



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

UTILIZAÇÃO DE META-HEURÍSTICAS PARA DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS EM UM LAMINADOR DE TIRAS A FRIO EM TANDEM

MAXWELL RODRIGO SILVA OLIVEIRA

Belo Horizonte – MG

Outubro de 2016

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

UTILIZAÇÃO DE META-HEURÍSTICAS PARA DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS EM UM LAMINADOR TANDEM DE TIRAS A FRIO

MAXWELL RODRIGO SILVA OLIVEIRA

Dissertação de Mestrado, submetida ao
Programa de Pós-Graduação em Modelagem
Matemática e Computacional, como parte dos
requisitos exigidos para a obtenção do título de
Mestre em Modelagem Matemática e
Computacional.

Orientadora:

Prof. Dra. Elizabeth Fialho Wanner
Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Co-Orientador:

Prof. Dr. Marccone Jamilson Freitas Souza
Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto

Belo Horizonte – MG
Outubro de 2016

Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos:

- À Deus pelo dom da vida.

- À minha orientadora Elizabeth, por me aceitar como orientando, pelas dicas e correções nos momentos corretos para guiar meu trabalho.

- Ao meu co-orientador Marcone, pelo entusiasmo ao lecionar a disciplina Heurísticas Computacionais e por ter acreditado neste trabalho.

- À minha esposa Priscilla pela compreensão e paciência.

- Aos meus pais Bras e Neide pela minha existência.

“Eu não falhei, encontrei 10 mil soluções que não davam certo.”

THOMAS ALVA EDISON

Resumo

A laminação a frio em *tandem* de uma tira de aço é um processo complexo, não linear, multivariável e com elevado nível de desafio em seu controle. As inúmeras variáveis envolvidas são inerentes à natureza dos diferentes tipos de aço processado, do equipamento em si e dos insumos utilizados, como os cilindros de laminação. Um dos principais parâmetros do processo que influencia diretamente na qualidade do material produzido é a força de laminação aplicada sobre os cilindros em contato direto com a tira de aço em processo. O cálculo das forças de laminação envolve equações e parâmetros não lineares, tornando o cálculo direto uma tarefa complexa. Neste trabalho, foi proposto um método de cálculo e distribuição de forças de laminação entre as cadeiras do laminador utilizando as meta-heurísticas computacionais Recozimento Simulado (RS) e Algoritmos Genéticos (AG), considerando as limitações eletromecânicas do equipamento, bem como características do material processado. O melhor conjunto de referências de laminação pôde ser obtido a partir de padrões de distribuição de redução, potência, força ou modo misto, com imposição de força específica em qualquer cadeira. Os algoritmos foram desenvolvidos, parametrizados e validados com base em um conjunto de dados de processo de 1000 bobinas produzidas no Laminador de Tiras a Frio (LTF) da ArcelorMittal Vega. Um algoritmo de adaptação do coeficiente de atrito da interface cilindro-tira e da curva de fluxo do aço foi desenvolvido para aumentar a precisão do método. A principal vantagem do método proposto é a independência de uma solução inicial para que seja obtida a melhor distribuição de reduções de espessura, com um tempo estável de execução menor que 250 ms e com precisão de 88% a 94%, quando comparado aos resultados reais da força de laminação aplicados para 1000 bobinas produzidas no LTF estudado.

PALAVRAS-CHAVE: Laminação à Frio, Distribuição de Forças de Laminação, Meta-heurísticas

Abstract

The tandem cold rolling of a steel strip is a complex, nonlinear, multivariate process with a high level of challenge in its control. The many variables involved are inherent to the nature of the different types of steel processed, the equipment itself and the inputs used, such as the rolling cylinders. One of the main parameters of the process that directly influences the quality of the material produced is the rolling force applied on the cylinders in direct contact with the steel strip in process. The calculation of the rolling forces involves non-linear equations and parameters, making the direct calculation a complex task. In this work, a method of calculating and distributing laminating forces among the mill stands was proposed using the computational metaheuristics Simulated Annealing (SA) and Genetic Algorithms (GA), considering the electromechanical limitations of the equipment, as well as the characteristics of the processed material. The best set of rolling references could be obtained from distribution patterns of reduction, power, force or mixed mode, with specific force imposed in any stand. The algorithms were developed, parameterized and validated based on a set of process data of 1000 coils produced in the ArcelorMittal Vega Cold Strip Mill. An algorithm for adapting the friction coefficient of the cylinder-strip interface and the strain-stress curve of the steel was developed to increase the accuracy of the method. The main advantage of the proposed method is the independence of an initial solution in order to obtain the best distribution of thickness reductions with a stable execution time of less than 250 ms with an accuracy of 88% to 94% when compared to the actual results of the strength of Laminations applied to 1000 coils produced in the studied Tandem Cold Mill.

KEYWORDS: Cold Rolling, Rolling Force Distribution, Metaheuristics

Lista de Figuras

Figura 1-1 - Laminador de Tiras a Frio – Configuração Contínua	4
Figura 2-1 – Esquema de uma máquina para laminação de chumbo para a utilização em janelas de vidro estanhado. Desenhado por Leonardo Da Vinci	7
Figura 2-2 – Cadeira de Laminação 4-High em fase de montagem	9
Figura 2-3 – Vista frontal de uma cadeira de Laminação 6-Hi	10
Figura 2-4 – Vista frontal de um laminador Sendzimir 20-High	11
Figura 2-5 – Laminador a Frio em <i>Tandem</i> de Quatro Cadeiras da ArcelorMittal Vega	12
Figura 2-6 – Detalhe de um ensaio de tração	13
Figura 2-7 – Curva de tensão - deformação convencional típica para metais	13
Figura 2-8 – Curva de fluxo empírica para materiais rígidos e plásticos (equação de Ludwik)	16
Figura 2-9 – Arco de contato na laminação a frio	20
Figura 2-10 – Esquema de Montagem de Transdutores de Pressão para Ensaio de Tração	33
Figura 2-11 - Pseudocódigo do Algoritmo Recozimento Simulado	36
Figura 2-12 - Pseudocódigo de um Algoritmo Genético genérico	40
Figura 2-13 - Pseudocódigo Típico do Método do Gradiente	41
Figura 3-1 – Extensômetro Instron usado em ensaio de tração	43
Figura 3-2 – Ensaio de Tração: Curva tensão - deformação de engenharia	44
Figura 3-3 – Ensaio de Tração: Curva tensão - deformação real	44
Figura 3-4 – Modelagem da curva tensão - deformação - Modelo de Swift sem <i>offset</i>	44
Figura 3-5 – Modelagem da curva tensão - deformação do Aço - Modelo de Swift, com <i>offset</i>	44
Figura 3-6 – Ensaio de Tração – Zona de deformação elástica – aço em desenvolvimento	46
Figura 3-7 – Distribuição de pressão no arco de contato para tira 2.261 x 0.482 x 1220 mm	48
Figura 3-8 – Força de laminação em função do número de divisões do ângulo de contato para tira 2.261 x 0.482 x 1220 mm, cadeira 1 e 4	48
Figura 3-9 – Níveis de Sistemas de Controle – ISA 88	49
Figura 3-10 – Arquitetura de Níveis de Controle de um LTF	50
Figura 3-11 – Organização de variáveis de otimização	51
Figura 3-12 - Pseudocódigo do Algoritmo de Recozimento Simulado proposto	65
Figura 3-13 - Pseudocódigo do Algoritmo Genético proposto	70
Figura 3-14 – Fluxograma do algoritmo de adaptação	72
Figura 4-1 - Boxplot do tempo de execução para 50 execuções dos algoritmos Recozimento Simulado (RS) e Algoritmo Genético (AG) para bobina D506901	79
Figura 4-2 - Boxplot da função custo para 50 execuções dos algoritmos Recozimento Simulado e Algoritmo Genético para a bobina D506901	80
Figura 4-3 – Evolução da função custo para distribuição de potência com força fixa na última cadeira usando algoritmo de Recozimento Simulado, fator de movimento = 0.01, máx. iterações = 10000, Bobina D506901	81
Figura 4-4 - Tempo de execução dos algoritmos Recozimento Simulado e Algoritmo Genético para 250 bobinas distintas	83
Figura 4-5 - Custo de execução dos algoritmos Recozimento Simulado e Algoritmo Genético para 250 bobinas distintas	84
Figura 4-6 - Comportamento das forças no laminador em regime normal de operação. Bobina D5042711	87

Figura 4-7 - Comportamento das forças no laminador com variação de velocidade durante o processo. Bobina D507712.....	88
Figura 4-8 - Comportamento das forças no laminador com variação de velocidade durante o processo. Bobina D506722.....	89
Figura 4-9 – Pseudocódigo do algoritmo de classificação de dados de laminação estáveis	91
Figura 4-10 - Classificação de estabilidade da velocidade de entrada da cadeira 1 para a bobina D507712	91
Figura 4-11 - Correlação entre força calculada e força medida em cada cadeira. Espessura de saída > 0.7 mm para 1000 bobinas produzidas em sequência, grau do aço: ES_ARCE01	93
Figura 4-12 - Correlação linear entre força calculada e força medida sem adaptação da curva tensão - deformação ou coeficientes de atrito para 50 bobinas produzidas em sequência	94
Figura 4-13 - Correlação linear entre força calculada e a força medida sem adaptação para 50 bobinas, espessura de saída > 0.7 mm, janela fixa de 4 bobinas.....	95
Figura 4-14 - Correlação linear entre força calculada e força medida usando adaptação para 1000 bobinas produzidas em sequência, espessura de saída > 0.7 mm, janela fixa de 4 bobinas.....	96

Lista de Tabelas

Tabela 1-1 - Parâmetros de um Laminador de Tiras a Frio	4
Tabela 1-2 - Esquemas de laminação de um Laminador de Tiras a Frio	5
Tabela 2-1 – Dimensões do corpo de prova de tira padronizado	15
Tabela 2-2 – Algoritmo Genético - População composta de 6 indivíduos e função de aptidão calculada	38
Tabela 2-3 – Algoritmo Genético – Exemplo de seleção de indivíduos por roleta	39
Tabela 3-1 – Parâmetros do modelo da curva tensão - deformação do aço USIBOR®	45
Tabela 3-2 – Comparação da estimação de parâmetros de ensaio de tração do material em desenvolvimento usando modelo de Swift e Swift com <i>offset</i> . Material com 1220 mm de largura....	45
Tabela 3-3 – Esquema de reduções para a tira 2.261 x 0.482 x 1220 mm.....	47
Tabela 3-4 – Parâmetros do modelo da curva tensão - deformação para validação do modelo de Bland e Ford	47
Tabela 3-5 – Forças de laminação calculadas para a tira 2.261 x 0.482 x 1220 mm usando o modelo de Bland e Ford	48
Tabela 3-6 - Representação de um vetor solução.....	51
Tabela 3-7 - Exemplo de distribuição de reduções para geração de uma solução inicial.....	54
Tabela 3-8 – Distribuição real de redução de espessura para o material DP600, 2.26 x 0.48 x 1254 mm	56
Tabela 3-9 – Distribuição real de redução de espessura para o material DP600, 2.26 x 0.48 x 1254 mm. Alteração de + 0.01 mm na saída da Cadeira 1.....	57
Tabela 3-10 – Distribuição real de redução de espessura para o material DP600, 2.26 x 0.48 x 1254 mm. Alteração de + 0.01 mm na saída da Cadeira 2.....	57
Tabela 3-11 – Distribuição real de redução de espessura para o material DP600, 2.26 x 0.48 x 1254 mm. Alteração de + 0.01 mm na saída da Cadeira 3.....	57
Tabela 3-12 – Dados de Potência do LTF em <i>Tandem</i> da Arcelor Mittal Vega	58
Tabela 3-13 - Distribuição real de potência para o material DP600, 2.26 x 0.48 x 1254 mm.....	59
Tabela 3-14 – Parâmetros da função de restrição de força	60
Tabela 3-15 – Exemplo de tensões específicas para laminação do aço DP600	61
Tabela 3-16 – Limites de tensão absoluta.....	62
Tabela 3-17 – Estimativa de coeficientes da função custo para geração de referências	63
Tabela 3-18 – Exemplo de aplicação de movimento no algoritmo RS.....	64
Tabela 3-19 – Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – parâmetros de entrada	66
Tabela 3-20 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – parâmetros do algoritmo ...	67
Tabela 3-21 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – Etapa 1	67
Tabela 3-22 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – Etapa 2	68
Tabela 3-23 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – Etapa 3	68
Tabela 3-24 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – Etapa 4	68
Tabela 3-25 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – Etapa 5	69
Tabela 4-1 - Configuração do LTF para verificação dos algoritmos propostos	76
Tabela 4-2 - Dados dos cilindros usados laminação da bobina D506901	76
Tabela 4-3 - Dados da bobina D506901 usada na validação dos algoritmos propostos.....	76
Tabela 4-4 - Parâmetros da curva tensão - deformação do aço ES_ARCE01.....	76
Tabela 4-5 - Restrições e parâmetros do processo para validação dos algoritmos.....	76

Tabela 4-6 - Parâmetros do algoritmo RS	77
Tabela 4-7 - Parâmetros do AG	77
Tabela 4-8 - Pesos e restrições para validação da distribuição da redução entre as cadeiras	77
Tabela 4-9 - Pesos e restrições para validação da distribuição da potência entre as cadeiras	78
Tabela 4-10 - Melhor distribuição de redução entre as cadeiras encontrada para a bobina D506901	81
Tabela 4-11 - Melhor distribuição de potência entre as cadeiras encontrada para a bobina D506901	82
Tabela 4-12 - Melhor distribuição de potência entre cadeiras encontrada para a bobina D506901, com redução fixa na última cadeira	82
Tabela 4-13 - Melhor distribuição de potência entre as cadeiras encontrada para a bobina D506901, com força específica na última cadeira	82
Tabela 4-14 - Força específica aplicada na última cadeira em função da redução total desejada	85
Tabela 4-15 - Correlação Linear entre Força Calculada e Força Medida usando adaptação de coeficientes da curva de fluxo do material para 50 bobinas. Espessura de saída > 0.7mm	94
Tabela 4-16 – Correlação de forças de laminação calculadas e medidas para 50 bobinas em função da adaptação do coeficiente de atrito e curva de fluxo	95
Tabela 4-17 – Correlação de forças de laminação calculadas e medidas para 1000 bobinas, em função da adaptação do coeficiente de atrito e curva de fluxo	96

Lista de Abreviaturas e Siglas

AG	Algoritmo Genético
AMV	ArcelorMittal Vega
CLP	Controlador Lógico Programável
DEC	Linha de Decapagem Contínua
DLL	Biblioteca de Ligação Dinâmica ou <i>Dynamic Link Library</i>
EMQ	Erro Médio Quadrático
LTF	Laminador de Tiras a Frio
RS	Recozimento Simulado
t	Tonelada
tf	Tonelada força

Lista de Símbolos

h_0	Espessura do material na entrada do laminador [m]
h_f	Espessura do material na saída do laminador [m]
h_1	Espessura de entrada do material em uma cadeira de laminação [m]
h_2	Espessura de saída do material após a laminação em uma cadeira [m]
h_n	Espessura do material durante a laminação, no ângulo neutro [m]
h	Espessura do material durante a laminação, em qualquer ponto na zona de redução [m]
L	Comprimento do arco de contato cilindro-tira [m]
e	Deformação de engenharia [sem unidade]
ε	Deformação verdadeira $\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$ [sem unidade]
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação [s^{-1}]
k	Limite de escoamento em cisalhamento [Pa]
Y	Limite de escoamento em tensão ou compressão uniaxial [Pa]
σ_1 e σ_3	Tensão no plano de deformação (tensões principais) de entrada e saída de uma cadeira respectivamente [Pa]
R	Raio do cilindro de trabalho [m]
R'	Raio do cilindro de trabalho deformado (durante laminação) [m]
ϕ	Ângulo entre uma seção da tira e o centro do cilindro de trabalho [rad]
μ	Coefficiente de atrito
ν	Coefficiente de Poisson
P	Pressão por unidade de comprimento [Pa/m]
E	Módulo de elasticidade [N/m^2]
P_m	Potência mecânica [W]
T_m	Torque Mecânico [Nm]
ω	Velocidade angular [rad/s]

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Caracterização do Problema	3
1.2	Objetivos: Geral e Específicos	5
2	Fundamentação Teórica.....	7
2.1	Breve História da Laminação.....	7
2.2	Tipos de Laminadores a Frio	8
2.2.1	Four-High.....	8
2.2.2	Six-High.....	9
2.2.3	Twenty-High	10
2.2.4	Laminador em <i>Tandem</i>	11
2.3	Deformação dos Materiais.....	12
2.3.1	Introdução	12
2.3.2	Ensaio de Tração	13
2.3.3	Modelos da Curva Tensão-Deformação.....	15
2.4	Modelos Matemáticos Relacionados à Força de Laminação	17
2.4.1	Premissas Utilizadas no Desenvolvimento de Modelos de Laminação.....	18
2.4.2	Modelo de Cálculo de Força de Laminação de Bland-Ford.....	19
2.4.2.1	Modelo de Deformação Plástica	20
2.4.2.2	Modelo de Deformação Elástica	26
2.4.3	Deformação Elástica dos Cilindros de Trabalho	28
2.4.4	Modelos de Torque e Potência	29
2.4.5	Taxa de Deformação na Laminação a Frio	31
2.4.6	Encruamento do Material e Influência da Velocidade na Laminação.....	31
2.4.7	Influência do Atrito na Determinação da Força de Laminação.....	32
2.5	Métodos Computacionais	35
2.5.1	Meta-heurísticas.....	35
2.5.1.1	Recozimento Simulado.....	36
2.5.1.2	Determinação da Temperatura Inicial no Recozimento Simulado	37
2.5.2	Algoritmos Genéticos	37
2.5.3	Método do Gradiente.....	40
3	Desenvolvimento do Projeto.....	42
3.1	Metodologia	42
3.2	Obtenção de Coeficientes da Curva Tensão - Deformação do Aço.....	43

3.3	Cálculo da Força de Laminação	46
3.4	Otimização da Distribuição de Forças Entre Cadeiras.....	49
3.4.1	Representação de uma Solução	51
3.4.2	Geração da Solução Inicial.....	51
3.4.2.1	Método de Solução não iterativa para cálculo do Fator Beta β	52
3.4.2.2	Método Estocástico	54
3.4.3	Modelo de Distribuição de Forças no Laminador de Tiras a Frio.....	54
3.4.3.1	Função Custo e Restrições de Redução de Espessura.....	55
3.4.3.2	Função Custo e Restrições de Potência.....	58
3.4.3.3	Função Custo e Restrições de Força.....	59
3.4.3.4	Restrições de Tensão.....	61
3.4.3.5	Escolha dos Coeficientes da Função Custo	62
3.4.4	Minimização da Função Custo pela Meta-heurística de Recozimento Simulado	63
3.4.5	Minimização da Função Custo Através de Algoritmo Genético.....	65
3.5	Adaptação do Cálculo de Força	70
3.5.1	Algoritmo de Otimização da Adaptação	71
3.6	Dados de Produção Utilizados no Desenvolvimento do Trabalho	73
4	Resultados	75
4.1	Verificação do Funcionamento dos Algoritmos Propostos	75
4.2	Verificação do Funcionamento dos Algoritmos Para Bobinas Distintas	82
4.3	Aplicação dos Algoritmos Propostos ao Processo Produtivo	84
4.4	Adaptação do Coeficiente de Atrito e Curva de Fluxo	93
5	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	97
5.1	Produtos da Dissertação	98
	Referências Bibliográficas	99
	Apêndice A	103

1 Introdução

O processo de laminação de aços planos consiste basicamente na redução da espessura de uma tira de aço até uma espessura desejada. É essencial que o material laminado apresente a menor variação na espessura possível, bem como as variações de espessura no início e fim do processamento do material sejam mínimas. Na laminação a frio, a tira de aço é submetida a uma pressão compressiva resultante da força aplicada pelos cilindros de trabalho do laminador, enquanto a tira é tracionada.

De acordo com Fleck e Johnson (1992), na teoria clássica de laminação desenvolvida por von Karman (1925), Orowan (1943) e Bland e Ford (1952), que apresenta uma modelagem matemática capaz de permitir o cálculo das forças e torques necessários na laminação, assume-se que o cilindro de trabalho mantém a forma circular quando submetido a uma força axial, mas sofre uma deformação elástica no arco de contato com a tira. Essa teoria também considera um coeficiente de atrito constante no arco de contato e que a tira sofre deformações plásticas nesta região, exceto em uma pequena região nas extremidades, onde a deformação é elástica.

