra o perfil da barra saída no 9º passe, que aumentou significativamente o alargamento no 10º passe, mostrado na parte hachurada. O flambamento da barra foi eliminado neste passe, junto com a deformação irregular no nono passe, fazendo com que a largura da barra fosse de 123,0 mm para 130,0 mm de largura.

Na décima primeira amostra ocorreu um problema com as medidas de espessura e largura, onde o planejado era 16 x 130 mm e ficou em 17 x 130,5 mm. A diferença na largura não foi acentuada e estava dentro das normas da empresa, que para este tipo de material fica em $\pm 2,5$ mm. A espessura ficou fora do especificado, causado pelo desgaste acentuado nas buchas dos mancais dos cilindros de laminação. Estes desgastes não foram compensados no plano de passe, o que resultou no aumento em 1 mm da espessura da barra.

A solução encontrada pelos operadores de laminação para este tipo de defeito foi à alteração do plano de passe a cada dia, compensando o desgaste natural das buchas de bronze.

O objetivo do experimento era analisar a calibração do cilindro, sendo assim qualquer alteração no plano de passe para compensar o desgaste modificaria a calibração empregada. A diferença na medida da espessura entre o valor planejado e o real não foi previsto inicialmente, mas era possível que acontecesse, mas não da magnitude encontrada nas amostras laminadas.

Devido às diferenças entre as medidas da espessura e largura encontradas no experimento e os valores projetados, os valores utilizados para os calculados dos modelos matemáticos foram os resultados encontrados nas amostras para que houvesse uma maior aproximação entre os valores medidos e os calculados. O resultado dos cálculos de alargamento e a comparação com o valor medido nas amostras estão dispostos a seguir.

4.2 Resultados dos Cálculos de Alargamento

Os resultados dos cálculos de alargamento na laminação abaixo apresentados utilizaram os valores de espessura e largura retirados das amostras laminadas para servirem de referência para posterior comparação e análise.

4.2.1 Cálculo de Alargamento por Wusatowski

Na Tabela 4.2 estão descritos os valores calculados para alargamento pelo modelo de Wusatowski para cada passe, comparado com o valor medido nas amostras. No Anexo D está

disposta à memória de cálculo segundo o modelo de Wusatowski para o 1º passe.

Tabela 4.2 – Valores dos cálculos de alargamento por Wusatowski.

		Variáveis							
		h ₀ (mm)	b ₀ (mm)	h ₁ (mm)	εw	-w	b ₁ (mm)	br (mm)	e (%)
Passes no laminador	1°	130,0	130,0	110,2	0,41	-0,17	133,7	136,2	-1,9
	2°	110,2	136,2	87,0	0,34	-0,25	144,3	146,2	-1,3
	3°	87,0	146,2	70,4	0,27	-0,42	159,8	151,5	5,2
	4°	70,4	151,5	55,0	0,22	-0,62	176,6	154,8	12,3
	5°	154,8	55,0	126,5	0,57	-0,07	56,3	59,0	-5,7
	6°	59,0	126,5	44,5	0,18	-0,68	153,1	132,0	13,8
	7°	44,5	153,1	32,0	0,14	-0,89	177,2	137,1	22,6
	8°	32,0	137,1	25,2	0,10	-0,99	173,6	139,4	19,7
	9°	139,4	25,2	123,0	0,47	-0,07	25,2	26,1	-2,7
	10°	26,1	123,0	19,5	0,08	-0,99	164,4	130,0	20,9
	11°	19,5	130,0	17,0	0,06	-0,99	149,1	130,5	12,5

Os valores da diferença relativa entre os valores calculados e os medidos na Tabela 4.2 mostram, quando o valor é negativo (valores em negrito na coluna “e”) que o valor calculado ficou abaixo do medido. Por exemplo no 2º passe, o valor calculado ficou com diferença de 1,3 % menor que no valor medido.

Quando o sinal for positivo, o valor calculado pelo modelo matemático é menor que o valor encontrado nas medições das amostras, como por exemplo no caso do 7º passe que teve uma diferença de 22,6 % em relação aos valores médios nas amostras e os valores calculados pelo modelo de Wusatowski.

4.2.2 Cálculo de Alargamento por Köster

Na Tabela 4.3 estão descritos os valores dos cálculos de alargamento segundo o modelo de Köster. No Anexo E está disposta a memória de cálculo do modelo de Köster para o 1º passe.

Tabela 4.3 – Valores dos cálculos de alargamento por Köster.

		Variáveis									
		h_0 (mm)	b_0 (mm)	h_1 (mm)	$C_{b\mu}$	l_d (mm)	φ_h	φ_b	b_1 (mm)	br (mm)	e (%)
Passes no laminador	1°	130,0	130,0	110,2	0,69	56,28	-0,16	0,033	134,2	136,2	-1,3
	2°	110,2	136,2	87,0	0,69	60,92	-0,24	0,050	143,2	136,2	-2,1
	3°	87,0	146,2	70,4	0,69	51,54	-0,21	0,029	150,6	151,6	-0,6
	4°	70,4	151,5	55,0	0,69	49,64	-0,25	0,030	156,1	154,8	0,8
	5°	154,8	55,0	126,5	0,69	62,49	-0,21	0,109	61,4	59,0	3,8
	6°	59,0	126,5	44,5	0,69	48,20	-0,28	0,050	132,4	132,0	0,3
	7°	44,5	132,0	32,0	0,69	44,72	-0,33	0,040	137,7	137,1	0,4
	8°	32,0	137,1	25,2	0,69	32,98	-0,23	0,013	138,9	139,4	-0,3
	9°	139,4	25,2	123,0	0,69	46,20	-0,13	0,085	27,5	26,1	4,9
	10°	26,1	123,0	19,5	0,69	32,49	-0,29	0,020	125,6	130,0	-3,5
	11°	19,5	130,0	17,0	0,69	20,0	-0,14	0,020	130,2	130,5	-0,2

Os valores da Tabela 4.3 levaram em consideração para efeito de cálculo que a temperatura não varia ao longo do processo de laminação. Com os cálculos de variação de temperatura, foi possível recalculer os valores e comparar com os valores a cada passe da Tabela 4.3. A comparação realizada está descrita e analisada junto com o modelo de variação de temperatura.

4.2.3 Cálculo de Alargamento por Siebel

Na Tabela 4.4 estão descritos os valores dos cálculos de alargamento para o modelo de Siebel. No Anexo F está disposta a memória de cálculo do modelo de Siebel para o 1° passe.

Tabela 4.4 – Valores dos cálculos de alargamento por Siebel.

		Variáveis								
		h_0 (mm)	h_1 (mm)	b_0 (mm)	l_d (mm)	Δb (mm)	C_s	b_1 (mm)	br (mm)	e (%)
Passes	1°	130,0	110,2	130,0	56,28	3,0	0,35	133,0	136,2	-2,4
	2°	110,2	87,0	136,2	60,92	4,5	0,35	140,7	146,2	-3,9
	3°	87,0	70,4	146,2	51,54	3,4	0,35	149,6	151,5	-1,2
	4°	70,4	55,0	151,5	49,64	3,8	0,35	155,3	154,8	0,3

	h_0 (mm)	h_1 (mm)	b_0 (mm)	l_d (mm)	Δb (mm)	C_s	b_1 (mm)	br (mm)	e (%)
5°	154,8	126,5	55,0	62,49	4,0	0,35	58,9	59,0	0,0
6°	59,0	44,5	126,5	48,17	4,1	0,35	130,6	132,0	-1,0
7°	44,5	32,0	132,0	44,72	4,4	0,35	136,4	137,1	-0,5
8°	32,0	25,2	137,1	32,98	2,4	0,35	139,5	139,4	0,1
9°	137,5	123,0	25,2	46,17	1,7	0,35	26,9	26,1	3,0
10°	26,1	19,5	123,0	32,49	2,9	0,35	125,9	130,0	-3,3
11°	19,5	17,0	130,0	20,0	0,9	0,35	130,9	130,5	0,3

Alguns valores encontrados pelo modelo de Siebel na Tabela 4.4 apresentam boa aproximação com os valores encontrados nas medições, como por exemplo no 5° passe, onde a diferença entre o valor calculado e o medido nas amostras foi de aproximadamente 0 %.

4.2.4 Cálculo de Alargamento por Ekelund

Na Tabela 4.5 estão descritos os valores de alargamento calculados passe por passe segundo o modelo de Ekelund. No Anexo G estão dispostas as memórias de cálculo do alargamento seguido o modelo de Ekelund para o 1° passe, sendo que para o restante dos passes, o procedimento de cálculo seguiu o mesmo modelo, ocorrendo mudanças em alguns itens dispostos abaixo na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Valores dos cálculos de alargamento por Ekelund.

	Passe no Laminado										
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
h_0 (mm)	130,0	110,2	87,0	70,4	154,8	59,0	44,5	32,0	137,5	26,1	19,5
h_1 (mm)	110,2	87,0	70,4	55,0	126,5	44,5	32,0	25,2	123,0	19,5	17,0
b_0 (mm)	130,0	136,2	146,2	151,5	55,0	126,5	132,0	137,1	25,2	123,0	130,0
l_d (mm)	56,28	60,93	51,54	49,64	62,49	48,47	44,72	32,98	46,17	32,49	20,00
μ	0,374	0,374	0,374	0,374	0,374	0,374	0,374	0,374	0,374	0,374	0,374
m	0,041	0,044	0,069	0,089	0,012	0,11	0,15	0,20	0,030	0,25	0,25
A	368,0	494,3	474,9	545,8	173,0	618,1	686,4	360,6	184,0	433,8	98,2
B	2232,7	2100,9	2251,5	2222,2	860,0	2206,1	2100,6	1517,0	1472,1	1498,6	717,4

		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
1° Interpolação	Y	-368,0	-494,3	-474,9	-545,8	-173,0	-618,1	-686,4	-360,6	-184,0	-433,8	-98,2
	Y'	277,1	287,8	307,8	317,6	125,6	270,4	279,9	285,2	108,8	258,1	265,5
	b ₁ ' (mm)	131,3	137,9	147,7	153,2	56,4	128,8	134,5	138,4	26,9	124,7	130,4
2° Interpolação	Y	1,6	2,7	2,2	2,8	1,6	4,8	5,6	1,5	-0,3	2,6	0,1
	Y'	279,6	291,0	310,7	320,9	128,0	274,7	284,5	287,6	108,5	261,3	266,2
	b ₁ '' (mm)	131,3	137,9	147,7	153,2	56,4	128,7	134,4	138,4	26,9	124,7	130,4
b ₁ (mm)	131,3	137,9	147,7	153,2	56,4	128,7	134,4	138,4	26,9	124,7	130,4	
br (mm)	136,2	146,2	151,5	154,8	59,0	132,0	137,1	139,4	26,1	130,0	130,5	
e (mm)	-3,7	-6,0	-2,5	-1,0	-4,7	-2,5	-2,0	-0,7	2,9	-4,3	-0,1	

Como nos cálculos de Köster, os valores dos cálculos obtidos através do modelo de Ekelund apresentados na Tabela 4.5, são dados obtidos admitindo que a temperatura não varia no processo de laminação.

4.2.5 Comparação entre Modelos de Alargamento

Na Figura 4.14 foram comparados os resultados dos modelos de Wusatowski, Köster, Siebel e Ekelud com a largura medida nas amostras de cada passe laminados em canais de laminação ou calibre.

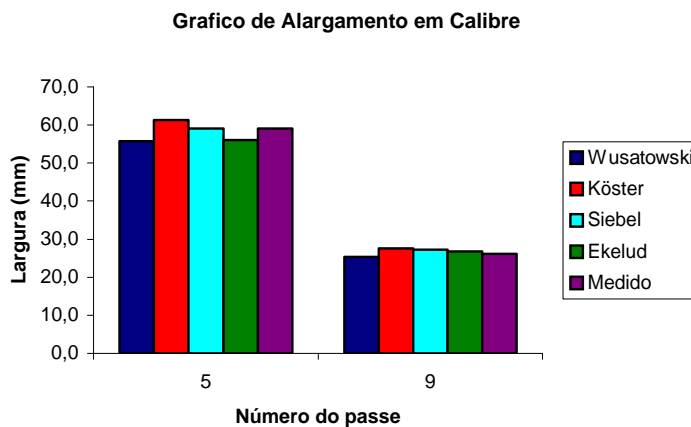


Figura 4.14 – Gráfico comparativo de cálculo para passe em calibre.

Os valores apresentados na Figura 4.14 mostram que os valores calculados não dispersaram do valor medido. Por exemplo no 9º passe, todos os modelos apresentaram boa aproximação, onde a diferença máxima de 1,4 mm, observada no modelo de Köster.

Os valores da Figura 4.15 mostram os valores para a laminação em mesa lisa.