Na análise de Johnson e Bentall (1969), relativa à laminação de tiras de pequena espessura, sugere-se que a redução da tira entre os cilindros de trabalho ocorre em duas zonas separadas por uma extensa zona neutra sem escorregamento, assumindo que os cilindros de trabalho mantêm a forma circular após a deformação. Com base nesta sugestão, Fleck e Johnson (1987) desenvolveram uma teoria que se aproxima do modelo de Bland-Ford para redução de tiras de espessura elevada e da análise de Johnson e Bentall para materiais de espessura inicial reduzida. Esta teoria considera a deformação plana homogênea da tira, quando sujeita a deformação. A zona de contato entre a tira e o cilindro de trabalho é dividida em sete zonas, não havendo deformação plástica nas zonas centrais. A deformação dos cilindros de trabalho é modelada de forma simplificada, adotando o método de fundação elástica.

Fleck et al. (1992) aprimoraram a teoria proposta por Fleck e Johnson (1987), desenvolvendo um modelo de deformação elástica para os cilindros de trabalho e incorporando os efeitos da tração na interface cilindro – tira. A condição de manutenção da forma cilíndrica dos rolos de trabalho é substituída pela deformação de forma elíptica dos mesmos. Le e Sutcliffe (1999) desenvolveram uma nova análise para laminação a frio de tiras de baixa espessura baseados nos trabalhos de Fleck e Johnson (1987) desconsiderando a existência de uma zona neutra central plana e simplificando o método de solução anterior, através da obtenção de uma equação explícita para a variação da pressão de contato nesta zona. O modelo proposto por Le e Sutcliffe permite tratar o raio de contato circular ou a deformação do cilindro da mesma forma.

Considerando um laminador de tiras a frio em *tandem*, onde são usadas quatro ou cinco cadeiras de laminação e a redução da espessura é gradual em cada cadeira, observa-se que a força de laminação predita pelos modelos baseados na teoria de Bland e Ford é compatível com as forças reais. A distribuição da redução de espessura do material entre as cadeiras é uma tarefa complexa, uma vez que a espessura de entrada de uma cadeira corresponde à espessura de saída da cadeira anterior, a curva tensão - deformação do material possui comportamento não linear e a tensão entre as cadeiras influencia na determinação das forças de laminação. Por último, a capacidade de aplicação da força de laminação e tração das cadeiras de um laminador em *tandem*, bem como as características dimensionais do material laminado, determinam os limites aplicáveis para os valores de redução possível em cada cadeira, sem que sejam produzidos efeitos indesejáveis como defeitos de planicidade e rompimento da tira.

Objetivando a distribuição uniforme de forças entre as cadeiras de laminação e respeitando os limites físicos do equipamento e do material processado, devem ser determinados esquemas de laminação que consideram reduções parciais em cada cadeira. Esquemas podem ser obtidos pela experiência e conhecimento de operadores de laminadores, com a tabulação dos resultados obtidos, ou pela utilização de algoritmos capazes de calcular as forças de laminação e determinar a melhor distribuição destas forças, resultando na utilização equilibrada do equipamento, reduzindo o desgaste mecânico do laminador e aumentando a sua eficiência.

Considerando a natureza não linear das variáveis envolvidas na determinação da força de laminação, o emprego de algoritmos de otimização não lineares torna-se um caminho natural. Dentre essa classe de algoritmos, há os de busca local, os quais, conforme Du e Swamy (2016), não necessariamente retornam o ótimo global. Por outro lado, há os algoritmos baseados em meta-heurísticas, que apesar de não garantirem o ótimo global, permitem a exploração de um espaço de busca mais amplo que os algoritmos de busca local (SKIENA, 2008).

Jiang et al. (2011) desenvolveram um algoritmo baseado na meta-heurística Colônias de Formigas (DORIGO e STÜTZLE, 2004) para determinar as forças de laminação em um Laminador de Tiras a Frio de cinco cadeiras, por meio do modelo clássico de Bland e Ford e diversas simplificações foram adotadas, que não são aplicáveis em um laminador real. Já Pires (2007) utilizou o método Simplex (NELDER e MEAD, 1965) para a determinação das forças de laminação em um Laminador de Tiras a Frio de cinco cadeiras baseado no Modelo de Bland e Ford e apresentou resultados reais de sua aplicação, comparando-os ao método de cálculo manual. Uma vez que o problema da distribuição de forças de laminação emprega variáveis contínuas, sugere-se a aplicação de heurísticas computacionais não combinatórias.

Neste trabalho, é proposto um modelo de cálculo capaz de prever a distribuição de forças de laminação em um Laminador de Tiras a Frio baseado nas meta-heurísticas computacionais

Recozimento Simulado e Algoritmo Genético e na teoria clássica de laminação de Bland e Ford. A principal vantagem do método proposto é a independência de uma solução inicial para que seja obtida a melhor distribuição de reduções de espessura com um tempo estável de execução menor que 250 ms, com precisão de 88% a 94% quando comparado aos resultados reais da força de laminação, aplicados para 1000 bobinas produzidas no Laminador de Tiras a Frio estudado.

1.1 Caracterização do Problema

O processo de laminação a frio ocorre após o processo de laminação a quente, onde blocos de aço, aquecidos em fornos ou produzidos por lingotamento contínuo, sofrem a conformação mecânica a quente, originando tiras de aço, as quais, por sua vez, são enroladas em bobinas. As bobinas são então desenroladas e a tira resultante é decapada para a remoção do óxido de ferro resultante do processo de laminação a quente e oxidação natural do material durante o seu armazenamento. A tira decapada pode ser novamente bobinada ou submetida à laminação a frio, onde o material sofre novamente uma deformação plástica, sendo preservada a largura, reduzida a espessura e proporcionalmente aumentado o comprimento do material.

Em um laminador de tiras a frio (LTF) em *tandem* típico, a tira passa por quatro ou cinco pares de cilindros de trabalho com motorização independente, cada qual suportado por cilindros de encosto de diâmetro ao menos duas vezes maior que o diâmetro dos cilindros de trabalho (valores típicos são mostrados na Tabela 1-1) (ROBERTS, 1978). Os cilindros de trabalho e encosto são produzidos com ligas especiais de aço de baixíssimo coeficiente de deformação, essencial para suportar as enormes forças aplicadas sobre estes durante a laminação. A Figura 1-1 apresenta esta configuração.

À medida que a tira de aço avança entre os pares de cilindro de trabalho, sua espessura é reduzida. A redução na espessura é causada pela elevada força de compressão aplicada em uma pequena região de contato entre os rolos de trabalho e a tira. A força de compressão necessária é fornecida por cilindros hidráulicos que atuam sobre os cilindros de encosto, que por sua vez, pressionam os cilindros de trabalho sobre a tira. A força aplicada é medida em células de carga instaladas em cada cadeira. As tensões aplicadas entre cada cadeira, bem como a tensão de entrada e saída, são medidas por tensiômetros instalados entre as cadeiras, na entrada e saída do laminador respectivamente. A espessura da tira é medida continuamente na entrada do laminador, após a primeira cadeira e normalmente após a última cadeira. A espessura entre as demais cadeiras é estimada pelo sistema de controle, considerando a velocidade angular dos motores de cada cadeira, diâmetro dos cilindros de trabalho e o escorregamento estimado (parâmetro de controle).

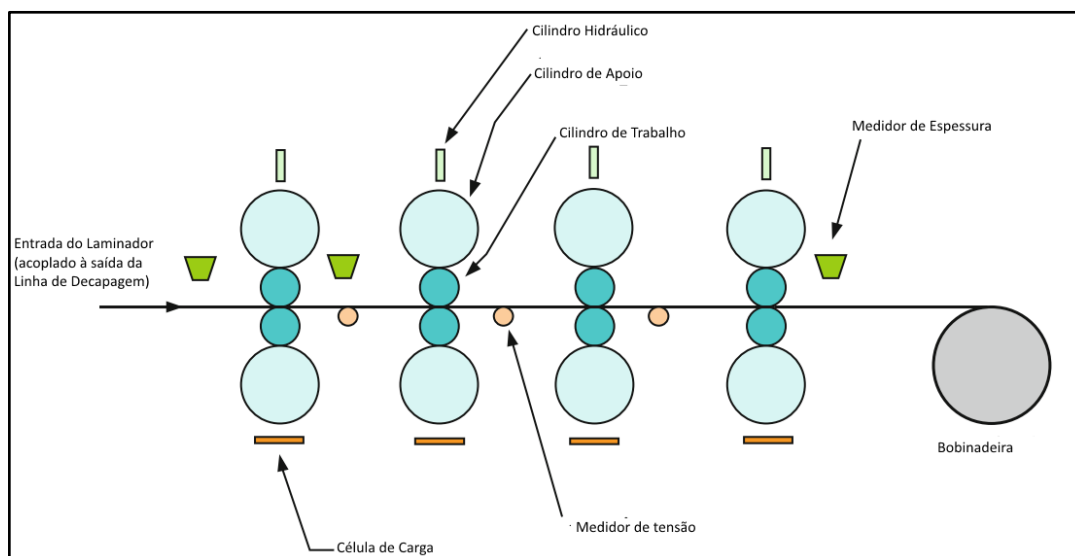


Figura 1-1 - Laminador de Tiras a Frio – Configuração Contínua¹

A Tabela 1-1 apresenta as características de um LTF de quatro cadeiras em *tandem*, acoplado à saída da Linha de Decapagem. A Tabela 1-2 apresenta os padrões de redução de espessura de três produtos distintos, como exemplo. Estes parâmetros variam para cada tipo de laminador, do material processado e do padrão de redução desejado. Como pode ser visto nesta tabela, deve ser definido para cada material a ser produzido, um esquema de laminação que consiste na distribuição da redução da espessura do material entre as cadeiras do laminador. Uma vez que as cadeiras são dispostas em série, a tira processada em uma cadeira é continuamente alimentada na cadeira seguinte e assim por diante, até a saída da última cadeira, onde então a tira é enrolada, formando bobinas, que são evacuadas quando toda a tira de entrada é processada ou por outro critério operacional, como peso pré-definido.

Tabela 1-1 - Parâmetros de um Laminador de Tiras a Frio

Parâmetro	Dimensão
Número de cadeiras	4
Largura da tira (mm)	750 a 1875
Espessura de entrada (mm)	1.2 a 5.3
Espessura de saída (mm)	0.24 a 2.25
Redução Global (%)	49 a 85
Distância entre as cadeiras (mm)	4500
Diâmetro do cilindro de trabalho (mm)	444.8 a 521
Diâmetro do cilindro de encosto (mm)	1250 a 1400
Força de laminação (tf)	100 a 3000
Tensão absoluta (tf)	5 a 75

¹ Fonte: (UDOMPHOL, 2007)

Tabela 1-2 - Esquemas de laminação de um Laminador de Tiras a Frio

Parâmetro	Esquema de Laminação		
	1	2	3
Espessura de entrada (mm)	2.833	3.650	3.470
Espessura de saída cadeira 1 (mm)	1.736	2.006	1.932
Espessura de saída cadeira 2 (mm)	1.064	1.153	1.170
Espessura de saída cadeira 3 (mm)	0.735	0.749	0.738
Espessura de saída cadeira 4 (mm)	0.720	0.730	0.720
Força de laminação cadeira 1 (tf)	1131	1248	1359
Força de laminação cadeira 2 (tf)	942	1013	1155
Força de laminação cadeira 3 (tf)	842	874	935
Força de laminação cadeira 4 (tf)	1251	1514	1521

O cálculo do esquema de laminação envolve a aplicação de diversas equações não lineares que descrevem as características da cadeira de laminação, dos cilindros de trabalho e encosto, da emulsão usada para o resfriamento da tira e cilindros, dentre outros parâmetros. Em função da gama elevada de materiais que podem ser processados em um laminador, a utilização de tabelas de força e redução pré-definidas é inviável. Desta forma, torna-se essencial a utilização de um algoritmo capaz de calcular um esquema de reduções, definir as forças de laminação necessárias para atingir estas reduções, verificar a capacidade do equipamento em realizar o esquema calculado, e encontrar o melhor esquema de reduções, que permita a distribuição do esforço de laminação entre as cadeiras, com o objetivo de maximizar o tempo de serviço dos componentes eletromecânicos do laminador.

Neste trabalho, será desenvolvido um algoritmo baseado em meta-heurísticas computacionais capaz de considerar os principais parâmetros envolvidos no processo de laminação de tiras a frio em *tandem*, resultando em uma ferramenta prática e de aplicação real para resolver o problema de distribuição de forças de laminação de forma ótima.

1.2 Objetivos: Geral e Específicos

Geral

Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um modelo de otimização e uma meta-heurística cujo objetivo é obter a melhor distribuição das forças de laminação entre as cadeiras, dadas as características do material processado, do laminador, as restrições técnicas e produtivas, e a espessura final desejada do produto acabado.

Propõe-se, também, o desenvolvimento de uma biblioteca de ligação dinâmica (DLL) em linguagem C-Sharp, que permita a fácil utilização do algoritmo em ambiente de produção real.

Específicos

- I) O algoritmo deve ser configurável, possibilitando a definição de classes de aços, características e limites técnicos do laminador, como a potência disponível, número de cadeiras, força de laminação e tensões entre as cadeiras.
- II) O algoritmo deve ser capaz de utilizar dados reais de produção para adaptação automática, visando à seleção do modelo adequado de laminação e ajustes de coeficientes estáticos, como o atrito entre cilindros e a tira, além dos parâmetros da curva de fluxo do material.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Breve História da Laminação

De acordo com Roberts (1978), durante o século XIV, pequenos cilindros de aço manual de aproximadamente 25 mm de diâmetro foram usados para laminar ouro, prata e talvez chumbo. Porém, o primeiro laminador do qual se tem algum registro foi desenvolvido por Leonardo Da Vinci em 1480, como mostrado na Figura 2-1. Contudo, não há nenhum registro sobre a construção deste tipo de laminador e nem que tenha sido dada alguma importância à laminação antes da metade do século XVI.

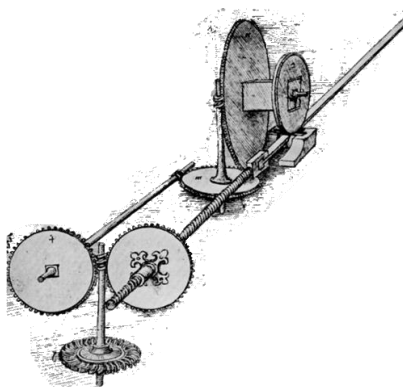


Figura 2-1 – Esquema de uma máquina para laminação de chumbo para a utilização em janelas de vidro estanhado. Desenhado por Leonardo Da Vinci²

No século XVI, o chumbo passou a ser usado na fabricação de telhados e os primeiros laminadores manuais surgiram para processar este material. Alguns artesãos desenvolveram laminadores básicos para a fabricação de instrumentos, como órgãos, ambos consistindo de um par de cilindros e uma alavanca ou cruzeta usada para transmitir força a estes cilindros.

No século XVII, grandes laminadores a quente já estavam em operação para a laminação de materiais ferrosos usados na produção de lingotes e tarugos, além do desenvolvimento de laminadores para a produção de barras cilíndricas. Estes laminadores ainda consistiam de um único par de cilindros com tração animal e posteriormente a vapor à época da Revolução Industrial.

Ainda de acordo com Roberts, no século XVIII, iniciou-se a utilização de laminadores em *tandem*, onde o material é laminado em sucessivos laminadores individuais dispostos em sequência denominados cadeiras. Durante a Revolução Industrial no início do século XIX houve um enorme avanço na construção destes equipamentos, com a utilização de laminadores em *tandem* e o contínuo aumento da produção exigida naquela época.

² Fonte: www.1000museums.com. Acessado em 01-Mar-2016

O desenvolvimento da laminação a frio como um processo produtivo ocorreu após o aprimoramento de um laminador de três cilindros, com a alteração de sua configuração para um conjunto de quatro cilindros, sendo dois cilindros de diâmetro menor em contato com o material laminado e dois cilindros de diâmetro maior, utilizados como encosto, uma vez que os cilindros menores sofriam grandes deflexões durante o processo (ROBERTS, 1978).

2.2 Tipos de Laminadores a Frio

Diversos tipos de laminadores a frio são empregados na indústria, em função do tipo de processo e materiais laminados. Considerando apenas a laminação de aços planos a frio, são utilizados diversos tipos de laminadores compostos por uma única cadeira de laminação ou por duas ou mais cadeiras dispostas em *tandem*, visando o aumento da produtividade e a capacidade de redução geral da espessura do material. As configurações dos laminadores mais empregados na indústria atualmente são mostradas a seguir.

2.2.1 Four-High

Os laminadores *Four-High* são os mais aplicados na indústria no processo de laminação a frio. As cadeiras de laminação são construídas com blocos sólidos de aço forjado e conectadas entre si quando aplicada a configuração em *tandem* para o aumento da estabilidade estrutural do conjunto.

Dois cilindros de trabalho que entram em contato com o material em processo são apoiados por dois grandes cilindros, denominados cilindros de encosto, para reduzir a flexão dos cilindros de trabalho, permitindo a redução de espessura do material com distribuição uniforme em relação a sua largura. Geralmente, a motorização ocorre nos cilindros de trabalho que podem utilizar um único motor acoplado a uma caixa de redução ou dois motores conectados a caixas de reduções individuais. Na primeira configuração, os cilindros de trabalho devem possuir a menor diferença de diâmetro possível, para evitar o atrito desigual entre as faces do material laminado, o que resulta na perda da qualidade do produto acabado. Um exemplo de uma cadeira de um laminador *Four-High* é mostrado na Figura 2-2.



Figura 2-2 – Cadeira de Laminação 4-High em fase de montagem³

2.2.2 Six-High

A cadeira de laminação *Six-High*, como mostrado na Figura 2-3, é composta por seis cilindros, sendo dois cilindros de trabalho que entram em contato com o material em processo, dois cilindros de encosto e dois cilindros intermediários entre os cilindros de trabalho e encosto. O formato das extremidades dos cilindros intermediários permite que a flexão dos cilindros de trabalho, durante a laminação, não limite a força aplicada como ocorre nos laminadores *Four-High*, permitindo uma maior redução de espessura nesta configuração quando comparada a última. Uma configuração usual de laminadores em *tandem* é a utilização de quatro cadeiras *Four-High* e uma cadeira *Six-High* na saída do laminador, o que garante uma melhor planicidade do produto acabado quando comparado à configuração *Four-High*.

³ Fonte: Shanghai Ivy Import & Export Co., Ltd. <http://www.shanghai-ivy.com/metal-coil-cold-rolling-mill/1-2-5t.jpg> acessado em 31-Jan-2016.

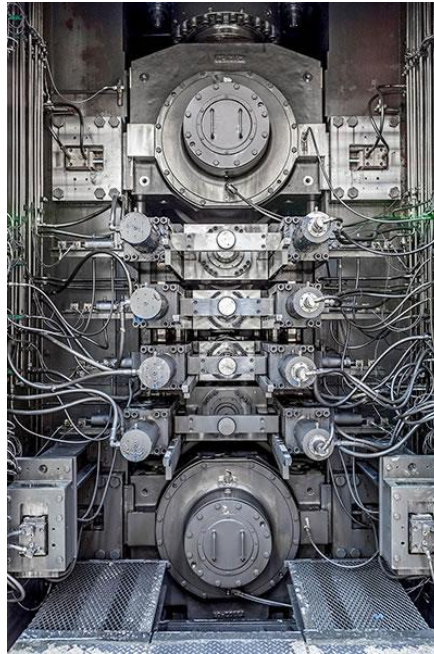


Figura 2-3 – Vista frontal de uma cadeira de Laminação 6-Hi⁴

2.2.3 Twenty-High

O principal fator para que seja alcançada a redução de espessura desejada na laminação a frio é a aplicação máxima de pressão em uma pequena área de contato entre o material em processo e os cilindros de trabalho. Com este objetivo, na década de 1950, foi proposto o laminador *Twenty-High* Sendzimir®, assim nomeado em homenagem ao seu idealizador Tadeusz Sendzimir. Neste laminador, 20 cilindros são dispostos como mostrado na Figura 2-4. Os cilindros de trabalho, com diâmetro inferior a 75 mm, são apoiados em dois conjuntos de cilindros intermediários, que por sua vez, são suportados por cilindros de encosto compostos por rolamentos. A força de laminação é transmitida por contato mecânico até os cilindros de trabalho, que em função de seu diâmetro pequeno, exercem elevadas pressões que resultam na laminação do material. Este tipo de laminador é amplamente utilizado na laminação de aços de dureza elevada, como o aço inoxidável e ligas com elevado teor de silício ou fósforo, além de ser empregado na laminação de materiais de baixíssima espessura, como 0.025 mm. O controle de espessura e a qualidade superficial do produto acabado no laminador Sendzimir é superior aos demais laminadores (ROBERTS, 1978).

⁴ Fonte: TubeFirst.com – URL: <http://www.tubefirst.com/newsdetail.php?ID=3629> . Acessado em 31-Jan-2016

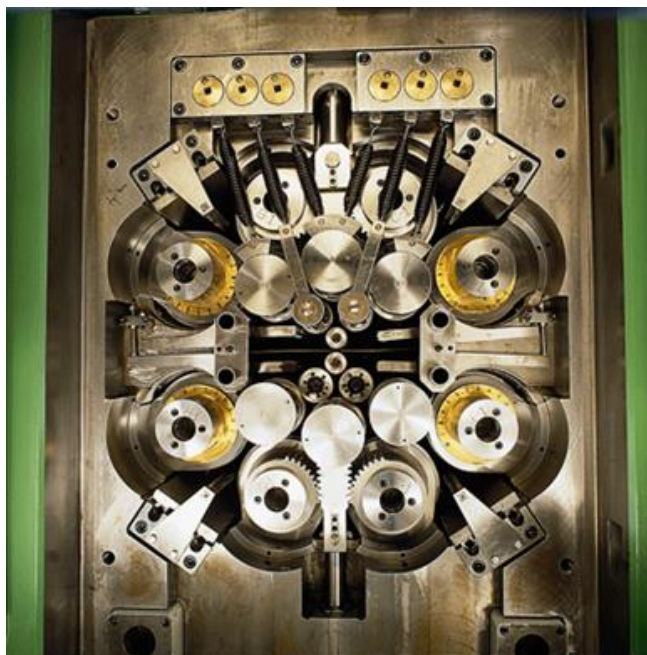


Figura 2-4 – Vista frontal de um laminador Sendzimir 20-High⁵

2.2.4 Laminador em *Tandem*

A constante necessidade do aumento de produção e materiais de espessura cada vez menores resultou na introdução dos laminadores em *tandem*, onde cadeiras de laminação são dispostas em sequência ou *tandem*, permitindo uma maior redução de espessura total do material e o aumento da velocidade de produção. Em um laminador de uma única cadeira, para a obtenção da espessura final desejada, é necessário que o material seja processado diversas vezes para a redução gradativa de espessura, ao passo que a mesma espessura de saída pode ser atingida em um laminador em *tandem* em um único passe. Como mais de uma cadeira de laminação é utilizada, cilindros de trabalho de diâmetros elevados podem ser aplicados para a obtenção da espessura final do material, uma vez que a força de laminação em cada cadeira é reduzida em relação a redução total. Ainda, quando comparado o tempo de processo, a diferença é ainda maior. Como exemplo, em um laminador de uma única cadeira, a produção de uma bobina de aço carbono de 35 toneladas leva em torno de 50 minutos, ao passo que a produção da mesma bobina em um laminador em *tandem* ocorre em, no máximo, 10 minutos.

Nos laminadores em *tandem*, um parâmetro importante a ser observado é o aumento da velocidade de laminação em cada cadeira em função da redução de espessura. Desta forma, o esquema de redução de espessura deve ser adequado às limitações de velocidade de cada cadeira, o que é chamado na indústria de cone de velocidade, em alusão ao formato de um cone circular disposto horizontalmente, com o vértice voltado para a primeira cadeira e a base para a última.

⁵ PMX Industries - <http://www.ipmx.com/about/tour.html> , acessado em 31-Jan-2016

Segundo Roberts, os laminadores em *tandem* de três cadeiras são projetados para reduções de espessura em relação a espessura inicial de até 33%, quatro cadeiras para reduções entre 33% a 83% e cinco cadeiras para reduções de 50% a 90%.



Figura 2-5 – Laminador a Frio em *Tandem* de Quatro Cadeiras da ArcelorMittal Vega⁶

2.3 Deformação dos Materiais

2.3.1 Introdução

Quando um sólido é submetido a forças externas, ele sofre deformação em sua forma. Quando essa força é removida, o material pode ou não retornar à sua forma inicial. Quando não retorna, a deformação no material é considerada permanente e denominada plástica. Forças inferiores às necessárias para causar uma deformação permanente no material causam deformações elásticas (COURTNEY, 2005).

Um material dúctil, quando submetido a um carregamento externo, exibe uma sequência de respostas como se segue: deformação elástica, deformação plástica e finalmente, fratura. O aço em seu estado sólido cristalino apresenta este comportamento e seu estudo é essencial para o processo de conformação mecânica, como a laminação a frio. Na Seção 2.3.2 será descrito o ensaio de tração, essencial para a caracterização do comportamento do aço sujeito ao carregamento uniaxial e na

⁶ SMS Group. URL: <http://www.siemag.sms-group.com/en/1563.html> . Acessado em 31-Jan-2015

Seção 2.3.3, será mostrada a modelagem matemática da curva tração- deformação, obtida do ensaio de tração.

2.3.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é frequentemente empregado para o estudo das propriedades mecânicas dos materiais. Este ensaio é realizado submetendo um corpo de prova de dimensões normalizadas (ASTM E8/E8M – 15a) a um alongamento controlado, pela aplicação de tração uniaxial, em um equipamento apropriado (ASTM, 2015). Após a preparação, duas marcas são realizadas ao longo do comprimento do corpo de prova. Em seguida, é medida a área da seção transversal inicial do corpo de prova e o comprimento de referência, definido pela distância das duas marcas. O corpo de prova é preso ao equipamento de testes por garras e o teste é realizado, com a aplicação de uma força tal que resulta no alongamento constante do material até sua ruptura. Um extensômetro é utilizado para medir a deformação uniaxial do material na direção de aplicação da tensão, na medida em que esta aumenta. Os dados coletados (tensão e extensão) são utilizados para a elaboração da curva tensão - deformação ou curva de fluxo do material em função da tensão aplicada. A Figura 2-6 apresenta um detalhe do equipamento utilizado no ensaio de tração.

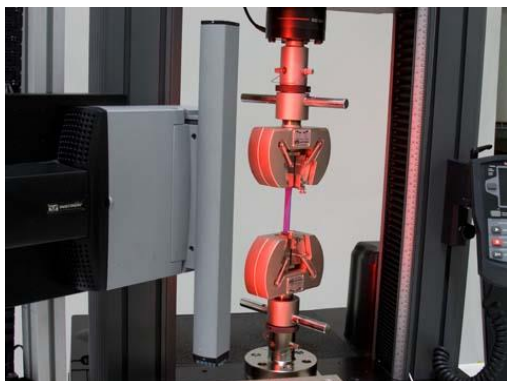


Figura 2-6 – Detalhe de um ensaio de tração ⁷

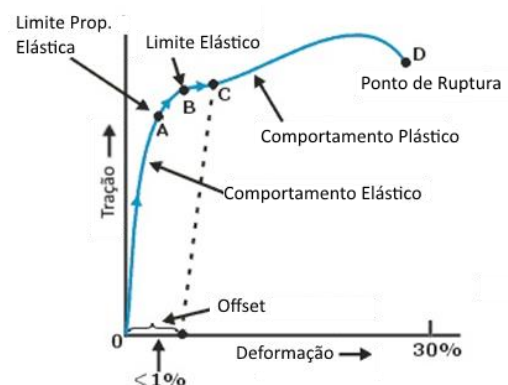


Figura 2-7 – Curva de tensão - deformação convencional típica para metais ⁸

O formato da curva tensão em função da deformação do material depende de diversos fatores, como:

- A composição química do material;
- Processos mecânicos prévios sofridos pela amostra (conformação mecânica);
- Tratamento térmico;

⁷ Fonte: Instron. URL: <http://www.instron.us/~media/images/instron/catalog/products/testing-systems/universal-testing-systems/5900-universal/5960-dual-column/detail2---5969-ave.jpg> - Acessado em 09/02/2016.

⁸ Fonte: NPTEL. URL: http://www.nptel.ac.in/courses/105108072/mod02/image/lec1_clip_image005.jpg - Acessado em 10/02/2016.

- Taxa de deformação durante o teste;
- Temperatura do corpo de prova;
- Orientação do corpo de prova em relação à carga aplicada.

Na curva tensão - deformação mostrada na Figura 2-7, os pontos de A a D representam as principais características do material quanto a aplicação da tração. O material apresenta um comportamento linear elástico entre os pontos 0 e A, podendo ser aplicada a lei de Hooke para deformação elástica nesta região. O ponto A é denominado limite de proporcionalidade. Na região definida entre os pontos A e B, o material ainda apresenta um comportamento elástico, porém não linear. Para os materiais dúcteis como o aço, a região definida pelos pontos A e B é de difícil mensuração, pois o limite de proporcionalidade é muito próximo do limite de elasticidade. Nestes casos, padronizou-se que o limite de elasticidade deve ser determinado para um alongamento de 0.2% do corpo de prova (ASTM, 2015). A partir do ponto B, a aplicação da tração sobre o material resulta no escoamento do mesmo e, conseqüentemente, uma deformação plástica, até o ponto D, onde ocorre a ruptura. Os pontos B e D são denominados ponto de escoamento e ponto de fratura respectivamente (HIBBELER, 2010).

Para a laminação a frio, os parâmetros mais importantes do material que podem ser obtidos pelo ensaio de tensão são o módulo de elasticidade, tensão de escoamento máxima e a resistência à deformação. O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, é uma propriedade mecânica de materiais sólidos, que representa a relação da força de deformação por unidade de área e a deformação proporcional do material. A resistência à deformação é uma característica do material que determina seu comportamento quando sujeito a um carregamento uniaxial, após a fase de deformação elástica, ou seja, deformação elástica na zona de escoamento, até que haja seu rompimento.

O módulo de elasticidade, E , do material pode ser obtido a partir da curva de tração-deformação e é definido pela inclinação da curva compreendida do ponto inicial do teste (ou a partir de 0.2% de alongamento para materiais dúcteis) até o limite elástico ou de escoamento:

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (2-1)$$

sendo σ a tensão uniaxial (N/m² ou Pa) e e (adimensional) a deformação de engenharia do material relativa ao seu comprimento inicial.

A resistência à deformação ao longo da região de escoamento ou deformação plástica não apresenta um comportamento linear e pode ser modelada de diversas maneiras como mostrado a seguir.

2.3.3 Modelos da Curva Tensão-Deformação

A modelagem matemática da curva tensão-deformação obtida no ensaio de tração é aplicada nos modelos matemáticos de laminação a frio para prever as forças necessárias durante a deformação do material.

Na modelagem da curva tração-deformação, o esforço à tração deve ser obtido em função da área da seção reta do corpo de prova e da carga aplicada durante o ensaio. Esta tração, chamada de tração de engenharia, deve ser ajustada para considerar a estrição (redução da área da seção reta) do material, sendo obtida a tração real. A deformação uniaxial ou deformação de engenharia obtida no ensaio deve ser ajustada para a deformação real por meio da relação $\varepsilon = \ln(1 + e)$ sendo e a deformação de engenharia e ε a deformação uniaxial.

A Figura 2-1 apresenta um corpo de prova e a Tabela 2-1 suas dimensões padronizadas. O esforço à tração, ou tração de engenharia, pode ser obtido como:

$$\sigma_{eng} = \frac{t}{T \cdot W} \quad (2-2)$$

sendo t a tensão medida, T e W a espessura e largura do corpo de prova respectivamente.

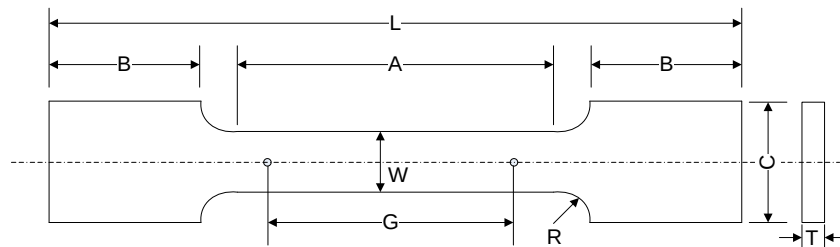


Figura 2-1 – Corpo de prova padronizado para ensaio de tração⁹

O esforço à tração considerada a estrição ou tração real pode ser obtida como:

$$\sigma_{real} = (1 + \Delta l)\sigma_{eng} \quad (2-3)$$

sendo Δl a deformação uniaxial do material medida no ensaio de tração. Uma vez determinados a deformação real e o esforço à tração real, os dados do ensaio de tração podem ser utilizados na modelagem da curva tensão - deformação.

Tabela 2-1 – Dimensões do corpo de prova de tira padronizado¹⁰

Propriedade	Dimensão (mm)
G – Comprimento de medição (teste)	50.0 ± 0.1
W – Largura	12.5 ± 0.1
T – Espessura	Espessura do material
R – Raio de adoçamento mínimo	12.5
L – Comprimento total	200
A – Comprimento da seção reduzida	57
B – Comprimento da seção de pinçamento mínima	50

⁹ Fonte: (ASTM, 2015)

¹⁰ Fonte: (ASTM, 2015)

Diversas equações são utilizadas na modelagem da curva tensão - deformação, como mostrado a seguir. A Equação (2-4) é comumente aplicada na modelagem da curva tensão - deformação de materiais dúcteis, considerando apenas a zona plástica (CHAKRABARTY, 2006).

$$\sigma = C\varepsilon^n \quad (2-4)$$

sendo C o coeficiente de resistência, ε a deformação real e n o expoente em função do encruamento do material. A equação prevê uma tensão inicial nula e uma inclinação inicial infinita, com exceção para $n = 1$, que representa um material elástico (idêntica à lei de Hooke). Quanto maior o valor de C , maior a inclinação da curva tensão - deformação. No entanto, a existência de uma deformação inicial sofrida pelo material não é considerada nesta equação. Em um laminador a frio em *tandem* acoplado à linha de decapagem, o material é comumente submetido a uma redução inicial de espessura em torno de 2% proveniente de um equipamento responsável pela quebra da carepa resultante da laminação à quente, antes da entrada do material no processo de decapagem ácida. Ainda, em cada cadeira de laminação, o material é novamente alongado e assim, torna-se necessário considerar este alongamento no equacionamento da curva tensão - deformação do aço. A Equação (2-5) proposta por SWIFT (1952) e citada por (CHAKRABARTY, 2006), (BEDI, 1969) e outros permite esta condição.

$$\sigma = C(m + \varepsilon)^n \quad (2-5)$$

sendo C , m e n constantes empíricas. Para $m = 0$, tem-se um material sem deformação prévia e a Equação (2-5) fica idêntica à Equação (2-4).

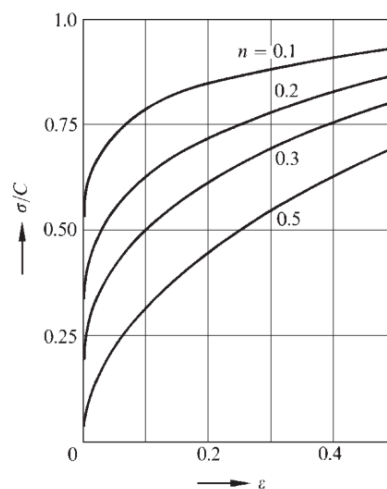


Figura 2-8 – Curva de fluxo empírica para materiais rígidos e plásticos (equação de Ludwik)¹¹

¹¹ Fonte: (CHAKRABARTY, 2006)

A equação de Swift (1952) pode ser alterada ainda com a inclusão de um *offset* que resulta em uma melhor aproximação da curva tensão - deformação real, quando os dados do ensaio de tração obtidos na zona de deformação elástica são mantidos, como mostrado na Equação (2-6).

$$\sigma = C(m + \varepsilon)^n + \alpha \quad (2-6)$$

Outros autores utilizam modelos específicos para a curva tensão - deformação, como (DUROVSKY, ZBORAY e KERKOVA, 2008), que propõem um polinômio de terceiro grau:

$$\bar{\sigma}_0 = f(\varepsilon) = A\varepsilon^3 + B\varepsilon^2 + C\varepsilon + D \quad (2-7)$$

sendo A, B, C e D parâmetros obtidos de uma regressão estatística baseada nos resultados do ensaio de tração.

Na prática, para a laminação, a curva tensão - deformação obtida em laboratório é modelada usando a equação de Swift e outras de preferência do especialista na laminação, de acordo com a massa de dados disponível para a modelagem. Na Seção 3.2, são apresentados os resultados da modelagem da curva tensão - deformação baseada em dados reais obtidos em laboratório.

2.4 Modelos Matemáticos Relacionados à Força de Laminação

O processo de laminação envolve a interação entre três componentes principais: os cilindros de trabalho, a lubrificação dos cilindros e o material laminado. O comportamento exato destes componentes durante o processo apresenta elevada complexidade para ser considerado em um modelo matemático, tornando-se necessária a simplificação da ação destes.

A partir da década de 1930, foram publicados os trabalhos de S. Ekelund (1933), J. Hitchcock (1935), E. Orowan (1943), D. Jortner (1959) dentre outros pesquisadores, compondo a teoria de laminação clássica quando consideradas as forças de laminação. Em função da complexidade destes modelos para a época, modelos simplificados foram desenvolvidos para aplicação direta em operação manual (através de um conjunto de curvas) ou com o auxílio de computadores, *online* e *off-line*. Ainda assim, efeitos do processo de laminação como o aumento do limite de resistência (*strain hardening*) à medida em que o material é laminado e o coeficiente de atrito são normalmente estimados e ajustados nos modelos atuais através da realimentação das variáveis de processo medidas, que possibilitam a adaptação dos modelos.

A seguir, são apresentados os conceitos básicos utilizadas no desenvolvimento dos modelos clássicos de laminação a frio.

2.4.1 Premissas Utilizadas no Desenvolvimento de Modelos de Laminação

Visando a simplificação do desenvolvimento dos modelos matemáticos relacionados à força de laminação, diversas premissas são adotadas. Roberts (1978) apresenta um conjunto de doze premissas reproduzidas a seguir. À medida que métodos de medição mais precisos foram desenvolvidos e com a utilização maciça de computadores auxiliando a modelagem matemática e a produção, diversas premissas deram lugar a medições ou modelos atualizados:

1 – O material em processo consiste de um corpo contínuo, essencialmente sem variação em seu volume ou densidade;

2 – A resistência à deformação do metal permanece constante ou varia de forma previsível ao longo do arco de contato entre o material e os cilindros de trabalho;

3 – Durante a deformação plástica do material, sua compressão é homogênea. Considerando o material constituído de pequenos segmentos verticais perpendiculares à aplicação da pressão de laminação, estes segmentos são “achataados” quando sujeitos a esta pressão e alongados no sentido de laminação, sem que haja a curvatura do material;

4 – Não há alteração na largura do material. Esta condição é válida quando a espessura do material é muito inferior à sua largura e desta forma, permite que a laminação seja considerada bidimensional apenas;

5 – A lubrificação na zona de redução ocorre de tal maneira que um coeficiente de atrito constante pode ser considerado ao longo do arco de contato;

6 – Deformações elásticas na tira, na zona de redução, são desprezíveis. Esta premissa é válida para grandes deformações, tipicamente de 20 a 50 por cento, faixa na qual a deformação elástica não excede 0.1 ou 0.2 por cento;

7 – Nas teorias iniciais, a curvatura do arco de contato correspondia ao raio de contato do cilindro de trabalho com a tira. O cilindro era considerado perfeitamente rígido, o que foi abandonado em trabalhos posteriores, dando lugar a cilindros que sofrem deformações elásticas durante o processo e conseqüentemente, aumentando sua área de contato com a tira. Não se considera alterações na velocidade periférica do cilindro em função destas deformações;

8 – O ângulo de contato formado entre a tira e a tangente da superfície do cilindro de trabalho no plano de entrada é pequeno, permitindo assumir que o diâmetro do cilindro é grande em relação à espessura de entrada do material;

9 – A aceleração da tira na zona de redução de espessura é desprezível;

10 – As tensões principais no material enquanto este é submetido ao processo de redução de espessura ocorrem nas direções a) normal ao plano e ao centro da tira, b) no plano da tira normal à direção de laminação e c) no plano da tira na direção de laminação;

11 – A tração no plano de laminação do material reduz as tensões de deformação no fim da zona de redução;

12 – Efeitos térmicos são ignorados, mesmo sendo conhecido o aumento da temperatura do material durante a deformação e que este aumento pode afetar a lubrificação.

2.4.2 Modelo de Cálculo de Força de Laminação de Bland-Ford

Bland e Ford desenvolveram um modelo para o cálculo da força de laminação largamente empregado e adaptado às mais diversas condições de laminação a frio. Neste modelo, a identificação da distribuição da pressão entre os cilindros de trabalho sobre a tira na zona de redução de espessura é utilizada para o cálculo da força de laminação. Uma pressão de laminação p_x atinge seu valor máximo no ângulo neutro, onde a tira apresenta a mesma velocidade tangencial dos cilindros, resultando em uma colina de atrito (*friction hill*). A força de laminação é então calculada como a área sob a curva da pressão de laminação.