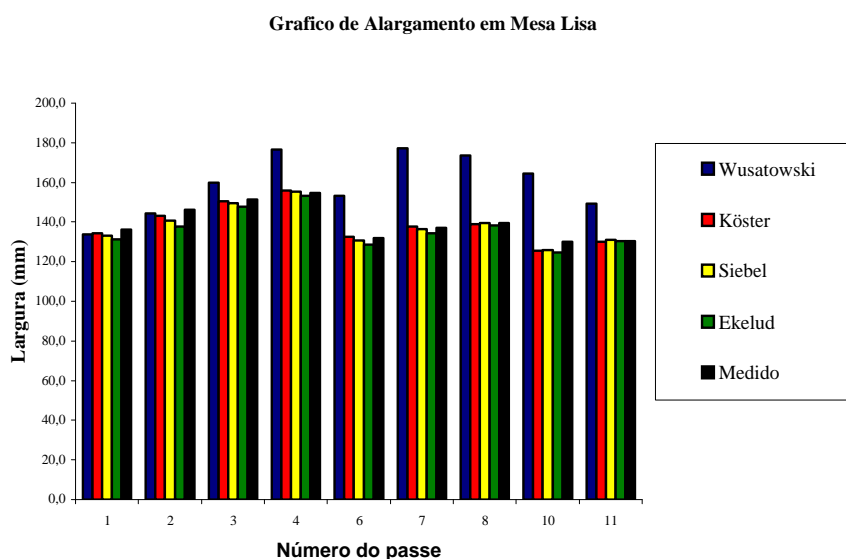


Figura 4.15 – Gráfico comparativo de cálculo para passe em mesa lisa.

Na Figura 4.15 como pode ser visto, a maior diferença entre o valor medido e o calculado ficou com o modelo de Wusatowski, onde os primeiros passes apresentaram boa aproximação e depois sofreram um grande desvio dos valores medidos.

Um bom modo de comparação entre modelos de cálculo pode ser realizado comparando não somente os valores de larguras finais a cada passe, como também os valores de deformação verdadeira. A Figura 4.16 mostra os valores de deformação verdadeira calculados a partir dos dados obtidos pelas amostras laminadas, tanto na altura e como em redução de área.

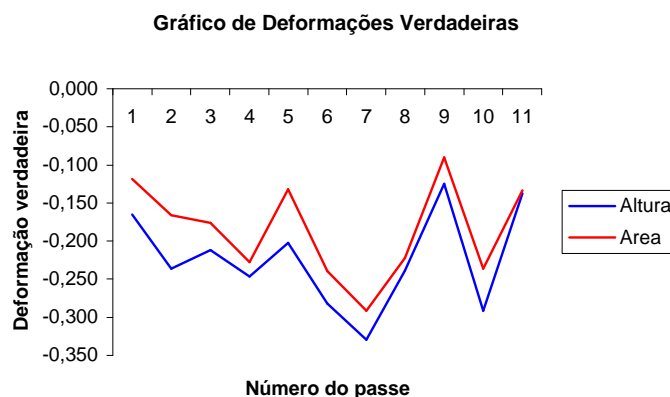


Figura 4.16 – Deformação verdadeira na altura e na área.

A diferença apresentada entre as deformações verdadeira na altura e na área na Figura 4.16 mostra que parte da deformação na altura foi transmitida para a largura no processo, sendo que quanto maior a diferença entre a deformação verdadeira em altura e em área, maior o alargamento sofrido pela barra no laminador. Esta diferença pode ser demonstrada matematicamente pela dedução da equação 4.1.

$$\varphi_{\text{área}} = \ln \frac{h_1 \times b_1}{h_0 \times b_0} \quad (\text{eq. 4.1})$$

$$\varphi_{\text{área}} = (\ln h_1 + \ln b_1) - (\ln h_0 + \ln b_0)$$

$$\varphi_{\text{área}} = (\ln h_1 - \ln h_0) + (\ln b_1 - \ln b_0)$$

$$\varphi_{\text{área}} = \left(\ln \frac{h_1}{h_0} \right) - \left(\ln \frac{b_1}{b_0} \right)$$

$$\varphi_{\text{área}} = \varphi_{\text{altura}} - \varphi_{\text{largura}}$$

A Figura 4.17 mostra a deformação verdadeira na largura para os valores medidos e comparando com os valores calculados segundo o modelo de Wusatowski, Köster, Siebel e Ekelund.

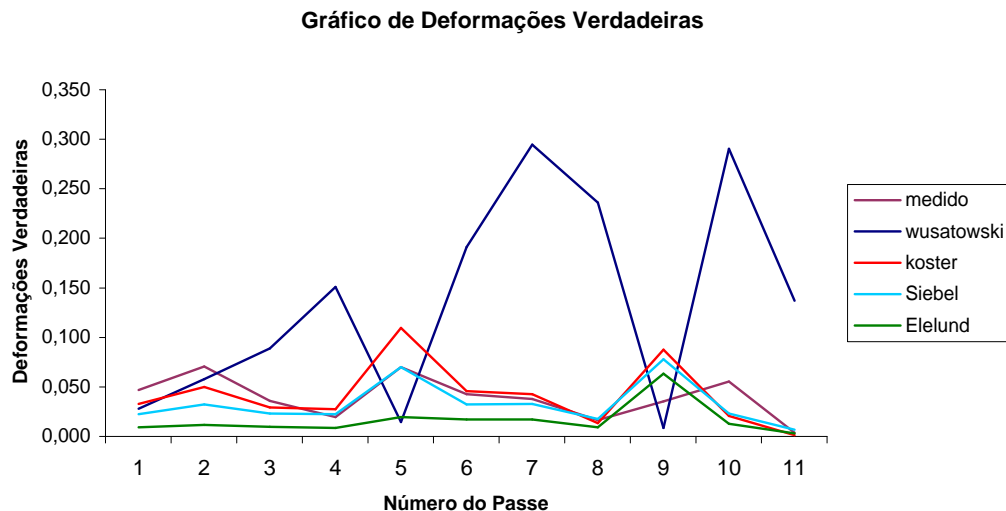


Figura 4.17 – Deformação verdadeira na largura medido e calculado.

Com deformação verdadeira na largura mostrada na Figura 4.17, é possível verificar que o modelo de Wusatowski apresenta grande variação entre os valores medidos nos experimentos e o calculado.

4.2.6 Análise dos Cálculos de Alargamento

Os valores da Tabela 4.6 indicam para cada passe qual dos modelos matemáticos obteve melhor resultado.

Tabela 4.6 – Melhor modelo de cálculo por passe.

PASSES NO LAMINADOR										
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
Köster	Wusatowski	Köster	Siebel	Siebel	Köster	Köster	Siebel	Wusatowski	Siebel	Ekelund

A Tabela 4.6 mostra que para cada passe um modelo matemático que apresenta melhor resultado. Esta variação dos entre modelos matemáticos já foi prevista antes em outros trabalhos ⁽⁴⁷⁾ que confirmam esta tendência para avaliação de alargamento em equações empíricas. Como a calibração empregada apresenta canais de laminação em apenas dois passes, o alargamento ocorre de maneira não controlada no restante dos passes e dependendo da redução empregada, defeitos na lateral da barra podem ocorrer.

Nos passes realizados em calibre, a diferença entre os resultados medidos e calculados foram satisfatórios, diferentemente dos resultados dos passes em mesa lisa, por que os modelos matemáticos desenvolvidos por Wusatowski, Köster, Siebel e Ekelund foram deduzidos a partir de processos de laminação que utilizaram canais em detrimento a laminação em mesa lisa.

A Tabela 4.7 mostra a média e o desvio padrão dos modelos matemáticos de alargamento dos 11 passes calculados no experimento.

Tabela 4.7 – Média e desvio padrão dos valores calculados para alargamento.

	Wusatowski	Köster	Siebel	Ekelund
Média (%)	10,8	1,7	1,6	1,9
Desvio Padrão (%)	7,9	1,7	1,6	2,9

Os resultados em percentual mostrados na Tabela 4.7 indicam que a diferença entre os

valores calculados e os medidos não ultrapassa 2 % em média do valor medido para os modelos de Köster e Siebel. Os demais modelos à diferença pode chegar a 11 % em média.

Mesmo com esta diferença entre os resultados, um dos modelos matemáticos tende a ter resultados com melhor aproximação. Para definir o melhor modelo para o laminador utilizado no experimento, a quantidade de modelos foi reduzida para as duas melhores, os modelos matemáticos de Köster e de Siebel por apresentarem melhor desempenho. Os modelos de Wusatowski e Ekelund podem ser desconsiderados para o cálculo do alargamento no laminador analisado.

A Figura 4.18 mostra um comparativo entre os modelos de Köster e Siebel e o valor encontrado no experimento.

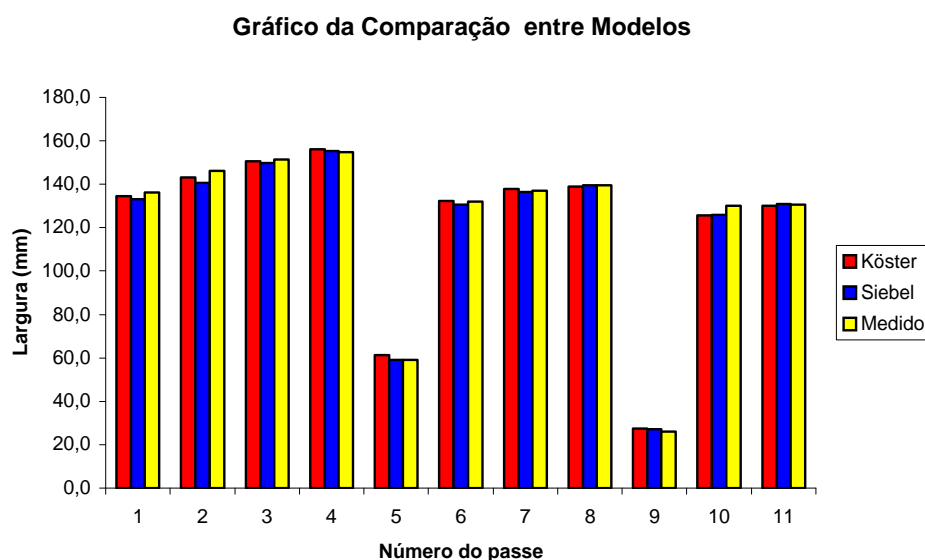


Figura 4.18 – Gráfico comparativo entre os modelos de Köster e Siebel com os valores medidos.

Os dados obtidos com o experimento e os valores dos cálculos apresentados na Figura 4.18 mostram boa aproximação com os valores medidos, como por exemplo no 4º passe que apresenta pequena diferença. A Tabela 4.8 mostra as diferenças percentuais entre os modelos de Köster e Siebel com os valores medidos.

Tabela 4.8 – Comparativo percentual entre os modelos com o valor medido.

	Valores por passe										
	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º
Köster	1,4 %	2,1 %	0,6 %	0,8 %	3,8 %	0,3 %	0,4 %	0,3 %	4,9 %	3,5 %	0,2 %
Siebel	2,4 %	3,9 %	1,2 %	0,3 %	0,0 %	1,0 %	0,5 %	0,1 %	4,2 %	3,3 %	0,3 %

O melhor valor encontrado para os dois modelos apresentados na Tabela 4.8 ficou no 5º passe para o modelo de Siebel e no 11º passe para o modelo de Köster.

Os valores das larguras encontrados nos experimentos (br) e colocados como referência, são médias aritméticas dos valores de maior e menor largura em cada amostra. Nos passes iniciais esta diferença é de maior magnitude, assim sendo a uma diferença entre os valores calculados e os medidos podem ser considerados menores.

Analisando por passe os resultados obtidos com os modelos de Köster e Siebel, é possível avaliar melhor os resultados.

No 1º e o 2º passe, ocorreu uma grande deformação lateral irregular devido a grande redução aplicada em mesa lisa com o equipamento apresentando uma grande folga axial. A redução aplicada em mesa lisa sem um canal que pudesse eliminar a deformação irregular, os modelos apresentaram diferenças consideráveis.

Nos passes de 3 a 8 apresentaram resultados satisfatórios com pouca diferença, com exceção do 5º passe no modelo de Köster que apresentou uma diferença acentuada. A definição da largura no 5º passe é prejudicada devido à deformação irregular sofrida no canal de laminação. Neste passe a altura da barra é maior que a largura, forçando o alargamento dentro do canal de laminação. O canal de número 1 do cilindro apresenta profundidade de 22 mm, com altura da barra na entrada do laminador de 154,8 mm. Descontando a profundidade dos dois canais, 44 mm de sua altura ficaram dentro dos canais e 110,8 mm entre a luz de laminação. O alargamento sofrido pela barra preencheu os canais e no meio da altura não sofreu deformação aparente. Para todos os passes, os modelos matemáticos prevêm um alargamento uniforme em toda a extensão da barra, o que não acontece no caso da laminação dentro destes canais.

No 9º passe o mesmo problema aparece, mas com um agravante. A barra neste passe possui uma largura de 25,2 mm e altura de 139,4 mm. A redução para 123 mm faz com que o alargamento seja contido dentro de canais dos cilindros com 13 mm de profundidade. Como no 5º passe a barra preenche o canal, mas esta também sofre um processo de flambagem causado pela pouca largura da barra, levando a aumento da diferença entre os valores calculados e os valores medidos.

No 10º passe, a barra com flambagem causada pelo 9º passe e com deformação em praticamente 26 mm de sua largura, sofreu um alargamento excessivo. Este problema de flambagem da barra, causou um erro entre os valores medidos e os calculados.

No 11º passe, como a deformação verdadeira é pequena, os resultados apresentados nos modelos teóricos apresentam diferenças que podem ser desprezadas em comparação com

o resultado obtido na laminação da última amostra.