Em função de sua importância para a teoria de laminação a frio, a modelagem de Bland e Ford, citada em diversos trabalhos como (ROBERTS, 1978), (DUROVSKY, ZBORAY e KERKOVA, 2008) e (PIRES, 2007) e utilizada neste trabalho, é reproduzida a seguir, a partir do trabalho de Pires, com a adaptação da nomenclatura adotada.

As premissas definidas por Bland e Ford na concepção do modelo descrito a seguir são:

1 – O arco de contato permanece circular, mesmo havendo deformação elástica dos cilindros de trabalho;

2 – O coeficiente de atrito é constante ao longo de todo o arco de contato;

3 – Não ocorre deformação lateral do material e a laminação pode ser tratada com um problema de deformação plana;

4 – A deformação é completamente homogênea, ou seja, um plano representado por uma linha vertical na entrada do arco de contato permanece vertical durante sua passagem pela zona de redução.

5 – O critério de Tresca é válido, ou seja, quando as tensões principais no plano de deformação, na deformação plana são σ_1 e σ_3 , a relação dada na Equação (2-8), mostrada abaixo, é válida. Sendo Y o limite de escoamento em tensão ou compressão uniaxial e k o limite de escoamento em cisalhamento, com compressão plana.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k = 2 \frac{Y}{\sqrt{3}} \quad (2-8)$$

Bland e Ford consideraram três zonas distintas onde o material sofre alteração em sua espessura durante a laminação, que podem ser vistas na Figura 2-9. Na zona I ou zona de compressão elástica, o material é comprimido até que seu limite de escoamento é atingido, iniciando

a deformação plástica. Na zona II ou zona de redução ou deformação plástica, a espessura do material é reduzida até sua espessura mínima. Na zona III, o material recupera elasticamente parte de sua espessura, sendo esta zona chamada de zona de recuperação elástica. A seguir, são descritas as equações desenvolvidas por Bland e Ford para estas zonas e a validação das equações com dados reais de produção.

2.4.2.1 Modelo de Deformação Plástica

Inicialmente, são consideradas as forças que atuam em um elemento h da tira no arco de contato. Em qualquer ponto entre a tira e os cilindros de trabalho, estas forças são resultantes da pressão radial s e a força de cisalhamento tangencial μs . O raio do cilindro de trabalho é considerado como o raio do cilindro deformado R' , descrito na Seção 2.4.3, e o ângulo entre um elemento da tira e o cilindro como $d\phi$.

O equilíbrio das componentes horizontais de forças agindo nas faces verticais de altura h e $(h + dh)$ do elemento da chapa é determinado como mostrado a seguir:

$$\sigma_3 h + 2sR'd\phi \sin\phi = (\sigma_3 + d\sigma_3)(h + dh) \pm 2\mu sR'd\phi \cos\phi \quad (2-9)$$

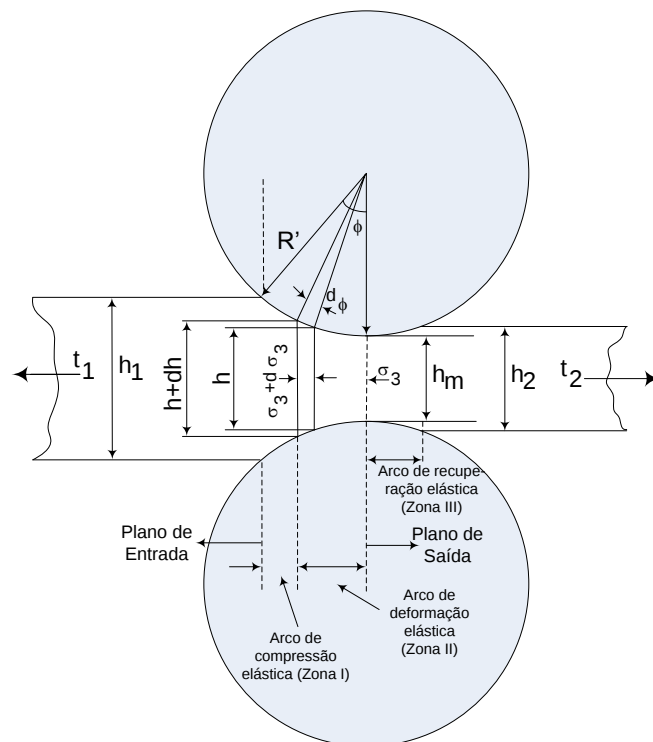


Figura 2-9 – Arco de contato na laminação a frio¹²

A Equação (2-9) pode ser reescrita como:

¹² Fonte: (BLAND e FORD, 1952)

$$\frac{d(\sigma_3 h)}{d\phi} = 2sR'(\sin\phi \pm \mu\cos\phi) \quad (2-10)$$

O equilíbrio das forças verticais pode ser determinado tomando σ_3 como a pressão específica do cilindro de trabalho.

$$\sigma_3 R' d\phi \cos\phi = sR' d\phi \cos\phi \mp \mu sR' d\phi \sin\phi \quad (2-11)$$

A Equação (2-11) pode ser reescrita como:

$$\sigma_3 = s(1 \pm \mu \tan \phi) \quad (2-12)$$

As simplificações de Bland e Ford são consideradas a seguir. Na laminação a frio, devido à espessura reduzida do material (0.25 a 6 mm típico) em relação ao raio do cilindro de trabalho (menor que 260 mm típico) o ângulo entre a tira e o cilindro é muito pequeno, raramente excedendo 6 graus. Ainda, o coeficiente de atrito é muito pequeno (0.03 a 0.09 típicos). Assim, $\mu \tan \phi$ será muito pequeno e poderá ser desprezado. Desta forma, a Equação (2-12) pode ser escrita como:

$$\sigma_3 = s \quad (2-13)$$

Ainda, considerando que para ϕ pequenos pode-se admitir $\sin\phi \simeq \phi$ e $\cos\phi \simeq 1$, a Equação (2-10) pode ser reescrita como:

$$\frac{d(\sigma_3 h)}{d\phi} = 2sR'(\phi \pm \mu) \quad (2-14)$$

Substituindo a Equação (2-13) na Equação (2-8), tem-se:

$$\sigma_3 = s - 2k \quad (2-15)$$

Substituindo a Equação (2-15) em (2-14) tem-se:

$$\frac{d[h(s - 2k)]}{d\phi} = 2sR'(\phi \pm \mu) \quad (2-16)$$

A Equação (2-16) pode ser reescrita como:

$$\frac{d \left[2kh \left(\frac{s}{2k} - 1 \right) \right]}{d\phi} = 2sR'(\phi \pm \mu) \quad (2-17)$$

Fazendo $2kh = u$ e $\frac{s}{2k} - 1 = v$ e usando a regra do produto

$$\frac{d(uv)}{dx} = u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx} \quad (2-18)$$

A Equação (2-17) pode ser rescrita como:

$$2kh \frac{d \left(\frac{s}{2k} - 1 \right)}{d\phi} + \left(\frac{s}{2k} - 1 \right) \frac{d(2kh)}{d\phi} = 2sR'(\phi \pm \mu) \quad (2-19)$$

Desenvolvendo, tem-se:

$$2kh \frac{d \left(\frac{s}{2k} \right)}{d\phi} + \left(\frac{s}{2k} - 1 \right) \frac{d(2kh)}{d\phi} = 2sR'(\phi \pm \mu) \quad (2-20)$$

Bland e Ford consideraram que o termo $\left(\frac{s}{2k} - 1 \right) \frac{d(2kh)}{d\phi}$ na Equação (2-20) é pequeno quando comparado ao termo $2kh \frac{d \left(\frac{s}{2k} \right)}{d\phi}$ porque $2k$ aumenta à medida que h decresce na região de deformação. Assim, desprezando este termo, tem-se:

$$\frac{1}{\frac{s}{2k}} \frac{d \left(\frac{s}{2k} \right)}{d\phi} = \frac{2R'}{h} (\phi \pm \mu) \quad (2-21)$$

A espessura da tira em qualquer ponto da zona de redução pode ser obtida por:

$$h = h_2 + 2R'(1 - \cos \phi) \quad (2-22)$$

Resolvendo $\Delta h = R'(1 - \cos \phi)$ para ϕ tem-se:

$$\phi = \arccos \left(1 - \frac{h_2 - h_1}{2R'} \right) \quad (2-23)$$

Considerando $\cos \phi = 1 - 2\sin^2(\phi/2)$ e admitindo para ϕ pequeno que $\sin \phi = \phi$, tem-se $1 - \cos \phi = \frac{\phi^2}{2}$. Usando esta expressão na Equação (2-22), obtém-se:

$$h = h_2 + R' \phi^2 \quad (2-24)$$

Substituindo h da Equação (2-24) na Equação (2-21), tem-se:

$$\frac{\frac{d\left(\frac{s}{2k}\right)}{d\phi}}{\frac{s}{2k}} = \frac{2R'}{h_2 + R' \phi^2} (\phi \pm \mu) \quad (2-25)$$

Integrando em função de ϕ tem-se:

$$\int \frac{\frac{d\left(\frac{s}{2k}\right)}{d\phi}}{\frac{s}{2k}} d\phi = \int \frac{2R'}{h_2 + R' \phi^2} (\phi \pm \mu) d\phi \quad (2-26)$$

O lado direito da Equação (2-26) pode ser decomposto como:

$$\int \frac{2R'}{h_2 + R' \phi^2} (\phi \pm \mu) d\phi = \int \frac{2R'\phi}{h_2 + R' \phi^2} d\phi \pm \int \frac{2R'\mu}{h_2 + R' \phi^2} d\phi \quad (2-27)$$

E dividindo o lado direito de (2-27) por $2R'$ e reorganizando o termo μ , obtém-se:

$$\int \frac{2R'}{h_2 + R' \phi^2} (\phi \pm \mu) d\phi = \int \frac{\phi}{\frac{h_2}{2R'} + \frac{\phi^2}{2}} d\phi \pm \mu \int \frac{1}{\frac{1}{2}\left(\frac{h_2}{R'} + \phi^2\right)} d\phi \quad (2-28)$$

Que pode ser reescrita como:

$$\int \frac{2R'(\phi \pm \mu)}{h_2 + R' \phi^2} d\phi = \int \frac{\phi}{\frac{1}{2}\left(\frac{h_2}{R'} + \phi^2\right)} d\phi \pm 2\mu \int \frac{1}{\frac{h_2}{R'} + \phi^2} d\phi \quad (2-29)$$

Assim, a Equação (2-26) pode ser reescrita como:

$$\int \frac{\frac{d\left(\frac{s}{2k}\right)}{d\phi}}{\frac{s}{2k}} d\phi = \int \frac{\phi}{\frac{1}{2}(h_2^2 + \phi^2)} d\phi \pm 2\mu \int \frac{1}{\frac{h_2^2}{R'} + \phi^2} d\phi \quad (2-30)$$

A Equação (2-30) pode ser resolvida usando as relações de integração abaixo:

$$\int \frac{f'(x)d(x)}{f(x)} = \ln f(x) \quad (2-31)$$

$$\int \frac{d(x)}{a^2 + x^2} = \frac{1}{a} \tan^{-1} \frac{x}{a} \quad (2-32)$$

$$\int \frac{xd(x)}{a + bx^2} = \frac{1}{2b} \ln \left(x^2 + \frac{a}{b} \right) \quad (2-33)$$

Resolvendo a Equação (2-30), obtém-se:

$$\ln \left(\frac{s}{2k} \right) = \ln \left(\frac{h_2 + R'\phi^2}{R'} \right) \pm 2\mu \sqrt{\frac{R'}{h_2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{R'}{h_2}} \phi + \ln C \quad (2-34)$$

Como $h = h_2 + R'\phi^2$, a Equação (2-34) pode ser reescrita como:

$$\ln \left(\frac{s}{2k} \right) = \ln \left(\frac{h}{R'} \right) \pm 2\mu \sqrt{\frac{R'}{h_2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{R'}{h_2}} \phi + \ln C \quad (2-35)$$

Fazendo:

$$H = 2 \sqrt{\frac{R'}{h_2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{R'}{h_2}} \phi \quad (2-36)$$

Tem-se:

$$\ln \left(\frac{s}{2k} \right) = \ln \left(\frac{h}{R'} \right) \pm \mu H + \ln C \quad (2-37)$$

Resolvendo para s, tem-se:

$$s = \frac{2Ckh}{R'} e^{(\pm \mu H)} \quad (2-38)$$

O efeito da tensão à ré e da tensão à frente aplicadas sobre a tira pela teoria de Bland e Ford é mostrado abaixo.

Fazendo $\sigma_3 = -t_2$ no plano de saída do arco de contato, tem-se, a partir da Equação (2-15):

$$s_2 = 2k_2 - t_2 \quad (2-39)$$

sendo k_2 a tensão de escoamento, em cisalhamento, no plano de saída. Como $\phi = 0$ na saída, resulta que $H = 0$ e a constante de integração calculada a partir da Equação (2-38) será:

$$C = \frac{R'}{h_2} \left(1 - \frac{t_2}{2k_2} \right) \quad (2-40)$$

Substituindo a Equação (2-40) na Equação (2-38), tem-se:

$$s^+ = \frac{2kh}{h_2} \left(1 - \frac{t_2}{2k_2} \right) e^{(\pm\mu H)} \quad (2-41)$$

Da mesma a forma, fazendo $\sigma_3 = t_1$, tomando o limite de escoamento da entrada (k_1) e $H = H_1$ neste ponto, onde $\phi = \phi_1$, tem-se:

$$s^- = \frac{2kh}{h_1} \left(1 - \frac{t_1}{2k_1} \right) e^{(H_1-H)} \quad (2-42)$$

A força de laminação P , por unidade de largura, é encontrada integrando-se a pressão vertical s exercida pelos cilindros sobre a tira em todo o arco de contato. Assim:

$$P = R' \left(\int_0^{\phi_n} s^+ d\phi + \int_{\phi_n}^{\phi_1} s^- d\phi \right) \quad (2-43)$$

sendo ϕ_n o ângulo neutro. O ângulo neutro é determinado a partir das equações (2-41) e (2-42) como segue:

No plano neutro tem-se $s_n^+ = s_n^-$ ou

$$\frac{2kh}{h_2} \left(1 - \frac{t_2}{2k_2} \right) e^{(\pm\mu H_n)} = \frac{2kh}{h_1} \left(1 - \frac{t_1}{2k_1} \right) e^{(H_1-H_n)} \quad (2-44)$$

que reordenando os termos, resulta em:

$$H_n = \frac{H_1}{2} - \frac{1}{2\mu} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \left(\frac{1 - \frac{t_2}{2k_2}}{1 - \frac{t_1}{2k_1}} \right) \right) \quad (2-45)$$

Calculando ϕ tem-se:

$$\phi_n = \sqrt{\frac{h_2}{R'}} \tan \left(\frac{H_n}{2} \sqrt{\frac{h_2}{R'}} \right) \quad (2-46)$$

2.4.2.2 Modelo de Deformação Elástica

O efeito da tensão a ré e a tensão a frente aplicadas respectivamente na entrada e saída da cadeira de laminação a frio foi inicialmente estudado por Bland e Ford. Os autores concluíram que estas tensões não poderiam ser ignoradas, por possuírem uma influência direta na pressão de laminação exercida pelos cilindros de trabalho sobre a tira em processo. Desta forma, propuseram um conjunto de equações que permitem o cálculo aproximado da contribuição destas tensões na determinação da força de laminação necessária à redução desejada de espessura da tira. A dedução das equações apresentadas pode ser obtida em (BLAND e FORD, 1952).

As premissas adotadas são:

- 1 - A interface tira/cilindro é dividida em três zonas: zona de compressão elástica, zona de deformação plástica e zona de recuperação elástica, como mostrado na Figura 2-9;
- 2 - A tensão horizontal é uniforme na seção longitudinal da tira;
- 3 - A zona de deformação plástica é delimitada como mostrado na Figura 2-9, com tensões vertical e horizontal constantes e nenhuma tensão de cisalhamento na seção vertical do material;

Desta forma, assume-se que as tensões vertical e horizontal são constantes nos limites das seções retas da zona de deformação plástica e que a tensão de cisalhamento é nula. Para satisfazer as condições de equilíbrio nos limites das zonas de deformação elástica e recuperação elástica, a tensão de cisalhamento e a tensão horizontal devem ser contínuas. Postulou-se que a tensão vertical média nas zonas elásticas satisfaz o critério de equilíbrio, considerando as tensões de cisalhamento horizontal e vertical nulas.

A contribuição da tensão a ré na zona de compressão elástica (zona I) para a força de laminação pode ser obtida pela expressão:

$$P_{e1} = \frac{(1 - \nu^2)(k - \sigma_1)^2}{4E} h_1 \sqrt{\frac{R'}{h_1 - h_2}} \quad (2-47)$$

A espessura mínima de saída da chapa da zona de deformação plástica pode ser obtida como:

$$h_m = h_2 \left[1 - \frac{(1 - \nu^2)(k - \sigma_2)}{E} \right] \quad (2-48)$$

A contribuição da tensão a frente na zona de recuperação elástica (zona III) pode ser obtida pela expressão:

$$P_{e2} = \frac{2}{3}(k - \sigma_2) \sqrt{\frac{h_2 R'}{E} (1 - \nu^2)(k - \sigma_2)} \quad (2-49)$$

De acordo com Bland e Ford, a força horizontal resultante aplicada a ambos os cilindros de trabalho em função da força de compressão elástica é $2\mu P_{e1}$. Para uma seção de espessura h_1 , esta força equivale a uma pressão de $2\mu P_{e1}/h_1$. Assim, a tensão de entrada aplicada na tira na saída na zona de deformação plástica deve ser corrigida através da expressão:

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - \frac{2\mu P_{e1}}{h_1} \quad (2-50)$$

A mesma correção deve ser feita para a força de recuperação elástica na saída:

$$\sigma'_2 = \sigma_2 - \frac{2\mu P_{e2}}{h_2} \quad (2-51)$$

A força de laminação resulta na deformação elástica e plástica da tira e na deformação elástica dos cilindros de trabalho. Esta última cessa assim que a região do cilindro em contato com a tira deixa a zona de redução. A determinação do raio do cilindro deformado é essencial para a obtenção da força de laminação. A obtenção deste parâmetro é descrita na Seção 2.4.3.

Como pode ser visto pela Equações (2-43) e (2-53) definidas na Seção 2.4.3, a força de laminação depende do raio do cilindro deformado elasticamente e vice-versa. A maneira usual para a solução deste problema é calcular a força de deformação considerando o raio do cilindro normal, sem deformação. A força calculada é então usada para a determinação do raio do cilindro deformado. Este novo raio é utilizado no cálculo de uma nova força de laminação em um processo

iterativo, até que haja a convergência da força de laminação calculada. Em testes realizados neste trabalho, observou-se que a convergência ocorre em poucas iterações (menor que 10 para um erro de 10^{-3} mm no raio do cilindro deformado para grandes reduções e menor que 30 para o mesmo fator de erro, para reduções menores que 4%).

2.4.3 Deformação Elástica dos Cilindros de Trabalho

Nas primeiras e mais simples teorias de laminação desenvolvidas, os cilindros de trabalho foram considerados como corpos rígidos, ou seja, não sujeitos a quaisquer deformações quando submetidos às pressões de laminação. Estas considerações podem ser aplicadas para a laminação de materiais de baixa dureza, quando sujeitos a grandes deformações. No entanto, para a laminação de materiais de dureza elevada e pequenas reduções na espessura, os cilindros sofrem uma expressiva deformação elástica, de forma que o arco de contato entre os cilindros e o material em processo é consideravelmente maior quando comparados a cilindros rígidos (ROBERTS, 1978).

Hertz, Dinnik, Huber, Fuchs e outros, citados por Roberts, verificaram que quando um cilindro exerce uma determinada força sobre uma superfície plana, a distribuição de pressão no arco de contato é elíptica. O comprimento do arco de contato é dado por:

$$L = 1.6 \times \sqrt{2PR' \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)} \quad (2-52)$$

sendo P a força por unidade de comprimento exercida pelo cilindro; ν_1 e ν_2 os coeficientes de Poisson para o cilindro e o material plano, respectivamente e E_1 e E_2 os valores correspondentes do módulo de Young do cilindro e do material.