Analisando todos os passes é possível verificar que um sistema de calibração que utiliza mesa lisa com alargamento não contido produz defeitos de deformação em alargamento que aumentam a diferença entre os valores calculados e os medidos.

Para os cálculos de alargamento segundo os modelos de Köster e Ekelund, a temperatura foi considerada constante ao longo do processo. Para verificar se ocorreriam melhoras nos resultados, foi calculada a variação de temperatura a cada passe, com os resultados a seguir.

4.3 Resultado dos Cálculos de Temperatura

Neste subcapítulo são apresentados os valores dos cálculos de temperatura.

4.3.1 Cálculo de Temperatura pelo Modelo de Hensel e Spittel

Na Tabela 4.9 estão descritos os valores para o ganho de temperatura pelo processo de conformação mecânica seguindo o modelo de Hensel e Spittel.

Tabela 4.9 - Valores de ganho de temperatura por conformação por passe.

	Valores por passe										
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
$\Delta\theta_u$ (k)	1,5	2,4	2,5	3,4	2,5	5,5	7,4	6,1	2,2	7,5	3,3

Pelos valores apresentados na Tabela 4.9, os passes de número 7 e 10 apresentam maiores valores. Isto pode ser explicado pela maior deformação verdadeira nestes passes. Na Tabela 4.10 estão descritos os valores para o ganho de temperatura devido ao atrito entre o cilindro de laminação e a barra em cada passe.

Tabela 4.10 - Valores de ganho de temperatura por atrito.

	Variáveis							
	V_a (mm ³ /s)	K_{wm} (N/mm ²)	P_u (W)	P_{GES} (W)	P_μ (W)	W_μ (kN/mm.s)	$\Delta\theta_\mu$ (k)	
1°	10882897	$7,75 \times 10^{-2}$	139361	151537	12175	1,6	0,13	
2°	9114625	$8,76 \times 10^{-2}$	188842	213030	24188	2,8	0,31	

		V_a (mm^3/s)	K_{wm} (N/mm^2)	P_u (W)	P_{GES} (W)	P_μ (W)	W_μ ($\text{kN}/\text{mm}.\text{s}$)	$\Delta\theta_\mu$ (k)
Valores por passe	3°	7775107	$1,02 \times 10^{-1}$	168263	187401	19138	2,5	0,29
	4°	6249778	$1,17 \times 10^{-1}$	181442	205799	24358	3,2	0,45
	5°	4614338	$1,06 \times 10^{-1}$	99145	109862	10717	3,0	0,27
	6°	4267519	$1,68 \times 10^{-1}$	202766	234250	31484	5,0	0,86
	7°	3194615	$1,92 \times 10^{-1}$	203715	241321	37605	6,2	1,36
	8°	2584941	$2,22 \times 10^{-1}$	136849	154579	17729	3,9	0,80
	9°	2150675	$1,53 \times 10^{-1}$	41305	44001	2696	2,2	0,15
	10°	1830248	$2,22 \times 10^{-1}$	118757	137880	19122	4,6	1,21
	11°	1642902	$2,05 \times 10^{-1}$	46506	49847	3341	1,3	0,24

Os maiores valores para o ganho de temperatura na Tabela 4.10 são os passes de número 7 e 10, devido estes passes apresentarem maior deformação verdadeira.

Na Tabela 4.11 estão descritos os valores para a perda de temperatura devido ao fenômeno de condução térmica entre barra e cilindro de laminação para cada passe.

Tabela 4.11 - Valores de perda de temperatura por condução.

		Variáveis								
		θ_B (k)	θ_w (k)	S (mm)	t_B (s)	b_3 (J/mm^2 . (s) $^{-1/2}.\text{k}$)	n	$\phi(n)$	K (J/mm^2 . s.k)	$\Delta\theta_L$ (k)
Valores por passe	1°	1438	333	0,5	$7,6 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	2,1	1,12	0,13	-22,7
	2°	1415	333	0,5	$8,2 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	2,21	1,12	0,19	-44,0
	3°	1372	333	0,5	$6,9 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	2,03	1,11	0,09	-20,3
	4°	1352	333	0,5	$6,7 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	1,99	1,11	0,07	-20,5
	5°	1332	333	0,5	$9,8 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	2,41	1,12	0,43	-77,7
	6°	1256	333	0,5	$6,5 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	1,96	1,10	0,06	-19,2
	7°	1240	333	0,5	$6,0 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	1,89	1,10	0,04	-16,5
	8°	1229	333	0,5	$4,4 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	1,62	1,05	0,004	-1,5
	9°	1231	333	0,5	$7,2 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	2,07	1,11	0,10	-12,3
	10°	1220	333	0,5	$4,4 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	1,61	1,04	0,01	-2,5
	11°	1221	333	0,5	$2,7 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	1,26	0,90	0,04	-12,0

Os valores apresentados na Tabela 4.11 variam conforme o tempo de contato entre o

cilindro e a barra e a temperatura antes de cada passe.

Na Tabela 4.12 estão descritos os valores do cálculo de perda de temperatura pelo processo de convecção da água de refrigeração.

Tabela 4.12 - Valores de perda de temperatura por convecção da água de refrigeração.

		Variáveis									
		θ_{ab} (k)	θ_{zu} (k)	Y_w	W_{t0} (mm ³ /s)	b_{k0} (mm)	W_{tu} (mm ³ /s)	b_{ku} (mm)	W_{SPEZ} (mm ² /s)	W_e (J/kg)	$\Delta\theta_z$ (k)
Valores por passe	1°	303	343	0,99	0,55	133,1	0	133,1	0,0041	293840210	-1,72x10 ⁻⁶
	2°	303	343	0,99	0,55	141,2	0	141,2	0,0039	293840210	-2,05x10 ⁻⁶
	3°	303	343	0,99	0,55	148,9	0	148,9	0,0037	293840210	-2,4x10 ⁻⁶
	4°	303	343	0,99	0,55	153,2	0	153,2	0,0036	293840210	-2,99x10 ⁻⁶
	5°	303	343	0,99	0,55	57,0	0	57,0	0,0096	293840210	-4,05x10 ⁻⁶
	6°	303	343	0,99	0,55	129,3	0	129,3	0,0043	293840210	-4,38x10 ⁻⁶
	7°	303	343	0,99	0,55	134,6	0	134,6	0,0041	293840210	-5,85x10 ⁻⁶
	8°	303	343	0,99	0,55	138,3	0	138,3	0,0040	293840210	-7,23x10 ⁻⁶
	9°	303	343	0,99	0,55	25,7	0	25,7	0,0214	293840210	-8,69x10 ⁻⁶
	10°	303	343	0,99	0,55	126,5	0	126,5	0,0043	293840210	-1,02x10 ⁻⁵
	11°	303	343	0,99	0,55	130,3	0	130,3	0,0042	293840210	-1,14x10 ⁻⁵

Os valores da perda de temperatura pela água de refrigeração na Tabela 4.12 apresentam valores muito baixos, mesmo com a quantidade de água que é colocada sobre os cilindros de laminação ser grande. Os baixos resultados indicam um erro associado ao cálculo, pois a influencia da refrigeração é pequena, mas não tão baixa a ponto de ser desconsiderada.

Na Tabela 4.13 estão descritos os valores do cálculo de perda de temperatura pelo processo de radiação da barra para o ambiente.

Tabela 4.13 - Valores de perda de temperatura por radiação da barra para o ambiente.

		Variáveis					
		T_a (k)	θ_B (k)	L (mm)	a_{st} (k ⁴)	C_{sr} (J/mm ² .s.k ⁴)	$\Delta\theta_s$ (k)
	1°	303	1438	3000	45641	4,61x10 ⁻⁶	-1,8
	2°	303	1415	3000	45586	4,61x10 ⁻⁶	-2,3

		T_a (k)	θ_B (k)	L (mm)	a_{st} (k ⁴)	C_{sr} (J/mm ² .s.k ⁴)	$\Delta\theta_s$ (k)
Valores por passe	3°	303	1372	3000	37744	$4,61 \times 10^{-6}$	-2,3
	4°	303	1352	3000	35770	$4,61 \times 10^{-6}$	-2,8
	5°	303	1332	3000	39748	$4,61 \times 10^{-6}$	-1,6
	6°	303	1256	3000	26867	$4,61 \times 10^{-6}$	-2,6
	7°	303	1240	3000	25566	$4,61 \times 10^{-6}$	-3,5
	8°	303	1229	3000	23366	$4,61 \times 10^{-6}$	-4,0
	9°	303	1231	3000	23960	$4,61 \times 10^{-6}$	-0,9
	10°	303	1220	3000	22871	$4,61 \times 10^{-6}$	-5,1
	11°	303	1221	3000	23280	$4,61 \times 10^{-6}$	-5,9

Os valores de θ_B mostrados na Tabela 4.13 são a somatória das perdas e ganhos de temperatura a cada passe anterior ao analisado. O tempo de laminação não consta nas equações de Hensel e Spittel para a perda de temperatura por radiação.

Na Tabela 4.14 estão dispostos os valores da variação total de temperatura calculada e a projeção de temperatura final de cada passe.

Tabela 4.14 - Valores da variação de temperatura e temperatura final em cada passe.

Valores das variáveis por passe											
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
$\Delta\theta$ (°C)	-22,9	-43,6	-19,8	-19,5	-76,5	-15,4	-11,2	1,5	-10,9	1,2	-5,9
T_n (°C)	1142,1	1098,5	1078,7	1059,3	982,7	967,3	956,1	957,5	946,7	947,8	933,4

Os valores da Tabela 4.14 mostram uma perda gradativa de temperatura por passe, representado pelo sinal negativo no valor da variação de temperatura ($\Delta\theta$). Nos passes de número 8 e 10 houve um aumento na temperatura, pois nestes passes o ganho pelo processo de conformação foi maior que a perda pelo processo de condução e radiação.

A perda de temperatura com a barra parada para retirada das amostras não foram levadas em consideração nos cálculos de variação de temperatura. As perdas com a barra parada são grandes se fossem retiradas as onze amostras de apenas uma barra. Para minimizar esta perda, as amostras retiradas de quatro barras, diminuindo o efeito da perda de temperatura no corte das amostras, diminuindo os erros dos cálculos de variação de temperatura.

No Anexo I está a memória de cálculo para a perda de temperatura pelo modelo de Hensel e Spittel.

4.3.2 Cálculo de Temperatura por Geleji

Para efeito de cálculo o tempo total de laminação deste perfil a partir de uma matéria prima de bitola 130x130 mm foi de aproximadamente 5 minutos. Neste caso o tempo de 5 minutos foi dividido por 11, que representam os 11 passes no laminador. Então para cada passe, o tempo estimado ficou em 27,3 segundos.

Na Tabela 4.15 são apresentados os valores para a variação de temperatura e temperatura final a cada passe segundo o modelo de Geleji.

Tabela 4.15 - Valores da variação de temperatura por Geleji.

		Variáveis				
		$\Delta\theta_u$ (°C)	$\Delta\theta_L$ (°C)	$\Delta\theta_S$ (°C)	$\Delta\theta$ (°C)	T_1 (°C)
Valores por passe	1°	$3,9 \times 10^{-7}$	$-9,0 \times 10^{-2}$	-22,4	-22,5	1142,5
	2°	$5,5 \times 10^{-7}$	$-1,1 \times 10^{-2}$	-19,8	-20,0	1122,5
	3°	$4,8 \times 10^{-7}$	$-8,2 \times 10^{-2}$	-18,7	-18,8	1103,7
	4°	$5,3 \times 10^{-7}$	$-7,6 \times 10^{-2}$	-17,8	-17,8	1085,9
	5°	$2,8 \times 10^{-7}$	$-5,1 \times 10^{-2}$	-16,8	-16,9	1069,0
	6°	$6,1 \times 10^{-7}$	$-5,9 \times 10^{-2}$	-16,0	-16,1	1052,9
	7°	$6,2 \times 10^{-7}$	$-5,2 \times 10^{-2}$	-15,3	-15,3	1037,6
	8°	$4,0 \times 10^{-7}$	$-2,9 \times 10^{-2}$	-14,6	-14,6	1023,0
	9°	$1,1 \times 10^{-7}$	$-1,3 \times 10^{-2}$	-13,9	-13,9	1009,0
	10°	$3,6 \times 10^{-7}$	$-2,5 \times 10^{-2}$	-13,3	-13,4	995,7
	11°	$1,3 \times 10^{-7}$	$-9,5 \times 10^{-2}$	-12,8	-12,8	982,9

Os dados da Tabela 4.15 mostram que para o modelo de Geleji, o ganho de temperatura pelo processo de conformação e a perda por condução térmica são desprezíveis. Neste caso somente a perda de temperatura pelo processo de radiação foi levada em consideração.

Como a perda de temperatura por condução é pequena nos cálculos segundo Geleji, foi utilizada a equação de Stefan – Boltzmann para obtenção da temperatura final da barra com

tempo de 5 minutos. O valor final da temperatura ficou em 934,1 °C. O resultado ficou 48,8°C abaixo do calculado passe a passe.

No Anexo J está a memória de cálculo para a perda de temperatura pelo modelo de Geleji

Para uma definição do melhor modelo de variação de temperatura, uma comparação entre os resultados obtidos passe a passe foi feita e apresentada no subcapítulo 4.3.3.