Hitchcock (1935), desenvolveu uma equação para a determinação do raio do cilindro deformado, amplamente usada nos modelos de laminação e que permite a obtenção de valores da força de laminação aplicável para grandes reduções (tipicamente acima de 10%) e materiais de espessura inicial elevada:

$$R' = R \left(1 + \frac{16(1 - \nu_{roll}^2)P}{\pi E \Delta h} \right) \quad (2-53)$$

sendo R' o raio do cilindro deformado; R o raio inicial do cilindro e Δh a diferença de espessura do material (redução absoluta).

2.4.4 Modelos de Torque e Potência

A tira em processo avança entre as cadeiras de laminação graças ao torque exercido nos cilindros de trabalho por motores acoplados a caixas de engrenagens, que amplificam o torque disponível no eixo destes motores. Este torque, é claro, é limitado pela potência instalada em cada cadeira, normalmente equipada com um ou dois motores de corrente contínua, em série, nos laminadores construídos até a década de 90 ou motores de corrente alternada, em laminadores mais modernos, controlados por inversores de frequência operando em média tensão, que garantem o torque máximo disponível mesmo em baixíssimas velocidades.

O torque necessário à movimentação da tira entre os cilindros de trabalho pode ser obtido a partir do balanço energético na cadeira, considerando a tensão de entrada, de saída e a energia de redução de espessura. As tensões de entrada e saída exercem um papel importante na localização do ângulo neutro e ao mesmo tempo, no torque necessário à redução. A tensão de entrada age no sentido contrário à rotação do cilindro e a tensão de saída age no mesmo sentido. Assim, o torque devido às tensões de entrada e saída pode ser escrito como:

$$T_t = \frac{w}{\bar{R}} [(t_1 \cdot h_1) - (t_2 \cdot h_2)] \quad (2-54)$$

em que w é a largura da tira; $\bar{R}$ o raio médio dos cilindros de trabalho; t_1 a tensão na entrada; h_1 a espessura de entrada; t_2 a tensão na saída; h_2 a espessura de saída; T_t o torque devido a tração.

A energia de redução pode ser obtida a partir do modelo de Bland e Ford, considerando que a energia de deformação da entrada ocorre até o ponto neutro, a partir do qual o material é mantido sobre pressão até a saída da zona de redução. Assim, a partir dos resultados obtidos nas equações (2-41), (2-42) e (2-46), obtém-se a energia de redução específica:

$$E_r = |s^-| - |s^+| \quad (2-55)$$

em que s^- é a energia necessária à manutenção da compressão do material após o ponto neutro; s^+ é a energia necessária à redução do material até o ponto neutro; E_r a energia total de redução.

O torque devido à redução pode ser obtido como:

$$T_r = \frac{w}{\bar{R}} R' \cdot E_r \quad (2-56)$$

em que w é a largura do material; $\bar{R}$ o raio médio dos cilindros de trabalho; R' o raio deformado do cilindro de trabalho; E_r a energia de redução calculada a partir da Equação (2-64).

O torque necessário à rotação dos cilindros de trabalho pode ser obtido pela soma das Equações (2-54) e (2-56):

$$T = T_t + T_r \quad (2-57)$$

Diversos parâmetros não considerados na Equação (2-55) interferem no torque que deve ser desenvolvido pelos motores de cada cadeia, tais como a existência de cilindros de encosto que são girados no sentido oposto ao movimento da tira pelo contato direto com os cilindros de trabalho, as perdas por atrito nos rolamentos e na caixa de redução, além da eficiência na transformação de energia elétrica em mecânica nos motores do laminador. Assim, o torque necessário à redução do material deve ser corrigido por ao menos um fator específico para cada cadeia. O torque necessário no eixo do motor (ou motores acoplados em uma cadeia) pode ser obtido como:

$$T_m = T \cdot (1/\eta_m) \cdot i \quad (2-58)$$

em que T é o torque de laminação obtido pela Equação (2-57); η_m a eficiência do sistema de transmissão mecânica; i a relação da caixa de redução. Valores entre 0.9 a 0.95 de eficiência são aplicados aos sistemas de transmissão mecânica de laminadores a frio.

A potência mecânica necessária ao desenvolvimento do torque de laminação pode ser obtida pela relação direta:

$$P_m = \frac{T_m}{i} \cdot \omega \quad (2-59)$$

em que T_m é o torque mecânico no eixo do motor obtido pela Equação (2-58); i a relação de transmissão; ω a velocidade angular do cilindro de trabalho.

A velocidade angular ω desenvolvida por cada cadeia de laminação pode ser obtida a partir da velocidade linear usando a relação:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2-60)$$

em que v é a velocidade tangencial (linear) do cilindro; r o raio do cilindro de trabalho e ω a velocidade angular.

Combinando as Equações (2-59) e (2-60), a potência mecânica pode ser calculada a partir da velocidade linear de laminação:

$$P_m = \frac{T_m}{i} \cdot \frac{v}{r} \quad (2-61)$$

A potência elétrica necessária ao desenvolvimento do torque aplicado à redução de espessura da tira pode ser obtida a partir da potência mecânica, considerando a eficiência do conversor ou inversor de frequência, para motores de corrente contínua ou alternada, respectivamente. Assim:

$$P_e = \frac{P_m}{\eta_e} \quad (2-62)$$

sendo η_e o coeficiente de eficiência do conversor ou inversor de frequência e P_e a potência elétrica.

2.4.5 Taxa de Deformação na Laminação a Frio

De acordo com Roberts, a partir da década de 1960 foi observado que, de um ponto de vista teórico, o efeito da taxa de deformação do material durante a laminação não poderia ser ignorado. Tipicamente, taxas de deformação de 10 s^{-1} a 1000 s^{-1} são encontradas na laminação a frio e a resistência dinâmica à deformação medida nesta faixa pode ser até duas vezes superior à medida no teste de tração-deformação padrão. Larke (1957) propõe a Equação (2-63) para a determinação da taxa de deformação:

$$\dot{\epsilon} = \frac{V h_n \cos \phi_n}{h_1 h_2} \sqrt{2(h_1 - h_2)/(2R')} \quad (2-63)$$

sendo V a velocidade da tira na entrada da cadeira; h_n a espessura do material no ângulo neutro, ϕ_n o ângulo neutro; h_1 e h_2 as espessuras de entrada e saída respectivamente; R' o raio do cilindro deformado.

2.4.6 Encruamento do Material e Influência da Velocidade na Laminação

Bedi (1969) avalia o efeito da velocidade de laminação na taxa de deformação do aço (*strain rate*) e sua consequência na força de laminação. O autor considera que a taxa de deformação do material aumenta com a velocidade de laminação, e que a curva deformação em função da tração é dependente da temperatura, sendo que a força de deformação reduz em função do aumento da temperatura. Devido ao aquecimento por atrito entre os rolos e o material em processo e a deformação plástica ao qual o material é submetido durante a laminação, ocorre elevação de temperatura. Por outro lado, se o tempo de permanência do material no arco de contato entre os cilindros é suficientemente curto, a elevação da temperatura no material durante a deformação pode ser insignificante, e o efeito do “amolecimento” (*softening effect*) será muito pequeno quando

comparado com o efeito da taxa de deformação. Isto pode resultar em um aumento líquido na força de laminação com o aumento da velocidade.

O encruamento (*strain hardening*) do material durante o processo de laminação é discutido em (ROBERTS, 1978). De acordo com o autor, o encruamento do aço com baixo teor de carbono não ocorre simultaneamente com a deformação imposta pela laminação, pelo menos para grandes reduções. O encruamento do material ocorre imediatamente após a remoção da ação compressiva, assumindo valores de acordo com as curvas convencionais de encruamento. No entanto, em processos onde o material é submetido a múltiplos passes ou reduções contínuas como ocorre na laminação em *tandem*, o encruamento do material deve ser considerado.

Bedi apresenta uma equação empírica para a determinação do limite de resistência médio:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_0} \right)^m \quad (2-64)$$

em que $\bar{\sigma}$ é o limite de resistência médio, $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação atual, $\bar{\epsilon}_0$ é a taxa de deformação obtida no ensaio de tração (quasi-estático) e m o expoente de sensibilidade da taxa de deformação. O autor propõe a utilização das Equações (2-5) e (2-64) para compor uma única equação de estado do material, representada pela Equação (2-65), considerando que a elevação de temperatura em função da deformação do material é inferior a 50°C e não afeta seu limite de resistência durante a laminação, uma vez que isto ocorre apenas no arco de contato dos cilindros de trabalho e o material e assim, o fator m permanece constante.

$$\bar{\sigma} = A(B + \bar{\epsilon}_0)^n \bar{\sigma}_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_0} \right)^m \quad (2-65)$$

2.4.7 Influência do Atrito na Determinação da Força de Laminação

McConnel e Lenard (2000) analisaram a influência de lubrificantes na redução da força de laminação a frio, objetivando a determinação do coeficiente de atrito nos modelos utilizados e os regimes de lubrificação durante o processo. Para isto, realizaram diversos ensaios de laminação em um laminador experimental de dois cilindros utilizando em cada ensaio, um tipo de óleo em um conjunto de seis tipos distintos. Como material para laminação, empregaram tiras de 1 mm x 25 mm x 300 mm previamente laminadas a frio com rugosidade de $R_a = 0.8 \mu\text{m}$ na direção de laminação e longitudinal. Em cada ensaio, 10 gotas do lubrificante foram aplicadas diretamente sobre a tira em espaços regulares. Durante os ensaios, a força de laminação, torque e escorregamento foram medidos. O coeficiente de atrito foi calculado através da aplicação da formula de Hitchcock de

maneira inversa: a partir de dados da tira (espessura de entrada, saída, comprimento e largura), dados dos cilindros de laminação (dureza e raio), medições (torque, escorregamento e força de laminação), o coeficiente de atrito pôde ser estimado pela equação proposta por Hill:

$$\mu = \frac{\frac{P}{\sigma\sqrt{R'\Delta h}} - 1.08 + 1.02\left(1 - \frac{h_2}{h_1}\right)}{1.79\left(1 - \frac{h_2}{h_1}\right)\sqrt{\frac{R'}{h_1}}} \quad (2-66)$$

Os resultados mostraram que a força de laminação e torque são reduzidos à medida que a velocidade de laminação aumenta, independentemente do tipo de lubrificante utilizado. Ainda, a força de laminação aumenta com o aumento da redução realizada. Já o coeficiente de atrito é reduzido com o aumento da velocidade de laminação, mantida a taxa de redução do material, também independentemente do tipo de lubrificante utilizado.

Tieu e Liu (2004) realizaram experimentos para medição do coeficiente de atrito no processo de laminação e a possível transferência de rugosidade do cilindro sobre a tira laminada. Em seu experimento, foram instalados transdutores de pressão nos cilindros de trabalho de um laminador experimental do tipo Hille (2 cilindros apenas), equipado com instrumentação suficiente para medir o torque e a força de laminação durante os testes. A Figura 2-10 apresenta o esquema de montagem dos transdutores.

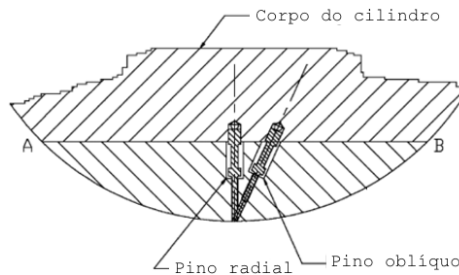


Figura 2-10 – Esquema de Montagem de Transdutores de Pressão para Ensaio de Tração ¹³.

O coeficiente de atrito pôde ser obtido através deste método utilizando a equação proposta por Royeen e Backofen:

$$\mu = \left(\frac{p_\theta}{p_r} - 1\right) / \tan \theta \quad (2-67)$$

sendo p_θ a pressão medida pelo sensor oblíquo, p_r a pressão medida pelo sensor na posição radial, θ o ângulo entre ambos os sensores e μ o coeficiente de atrito calculado.

¹³ Fonte: (TIEU e LIU, 2004)

Para a verificação do método de medição proposto, os autores utilizaram um método de marcação na tira: dois pontos são marcados na tira antes da laminação e a distância entre eles é medida. Após a laminação, em função da redução de espessura, a distância entre os pontos é aumentada e o coeficiente de atrito pode ser estimado baseado nas equações de Ford et al (1951), como segue.

$$\mu = \frac{y_1 - y_2}{2\sqrt{R'(y_1 - y_2) - 4\sqrt{S_f R' y_2}}} \quad (2-68)$$

sendo $y_1 - y_2$ a distância entre dois pontos da tira, R' o raio do cilindro deformado e S_f o fator de escorregamento à frente.

O raio do cilindro deformado é dado por:

$$R' = R \left(1 + \frac{C_0 P_t}{W(y_1 - y_2)} \right) \quad (2-69)$$

sendo $C_0 = \frac{16(1-\nu_r^2)}{\pi E_r}$, ν_r o coeficiente de Poisson do cilindro, E_r o módulo de elasticidade do cilindro, P_t a força de laminação medida, W a largura da tira. O fator de escorregamento à frente S_f pode ser determinado como:

$$S_f = \frac{L' - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2-70)$$

sendo L_0 a circunferência do cilindro e L' a marca na tira após uma revolução no cilindro.

Nos testes, foram empregadas tiras de alumínio e aço carbono, submetidas a reduções e velocidades de laminação variável. Em todos os ensaios, o coeficiente de atrito obtido foi reduzido à medida que a velocidade foi aumentada. Ainda, o coeficiente de atrito foi maior quando não foi usada nenhuma lubrificação. Com relação à geração de rugosidade, foi verificado que os cilindros imprimiram rugosidade na tira e vice-versa na direção de laminação, não sendo verificada a transferência de rugosidade longitudinal. Finalmente, os autores verificaram que quanto maior o diâmetro do material ou do cilindro, maior a força necessária a ser empregada na laminação, em conformidade com a teoria clássica de laminação, proposta por Bland e Ford.

2.5 Métodos Computacionais

2.5.1 Meta-heurísticas

Heurísticas são procedimentos que tratam problemas de otimização sem dispor de garantias teóricas nem de que a solução ótima exata seja obtida, e nem tampouco de garantias de que a solução obtida tenha algum tipo de proximidade em relação à solução ótima exata (TAKAHASHI e GASPARELLO, 2013). A lógica de uma heurística é, ao contrário, a de garantir que a solução obtida seja melhor que a vasta maioria das alternativas disponíveis, sendo nesse sentido uma “boa solução”.

Já as meta-heurísticas são formadas por um conjunto de técnicas de otimização estocásticas que utilizam heurísticas para a obtenção da melhor solução possível para problemas complexos (LUKE, 2013). A aplicação de meta-heurísticas na solução do problema de distribuição de forças em um laminador a frio em *tandem* é justificada a seguir.

Na laminação a frio, objetiva-se a redução da espessura do material processado de forma controlada, garantindo a qualidade do produto final. Inúmeras variáveis influenciam o processo de laminação, como já descrito nas sessões anteriores. Para o controle de processo de um laminador a frio, seja de uma única cadeia ou em *tandem*, ao menos duas variáveis do processo devem ser controladas para que a espessura de saída do material seja a desejada. São elas a força de laminação e as tensões de entrada e saída. Mantidas constantes as tensões, o aumento da pressão sobre os cilindros de trabalho resulta em um aumento na força de laminação e, conseqüentemente, na redução da espessura do material, desde que esta força seja capaz de realizar uma deformação plástica no material. Ao mesmo tempo, mantida constante a força de laminação, a alteração das tensões de entrada e saída movem o ponto neutro de atuação das forças de atrito, resultando em uma variação de espessura do material laminado. Assim, existem inúmeros pares de força de laminação x tensões que permitem a redução de espessura do material. A escolha do melhor par força de laminação x tensões é uma questão direta de otimização.

Pires et al (2006) aplicaram o método *Simplex* de Nelder e Mead (1965) para a solução deste problema em um LTF em *tandem*, similar ao estudado neste trabalho, alcançando melhorias significativas no processo produtivo, quando comparado com o método manual de geração de *presets* de força de laminação e tensões entre as cadeiras. Neste presente trabalho, foram usadas as meta-heurísticas Recozimento Simulado e Algoritmo Genético com a mesma finalidade. É importante destacar que a primeira utiliza o método de geração de uma solução inicial proposta por Pires. A última, por sua vez, utiliza um método estocástico para geração dos indivíduos em cada população e apresentou resultados mais promissores que a primeira, para a base de dados reais utilizada na validação dos modelos.

As meta-heurísticas aplicadas neste trabalho são descritas a seguir. O detalhamento da aplicação destas meta-heurísticas na solução do problema de distribuição de forças no LTF em *tandem* será mostrada na Seção 2.5.3.

2.5.1.1 Recozimento Simulado

Recozimento Simulado ou *Simulated Annealing* é uma meta-heurística inspirada no processo físico de recozimento de um sólido para obtenção de estados de baixa energia na área da física da matéria condensada (SKIENA, 2008). O método permite transições de piora na solução para não ficar preso em ótimos locais. Seu pseudocódigo é mostrado na Figura 2-11. Detalhes adicionais sobre o algoritmo e analogia com o processo físico podem ser encontrados em (KIRKPATRICK, GELATT e VECCHI, 1983).

Procedimento SA

1. Seja s_0 uma solução inicial, T_0 a temperatura inicial, ξ a taxa de resfriamento e SA_{max} o número máximo de iterações para se atingir o equilíbrio térmico;
2. $s \leftarrow s_0$; {Solução corrente}
3. $s' \leftarrow s$; {Melhor solução obtida até então}
4. $T \leftarrow T_0$; {Temperatura corrente}
5. $IterT \leftarrow 0$; {Número de iterações na temperatura T }
6. enquanto ($T > 0$) faça
7. enquanto ($IterT < SA_{max}$) faça
8. $IterT \leftarrow IterT + 1$; Gere um vizinho qualquer $s' \in N(s)$;
9. $\Delta = f(s') - f(s)$;
10. se ($\Delta < 0$) então
11. $s \leftarrow s'$; se $f(s') < f(s^*)$ então $s^* \leftarrow s'$;
12. senão
13. Tome $x \in [0,1]$; se $x < e^{-\Delta/T}$ então $s \leftarrow s'$;
14. fim-se;
15. fim-enquanto;
16. $T \leftarrow \xi \times T$;
17. $IterT \leftarrow 0$;
18. fim-enquanto;
19. Retorne s^* ;
20. Fim

Figura 2-11 - Pseudocódigo do Algoritmo Recozimento Simulado

No Recozimento Simulado, parte-se de uma solução qualquer e de uma temperatura T . O procedimento principal consiste em um laço em que são geradas soluções vizinhas à solução atual por SA_{max} iterações e em seguida a temperatura é reduzida. O laço principal termina quando há o congelamento do sistema, ou seja, quando $T = 0$. A cada iteração na mesma temperatura, a solução vizinha gerada é comparada com a solução corrente e se ela for melhor que esta, ela a substitui. Se a solução for de piora, ainda assim ela poderá ser aceita, desde que um número aleatório entre 0 e 1 seja menor que $e^{-\Delta/T}$ (METROPOLIS, ROSENBLUTH *et al.*, 1953). O termo Δ em $e^{-\Delta/T}$ representa uma

quantidade equivalente à piora da melhor solução comparada à solução vizinha gerada. À medida que a temperatura é reduzida, a chance de soluções piores serem aceitas é reduzida quase a zero.

2.5.1.2 Determinação da Temperatura Inicial no Recozimento Simulado

A temperatura T determina a probabilidade de aceite de soluções de piora do algoritmo. A temperatura inicial pode ser definida como um parâmetro ou por simulação, tal como em (ARAÚJO e SOUZA, 2006), considerando a minimização da função objetivo. Dada uma temperatura e uma solução inicial quaisquer, um laço de S_{Amax} iterações é executado, sendo calculada a cada iteração um valor Δ entre a solução inicial e uma solução vizinha, gerada aleatoriamente. Caso a solução seja de melhora, ela é aceita; caso contrário, ela pode ser aceita com a probabilidade $rand(0,1) < e^{-\Delta/T}$. Se em S_{Amax} iterações forem aceitas $\gamma \times S_{Amax}$ soluções, a temperatura obtida é retornada como temperatura inicial; caso contrário, a temperatura é elevada por um fator δ , tal que a nova temperatura seja $T \leftarrow T \times \delta$ e o laço é reiniciado. Neste trabalho, os parâmetros γ e δ foram fixados nos valores 0,90 e 1,1, respectivamente. Desta forma, a temperatura inicial é aquela na qual 90% dos movimentos realizados são aceitos, o que está em harmonia com o processo de recozimento, que exige uma temperatura inicial alta.

2.5.2 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos (AGs) são métodos de busca probabilísticos inspirados nos princípios da seleção natural e da genética. Foram desenvolvidos por John Holland e pelos seus alunos da Universidade de Michigan durante os anos 1960 (HOLLAND, 1975).

A evolução biológica efetua uma pesquisa em um espaço de grande dimensão e complexidade, constituído por todas as possíveis combinações genéticas que podem ser geradas. Alguns dos elementos pertencentes a este espaço de procura poderão originar organismos viáveis. O processo evolutivo contribui para a obtenção de um conjunto de indivíduos bem adaptados ao meio ambiente em que se encontram (PEREIRA, 2013).

Baseado na inspiração natural, os AGs processam conjuntos de elementos do espaço de procura. Estes conjuntos, usualmente denominados populações, são evoluídos ao longo de sucessivas iterações. O objetivo é encontrar uma solução de elevada qualidade para o problema que está sendo resolvido. Inicialmente, indivíduos são aleatoriamente selecionados a partir de uma população e através de dois mecanismos simples da teoria da evolução aplicados sobre estes indivíduos, são gerados novos indivíduos, seguindo as regras a seguir:

- Os elementos mais aptos de uma determinada população são selecionados para cruzamento e geração de novos indivíduos. Esta seleção ocorre de forma probabilística na maioria dos casos. As formas mais comuns são o torneio e roleta;

- Operadores de transformação, como recombinação e mutação, são aplicados sobre os novos indivíduos de forma probabilística, diferenciando-os de seus progenitores.

Na construção de um AG, duas definições essenciais são necessárias:

1. A representação das soluções que fazem parte do espaço de procura. A proposta inicial de Holland sugeria a utilização da codificação binária para a representação dos indivíduos. Assim, a presença ou ausência de uma determinada característica era representada por uma sequência binária. No entanto, a utilização de AGs na solução de problemas no espaço contínuo sugere a representação real como mais adequada (EIBEN e SMITH, 2003). Esta última foi aplicada neste trabalho;
2. A função de aptidão, que qualifica cada indivíduo quanto a sua capacidade de solucionar o problema.

Na seleção por torneio, n indivíduos ($n > 1$) são selecionados aleatoriamente e a função de aptidão de cada indivíduo é avaliada. O indivíduo que apresentar a melhor função objetivo é selecionado. Na Tabela 2-2, são mostrados 6 indivíduos. Selecionando aleatoriamente 3 conjuntos de indivíduos para o torneio 2 a 2, podemos encontrar, por exemplo, os pares (I_1, I_3), (I_4, I_2) e (I_5, I_6). Para uma função de minimização, o indivíduo que possui o menor valor da função de aptidão vence o torneio. Assim, neste exemplo, os vencedores são I_1 ($120 < 500$), I_2 ($160 < 600$) e I_5 ($90 < 160$).

Tabela 2-2 – Algoritmo Genético - População composta de 6 indivíduos e função de aptidão calculada

Indivíduo	Função de Aptidão
$I_1 = (42.05; 30.05; 20.02; 2.05)$	$f_1 = 120$
$I_2 = (37.40; 40.12; 30.02; 4.02)$	$f_2 = 160$
$I_3 = (33.12; 16.05; 48.00; 3.00)$	$f_3 = 500$
$I_4 = (12.11; 48.12; 33.10; 1.00)$	$f_4 = 600$
$I_5 = (42.05; 32.05; 20.02; 2.05)$	$f_5 = 90$
$I_6 = (37.40; 40.12; 30.02; 4.02)$	$f_6 = 160$

Na seleção por roleta, n indivíduos ($n > 1$) são escolhidos aleatoriamente, a função de aptidão de cada indivíduo é avaliada e utilizada na seleção dos indivíduos (HOLLAND, 1975). Como exemplo, selecionando os indivíduos I_1 , I_5 e I_6 , a função de aptidão destes é 120, 90 e 160 respectivamente. Uma forma de seleção por roleta é a escolha do indivíduo com uma probabilidade proporcional à função de aptidão. Neste caso, a probabilidade de cada indivíduo f_i ser selecionado é $f_i / \sum_{j=1}^n f_j$ sendo n o número de indivíduos participantes da seleção. O termo $\sum_{j=1}^n f_j$ normaliza a função de aptidão dos indivíduos. Os indivíduos são então listados e a função de aptidão normalizada é

acumulada, definindo os limites de seleção dos indivíduos em uma faixa entre 0 e 1. Este processo é mostrado na Tabela 2-3. Se um número aleatório escolhido entre 0 e 1 for, por exemplo, 0.67, a seleção por roleta resultará na escolha de I_6 , pois seus limites de escolha são > 0.5676 e ≤ 1.0000 . A seleção por roleta pode apresentar características indesejáveis como a convergência prematura, quando um indivíduo é muito melhor que o restante da população, rapidamente dominando o processo seletivo; ou a ausência de uma pressão seletiva, quando a população é composta por indivíduos medianos e uma pequena ou nenhuma diferença entre os indivíduos não favorece a escolha (EIBEN e SMITH, 2003).

Tabela 2-3 – Algoritmo Genético – Exemplo de seleção de indivíduos por roleta

Indivíduo	Função de Aptidão	F. Aptidão Normalizada	F. Aptidão Normalizada Acumulada
$I_1 = (42.05; 30.05; 20.02; 2.05)$	$f_1=120$	0.3244	0.0000
$I_5 = (42.05; 32.05; 20.02; 2.05)$	$f_5=90$	0.2432	0.3244
$I_6 = (37.40; 40.12; 30.02; 4.02)$	$f_6=160$	0.4324	0.5676
			1.0000

Em função dos mecanismos de seleção e transformação dos indivíduos, a cada iteração, a qualidade média da população é melhorada. Esta característica dos AGs depende diretamente da adoção de operadores genéticos adequados a solução do problema. Os operadores genéticos básicos utilizados em AGs são descritos a seguir:

- **Recombinação (*crossover*):** Efetua a troca de características de dois indivíduos (progenitores), gerando um ou mais indivíduos que carrega a informação genética dos pais. Este operador permite que os indivíduos gerados possuam alguma característica que possibilite uma melhora na aptidão para a solução do problema.

Tomando um par de indivíduos, a recombinação de características destes indivíduos pode ser efetuada através da operação $z_i = \alpha x_i + (1 - \alpha)y_i$ sendo x_i e y_i as características na posição i dos indivíduos x e y respectivamente, α um fator aleatório entre 0 e 1 e z_i a característica i do novo indivíduo. A recombinação pode ocorrer em todas as características do par de indivíduos ou aleatoriamente em uma ou mais características. Neste trabalho, como será visto na Seção 3.4.5, optou-se pela recombinação de apenas uma característica dos indivíduos, reduzindo a chance de geração de indivíduos com características inválidas para a solução do problema.

Como exemplo, a recombinação da primeira característica dos indivíduos I_5 e I_6 mostrados na Tabela 2-2, dado $\alpha = 0.3$ resultará em $z_1 = 0.3(42.05) + (1 - 0.3)(37.40) = 38.80$. Se apenas esta recombinação ocorrer e se o novo indivíduo herdar as demais características de I_6 , por exemplo, este será: $I_7 = (38.80; 40.12; 30.02; 4.02)$.

- **Mutação:** A mutação atua diretamente nos indivíduos originados da recombinação dos progenitores, alterando minimamente alguma característica do novo indivíduo. A mutação permite que alguns indivíduos em uma população homogênea sejam diferenciados. Em termos de minimização, a diversificação de alguns indivíduos da população permite que o algoritmo de busca escape de bacias de atração locais e tenha alguma chance de encontrar o ponto de mínimo global (TAKAHASHI e GASPAR-CUNHA, 2013).

Tomando um indivíduo, a mutação pode ser executada através da operação $z_{i_{n+1}} = z_{i_n} + \delta$, se $\alpha \leq \beta$ sendo α um número aleatório entre 0 e 1, β o fator de mutação; δ o valor da mutação; z_{i_n} a característica i na geração n e $z_{i_{n+1}}$ a característica i a ser usada na próxima geração (após a mutação). Assim, para o indivíduo I_7 do exemplo anterior, dado $\alpha = 0.01$ e $\beta = 0.02$, a mutação poderá ocorrer. Para um δ definido aleatoriamente como -0.01, uma mutação na segunda característica de I_7 ($z_2 = 40.12$) será $z_2 = 40.12 - 0.01 = 40.11$.

A estrutura genérica de um AG é mostrada na Figura 2-12.

Algoritmo GA

1. $t \leftarrow 0$;
2. Gerar a população inicial $P(t)$;
3. Avaliar os indivíduos de $P(t)$;
4. Faça
5. Selecionar pais $P'(t)$ a partir de $P(t)$;
6. Aplicar operadores genéticos a $P'(t)$ obtendo a nova população $P(t+1)$;
7. Avaliar $P(t+1)$;
8. $t \leftarrow t + 1$;
9. Até (critério de parada atingido);
10. Retorna resultado final da otimização;

Fim GA

Figura 2-12 - Pseudocódigo de um Algoritmo Genético genérico

2.5.3 Método do Gradiente

O método do gradiente é um algoritmo determinístico que consiste no cálculo do gradiente da função objetivo associada à solução corrente e, em seguida, na reavaliação da função objetivo considerando o deslocamento da solução corrente em direção oposta ao do gradiente encontrado, multiplicado por um fator α . Um novo gradiente é calculado, então, a partir da nova solução obtida até que não seja possível uma melhora na função ou que o número máximo de iterações tenha sido alcançado (SKIENA, 2008). O pseudocódigo típico deste procedimento é mostrado na Figura 2-13.

```
procedimento Gradiente
```

```

1.  $k \leftarrow 0$ 
2. enquanto (critério de parada não atingido)
3.    $g(k) \leftarrow \text{gradiente}(f(\cdot), x(k))$ ;
4.    $d(k) \leftarrow -g(k)$ ;
5.    $\alpha_k \leftarrow \text{argmin}_{\alpha} f(x(k) + \alpha d(k))$ ;
6.    $x(k+1) \leftarrow x(k) + \alpha_k d(k)$ ;
7.    $k \leftarrow k + 1$ ;
8. fim-enquanto
fim Gradiente
```

Figura 2-13 - Pseudocódigo Típico do Método do Gradiente

O fator α determina o tamanho do deslocamento dado no sentido oposto ao do gradiente da função. Em (TAKAHASHI, 2009), um método de otimização unidimensional é utilizado para determiná-lo. Neste trabalho, no entanto, o método de seção áurea é aplicado: Inicialmente, parte-se de um valor pequeno para α . A função objetivo é, então, calculada e seu valor comparado com o valor da função objetivo corrente. Caso seja melhor, α é multiplicado por 1.618 (proporção áurea) e a função objetivo é calculada novamente até que haja uma piora na solução encontrada. O valor α imediatamente anterior à piora é utilizado no cálculo do deslocamento. A proporção áurea, como fator multiplicador de α , foi uma escolha arbitrária do autor após a execução de testes com outros fatores tais como 2, 5 e 10 e por apresentar resultados satisfatórios em todos os testes executados.

3 Desenvolvimento do Projeto

3.1 Metodologia

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um algoritmo baseado em meta-heurísticas que possibilitem o cálculo e distribuição das forças em um LTF de quatro cadeiras dispostas em *tandem*. O modelo de Bland e Ford, para o cálculo da força de laminação em uma cadeira, dadas as características do material e da cadeira de laminação, é empregado juntamente com o modelo de Hitchcock para a determinação do raio do cilindro deformado em função da força de laminação. Em seguida, os algoritmos propostos neste trabalho são utilizados para a determinação da melhor distribuição de forças possível entre as cadeiras que resulte em um material de qualidade.

Como base para a pesquisa e validação do método de cálculo e distribuição de forças de laminação entre as cadeiras de um laminador em *tandem*, foi utilizada uma base de dados de produção, de um laminador real, composta de características de 5000 bobinas laminadas durante 120 dias; características mecânicas dos cilindros de encosto e trabalho; os parâmetros reais de laminação empregados pelo sistema de controle para atingir as características finais do produto desejado e as medições dos principais parâmetros de produção obtidas durante a laminação do material.

O modelo de cálculo da força de laminação proposto por Bland e Ford foi codificado nas linguagens de programação Matlab® e Microsoft® C-Sharp. Em seguida, foram calculadas as forças de laminação, tomando como base a redução de espessura obtida a partir das medições realizadas no laminador real, por bobina e cadeira de laminação, e comparados com as forças reais obtidas para a laminação de uma bobina. Foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos e os resultados de produção do laminador de referência para a validação do modelo.

Uma vez definida a aplicabilidade e limitação do algoritmo de cálculo da força de laminação implementado, foram desenvolvidos algoritmos baseados em meta-heurísticas para a distribuição das forças de laminação entre as cadeiras, considerando as características e limitações eletromecânicas do laminador. Os algoritmos foram codificados em linguagem C-Sharp e compilados em uma biblioteca de ligação dinâmica ou *Dynamic Link Library* (DLL) para possível aplicação futura no laminador estudado.

Os resultados obtidos através da aplicação de cada meta-heurística utilizada foram analisados estatisticamente para a determinação da meta-heurística de menor tempo de processamento, maior estabilidade e precisão.

Em função das características do processo produtivo e dos materiais empregados na laminação, foi proposto e desenvolvido um modelo adaptativo para o ajuste da força de laminação, objetivando o aumento da precisão do modelo de distribuição de forças proposto. Os dados reais de produção foram utilizados para a validação das adaptações propostas. Os resultados obtidos e as conclusões de cada etapa de desenvolvimento são apresentados em seguida.

3.2 Obtenção de Coeficientes da Curva Tensão - Deformação do Aço

A obtenção dos parâmetros da curva tensão - deformação do material a ser laminado é essencial para a determinação da força de laminação. Para tal, foram usados dados de um ensaio de tração de um tipo de aço em desenvolvimento pela ArcelorMittal, executado em laboratório de acordo com a norma internacional ASTM E8/E8M – 15A (ASTM, 2015).

Os ensaios foram realizados empregando-se um extensômetro à laser do fabricante Instron e os dados coletados através do software Blue Hill II. O equipamento é mostrado na Figura 3-1. As medições realizadas pelo equipamento são a tração aplicada e a deformação resultante. A tensão é medida em MPa e a deformação em mm/mm.



Figura 3-1 – Extensômetro Instron usado em ensaio de tração

A curva tensão - deformação de engenharia para a amostra do material é mostrada na Figura 3-2. A curva tensão - deformação real obtida para a amostra do material é mostrada na Figura 3-3.

A curva tensão - deformação ser modelada por diversas equações, como mostrado na Seção 2.3.3. A seguir, será mostrado o resultado da modelagem da curva tensão - deformação usando o modelo proposto por (SWIFT, 1952) (Equação (2-5)) e o mesmo modelo, com um *offset* (Equação (2-6)).

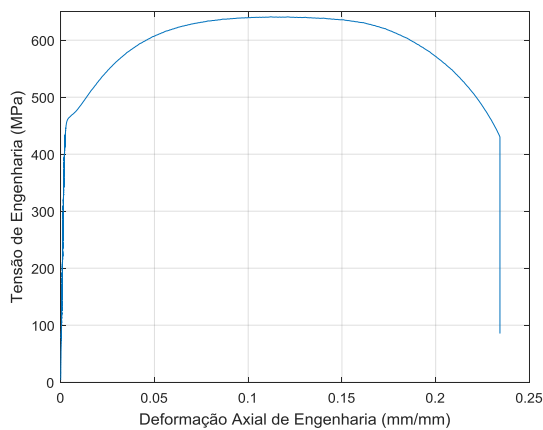


Figura 3-2 – Ensaio de Tração: Curva tensão - deformação de engenharia

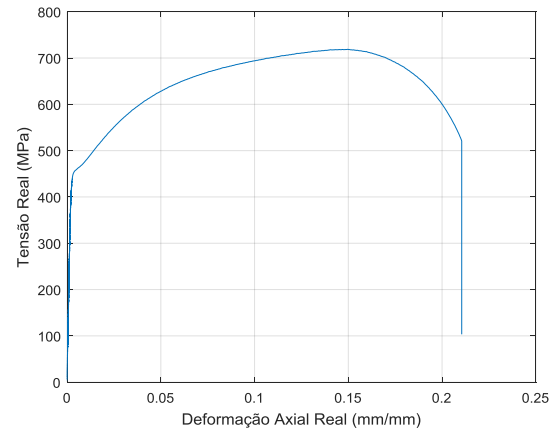


Figura 3-3 – Ensaio de Tração: Curva tensão - deformação real

Assumindo que o material não sofreu nenhuma tensão inicial que pudesse resultar em qualquer deformação, o parâmetro m foi considerado igual a zero. Os parâmetros C , n e α podem ser obtidos pelo ajuste da curva tensão - deformação pelo método dos mínimos quadrados. Através da função *lsqcurvefit* do software Matlab®, os parâmetros da curva tensão - deformação proposta por Swift com e sem o *offset* foram obtidos. A zona de escoamento foi considerada a partir da deformação de 0,2% do corpo de prova de acordo com a normal ASTM E8/E8M – 15A (ASTM, 2007) e o limite superior foi considerado como o ponto de maior tração obtida no ensaio. As curvas reais e os resultados obtidos da modelagem são mostradas na Figura 3-4 e Figura 3-5. Os parâmetros das curvas, bem como a correlação entre a tração calculada e medida são mostrados na Tabela 3-1.

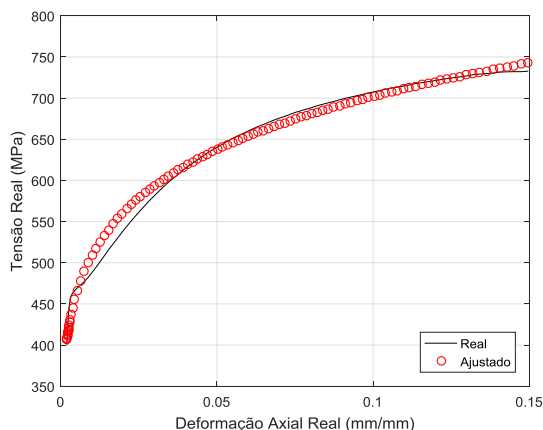


Figura 3-4 – Modelagem da curva tensão - deformação - Modelo de Swift sem *offset*

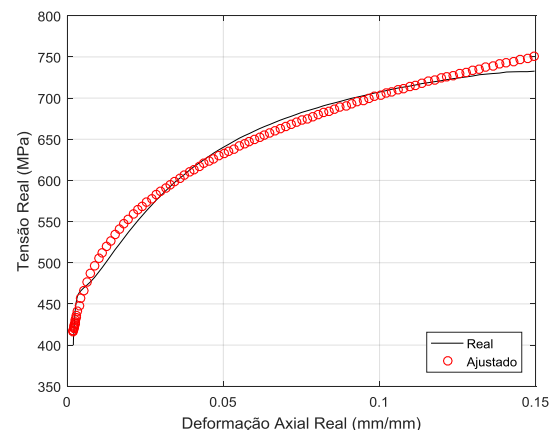


Figura 3-5 – Modelagem da curva tensão - deformação do Aço - Modelo de Swift, com *offset*

A correlação linear (HOLMAN, 1994) apresentada na Tabela 3-1 mostra que a curva modelada pela equação de Swift com *offset* ajusta-se ligeiramente melhor aos dados reais que a curva modelada pela equação de Swift original.

Tabela 3-1 – Parâmetros do modelo da curva tensão - deformação do aço USIBOR®

Modelo	C	m	n	α	Correlação
Swift sem <i>offset</i>	968.3	0	0.1397	-	0.9943
Swift com <i>offset</i>	923.1	0	0.2279	216.7	0.9956

A Tabela 3-2 apresenta a utilização dos dados da curva tensão - deformação para a estimação da tração necessária à deformação do aço em um caso real. A deformação real do material foi calculada em função da espessura de entrada do laminador e a espessura de saída de cada cadeira. Em seguida, foi calculada a força específica e a força real de laminação aplicando o modelo de Bland e Ford, usando os parâmetros da curva tensão - deformação obtidos pelos modelos de Swift com e sem *offset*. É possível verificar que a curva obtida pelo modelo original de Swift tende a estimar valores inferiores aos valores obtidos pelo modelo com *offset*. Como este parâmetro é essencial para a estimação da força de laminação, a aplicação do modelo de Swift neste caso resulta em pressões de laminação menores que as necessárias e, conseqüentemente, exige uma maior atuação do sistema de controle do laminador para atingir a força de laminação ideal à redução de espessura do material.

Tabela 3-2 – Comparação da estimação de parâmetros de ensaio de tração do material em desenvolvimento usando modelo de Swift e Swift com *offset*. Material com 1220 mm de largura.