4.3.3 Comparação entre Modelos de Cálculo de Temperatura

O valor da temperatura final pelo modelo de Hensel e Spittel ficou em 933,4 °C, e o do modelo de Geleji ficou em 982,9 °C, uma diferença de 49,5 °C. Comparando com o valor final do modelo de Hensel e Spittel com o valor calculado, utilizando somente a perda de temperatura por radiação no modelo de Geleji gerou uma diferença de 0,7 °C.

A Figura 4.19 mostra uma comparação entre os valores calculados passe a passe pelos modelos de Hensel e Spittel e o modelo de Geleji, onde os valores em negativo apresentam perda de calor e os valores positivos o ganho de calor no processo.

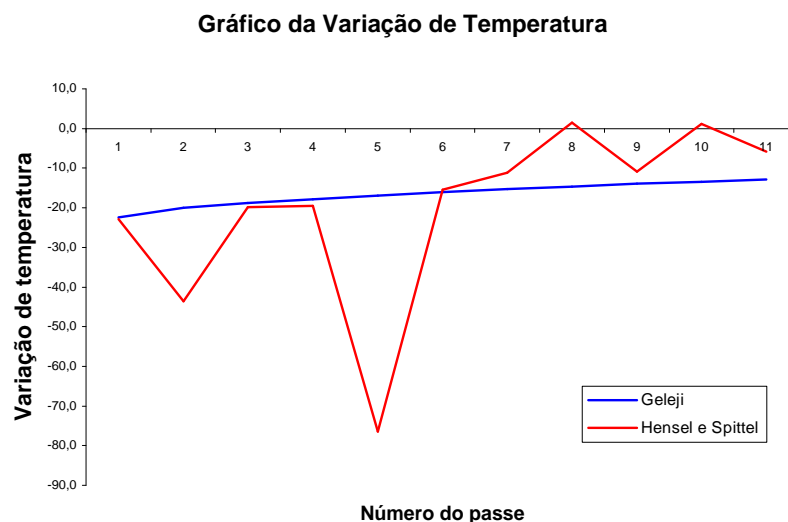


Figura 4.19 – Variação de temperatura por passe.

Os valores obtidos pelo modelo de Geleji na Figura 4.19 mostram uma queda gradual em todo o processo de laminação, ao contrário do modelo de Hensel e Spittel que apresenta grande variação e nos passe 8 e 10 apresenta ganho de temperatura.

Na Figura 4.20 mostra a temperatura final da barra depois de cada passe pelos modelos de Hensel e Spittel e Geleji.

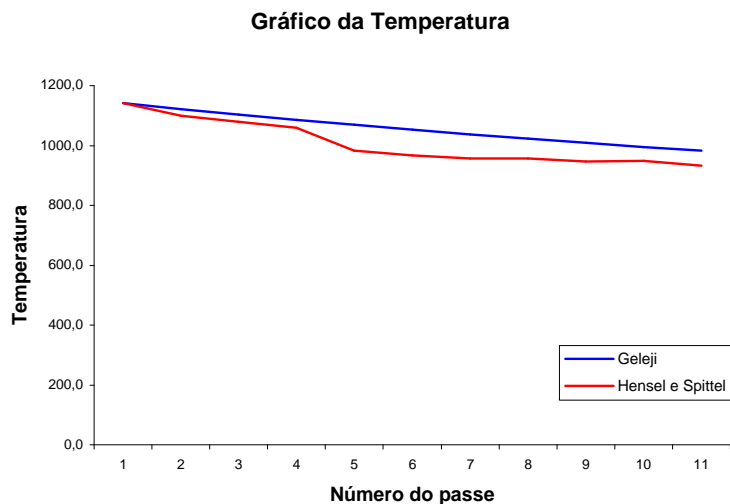


Figura 4.20 – Temperatura depois de cada passe.

Os valores da perda de temperatura pelo modelo de Hensel e Spittel mostrados na Figura 4.20 para o passe de número 5 são grandes. Outro dado observado é que as curvas de temperatura estão bem próximas nos dois modelos para cada passe.

A comparação entre os modelos de variação de temperatura serviu de referência para a análise e definição do modelo adotado. A análise feita sobre os resultados dos cálculos está a seguir.

4.3.4 Análise dos Cálculos de Distribuição de Temperatura

A Tabela 4.16 mostra a variação calculada de temperatura por passe entre os modelos de Hensel e Spittel e Geleji.

Tabela 4.16 – Comparativo entre os modelos de Hensel e Spittel e Geleji.

	Valores das variáveis por passe										
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
$\Delta\theta_{\text{Spittel}}$	-22,9	-43,6	-19,8	-19,5	-76,5	-15,4	-11,2	1,5	-10,9	1,2	-14,4
$\Delta\theta_{\text{Geleji}}$	-22,5	-20,0	-18,8	-17,8	-16,9	-16,1	-15,3	-14,6	-14,0	-13,3	-12,8
e (%)	1,74	54,12	5,05	8,72	77,91	-4,54	-36,61	-1073	-28,44	-1208	11,11

O valor da diferença absoluta entre os valores calculados pelo modelo de Hensel e Spittel e de Geleji mostrados na Tabela 4.16 apresentaram variação tanto positivas como

negativas. Quando a variação é positiva significa que o valor obtido pelo modelo de Hensel e Spittel foi maior que o obtido pelas equações de Geleji. Quando o valor for negativo, o valor de Geleji é maior que o encontrado na equação de Hensel e Spittel.

Analisando o modelo de Geleji, os resultados obtidos no modelo matemático para a perda de calor por condução e ganho pelo trabalho de conformação são desprezíveis. Os valores encontrados são os resultados dos cálculos de radiação térmica no período de laminação, que resultou na temperatura de 933,4 °C, próximo ao valor de 934,1°C de Hensel e Spittel.

A análise do modelo de Hensel e Spittel mostra que o ganho de temperatura pelo atrito entre barra e cilindro, somados as perdas por convecção e por radiação praticamente se anulam. O processo de perda de temperatura segundo o modelo de Hensel e Spittel ocorre pela diferença do que foi ganho pela conformação e o que foi perdido pela condução térmica.

Neste caso, dois modelos que apresentam resultados parecidos, mas com teorias completamente diferentes. Para o modelo de Geleji, a radiação térmica é o processo de maior transferência de calor e para o modelo de Hensel e Spittel a condução térmica. Como os valores de temperatura para cada passe foram utilizados nos cálculos de força de laminação para cada passe, um modelo teve que ser definido para ser aplicado nos cálculos de força de laminação e alargamento.

Trabalhos publicados ⁽⁴⁸⁾ ⁽⁴⁹⁾ ⁽⁵⁰⁾ indicam que para a modelagem térmica de cilindros de laminação, o fator principal para o ganho de temperatura no cilindro se dá pelo processo de condução térmica e não por irradiação de outro meio. Como o modelo de Geleji mostrou maior influência para perda por radiação e o modelo de Hensel e Spittel por condução, o modelo de Hensel e Spittel foi determinado para os cálculos de força de laminação e alargamento e o modelo de Geleji desconsiderado.

Analisando os resultados dos cálculos segundo o modelo de Hensel e Spittel para os passes 8 e 10, houve um aumento da temperatura da barra no processo de laminação. Este aumento ocorreu pela velocidade de deformação alta em relação ao arco de contato nestes dois passes. Estas variáveis somadas fazem com que o ganho pelo processo de conformação mecânica seja maior que a perda por condução, pois à parte da barra que entra em contato com a barra é menor que nos outros passes.

A ocorrência do aumento da temperatura em passes no laminador acontece também em laminadores de alta velocidade de laminação, onde a partir de determinados passes intermediários a temperatura tende a aumentar até o passe de acabamento final ⁽⁵¹⁾.

No restante dos passes o modelo apresenta perdas compatíveis com o tempo de

contato entre o cilindro e a barra, com a maior perda no 5º passe, devido ao arco de contato apresentar um valor acima dos encontrados nos demais passes.

Com os resultados do modelo de Hensel e Spittel para cada passe, foi aplicada a variação de temperatura a cada passe nos modelos de alargamento de Köster e Ekelund apresentada abaixo.

4.3.5 Aplicação da Variação de Temperatura nos Modelos Matemáticos para Alargamento

A Tabela 4.17 mostra a variação teórica em comparação com os valores retirados das amostras, segundo o modelo de Köster aplicando uma variação de temperatura a cada passe baseado no modelo de variação de temperatura de Hensel e Spittel.

Tabela 4.17 – Valores dos cálculos de alargamento por Köster com variação de temperatura.

	Passes										
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
b_1 (mm)	134,4	143,0	150,2	155,7	61,0	131,0	136,1	138,2	27,3	124,6	130,1
b_r (mm)	136,2	146,2	151,5	154,8	59,0	132,0	137,1	139,4	26,1	130,0	130,5
e (%)	-1,35	-2,24	-0,89	0,42	3,35	-0,77	-0,74	-0,86	4,43	-4,32	-0,32

Os dados da largura apresentados na Tabela 4.17 foram colocados em forma de gráfico para uma melhor visualização. A Figura 4.21 mostra a comparação entre o valor da largura com a temperatura fixa e com a variação de temperatura.

Gráfico de Comparação entre Temperatura Fixa e Variável

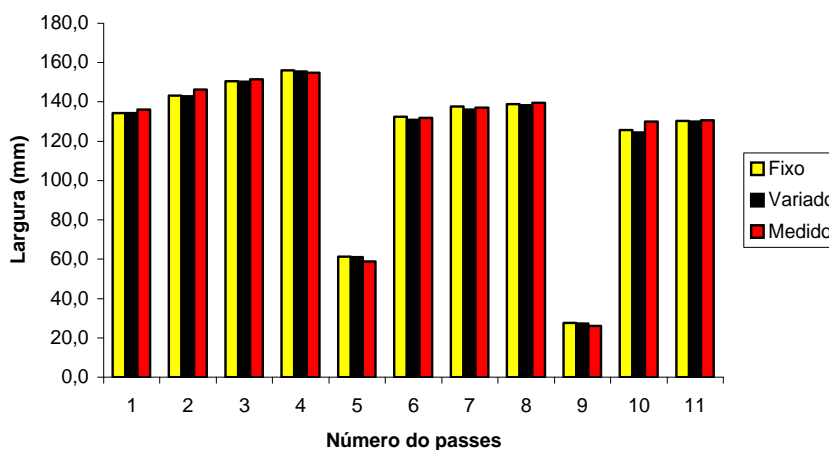


Figura 4.21 – Comparação entre modelo de Köster com temperatura fixa e variada.

A variação mostrada na Figura 4.21 foi pequena, ocorrendo melhora nos resultados para os passes 4, 5 e 9. Os casos de piora nos dados para os passes 2, 3, 6, 7, 8, 10 e 11. O valor para o 1º passe não sofreu alteração. Os passes de número cinco e nove foram realizados dentro de canais de laminação

Como os dados apresentaram melhora apenas para três dos passes, a aplicação da variação de temperatura para o modelo de alargamento por Köster pode ser desconsiderada.

Para o modelo de Ekelund, foi aplicado o mesmo processo de variação de temperatura que no modelo de Köster, e o resultado está na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Valores dos cálculos de alargamento por Ekelund com variação de temperatura.

	Passes										
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
b_1 (mm)	131,3	138,0	148,0	153,6	57,6	129,8	135,5	138,8	27,4	128,3	130,5
br (mm)	136,2	146,2	151,5	154,8	59,0	132,0	137,1	139,4	26,1	130,0	130,5
e (%)	-3,7	-5,9	-2,3	-0,8	-2,4	-1,7	-1,2	-0,4	4,6	-3,8	0,0

Os dados da largura apresentados na Tabela 4.18 foram colocados em forma de gráfico para uma melhor visualização. A Figura 4.22 mostra a comparação entre o valor da largura com a temperatura fixa e com a variação de temperatura.

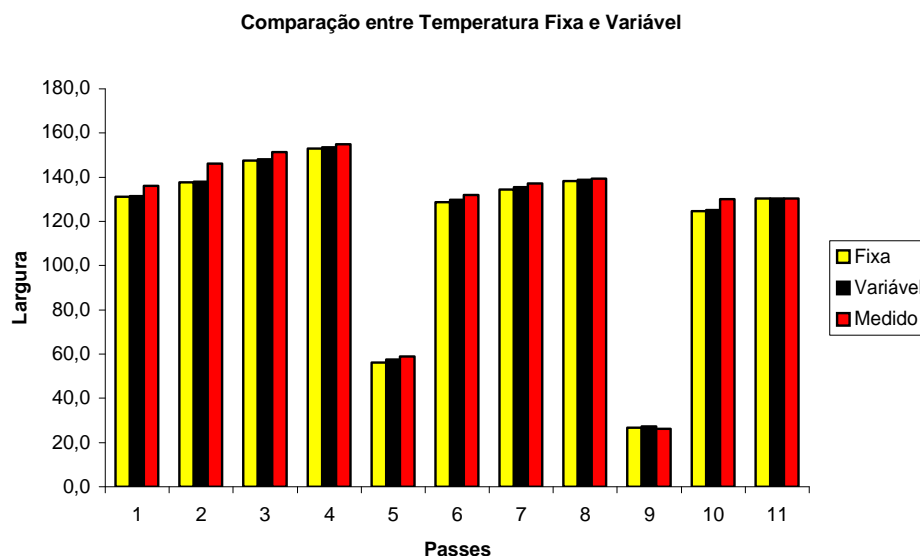


Figura 4.22 – Comparação entre modelo de Ekelund com temperatura fixa e variada.