	Entrada	Saída Cadeira 1	Saída Cadeira 2	Saída Cadeira 3	Saída Cadeira 4
Espessura (mm)	2.833	1.736	1.064	0.735	0.72
Redução (%)		63%	63%	45%	2%
Deformação real ($m + \varepsilon$)		0.213	0.425	0.586	0.595
Tensão de Fluxo Modelo Swift (MPa)		780.2	859.2	898.6	900.6
Tensão de Fluxo - Swift com <i>offset</i> (MPa)		865.6	976.3	1033.9	1036.8

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, pode ser calculado através da Equação (2-1), analisando a zona de deformação elástica obtida no ensaio de tração. Na Figura 3-6 os pontos marcados na curva tensão - deformação correspondem a zona de deformação elástica do material e permitem a determinação do módulo de Young: $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \sim 199.53 \text{ GPa}$. Quando esta medição não está disponível, emprega-se na prática 200 a 230 GPa para o aço com baixo teor de carbono, como o processado no laminador em *tandem* estudado.

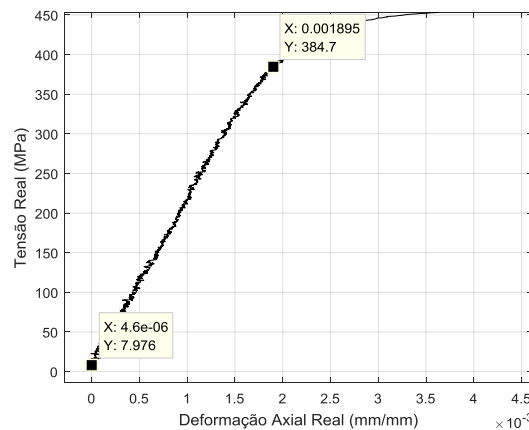


Figura 3-6 – Ensaio de Tração – Zona de deformação elástica – aço em desenvolvimento

Os parâmetros das curvas tensão - deformação usadas neste trabalho foram obtidos pela equipe de especialistas do LTF estudado, através da interface de Engenharia do Modelo Matemático atualmente em operação, que utiliza a equação de Swift com *offset*. A partir da análise do código fonte do modelo matemático em operação, verificou-se que o método de ajuste de curvas proposto por Levenberg-Marquardt (ROWEIS, 1999) foi empregado.

3.3 Cálculo da Força de Laminação

O modelo de Bland Ford é aplicado em diversos tipos de laminadores como os apresentados na Seção 2.2, sendo um modelo amplamente utilizado e consolidado na indústria. Um algoritmo baseado nas equações apresentadas na Seção 2.4.2 foi programado em Matlab® e em C-Sharp. Para a solução dos cálculos integrais, o ângulo de contato entre a tira e o cilindro foi determinado através da Equação (2-23) e em seguida, particionado em m intervalos iguais. Para cada intervalo de integração, foi calculada a resistência à deformação de entrada e saída, a pressão de laminação da entrada da zona de redução para a saída e vice-versa.

Como a força de laminação depende diretamente do raio do cilindro deformado e vice-versa, o algoritmo foi programado de forma iterativa. O raio físico do cilindro foi utilizado na primeira iteração e determinada a força de laminação. Em seguida, o raio do cilindro deformado foi calculado e utilizado no cálculo de uma nova força de laminação. Como condição de parada, foi considerada a variação do raio do cilindro deformado inferior a 0.001 mm entre iterações.

Na determinação do número de divisões do ângulo de contato entre a tira e o cilindro, foi considerado como critério, uma variação aceitável de 50 kN da força máxima de laminação calculada a partir de 10000 intervalos de integração, com decrementos de 10 em 10, até o mínimo de 10 divisões. Como os valores das forças calculadas no LTF são da ordem de 10000 kN, uma variação de 50 kN equivale a 0,5% deste valor, sendo aceitável para aplicações reais. Uma vez que a precisão do resultado obtido depende diretamente do tamanho do intervalo de integração, foram considerados

os casos de maior e menor redução de espessura dados no esquema de laminação apresentado na Tabela 3-3. Os resultados obtidos são mostrados nos gráficos da Figura 3-8.

Para a avaliação do modelo proposto, foram utilizados dados reais médios de uma bobina produzida no LTF estudado, com dimensões 2.261 x 0.482 x 1220 mm, com o esquema de redução e parâmetros de processo mostrados na Tabela 3-3. O modelo da curva tensão - deformação do aço utilizado é dado na Tabela 3-4. Para as cadeiras 1 a 3, foi considerado um coeficiente de atrito constante $\mu = 0.03$ e para a cadeira 4, $\mu = 0.07$ em função da rugosidade dos cilindros. Estes valores de coeficiente de atrito são típicos na laminação a frio, como pode ser encontrado em (DUROVSKY, ZBORAY e KERKOVA, 2008) e (LIU, 2002). Como módulo de elasticidade da tira, foi usado 230 GPa e coeficiente de Poisson 0.30; o ângulo de contato foi dividido em 200 intervalos de integração, em função dos resultados obtidos no teste anterior. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3-5.

Tabela 3-3 – Esquema de reduções para a tira 2.261 x 0.482 x 1220 mm

	Entrada	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Cadeira 4
Espessura (mm)	2.261	1.301	0.777	0.504	0.482
Redução (%)		42.5%	40.3%	35.1%	4.4%
Tensão (MPa)	63.7	140.5	153.7	176.9	23.9
Velocidade (m/min)	187.7	326.3	553.7	853.2	892.2
Diâmetro cilindro superior (mm)		469.27	491.08	498.56	514.31
Diâmetro cilindro inferior (mm)		469.23	491.03	498.50	514.27
Força de laminação média (kN)		10698.79	9424.66	9552.19	11083.3

Tabela 3-4 – Parâmetros do modelo da curva tensão - deformação para validação do modelo de Bland e Ford

α (MPa)	β	γ	Offset (MPa)
630.962	0.20672	-0.0002	150

A curva da pressão de laminação calculada para cada cadeira dado o esquema de laminação é mostrada na Figura 3-7. O arco de contato foi dividido em 10000 intervalos iguais.

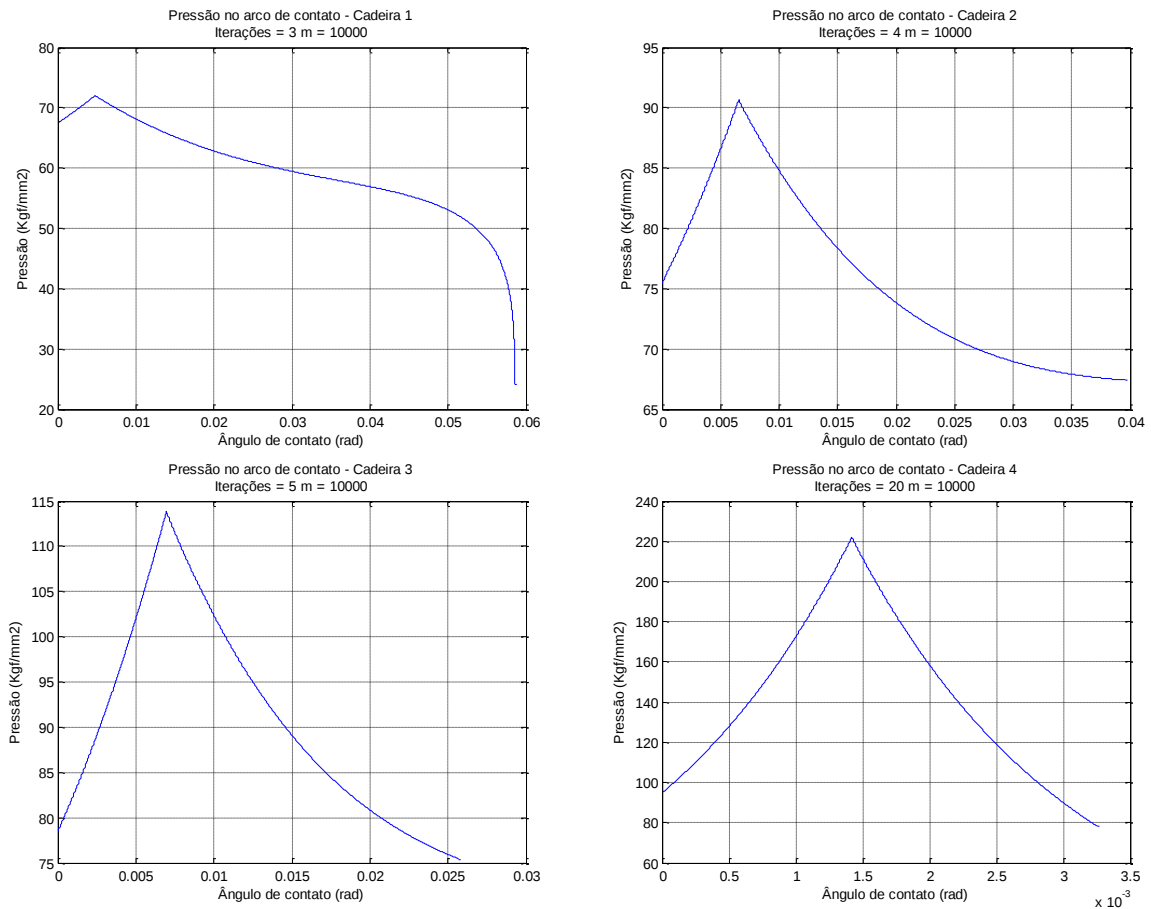


Figura 3-7 – Distribuição de pressão no arco de contato para tira 2.261 x 0.482 x 1220 mm

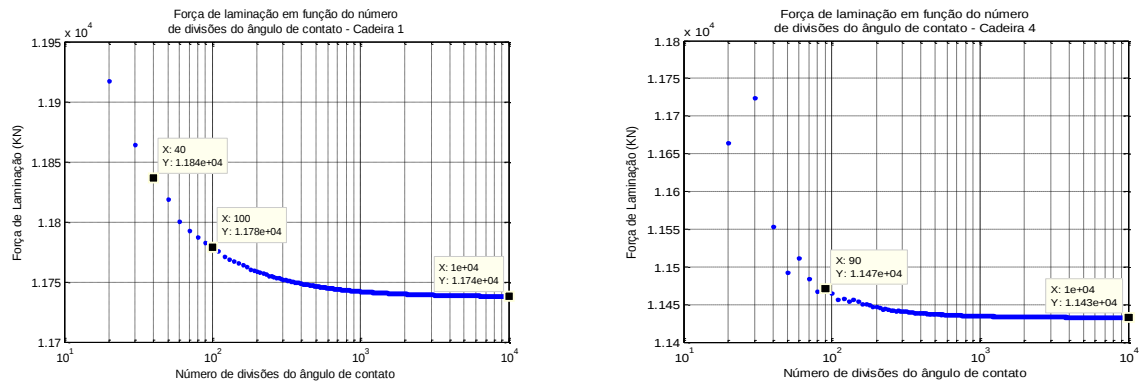


Figura 3-8 – Força de laminação em função do número de divisões do ângulo de contato para tira 2.261 x 0.482 x 1220 mm, cadeira 1 e 4

Tabela 3-5 – Forças de laminação calculadas para a tira 2.261 x 0.482 x 1220 mm usando o modelo de Bland e Ford

Entrada	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Cadeira 4
Força de laminação calculada (kN)	11175	11948	11509	11443

3.4 Otimização da Distribuição de Forças Entre Cadeiras

Sistemas de controle modernos são estruturados em níveis, sendo que os equipamentos componentes de um nível executam uma determinada função específica, interagindo com os níveis subjacentes, trocando informações e executando ações para que o processo produtivo funcione adequadamente. Esta organização foi proposta na norma ISA-88 (ANSI/ISA, 2010) pela *International Society of Automation* (ISA) e é baseada em diversas normas editadas pela mesma instituição. Os níveis são normalmente apresentados em uma pirâmide como mostrado na Figura 3-9, onde a base (Nível 0) é composta por instrumentos denominados “inteligentes” por processarem a informação física coletada do chão-de-fábrica e convertê-la em sinais elétricos ou lógicos que podem ser transmitidos por sinais elétricos ou por redes de dados rede para o próximo nível. Os dados produzidos por estes instrumentos são coletados por equipamentos de controle (Nível 1), responsáveis pelo controle do processo industrial através do envio de comandos executados imediatamente pelos instrumentos do Nível 0. Os equipamentos de controle recebem *inputs* de sistemas mais complexos, responsáveis pelo cálculo de *presets*, execução de modelos matemáticos e análise estatística de dados. Neste nível, denominado Nível 2, encontram-se os computadores industriais e de processo. O planejamento de produção, por sua vez, é realizado em um nível acima ou Nível 3, onde são considerados os recursos necessários à produção, tais como matéria-prima, disponibilidade de equipamentos e mão-de-obra. Os sistemas que compõem o Nível 3 interagem ainda com sistemas de níveis superiores ou Nível 4, tais como os sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*) e BI (*Business Intelligence*).

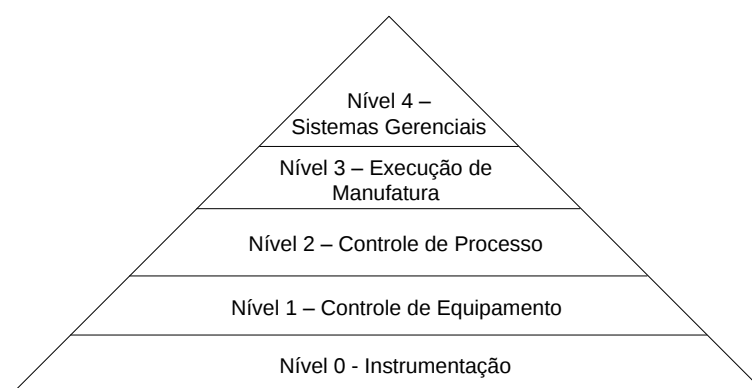


Figura 3-9 – Níveis de Sistemas de Controle – ISA 88¹⁴

Na laminação de tiras a frio em *tandem*, a distribuição equilibrada das forças nas cadeiras de laminação e as tensões entre as cadeiras é essencial para que seja atingida a espessura final desejada da tira processada e sua qualidade superficial. Esquemas de redução inadequados levam a

¹⁴ Fonte: (ANSI/ISA, 2010)

espessuras fora de especificação, marcas na tira por escorregamento, baixa planicidade, resultando na perda de material e consequentemente, custos elevados ao fabricante.

Nos laminadores modernos, incluindo o laminador estudado, o *setup* das forças de laminação e tensões entre as cadeiras é realizado por algoritmos executados em computadores dedicados, que recebem *inputs* de sistemas de execução de manufatura (Nível 3), dados do laminador a partir do controlador de processo (Nível 1) e parâmetros de produção configurados em tabelas de materiais definidas pelos especialistas em metalurgia (Sistema Nível 2), responsáveis pelo laminador. Baseado nestas informações, o esquema de laminação apropriado é calculado e enviado para o controlador de processo, que configura o equipamento (ajuste de forças de laminação e tensões entre as cadeiras, entre outros parâmetros) para a condição solicitada no esquema. A partir deste ponto, o controlador de processo é responsável pelo ajuste dinâmico dos parâmetros de laminação objetivando a obtenção do produto acabado conforme solicitado no esquema de laminação. A arquitetura dos níveis de controle de processo no laminador é mostrada na Figura 3-10.

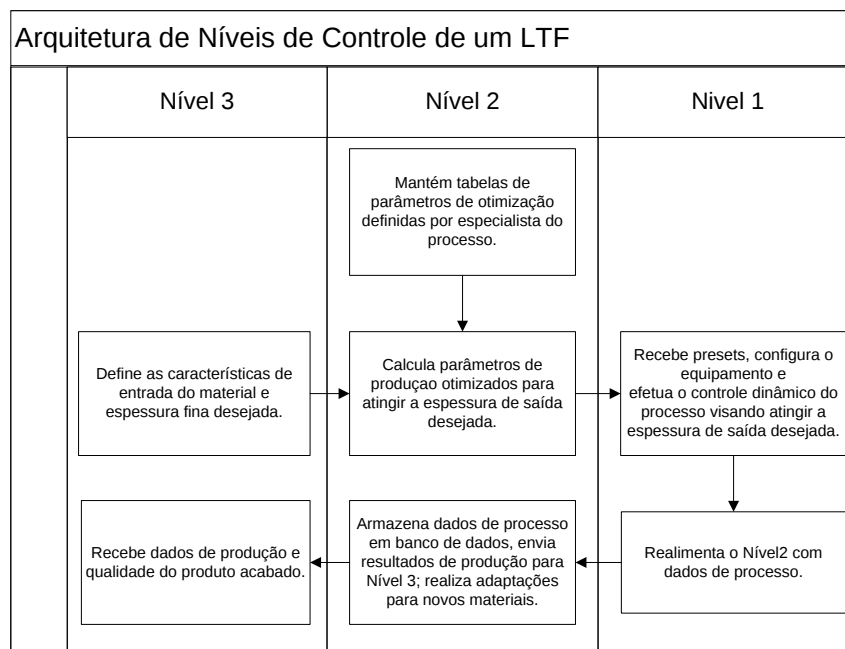


Figura 3-10 – Arquitetura de Níveis de Controle de um LTF

Na fase de otimização, são aplicadas a meta-heurística Recozimento Simulado e o Algoritmo Genético, definidos na Seção 2.5 para o cálculo das forças de laminação e tensão entre as cadeiras. Na Seção 3.4.1 será definida a representação da solução do problema. Na Seção 3.4.2 serão mostrados métodos de obtenção de uma solução inicial. Na Seção 3.4.3 será definida a função de custo a ser minimizada. Nas Seções 3.4.4 e 3.4.5 serão estruturados os algoritmos programados para a solução do problema. Os resultados obtidos são mostrados e analisados no Capítulo 4.

3.4.1 Representação de uma Solução

A força de laminação em uma cadeira pode ser obtida a partir do modelo de Bland e Ford, definido na Seção 2.4.2. A espessura de entrada h_1 e de saída h_2 da tira, além das tensões de entrada t_1 e saída t_2 em cada cadeira determinam a força de laminação, conhecidos os demais parâmetros. A espessura de saída da cadeira n é a espessura de entrada da cadeira $n + 1$ e assim por diante, até a saída do laminador. A relação $h = (h_i - h_{(i+1)}) / h_i$ determina o fator de redução de espessura da tira na cadeira i quando a pressão de laminação P é aplicada entre os cilindros. A tensão de entrada do laminador é definida como t_i e a tensão de saída $t_{(i+1)}$ até a saída da cadeira n .

A solução do problema pode ser representada como um vetor de $2(n + 1)$ posições, sendo n o número de cadeiras do laminador. A espessura de entrada no laminador ocupa a primeira posição do vetor e as espessuras de saída de cada cadeira as posições seguintes, até a posição $(n + 1)$. A tensão de entrada da cadeira 1 ocupa a posição $(n + 1) + 1$ do vetor e a tensão entre as cadeiras ocupa as posições seguintes, até $(n + 1) + (n + 1) = 2(n + 1)$. A Figura 3-11 mostra a localização de cada parâmetro relativo ao esquema de laminação e a Tabela 3-6 mostra a alocação do vetor solução.

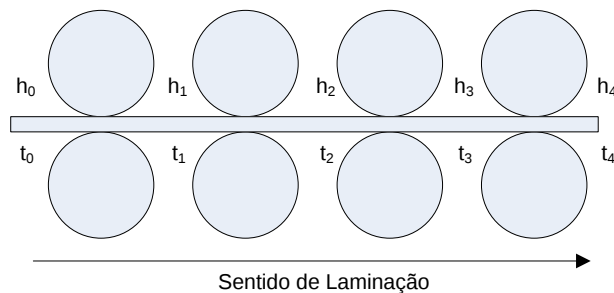


Figura 3-11 – Organização de variáveis de otimização

Tabela 3-6 - Representação de um vetor solução

	Espessuras					Tensões				
	h_0	h_1	h_2	h_3	h_4	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

3.4.2 Geração da Solução Inicial

A solução inicial é obtida a partir de um esquema de distribuição de reduções entre as cadeiras de laminação e o cálculo da força de laminação necessária para a execução destas reduções. As tensões de entrada e saída das cadeiras também precisam ser definidas, uma vez que influenciam diretamente na força de laminação. Para a aplicação da meta-heurística de Recozimento Simulado (RS), uma única solução inicial é necessária. Já para o Algoritmo Genético (AG) um conjunto de

pontos de partida ou indivíduos é necessária para que seja iniciado o processo de busca. Dois algoritmos de geração da solução inicial serão apresentados a seguir. O primeiro, proposto por Pires (2007), é utilizado como ponto de partida de um algoritmo de busca direta baseado no método Simplex, de Nelder e Mead e usado neste trabalho como ponto solução inicial do método RS. O segundo, estocástico, é usado na geração dos indivíduos aplicados no AG.