A comparação na Figura 4.22 mostra melhora nos resultados para os passes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 e 11. A piora do resultado ocorreu apenas no passe 9 onde ocorreu o defeito de

tombamento da barra no canal de laminação.

A melhora nos resultados do modelo de Ekelund não foi o suficiente para diminuir significativamente a diferença dos valores encontrados nas amostras e o valor calculado. Para o modelo de Köster os resultados pioraram, levando a conclusão que para este caso onde o processo de laminação trabalha em mesa lisa, a temperatura pouco afeta as condições de cálculo para este modelo.

Para a execução dos cálculos de variação de temperatura, foi necessário o cálculo da força de laminação, com resultado no subcapítulo 4.4.

4.4 Resultados dos Cálculos da Força de Laminação

Os valores para a força de laminação foram utilizados nos cálculos de variação de temperatura. Para uma melhor visualização, são apresentados separadamente os valores da velocidade de deformação, resistência à deformação e força de laminação.

4.4.1 Cálculo da Velocidade de Deformação

Na Tabela 4.19 estão descritos os demais valores para a velocidade de deformação. A memória de cálculo do 1° passe está descrita no Anexo K.

Tabela 4.19 - Valores dos cálculos para velocidade de deformação.

		Passes no laminador										
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
Variáveis	v (mm/s)	741,9	741,9	741,9	741,9	639,9	741,9	741,9	741,9	681,7	741,9	741,9
	l_d (mm)	56,28	60,93	51,54	49,64	67,49	48,17	44,72	32,98	49,10	32,50	20,00
	ϕ_h	0,165	0,236	0,212	0,247	0,202	0,282	0,330	0,239	0,125	0,292	0,137
	$\dot{\Phi}$ (s ⁻¹)	2,18	2,88	3,05	3,69	2,07	4,34	5,47	5,37	1,74	6,66	5,09

Foram utilizados nos cálculos da Tabela 4.19 os valores da deformação verdadeira na altura devido aos valores serem conhecidos antes do processo de laminação.

4.4.2 Cálculo da Resistência a Deformação

Na Tabela 4.20 estão descritos os demais valores para a resistência a deformação. A memória de cálculo do 1° passe está descrita no Anexo L.

Tabela 4.20 - Valores dos cálculos para resistência à deformação.

		Passes no laminador										
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
Variáveis	k_f (N/mm ²)	72	80	90	100	100	135	145	160	140	150	145
	μ	0,468	0,479	0,501	0,511	0,520	0,559	0,566	0,572	0,571	0,577	0,576
	k_e	1,08	1,09	1,14	1,18	1,06	1,25	1,33	1,39	1,10	1,48	1,42
	k_w (N/mm ²)	77,5	87,6	102,2	117,6	106,4	168,5	193,4	221,6	153,4	222,6	206,3

Os valores da Tabela 4.20 mostram que a resistência à deformação da barra no laminador depende diretamente da velocidade de deformação e da temperatura da barra na entrada do laminador.

4.4.3 Cálculo da Força de Laminação

Na Tabela 4.21 estão descritos os valores para a força de laminação. A memória de cálculo do 1° passe está descrita no Anexo M.

Tabela 4.21 - Valores dos cálculos para força de laminação.

		Passes no laminador										
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
Variáveis	b_m (mm)	133,1	141,2	148,9	153,2	57,0	129,3	134,6	138,3	25,7	126,5	130,3
	A_d (mm ²)	7491,5	8602,8	7671,2	7602,2	3562,1	6225,5	6017,3	4560,2	1259,4	4110,8	2605,0
	F_w (kN)	580,9	754,0	784,1	894,0	379,1	1048,7	1163,6	1010,6	193,2	914,9	537,5

Os valores mostrados na Tabela 4.21 indicam que a força necessária para laminar à barra sofre variação ao longo dos passes, ficando com os maiores valores para os passes intermediários 6, 7 e 8 e os menores valores para os passe de acerto de largura de número 5 e 9.

4.4.5 Análise do Cálculo da Força de Laminação

Os resultados dos valores da velocidade de deformação, resistência à deformação e força de laminação foram traduzidos em forma de gráfico para uma melhor visualização e análise. A Figura 4.23 mostra a curva da velocidade de deformação da barra no laminador.

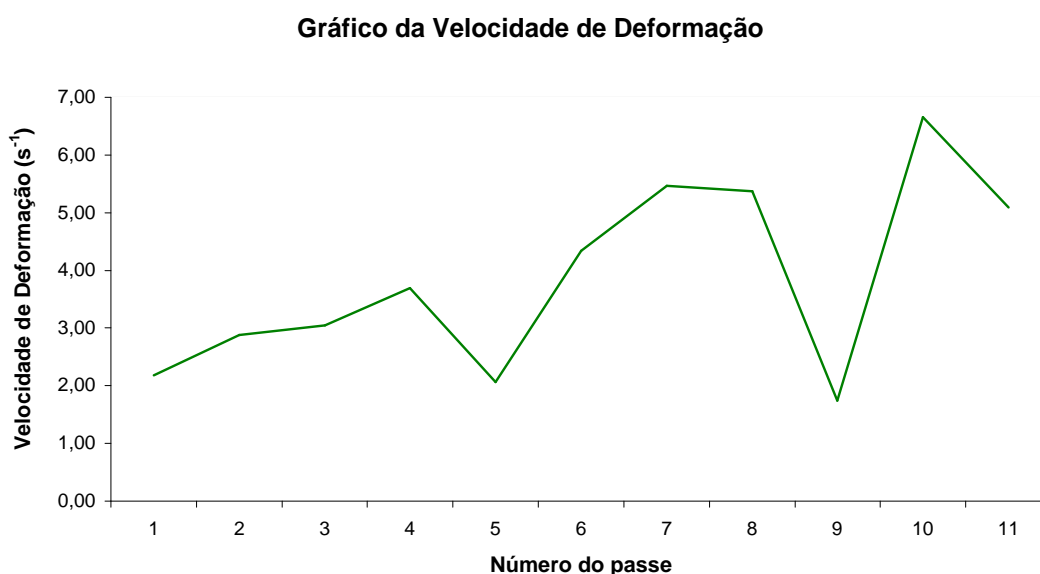


Figura 4.23 – Curva da velocidade de deformação.

A Figura 4.23 mostra um aumento da velocidade de deformação da barra no laminador. Existe uma diminuição da tendência ao crescimento da velocidade nos passes de número 5, 9 e 11. Esta diminuição nos passes 5 e 9 aconteceram devido à laminação ocorrer dentro de canais.

Os canais de laminação apresentam um rebaixo em relação à mesa lisa, sendo assim, a velocidade periférica do cilindro neste ponto é menor em comparação a velocidade periférica da mesa lisa. Os tipos de canais utilizados mantém a velocidade no fundo de canal constante em todo o fundo de canal.

A Figura 4.24 mostra a curva de resistência à deformação do material laminado em cada passe no laminador.



Figura 4.24 – Curva de resistência à deformação do material laminado.

A Curva da Figura 4.24 mostra um aumento da resistência a deformação do material laminado devido principalmente à perda gradual de temperatura da barra no laminador. Os dados da perda de temperatura a cada passe foram retirados do modelo matemático de Hensel e Spittel para variação de temperatura. Nos passes de número 5, 9 e 11 ocorreu uma diminuição da resistência a deformação porque houve uma redução do fator de influência da geometria.

A Figura 4.25 mostra a curva da força de laminação no laminador.

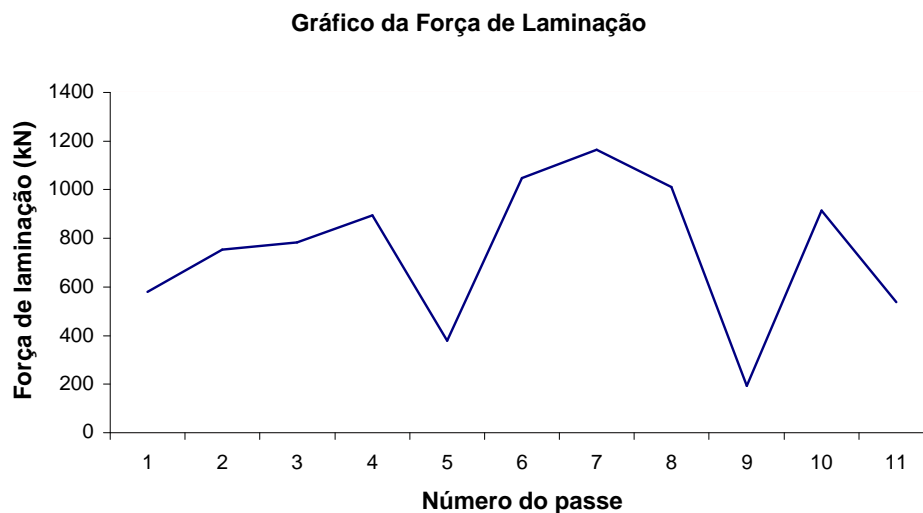


Figura 4.25 – Curva da força de laminação.

Na Figura 4.25 é possível verificar a força de laminação exigida a cada passe no laminador. Nos passes de número 5, 9 e 11 ocorre uma diminuição da força de laminação influenciada pela diminuição da resistência a deformação nestes passes e também pela diminuição da área de contato entre barra e cilindro de laminação.

Os dados mostram que a força necessária para laminar uma barra depende da redução empregada, resistência à deformação intrínseca a cada material, da velocidade periférica do cilindro e da temperatura a cada passe.

Uma boa aplicação para os dados da força de laminação calculados está na determinação da potência exigida ao laminador em cada passe. Por exemplo no cálculo do ganho de temperatura por atrito, o valor da potência necessária para laminar o material foi exigida, e neste caso está expressa em W (Watts).

O passe com maior valor de potência foi o de número 7, onde o valor de potência ficou em torno de 203715 W, ou aproximadamente 273,2 HP (1 HP = 745,69 W). A potência expressa em HP (*Horse Power*) é a mesma que CV (Cavalo Vapor) ou PS (Pferde Stärke)⁽⁵²⁾. Esta potência é somada com a potência necessária para fazer o sistema girar, chamada de potência em vazio.

Esta potência em vazio somada com a potência a cada passe, forma a potência necessária para que o motor possa laminar a barra sem que este sofra danos decorrentes com sobrecargas elétricas.

Na Figura 4.26 mostra a potência utilizada a cada passe para que a barra possa ser laminada.

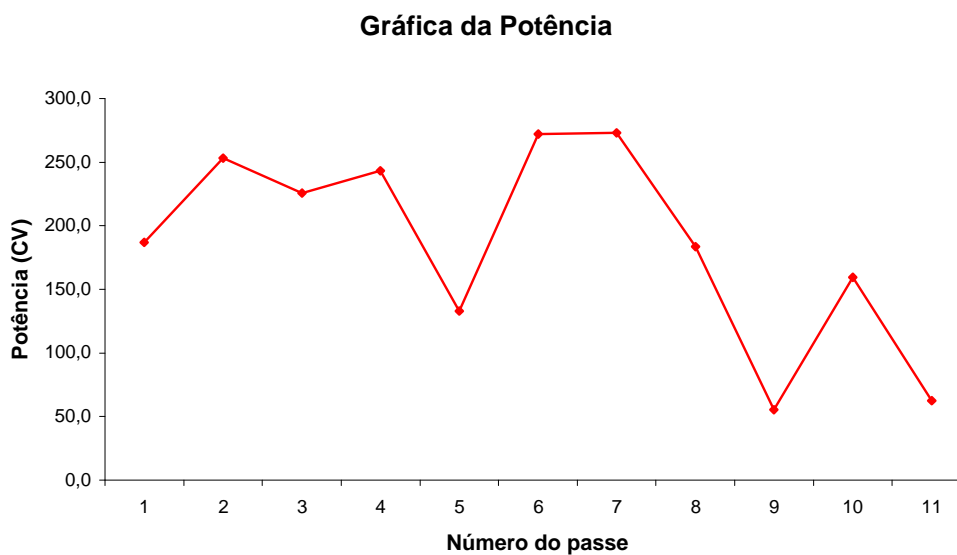


Figura 4.26 – Curva de potência calculada por passe.

Os dados da Figura 4.26 mostram valores altos para os passes 6 e 7 e menores para os passes 9 e 11.

A potência em vazio do laminador, ou seja a potência necessária para que o laminador funcione sem laminar não foi mensurada neste equipamento. Uma estimativa pode ser utilizada medindo a corrente elétrica que passa pelo laminador em vazio, que ficou em 75 A, representando 37 % da potência máxima do motor. O valor foi medido com a ajuda da chave inversora de frequência do motor elétrico do laminador.

Algumas mudanças no laminador foram executadas com o intuito de diminuir as folgas existentes e a potência em vazio do laminador. Estas mudanças estão em detalhes a seguir.

4.6 Mudanças Realizadas no Equipamento de Laminação

Um dos principais fatores que aumentam a força exigida do motor em vazio são os mancais que operam com buchas de bronze, ocorrendo um aumento do arraste do cilindro quando a barra está sendo lamina. Este arraste é tão significativo que uma bucha do mancal dura aproximadamente 15 dias, criando defeitos como a diferença entre os valores de redução programada para cada passe e os valores finais retirados em cada amostra.

Com base nas amostras retiradas, seus defeitos e cálculo da potência exigida a cada passe foram feitas alterações mecânicas no equipamento. Estas alterações não foram o principal objetivo do trabalho, mas mostraram-se necessárias para que houvesse uma diminuição dos defeitos do processo produtivo no laminador.

Para solucionar o problema de erro no plano de passe e excesso de força em vazio do laminador, foram projetados novos mancais em substituição aos mancais de bronze dos cilindros. Os novos mancais foram projetados para serem mancais com rolamento. A idéia era diminuir a força necessária para laminar o material, pois as buchas ofereciam muita resistência ao movimento de rotação do cilindro e deixavam folgas axiais muito grandes, causando desvios e erros no processo produtivo.

Um custo parcial foi levantado para avaliar a viabilidade do investimento. O projeto previa 12 rolamentos com preço total de R\$ 30.000,00 (R\$2.500,00 cada rolamento) e mais R\$ 5.000,00 na preparação de todos os mancais (fundição e usinagem). O sistema de buchas consumia uma média de 5 buchas por mês com custo unitário de R\$ 750,00 cada, no total de R\$ 3.750,00 por mês. As buchas de bronze utilizavam óleo para lubrificação, com gasto de R\$ 1.320,00 por mês. Com a utilização de rolamentos, os custos de buchas e do óleo que a cada

mês consumia R\$ 5.070,00 deveriam pagar o investimento de R\$ 35.000,00 em aproximadamente 7 meses. Existiam outros custos envolvidos, mas estes não foram contabilizados por falta de dados confiáveis.

Com os custos parciais favoráveis, o projeto foi aprovado pela direção da empresa. O tempo de implantação total do projeto foi de quatro meses e mostrou resultados inesperados. A produção diária passou de 36.000 kg para 41.000 kg, ocasionado pela redução significativa do arraste entre os mancais de bronze e o cilindro do laminador. A força necessária para que o laminador funcionasse tanto em vazio como em carga diminuiu pela substituição dos mancais de bronze, apesar de que o laminador possuir mais mancais de bronze em seu conjunto de acionamento, que se substituídos, também diminuiriam a força exercida sobre o motor elétrico.

O retorno não foi apenas financeiro, mas também ocorreu melhora na qualidade do material laminado. A diminuição das folgas axiais fez com que os canais de laminação permanecessem alinhados, eliminando o tombamento da barra nos passes em canais. Com a substituição das buchas dos mancais por rolamentos, as folgas ocasionadas pelo desgaste das buchas foram eliminadas, fazendo com que o acerto da laminadora fosse mantido ao longo do processo sem sofrer alterações, melhorando o acerto das dimensões da barra laminada.

5 CONCLUSÃO

A análise da calibração de barra para laminação passe a passe mostra ser muito importante devido aos dados que retirados sobre a qualidade do material laminado e medidas finais da bitola laminada. Este trabalho representou avanços importantes para a empresa na parte de controle do material produzido, pois a mesma nunca analisou tecnicamente a produção e com a ajuda do trabalho foram identificados vários problemas não contabilizados

Analisando as amostras obtidas, foi verificado que o processo gerou muitos defeitos, como por exemplo a formação de deformações irregulares como tombamento da barra e medidas fora do especificado. Estes defeitos foram formados pela deficiência técnica no equipamento de laminação e uma calibração que utiliza mesa lisa em detrimento de canais de laminação. Os canais de laminação presentes nos cilindros e utilizados no plano de passe estavam no limite de suportar o alargamento empregado nos passes de número 5 e 9, a ponto de sofrer um processo de estouro de canal, ocasionado um problema chamado de dobra de laminação. Este problema de dobra aconteceu muitas vezes no passado gerando o sucateamento do material laminado sem que o real problema causador fosse detectado.

A aplicação das equações teóricas para determinação do alargamento para este laminador foi de muita importância para definir um limite de alargamento antes do material sofrer o estouro de canal. Os experimentos com os cálculos de alargamento seguindo os modelos de Wusatowski, Köster, Siebel e Ekelund resultaram em dois modelos que podem ser empregados com maior precisão, o modelo de Köster e o modelo de Siebel. O modelo de Siebel é mais simples para a aplicação prática que o modelo de Köster, que apresentou maior precisão para o último passe. Para os passes em canais o melhor modelo é o de Siebel. Como a empresa nunca analisou nenhum plano de passe, o melhor modelo para este caso é o modelo de Siebel por ser de maior simplicidade de aplicação.

Nos cálculos de distribuição de temperatura para serem aplicados nos cálculos de alargamento, o modelo de Hensel e Spittel apresentou resultados mais coerentes com a realidade prática que o modelo de Geleji. Analisando os dados obtidos e aplicando nos modelos de alargamento e força de laminação, ficou evidente que para os modelos de alargamento a influência da temperatura pode ser desprezada. Aplicando a variação de temperatura no modelo de Köster ocorreu uma piora nos resultados e no modelo de Ekelund houve uma melhora, mas esta melhora não chegou a afetar significativamente os resultados obtidos. Para este caso específico, a variação de temperatura afeta diretamente a força de

laminação.

Os resultados obtidos com o modelo de Ekelund para a força de laminação apresentaram resultados satisfatórios, informando quais passes foram de maior esforço para o laminador. Com os resultados da força de laminação foi possível calcular a potência exigida para o equipamento, onde seu maior valor foi no 7º passe com 273 CV. Esta potência exigida para laminar não afeta com esta magnitude o motor elétrico devido as duas reduções de velocidade aplicada na saída do motor até os cilindros. A potência aplicada em vazio ao motor não foi calculada, mas o motor elétrico utilizou uma corrente de 75 A para girar a máquina sem a barra entre os cilindros, uma amperagem relativamente alta.

Com todas as análises feitas sobre o resultado das amostras e seus defeitos apresentados neste experimento, foram projetadas modificações no equipamento de laminação. Estas modificações não faziam parte deste trabalho de análise de uma calibração, mas pelo nível de problemas apresentados estas modificações foram necessárias. As modificações nos mancais de laminação superaram as expectativas iniciais em relação à manutenção, custo de operação e principalmente produtividade, que não foi analisada quando foi feito a viabilidade de custos, mas se mostrou como principal fator de melhoria no equipamento.

Os resultados na produção decorrentes da melhoria no equipamento comprovam que uma boa análise do processo de laminação, com o auxílio de ferramentas que simulam o processo produtivo analisado passe a passe geram resultados para a empresa que ganha com o aumento da produção e qualidade de seus produtos, junto com os profissionais que atuam no processo que ganham conhecimento através de estudos realizados em instituições de pesquisa aplicado em um caso prático de processo produtivo.

6 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros podem ser realizados sobre o mesmo equipamento de laminação seguindo várias linhas de pesquisa e aplicação como:

- 1) Os modelos matemáticos utilizados neste trabalho são de ordem empírica, apresentando diferenças, às vezes grande com o que ocorre a cada passe. Uma abordagem que pode ser feita sobre este tipo de trabalho é a utilização de modelos matemáticos computacionais como elementos finitos e comparar os resultados com os modelos empíricos para se determinar a diferença entre estes e qual o seu ganho ou perda em relação a uma laminação real.
- 2) Outra abordagem que se pode dar é analisar o real efeito da temperatura sobre o processo de laminação, analisando cada aspecto da transferência de calor para se determinar com exatidão que fenômeno físico está mais presente e em que parte do processo.
- 3) A realização de um modelamento e aplicação de uma nova calibração que melhore aspectos do processo como o tombamento da barra ao passar pelo laminador, principalmente nos primeiros passes.

REFERÊNCIAS

1. BRESCIANI, et al: **Conformação Plástica dos Metais**. Editora da Unicamp, ed. 05, 1997.
2. HELMAN, H.; CETLIN, P. R.: **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. Editora da UFMG, ed. 02, 1993.
3. SCHAEFFER, L.: **Conformação Mecânica**. 2.ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
4. BURTSEV, K.: **Rolling practice**. Moscow: Mir publishers. 1973.
5. BALTOV, A. I.; NEVED, A. I.: **An Approach to the Modelling of Contact Friction During Rolling**. Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 1995. Volume 53, pg 695 - 711.
6. MUNTHER, A.; LEONARD, J. G.: **The Effect of Scaling on Interfacial Friction in Hot Rolling of Steels**. Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 1999. Volume 88, pg 105 - 113.
7. YU, Y.; LEONARD, J. G.: **Estimating the Resistance to Deformation of the Layer of Scale During Hot Rolling of Carbon Steel Strips**. Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2002. Volume 121, pg 60 - 683.
8. VEGNE, C. et al: **Analysis of the Friction and Wear Behavior of Hot Work Tool Scale: Application to the Hot Rolling Process**. WEAR, 2001: Elsevier, 2001. Volume 250, pg 322 – 333.
9. SUN, W. et al: **Oxide Scales Growth of Low-Carbon Steel at High Temperatures**. Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2004. Volume 155 – 156, pg 1300 - 1306.

10. BAYOUMI, L. S.; LEE, Y.: **Effect of Interstand Tension on Roll Load, Torque and Workpiece Deformation in the Rolling Process.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2004. Volume 145, pg 7 - 13.
11. SCHAEFFER, L.: **Método de Medição de Força em Laminação; Analogia entre Força Medida e Calculada na Laminação à Quente de Perfis de Aço.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1976.
12. LAUDARES, F. A., et al: **Análise da Laminação a Quente de Planos Através do Método de Elementos Finitos.** Joinville: 41° Seminário de laminação, processos e produtos laminados e revestidos. ABM. 2004.
13. ELKHIER, M. A.: **A Modified Method for Lateral Spread in Thin Strip Rolling.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2002. Volume 124, pg 77 - 82.
14. KANEKO, S. et al: **The Spread Rolling of IF Steel Strip.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2003. Volume 141, pg 365 - 369.
15. KWON, H. C.; IM, Y. T.: **Interactive Computer Aided Design System for Roll Pass and Profile Design in Bar Rolling.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2002. Volume 123, pg 399 - 405.
16. CASTRO, J. A., et al: **Modelamento Matemático do Processo de Laminação a Quente Via Equações de Transporte.** Joinville: 41° Seminário de laminação, processos e produtos laminados e revestidos. ABM. 2004.
17. PERCY LUND, HUMPHRIES & COMPANY LIMITED.: **Roll Pass Design.** England: Sheffield, 1960.
18. FERRAZ, M. J. de O.: **Calibração de Produtos Não Planos.** São Paulo: ABM, 1977.
19. GRANVILLE, W. A.: **Elementos de Cálculo Diferencial e Integral.** Rio de Janeiro: Âmbito Cultural Edições, 1992.

20. DIETER, G. E.: **Mechanical Metallurgy**. Editora McGraw-Hill, SI Metric Edition, 1988.
21. BEIJAN, A.: **Transferência de Calor**. Editora Edgard Blücher, 1º edição, 1996.
22. PAL, S. K.; LINKENS, D. A.: **Temperature Distribution in Steel During Hot Rolling: Pseudo Bond Graph View**. Simulation Modelling Practice and Theory: Elsevier, 2002. Volume 10, pg 69 – 85.
23. GELEJI, A.: **Forge Equipment Rolling Mills and Accessories**. Budabest: Akadémiai Kiadó, 1967.
24. SHURIZLY, A.; LEONARD, J. G.: **The Effect of Scaling and Emulsion Delivery on Heat Transfer During the Hot Rolling of Steel Strips**. Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2000. Volume 101, pg 250-259.
25. HENSEL, A.; SPITTEL, T.: **Rationeller Energieeinsatz bei Umformprozessen**. Leipzig: VEB Deutscher Verlarg für Grundstoffindustrie, 1981.
26. INCOPERA, F. P.; DEWITT, D. P.: **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Rio de Janeiro: Ltc, 1998.
27. SABOONCHI A.; ABBASPOUR, M.: **Changing the Geometry of Water Spray on Milling Work Roll and Its Effect on Work Roll Temperature**. Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2004. Volume 148, pg 35-49.
28. BRAGA, W.: **Transmissão de Calor Introdução ao Estudo**. Editora Booklink, Volume I, 2001.
29. KOMORI, K.: **Simulation of Deformation and Temperature in Caliber Rolling: Effect of Finite Element Mesh in Cross Section**. Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2003. Volume 143, pg 367 - 372.

30. KOMORI, K.: **Simulation of Deformation and Temperature in Multi-Pass Three-Roll Rolling.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 1999. Volume 92, pg 450 - 457.
31. KREITH, F.: **Princípios da Transmissão de Calor.** Editora Edgard Blücher, 3º edição, 1977.
32. JAKLIC, A. et al: **A Simulation of Heat Transfer During Billet Transport.** Applied Thermal Engineering: Pergamon, 2002. Volume 22, pg 873 – 883.
33. GUO, Y. B.; WEN, Q.; HORSTEMEYER, M. F.: **An Internal State Variable Plasticity – Based Approach to Determine Dynamic Loading History Effects on Material Property in Manufacturing Processes.** International Journal of Mechanical Sciences: Elsevier, 2005. Volume 47, pg 1423 – 1441.
34. SON, J. S. et al: **A Study on On-Line Learning Neural Network for Prediction for Rolling Force in Hot-Rolling Mill.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2005. Volume 164-165, pg 1612 – 1617.
35. BEHZADIPOUR, S. et al: **A New Shape Change Quantification Method for Estimation of Power in Shape Rolling.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2004. Volume 148, pg 353 – 361.
36. FERRAZ, M. J. de O.: **Laminação dos Aços.** São Paulo: ABM, 1975.
37. YUN, I.S.; WILSON W. R. D.; EHMANN, K. F.: **Charter in the Strip Rolling Process, Part 1: Dynamic Model of Rolling.** Journal of Manufacturing Science and Engineering: ASME, 1997. Volume 120/2, pg 330 – 336.
38. PINHEIRO, I. P.; BARBOSA, R.; CETLIN, P. R.: **Effect of Strain Path on the Dynamic Restoration of Interstitial Free Steel in the Austenitic Temperature Range.** Scripta Materialia: Elsevier, 2005. Volume 52, pg 639 – 644.

39. SERAJZADEH, S.: **Prediction of Microstructural Changes During Hot Rod Rolling.** International Journal of Machine Tool & Manufacture: Elsevier, 2003. Volume 43, pg 1487 - 1495.
40. BONTCHEVA, N.; PETZOV, G.: **Total Simulation Model of the Thermo-Mechanical Process in Shape Rolling of Steel Rods.** Computational Materials Science: Elsevier, 2005. Volume 34, pg 377 – 388.
41. HIGGINSON, R. L.; SELLARS, C. M.: **The Effect of Strain Path reversal during Hot Rolling on Austenitic Stainless Steel.** Material Science and Engineering: Elsevier, 2002, Volume A338, pg 323 – 330.
42. DUAN, X.; SHEPPARD, T.: **The Influence of the Constitutive Equation on the Simulation of a Hot Rolling Process.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2004. Volume 150, pg 100 - 106.
43. KOMORI, K.: **Simulation of Deformation and Temperature in Multi Pass Caliber Rolling.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 1997. Volume 71, pg 329 - 336.
44. KOMORI, K.; KOUMURA, K.: **Simulation of Deformation and Temperature in Multi-Pass H-Shape Rolling.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2000. Volume 105, pg 24 - 31.
45. CODA, R. C.: **Análise de Defeitos em Laminação.** Porto Alegre: Apostila do Laboratório de Transformação Mecânica. 2004.
46. AMERICAN SOCIETY OF TEST AND MATERIAL INTERNATIONAL DIVISION.: **Standard Specification for Carbon Structural Steel: ASTM A36/A 36M-04.** Wear Conshohocken, United States. 2004.
47. SAID, A. et al: **The Temperature, Roll Force and Roll Torque During Hot Bar Rolling.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 1999. Volume 88, pg 147 - 153.

48. CORRAL, R. L.; COLAS, R.; STRIP, A.: **Modeling the Thermal and Thermoelastic Responses of Work Rolls Used for Hot Rolling Steel Strip.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2004. Volume 153 – 154, pg 886 - 893.
49. GUERRENO, M. P.; FLORES, C. R.; PÉREZ, A.; COLÁS, R.: **Modelling Heat Transfer in Hot Rolling Work Rolls.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 1999. Volume 94, pg 52 - 59.
50. HUANG, C. H.; JU, T. M.: **The Estimation of Surface Thermal Behavior of the Working Roll in Hot Rolling Process.** Int. J. Heat Transfer: Pergamon, 1995. Volume 38, pg 1019 – 1031.
51. CODA, R. C.: **Laminação de Produtos Longos de Aço Laminados a Quente.** Porto Alegre: Apostila do Laboratório de Transformação Mecânica. 2004.
52. CURCIO, ARMANDO et al: **Enciclopédia Tecnológica.** Editora Planetarium, Volume 02, pg 231.

ANEXO A Fotos ilustrativas do laminador de barras utilizado

Neste anexo, segue fotos e explicações mais específicas sobre o equipamento de laminação utilizado no experimento. A Figura A.1 mostra os cilindros montados no laminador e um acessório que serve para a barra entrar nos canais de laminação.



Figura A.1 – Cilindro montado no laminador.

È possível verificar a quantidade de carepa formada no processo de laminação através da Figura A.1, visualizada sobre o acessório. Na Figura A.2 a mesma máquina visualizando a posição da máquina no primeiro passe do laminador.



Figura A.2 – Foto entrada 1° passe.

Na Figura A.2 mostra mais detalhadamente o controle de abertura da luz de laminação que fica a frente dos acentos dos operadores de laminação.

A Figura A.3 mostra a entrada do forno de aquecimento de barras.



Figura A.3 – Foto do forno de aquecimento de barras.

Na Figura A.3 as palanquilhas cortadas estão posicionadas a frente da porta do forno esperando o próximo avanço das palanquilhas dentro do forno. A Figura A.4 mostra a porta aberta do forno e o material sendo empurrado para dentro deste.




Figura A.4 – Entrada de palanquilha no forno.

Na Figura A.4 pode-se ter noção da temperatura interna dentro do forno pela coloração alaranjada no fundo do forno. Este forno de aquecimento com mostrado no Capítulo 4.4 possui uma rampa de aquecimento, começando da porta de carga com temperatura ambiente até a porta de saída com a temperatura de laminação programada, no caso 1165 °C.

ANEXO B Certificado de qualidade da usina

A Figura B1 mostra o certificado de qualidade do material utilizado no experimento.



Votorantim | Metais

CERTIFICADO DE QUALIDADE
QUALITY CERTIFICATE

USINA: Avenida Homero Leite, 1051 - Saudade - Cep: 27313-191 - Barra Mansa - RJ - Tel.: 24 3324-9655 - Fax: 24 3324-9600
 VENDAS: Avenida Pres. Wilson, 4459 a 4529 - Ipiranga - Cep: 04220-001 - São Paulo - Tel.: 11 6215-8971 - Fax: 11 6273-4862


Nota Fiscal/Invoice : 193627 Data Emissão/Issue Date: 16/02/11
 Certificado/Certificate nr.: 97475 No. Folha/Page Nr. : 1

Corrida (No.)	Volume (L)	Peso (L)	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cu	% Cr	% Nb	% B	% Al
246157		19,895	0.12	0.67	0.158	0.032	0.039	0.16	0.06	0.000	0.0000	0.0

Observação/Observation: Corrida: 246157 Volume: 1

CÓDIGOS PROPRIEDADES MECÂNICAS: L.E. = LIMITE DE ESCORIMENTO/L.R. = LIMITE DE RESISTÊNCIA/L = ALONGAMENTO/DOB. = DOBRAMENTO
 CERTIFICAMOS QUE OS PRODUTOS DESCRITOS, FORAM ENSAIADOS E ANALISADOS CONFORME ESPECIFICADO E OS RESULTADOS ATENDEM A NORMA CITADA
 WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL, HAS BEEN TESTED AND ANALYSED AS SPECIFIED, AND RESULT COMPLIES THE MENTIONED SPECIFICATION.

Responsável pelo Controle de Qualidade:



No. Controle: **242594**

IC 1709

Figura B1 – Certificado de qualidade da matéria prima.

ANEXO C Memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Wusatowski

Abaixo está disposta a memória de cálculo de alargamento seguindo o modelo de Wusatowski para o primeiro passe.

Condições geométricas:

$$h_0 = 130 \text{ mm}$$

$$b_0 = 130 \text{ mm}$$

$$h_1 = 110,2 \text{ mm}$$

$$b_r = 136,2 \text{ mm}$$

Cálculo das variáveis:

$$\varepsilon_w = h_0/2 \cdot R = 130/2 \cdot (320/2)$$

$$\varepsilon_w = 0,41$$

$$-w = -10^{(-1,269 \cdot \varepsilon_w \cdot \exp(0,556 \cdot b_0/h_0))} = -10^{(-1,269 \cdot 0,40625 \cdot \exp(0,556 \cdot 130/130))}$$

$$-w = -0,17$$

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

$$b_1 = b_0 \cdot (h_1/h_0)^{-w} = 130 \cdot (110,2/130)^{-0,17019}$$

$$b_1 = 133,7 \text{ mm}$$

$$e = (b_1 - b_r) \cdot 100/b_1$$

$$e = (133,7 - 136,2) \cdot 100/133,7$$

$$e = -1,9 \%$$

ANEXO D Memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Köster

Abaixo está disposta a memória de cálculo de alargamento seguindo o modelo de Köster para o primeiro passe.

Condições geométricas:

$$h_0 = 130 \text{ mm}$$

$$b_0 = 130 \text{ mm}$$

$$h_1 = 110,2 \text{ mm}$$

$$b_r = 136,2 \text{ mm}$$

Cálculo das variáveis:

$$C_{b\mu} = T_{\text{ref.}}/T_L = 1000/1438,15 = 0,6953$$

$$l_d = (R * \Delta h)^{1/2} = ((320/2)*(130-110,2))^{1/2} = 56,28$$

$$\varphi_b/\varphi_h = - e^{(C_{b\mu} * b_0/l_d)} = - e^{(0,6953*130/56,28)}$$

$$\varphi_b = -0,2007 * \ln(110,2/130)$$

$$\ln(b_1/b_0) = 0,033$$

$$b_1 = 134,3 \text{ mm}$$

$$e = (134,4 - 136,2) * 100/134,3$$

$$e = -1,35\%$$

ANEXO E Memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Siebel

Abaixo está disposta a memória de cálculo de alargamento seguindo o modelo de Siebel para o primeiro passe.

Condições geométricas:

$$h_0 = 130 \text{ mm}$$

$$h_1 = 110,2 \text{ mm}$$

$$b_0 = 130 \text{ mm}$$

$$b_r = 136,2 \text{ mm}$$

Cálculo das variáveis:

$$l_d = ((320/2) * (130 - 110,2))^{1/2}$$

$$l_d = 56,28$$

$$\Delta b = 0,35 * 56,28 * (130 - 110,2) / 130$$

$$\Delta b = 3,0 \text{ mm}$$

$$b_1 = 3,0004 + 130$$

$$b_1 = 133 \text{ mm}$$

$$e = (133 - 136,2) * 100 / 133$$

$$e = -2,41 \%$$

ANEXO F Memória de cálculo de alargamento segundo o modelo de Ekelund

Abaixo está disposta a memória de cálculo de alargamento seguindo o modelo de Ekelund para o primeiro passe.

Condições geométricas:

$$h_0 = 130 \text{ mm}$$

$$h_1 = 110,2 \text{ mm}$$

$$b_0 = 130 \text{ mm}$$

$$b_r = 136,2 \text{ mm}$$

Cálculo das variáveis:

$$l_d = (320/2 * (130 - 110,2))^{1/2}$$

$$l_d = 56,28$$

$$\mu = 0,8 * (1,05 - 0,0005 * 1165)$$

$$\mu = 0,374$$

$$m = (1,6 * 0,374 * 56,28 - 1,2 * (130 - 110,2)) / (130 + 110,2)$$

$$m = 4,13 \times 10^{-2}$$

$$A = 8 * 4,13 \times 10^{-2} * 56,28 * (130 - 110,2)$$

$$A = 368,09$$

$$B = 4 * 4,13 \times 10^{-2} * (130 + 110,2) * 56,28$$

$$B = 2232,73$$

1º Interpolação

Supondo que ($b_1 = b_0$)

$$Y = (130^2 - 130^2) + 2232,73 * \ln(130/130) - 368,09$$

$$Y = -368,09$$

$$Y' = 2 \cdot 130 + 2232,73/130$$

$$Y' = 277,17$$

$$b_1' = 130 + 368,09/277,17$$

$$b_1' = 131,3 \text{ mm}$$

2° Interpolação

$$b_1 = 131,3 \text{ mm}$$

$$Y = (131,3^2 - 130^2) + 2232,73 \cdot \ln(131,23/130) - 368,09$$

$$Y = 1,65$$

$$Y' = 2 \cdot 131,3 + 2232,73/131,23$$

$$Y' = 279,66$$

$$b_1'' = 131,3 - 1,65/279,66$$

$$b_1'' = 131,32 \text{ mm}$$

$$e = (131,3 - 136,2) \cdot 100/131,3$$

$$e = -3,71 \%$$

ANEXO G Memória de cálculo de temperatura segundo o modelo de Hensel e Spittel

Abaixo está disposta a memória de cálculo de variação de temperatura seguindo o modelo de Hensel e Spittel para o primeiro passe.

Dados retirados do Capítulo 4:

$$\varphi_h = 0,165$$

$$l_d = 56,28 \text{ mm}$$

$$F_w = 580,58 \text{ kN}$$

$$b_m = 133,1 \text{ mm}$$

$$V = 741,9 \text{ mm/s}$$

$$h_1 = 110,2 \text{ mm}$$

$$R = 160 \text{ mm}$$

$$A_d = 7490,9 \text{ mm}^2$$

Constantes Utilizadas:

$$\gamma = 0,00000738 \text{ kg/mm}^3 \text{ }^{(3)}$$

$$c_p = 1169 \text{ J/kg.k} \text{ }^{(26)}$$

$$\lambda_2 = 0,032 \text{ J/mm.s.k} \text{ }^{(3)}$$

$$\gamma_w = 9,98 \times 10^{-10} \text{ kg/mm}^3 \text{ }^{(26)}$$

$$C_w = 7181000 \text{ J/kg.k} \text{ }^{(26)}$$

$$C = 5,76 \times 10^{-6} \text{ J/mm}^2 \text{.s.k}^4 \text{ }^{(23)}$$

$$r = 2449000 \text{ J/kg.k} \text{ }^{(26)}$$

$$\varepsilon = 0,8 \text{ }^{(26)}$$

Aumento da temperatura devido ao trabalho de conformação:

$$\Delta\theta_u = (F_w * \varphi_h) / (b_m * l_d * \gamma * c_p)$$

$$\Delta\theta_u = ((580,58 * 0,165) / (133,1 * 56,28 * 0,00000738 * 1169))$$

$$\Delta\theta_u = 1,5 \text{ k}$$

Aumento da temperatura devido ao atrito entre cilindro e barra:

$$\Delta\theta_{\mu} = (W_{\mu} * b_m * l_d) / (V_a * \gamma * c_p)$$

onde

$$V_a = b_m * h_1 * V$$

$$V_a = 133,1 * 110,2 * 741,9$$

$$V_a = 10882897 \text{ mm}^3/\text{s}$$

$$K_{wm} = F_w / (b_m * l_d)$$

$$K_{wm} = 580,58 / (133,1 * 56,28)$$

$$K_{wm} = 7,75 * 10^{-2} \text{ kN/mm}^2$$

$$P_u = K_{wm} * \varphi_h * b_m * h_1 * V$$

$$P_u = 7,75 * 10^{-2} * 0,165 * 133,1 * 110,2 * 741,9$$

$$P_u = 139361 \text{ W}$$

$$P_{GES} = F_w * l_d * V / R$$

$$P_{GES} = 580,58 * 56,28 * 741,9 / 160$$

$$P_{GES} = 151537 \text{ W}$$

$$P_{\mu} = P_{GES} - P_u$$

$$P_{\mu} = 151537 - 139361$$

$$P_{\mu} = 12175 \text{ W}$$

$$W_{\mu} = P_{\mu} / A_d$$

$$W_{\mu} = 12175 / 7491,5$$

$$W_{\mu} = 1,63 \text{ W/mm}$$

$$\Delta\theta_{\mu} = ((W_{\mu} * b_m * l_d) / V_a * \gamma * c_p)$$

$$\Delta\theta_{\mu} = ((1,63 * 133,1 * 56,28) / 10882897 * 0,00000785 * 1169)$$

$$\Delta\theta_{\mu} = 0,13 \text{ k}$$

Diminuição da temperatura pelo processo de condução térmica:

$$\Delta\theta_L = (2 \cdot K \cdot l d \cdot (\theta_B - \theta_W)) / (V \cdot h_1 \cdot \gamma \cdot c_p)$$

onde

$$\theta_B = 1438 \text{ K}$$

$$\theta_W = 333 \text{ K}$$

$$s = 0,5 \text{ mm}$$

$$t_B = l d / V$$

$$t_B = 56,28 / 741,9$$

$$t_B = 7,6 \times 10^{-2} \text{ s}$$

$$b_3 = (\lambda_2 \cdot \gamma \cdot c_p)^{1/2}$$

$$b_3 = (0,032 \cdot 0,0000738 \cdot 1169)^{1/2}$$

$$b_3 = 1,7 \times 10^{-2} \text{ J/mm}^2 \cdot (\text{s})^{1/2} \cdot \text{K}$$

$$n = ((2 \cdot \lambda_2) / b_3) \cdot (t_B)^{1/2} / s$$

$$n = ((2 \cdot 0,032 / 1,7 \times 10^{-2}) \cdot (7,6 \times 10^{-2})^{1/2} / 0,5$$

$$n = 2,1$$

$$\phi(n) = (2 / (\pi)^{1/2}) \cdot \int_0^n \omega^{n-t} e^{-t^2} dt$$

$$\phi(n) = (2 / (\pi)^{1/2}) \cdot (1 - e^{-n^2})$$

$$\phi(n) = (2 / (\pi)^{1/2}) \cdot (1 - e^{-(2,1)^2})$$

$$\phi(n) = 1,12$$

$$k = (b_3 / 2 \cdot t_B)^{1/2} \cdot (e^{n^2} \cdot (1 - \phi(n)) - (1/n) + (2/(\pi)^{1/2}))$$

$$k = -((1,7 \times 10^{-2} / 2) \cdot (7,6 \times 10^{-2})^{1/2}) \cdot (e^{(2,1)^2} \cdot (1 - 1,08)) - (1/2,1) + (2/(\pi)^{1/2})$$

$$k = 0,13$$

$$\Delta\theta_L = (2 \cdot K \cdot l d \cdot (\theta_B - \theta_W)) / (V \cdot h_1 \cdot \gamma \cdot c_p)$$

$$\Delta\theta_L = (2 \cdot 0,13 \cdot 56,28 \cdot (1438 - 333)) / (741,9 \cdot 110,2 \cdot 0,0000738 \cdot 1169)$$

$$\Delta\theta_L = -22,7 \text{ k}$$

Diminuição da temperatura pelo efeito de convecção e evaporação da água de refrigeração do cilindro de laminação:

$$\Delta\theta_Z = (W_{\text{SPEZ}} \cdot \gamma_w \cdot W_e) / (h_1 \cdot \gamma \cdot c_p \cdot V)$$

onde

$$\theta_{ab} = 303 \text{ k (estimado)}$$

$$\theta_{zu} = 343 \text{ k (estimado)}$$

$$Y_w = 0,99 \text{ (estimado)}$$

$$W_{to} = 0,55 \text{ mm}^3/\text{s}$$

$$b_{ko} = b_m = 133,1 \text{ mm}$$

$$W_{tu} = 0 \text{ mm}^3/\text{s}$$

$$b_{ku} = b_m = 133,1 \text{ mm}$$

$$W_{\text{SPEZ}} = (W_{to}/b_{ko}) + (W_{tu}/b_{ku})$$

$$W_{\text{SPEZ}} = (0,55/133,1) + (0/133,1)$$

$$W_{\text{SPEZ}} = 0,0041 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$W_e = (1-Y) \cdot C_w \cdot (\theta_{ab} - \theta_{zu}) + Y \cdot r + Y \cdot (100 - \theta_{zu}) \cdot C_w$$

$$W_e = (1-0,99) \cdot 4181000 \cdot (343-303) + 0,99 \cdot 2449000 + 0,99 \cdot (100-303) \cdot 4181000$$

$$W_e = 293840210 \text{ J/kg}$$

$$\Delta\theta_Z = (W_{\text{SPEZ}} \cdot \gamma_w \cdot W) / (h_1 \cdot \gamma \cdot c_p \cdot V)$$

$$\Delta\theta_Z = (0,0041 \cdot 9,98 \times 10^{-10} \cdot 293840210) / (110,2 \cdot 0,00000738 \cdot 1169 \cdot 741,9)$$

$$\Delta\theta_Z = -1,72 \times 10^{-6} \text{ k}$$

Diminuição da temperatura pelo processo de radiação da barra para o meio ambiente:

$$\Delta\theta_S = (2 \cdot L \cdot C_{sr} \cdot a_{st}) / (V \cdot h_1 \cdot \gamma \cdot c_p)$$

onde

$$T_a = 303 \text{ k}$$

$$\theta_B = 1438 \text{ k}$$

$$L = 3000 \text{ mm}$$

$$a_{st} = ((\theta_B + \Delta\theta_u + \Delta\theta_\mu - \Delta\theta_L) / 100)^4 - (T_a / 100)^4$$

$$a_{st} = ((1438 + 1,5 + 0,13 - 22,7) / 100)^4 - (303 / 100)^4$$

$$a_{st} = 45641 \text{ k}^4$$

$$C_{sr} = \varepsilon * C$$

$$C_{sr} = 0,8 * 5,76 * 10^{-6}$$

$$C_{sr} = 4,61 * 10^{-6}$$

$$\Delta\theta_S = (2 * L * C_{sr} * a_{st}) / (V * h_1 * \gamma * c_p)$$

$$\Delta\theta_S = (2 * 3000 * 4,61 * 10^{-6} * 45641) / (741,9 * 110,2 * 0,00000738 * 1169)$$

$$\Delta\theta_S = -1,8 \text{ k}$$

Varição total de temperatura no passe

$$\Delta\theta = \Delta\theta_u + \Delta\theta_\mu + \Delta\theta_L + \Delta\theta_Z + \Delta\theta_S$$

$$\Delta\theta = 1,5 + 0,13 - 22,7 - 1,72 * 10^{-6} - 1,8$$

$$\Delta\theta = -22,9 \text{ k}$$

Temperatura no passe seguinte

$$T_1 = T_L + \Delta\theta$$

$$T_1 = ((1165 + 273) - 22,9) - 273$$

$$T_1 = 1142,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

ANEXO H Memória de cálculo da perda de temperatura segundo o modelo de Geleji

Abaixo está disposta a memória de cálculo de variação de temperatura seguindo o modelo de Geleji para o primeiro passe.

$$\varepsilon = 0,8$$

$$C_p = 0,299 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

$$C_G = 4,96 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h.k}^4$$

$$h_0 = 130 \text{ mm}$$

$$b_0 = 130 \text{ mm}$$

$$l_0 = 500 \text{ mm}$$

$$\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$T_L = 1165 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_A = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$z = 8,33 \times 10^{-2} \text{ h}$$

Área radiante:

$$A_R = 2 \cdot h_0 \cdot l_0 + 2 \cdot b_0 \cdot l_0 + 2 \cdot h_0 \cdot b_0$$

$$A_R = 2 \cdot 130 \cdot 500 + 2 \cdot 130 \cdot 500 + 2 \cdot 130 \cdot 130$$

$$A_R = 0,2938 \text{ m}^2$$

Massa da barra de amostra:

$$G = h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 \cdot \gamma$$

$$G = 130 \cdot 130 \cdot 500 \cdot 0,000007850$$

$$G = 66,33 \text{ kg}$$

$$Q = \varepsilon \cdot C_G \cdot z \cdot A_R \cdot [(T_L/100)^4 - (T_a/100)^4]$$

$$Q = 0,8 \cdot 4,96 \cdot 8,33 \times 10^{-2} \cdot 0,2938 \cdot [((1165+273)/100)^4 - ((30+273)/100)^4]$$

$$Q = 4579 \text{ kcal}$$

$$\Delta\theta_s = Q / G \cdot c_p$$

$$\Delta\theta_s = 4879 / 66,33 * 0,299$$

$$\Delta\theta_s = -231 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 1165 - 231$$

$$T_1 = 934,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ANEXO I Memória de cálculo da velocidade de deformação segundo o modelo de Ekelund

Abaixo está disposta a memória de cálculo para velocidade de deformação seguindo o modelo de Ekelund para o primeiro passe.

$$v = \pi * R * n / 30.$$

$$n = 44,28 \text{ rpm.}$$

$$v = 3,1418 * 160 * 44,28 / 30$$

$$v = 741,9 \text{ mm/s}$$

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

$$ld = (160 * (130 - 110,2))^{1/2}$$

$$ld = 56,28 \text{ mm}$$

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

$$\varphi_h = \ln(110,2/130)$$

$$\varphi_h = 0,165$$

$$\dot{\varphi} = V * \varphi / ld$$

$$\dot{\varphi} = 741,9 * 0,165 / 56,28$$

$$\dot{\varphi} = 2,18 \text{ s}^{-1}$$

ANEXO J Memória de cálculo da resistência à deformação segundo o modelo de Ekelund

Abaixo está disposta a memória de cálculo da resistência à deformação segundo Ekelund para o passe de número 1.

$$k_f = 7,2 \text{ kgf/mm}^2$$

$$k_f = 72 \text{ N/mm}^2$$

$$k_e = 1 + (1,6 * \mu * l_d - 1,2 * \Delta h) / (h_0 + h_1)$$

$$\mu = (1,05 - 0,0005 * T)$$

$$\mu = (1,05 - 0,0005 * 1165)$$

$$\mu = 0,468$$

$$k_e = 1 + (1,6 * 0,468 * 56,28 - 1,2 * (130 - 110,2)) / (130 + 110,2)$$

$$k_e = 1,08$$

$$k_w = k_f * k_e$$

$$k_w = 72 * 1,08$$

$$k_w = 77,5 \text{ N/mm}^2$$

ANEXO K Memória de cálculo da força de laminação segundo o modelo de Ekelund

Abaixo está disposta a memória de cálculo da força de laminação segundo Ekelund para o passe de número 1.

$$b_m = (b_1 + b_2) / 2$$

$$b_m = (130 + 136,2) / 2$$

$$b_m = 133,1 \text{ mm}$$

$$A_d = l_d * b_m$$

$$A_d = 56,28 * 133,1$$

$$A_d = 7491,5 \text{ mm}^2$$

$$F_w = A_d * K_w$$

$$F_w = 7491,5 * 77,5$$

$$F_w = 580,58 \text{ kN}$$