3.4.2.1 Método de Solução não iterativa para cálculo do Fator Beta β

De acordo com Pires, o método do fator Beta (β) proposto por Guo (1997), foi desenvolvido para assegurar que a redução de espessura em cada passe de um laminador reversível de uma única cadeira, estivessem dentro dos limites superior e inferior de redução estabelecidos para cada passe. Este conceito pode ser aplicado ao LTF em *tandem*, considerando cada cadeira do laminador em *tandem* como um passe do laminador reversível. Pires chama a atenção para o fato que um algoritmo de otimização possa necessitar de um elevado número de iterações para a convergência ou mesmo não ser capaz de convergir em função do esquema de laminação inicial definido. A seguir, é reproduzida a proposta de Guo e a solução dada por Pires, considerada melhor que a proposta original.

Guo define que um conjunto de reduções deve obedecer a seguinte equação:

$$r_i = \beta \cdot r_{ui} + (1 - \beta) \cdot r_{li} \quad i = 1, \dots, N \quad (3-1)$$

sendo N o número de passes; r_{ui} e r_{li} os limites superior e inferior de redução definido para o passe i ; $0 \leq \beta \leq 1$, um fator de interpolação entre os limites mínimo e máximo. As reduções são consideradas reduções convencionais em cada passe. A redução de espessura total para qualquer esquema de redução pode ser calculada como

$$r_t = 1 - \frac{h_f}{h_0} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - r_i) \quad (3-2)$$

sendo h_f a espessura final; h_0 a espessura de entrada do laminador, r_i a redução no passe i e r_t a redução total. As equações (3-1) e (3-2) podem ser agrupadas e usadas para a obtenção de uma equação em função de β :

$$\beta^{(n+1)} = \beta^n \frac{\prod_{i=1}^N [(1 - r_{li}) - \beta^n \cdot (r_{ui} - r_{li})] - \frac{h_n}{h_0}}{\sum_{j=1}^N (r_{uj} - r_{lj}) \cdot \prod_{i=1, i \neq j}^N [(1 - r_{li}) - \beta^n \cdot (r_{ui} - r_{li})]} \quad (3-3)$$

sendo n o número de iterações. Desta forma, conhecidas as espessuras de entrada e saída da tira e fixando os limites de redução de cada cadeira, a redução individual das cadeiras pode ser calculada pelo fator β .

A determinação do fator β proposta por Guo utiliza o método de Newton-Raphson, que depende de uma solução inicial próxima da solução ótima. Pires propõe um método não iterativo para o cálculo do fator β , utilizando o conceito de redução logarítmica em cada cadeira. A Equação (3-1) torna-se:

$$\varepsilon_i = \beta \cdot \varepsilon_{ui} + (1 - \beta) \cdot \varepsilon_{li} \quad i = 1, \dots, N \quad (3-4)$$

sendo N o número de cadeiras; ε_{ui} a redução logarítmica máxima na cadeira; ε_{li} a redução logarítmica mínima na cadeira; ε_i a redução logarítmica na cadeira. Os termos ε_{ui} , ε_{li} e ε_i são definidos como: $\varepsilon_i = \ln\left(\frac{1}{1-r_i}\right)$; $\varepsilon_{li} = \ln\left(\frac{1}{1-r_{li}}\right)$; $\varepsilon_{ui} = \ln\left(\frac{1}{1-r_{ui}}\right)$.

Considerando a soma destas reduções, tem-se:

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \beta \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{ui} + (1 - \beta) \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li} \quad (3-5)$$

A redução logarítmica total aplicada ao material é:

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \varepsilon_m = \beta \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{ui} + \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li} - \beta \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li} \quad (3-6)$$

Resolvendo para β , tem-se:

$$\beta = \frac{\varepsilon_m - \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li}}{\sum_{i=1}^N \varepsilon_{ui} - \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li}} \quad (3-7)$$

Conhecido o valor de β , pode-se determinar a redução logarítmica para cada cadeira através da Equação (3-4) e a redução convencional como:

$$r_i = 1 - \exp(\varepsilon_i)^{-1} \quad (3-8)$$

Dada a redução, a espessura de saída de cada cadeira pode ser obtida por:

$$h_{i+1} = (1 - r_i)h_i \quad (3-9)$$

Deve-se observar que este método produz um único esquema de reduções, mantidas as faixas de redução de cada cadeira. Este tipo de solução inicial única é adequado para o método de minimização aplicado por Pires na distribuição de forças em um LTF, baseado no algoritmo simplex de Nelder e Mead que depende de uma solução inicial factível para a convergência. Este método também é aplicado neste trabalho para a obtenção de uma solução inicial de distribuição de reduções utilizando o algoritmo RS, descrito na Seção 3.4.4.

3.4.2.2 Método Estocástico

Dada a espessura de entrada h_0 e saída h_f do laminador, é calculada a redução total pela equação $h = (h_0 - h_f) / h_0$. Um número aleatório entre 0 e 1 é obtido e multiplicado pelo fator de redução h , sendo o resultado utilizado com fator de redução de espessura para a primeira cadeira. A espessura de saída obtida é usada como espessura de entrada da próxima cadeira. Igualmente, um novo número aleatório é gerado e determinada a redução da cadeira. Este processo é repetido até a penúltima cadeira, sendo a redução restante imposta para a última cadeira. A Tabela 3-7 apresenta um exemplo de distribuição de reduções para a geração da solução inicial considerando um laminador composto por quatro cadeiras. A solução inicial obtida através deste método não é uma solução viável para aplicação direta na laminação, mas é adequada à utilização de meta-heurísticas que utilizam uma população inicial composta por soluções candidatas, como foi verificado no desenvolvimento do Algoritmo Genético proposto neste trabalho.

Tabela 3-7 - Exemplo de distribuição de reduções para geração de uma solução inicial

Cadeira	Espessura de Entrada (mm)	Espessura global de saída (mm)	Redução necessária (%)	Número aleatório entre 0 e 1	Redução (%)	Espessura de Saída (mm)
1	2,680	0,750	72%	0,704	51%	1,322
2	1,322	0,750	43%	0,286	12%	1,158
3	1,158	0,750	35%	0,751	26%	0,852
4	0,852	0,750	12%		12%	0,750

3.4.3 Modelo de Distribuição de Forças no Laminador de Tiras a Frio

Na laminação a frio em *tandem*, ao menos três modos de utilização das cadeiras de laminação são aplicados: redução, potência e força. A escolha de cada modo depende diretamente da capacidade do laminador em obter a espessura de saída do material, dadas às condições operacionais. Independentemente do modo empregado, a redução na última cadeira de laminação é sempre mantida baixa, uma vez que esta cadeira é usada para o acabamento superficial da tira, sendo a redução de espessura mantida entre 2% a 6%. As demais cadeiras participam do modo de

distribuição de força escolhido. Quando um modo de operação é selecionado, restrições inerentes aos demais modos são impostas ao processo: se o modo de redução de espessura é usado, a potência usada de cada cadeira não pode ultrapassar a potência útil da mesma. Se o modo de distribuição de potência é usado, a redução de espessura em uma determinada cadeira não pode ultrapassar um limite máximo de redução de espessura, que pode resultar em perda de qualidade do material. Se o modo de distribuição de força for escolhido, as restrições de potência e redução se aplicam. Desta forma, a função custo a ser minimizada deve levar em consideração: a força de laminação, os limites de redução de espessura impostos, a potência disponível de cada cadeira e as tensões entre as cadeiras. A função a ser minimizada pode ser escrita como:

$$J(r, p, f) = \arg \min(c_{R1}J_{redução} + c_{P1}J_{potência} + c_{F1}J_{força}) \quad (3-10)$$

$$\text{sujeito a } \begin{cases} c_{R2}R_{redução} \\ c_{P2}R_{potência} \\ c_{F2}R_{força} \\ c_{T2}R_{tensão} \end{cases}$$

sendo J o custo total; J_R , J_P e J_F os custos de redução de espessura, potência e força em todas as cadeiras respectivamente; R_R , R_P , R_F , R_T as restrições de redução de espessura, potência, força e tensão; c_{R1} , c_{P1} , c_{F1} o peso associado aos respectivos custos; c_{R2} , c_{P2} , c_{F2} , c_{T2} o peso associado às respectivas restrições

Os algoritmos propostos utilizam uma única função objetivo que deve ser minimizada, sendo necessária a obtenção de uma única equação que contemple a função objetivo e as restrições. Isto pode ser obtido considerando as restrições somadas à função objetivo, com pesos específicos. Desta forma, a equação (3-10) pode ser reescrita como:

$$J = c_{R1}J_R + c_{P1}J_P + c_{F1}J_F + c_{R2}R_R + c_{P2}R_P + c_{F2}R_F + c_{T2}R_T \quad (3-11)$$

A seguir, cada função de custo e restrição é apresentada. Na Seção 3.4.3.5, os pesos das funções para os modos de cálculo de referências no laminador serão definidos.

3.4.3.1 Função Custo e Restrições de Redução de Espessura

No modo de operação de distribuição de redução de espessura, as reduções desejadas em cada cadeira são especificadas por material e podem ser subdivididas em faixas de largura e redução total. Neste modo, o modelo matemático é direcionado a determinar as forças de laminação necessárias que devem ser aplicadas em cada cadeira de forma a obter as reduções desejadas. É claro, os limites de torque e potência de cada cadeira devem ser respeitados, pois, do contrário, as reduções desejadas não serão obtidas.

A redução de espessura em uma cadeira é definida como:

$$r_i = \frac{h_i - h_{(i+1)}}{h_i}, i = 1, \dots, n \quad (3-12)$$

sendo h_i a espessura de entrada na cadeira i ; $h_{(i+1)}$ a espessura de saída da cadeira i ; r_i a redução de espessura na cadeira i .

A função custo no padrão de distribuição de reduções é definida como:

$$J_R = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}}{\frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}} - 1 \right| \quad (3-13)$$

sendo i uma cadeira de 1 a n ; r_i e R_i a redução calculada e a redução desejada para a cadeira i obtidas através da equação (3-12); J_R o custo da distribuição de redução.

Os somatórios $\sum_{i=1}^n r_i$ e $\sum_{i=1}^n R_i$ na Equação (3-13) permitem a normalização das reduções calculadas e objetivadas respectivamente, permitindo a aplicação desta equação em conjunto com as demais, mostradas a seguir, para a composição da função de custo total.

A Tabela 3-8 apresenta uma distribuição real de reduções de espessura, usada na laminação de uma tira de aço do material DP600, com espessura de entrada de 2.89 mm e saída 1.00 mm, 1254 mm de largura. As reduções calculadas e esperadas são normalizadas para fins de comparação. Os custos de redução individual e total são mostrados.

Tabela 3-8 – Distribuição real de redução de espessura para o material DP600, 2.26 x 0.48 x 1254 mm

	Entrada	Saída Cad. 1	Saída Cad. 2	Saída Cad. 3	Saída Cad. 4	Total
Espessura	2.8900	1.9320	1.3780	1.0200	1.0000	
Redução Calculada		0.3315	0.2867	0.2598	0.0196	0.8976
Redução Esperada		0.3700	0.3200	0.2900	0.0200	1.0000
Redução Calculada Normalizada		0.3693	0.3194	0.2894	0.0218	1.0000
Redução Esperada Normalizada		0.3700	0.3200	0.2900	0.0200	1.0000
Custo		0.0019	0.0017	0.0020	0.0922	0.0978

Como as espessuras de entrada e saída do laminador não podem ser alteradas, já que a primeira é um parâmetro do material e a última é a especificação do produto final desejado, a alteração em qualquer espessura intermediária resulta na alteração da função custo. Como esperado, a alteração de espessura nas primeiras cadeiras tem um peso menor na função custo que a alteração na última cadeira, devido à margem estreita de redução possível nesta cadeira. As tabelas

abaixo apresentam a influência da alteração de 0.01 mm na espessura de saída das cadeiras 1 a 3, evidenciando este comportamento esperado da função custo.

Tabela 3-9 – Distribuição real de redução de espessura para o material DP600, 2.26 x 0.48 x 1254 mm.
Alteração de + 0.01 mm na saída da Cadeira 1

	Entrada	Saída Cad. 1	Saída Cad. 2	Saída Cad. 3	Saída Cad. 4	Total
Espessura	2.8900	1.9420	1.3780	1.0200	1.0000	
Redução Calculada		0.3280	0.2904	0.2598	0.0196	0.8979
Redução Esperada		0.3700	0.3200	0.2900	0.0200	1.0000
Redução Calculada Normalizada		0.3654	0.3235	0.2894	0.0218	1.0002
Redução Esperada Normalizada		0.3700	0.3200	0.2900	0.0200	1.0000
Custo		0.0123	0.0111	0.0020	0.0922	0.1176

Tabela 3-10 – Distribuição real de redução de espessura para o material DP600, 2.26 x 0.48 x 1254 mm.
Alteração de + 0.01 mm na saída da Cadeira 2

	Entrada	Saída Cad. 1	Saída Cad. 2	Saída Cad. 3	Saída Cad. 4	Total
Espessura	2.8900	1.9320	1.3880	1.0200	1.0000	
Redução Calculada		0.3315	0.2816	0.2651	0.0196	0.8978
Redução Esperada		0.3700	0.3200	0.2900	0.0200	1.0000
Redução Calculada Normalizada		0.3693	0.3137	0.2954	0.0218	1.0002
Redução Esperada Normalizada		0.3700	0.3200	0.2900	0.0200	1.0000
Custo		0.0019	0.0197	0.0185	0.0922	0.1323

Tabela 3-11 – Distribuição real de redução de espessura para o material DP600, 2.26 x 0.48 x 1254 mm.
Alteração de + 0.01 mm na saída da Cadeira 3

	Entrada	Saída Cad. 1	Saída Cad. 2	Saída Cad. 3	Saída Cad. 4	Total
Espessura	2.8900	1.9320	1.3780	1.0300	1.0000	
Redução Calculada		0.3315	0.2867	0.2525	0.0291	0.8999
Redução Esperada		0.3700	0.3200	0.2900	0.0200	1.0000
Redução Calculada Normalizada		0.3693	0.3194	0.2813	0.0324	1.0025
Redução Esperada Normalizada		0.3700	0.3200	0.2900	0.0200	1.0000
Custo		0.0019	0.0017	0.0299	0.6224	0.6559

A Equação (3-13) contempla apenas a condição em que a distribuição de reduções desejada para o material é atingida. No entanto, a espessura de saída objetivada deve obrigatoriamente ser alcançada. Para isto, a espessura de saída deve ser tratada como restrição em qualquer modo de obtenção de referências de operação do laminador, definida como:

$$R_R = \left| h_f - h_0 \cdot \prod_{i=1}^n (1 - r_i) \right| \quad (3-14)$$

sendo h_f a espessura desejada de saída, h_0 a espessura de entrada do material no laminador; r_i a redução de espessura na cadeira i ; n o número de cadeiras do laminador.

Deve-se observar que a redução de espessura total, independentemente do tipo de laminador é sempre menor que a unidade, não sendo necessária a normalização.

3.4.3.2 Função Custo e Restrições de Potência

Em cada cadeira de laminação, ao menos um motor é utilizado para imprimir o torque necessário ao processo. Por razões de padronização visando à redução de custo de manutenção e sobressalentes, é comum a utilização de motores idênticos em todas as cadeiras. Ainda, podem ser usados mais de um motor por cadeira, o que se aplica normalmente às cadeiras intermediárias. No laminador em estudo, composto de quatro cadeiras, após uma modernização prevendo a inclusão de mais uma cadeira de laminação que seria instalada antes da primeira, denominada “cadeira zero”, foi instalado um motor adicional na primeira cadeira. Assim, o laminador passou a contar com as três cadeiras iniciais com a mesma potência disponível. Os limites de potência e velocidade do laminador estudado são mostrados na Tabela 3-12.

Tabela 3-12 – Dados de Potência do LTF em *Tandem* da Arcelor Mittal Vega

Cadeira		1	2	3	4
Número de Motores		2	2	2	1
Potência Instalada (KW)	P_i	6000	6000	6000	3000
Fator Utilização	α_i	0.9167	0.9167	0.9167	1.0000
Potência útil (KW)		5500.2	5500.2	5500.2	3000

A função custo de distribuição de potência pode ser modelada como:

$$J_P = \sum_{i=1}^n \left| \left(\frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} - \frac{P_i}{\max(1, \sum_{i=1}^n P_i) \cdot \min(1, \sum_{i=1}^n P_i)} \right) \right| \quad (3-15)$$

sendo i o índice de uma cadeira de 1 a n ; p_i a potência calculada para uma cadeira; P_i a contribuição de potência requerida para a cadeira; J_P o custo total da distribuição de potência no laminador.

O termo $\sum_{i=1}^n p_i$ na Equação (3-15) normaliza a potência calculada p_i para a cadeira i . A normalização também é aplicada à contribuição de potência requerida para cada cadeira, com a utilização do termo $\max(1, \sum_{i=1}^n P_i) \cdot \min(1, \sum_{i=1}^n P_i)$.

A Tabela 3-13 apresenta a potência real utilizada na laminação de uma bobina de aço do material DP600, usando a distribuição de redução. Considerando que o laminador possui a mesma potência instalada nas cadeiras 1 a 3 e metade desta potência instalada na cadeira 4, se o modo de

distribuição de forças fosse aplicado neste caso, as cadeiras 1 a 3 deveriam contribuir com 2/7 da potência total e a cadeira 4 com apenas 1/7. Esta configuração pode ser facilitada usando a distribuição de potência desejada conforme mostrado na tabela e aplicando-se o fator de normalização $(0.50 + 0.50 + 0.50 + 0.25) = 1.75$. Normalizando também a potência calculada, o custo total pode ser facilmente obtido. Neste exemplo, como foi usado o modo de distribuição de redução em detrimento ao modo potência, pode-se verificar o valor elevado do custo calculado.

Tabela 3-13 - Distribuição real de potência para o material DP600, 2.26 x 0.48 x 1254 mm.

	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Cadeira 4	Total
Distribuição desejada	0.5000	0.5000	0.5000	0.2500	1.7500
Potência calculada (KW)	2905.0	4478.0	4613.0	1691.0	13687.0
Dist. desejada normalizada	0.2857	0.2857	0.2857	0.1429	1.0000
Potência calculada normalizada	0.2122	0.3272	0.3370	0.1235	1.0000
Custo	0.2571	0.1451	0.1796	0.1352	0.7170

A utilização excessiva da potência disponível em uma cadeira pode resultar em uma redução de espessura acima do esperado, podendo ocasionar o desvio horizontal da tira durante o processo e consequentemente seu rompimento, resultando em perda de material, danos ao laminador e perda de produção. A subutilização da potência disponível também não é desejada, pois resulta em baixa redução de espessura, baixa produtividade e causa instabilidade no controle de espessura. Desta forma, torna-se necessária a restrição da potência mínima e máxima empregada em cada cadeira. A função de restrição de potência pode ser modelada como:

$$R_P = \sum_{i=1}^n \lambda_{pli} \cdot |\min(0, p_i - \tau_{pli}(P_i))| + \sum_{i=1}^n \lambda_{pui} \cdot |\max(p_i, \tau_{pui}(P_i) - p_i)| \quad (3-16)$$

sendo i uma cadeira de 1 a n ; λ_{pli} e λ_{pui} , respectivamente, os pesos aplicados à restrição de utilização mínima e máxima da potência disponível na cadeira i ; p_i a potência calculada; P_i a potência disponível; τ_{pli} e τ_{pui} os fatores de limitação da potência mínima e máxima de utilização da cadeira para um material específico; R_P a restrição total de potência.

3.4.3.3 Função Custo e Restrições de Força

A modelagem da função custo e restrições de força utilizada em cada cadeira para a redução da espessura do material segue a mesma estrutura da função custo e restrições de potência. A função custo de força pode ser modelada como:

$$J_f = \sum_{i=1}^n \left| \left(\frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} - \frac{\beta_i F_i}{\max(1, \sum_{i=1}^n \beta_i F_i) \cdot \min(1, \sum_{i=1}^n \beta_i F_i)} \right) \right| \quad (3-17)$$

sendo i uma cadeira de 1 a n ; f_i a força calculada para a respectiva cadeira; β_i o fator de utilização da força disponível na cadeira para um material específico; J_f a função custo de força.

A imposição da força desejada para qualquer cadeira de laminação é modelada como uma restrição da força específica disponível na cadeira, ou seja, a força por unidade de largura da tira. Ainda, a força de laminação não deve ultrapassar o limite máximo de força disponível na cadeira. Estas restrições podem ser modeladas como:

$$R_F = \sum_{i=1}^n \lambda_{Fe_i} \left| \frac{\frac{f_i}{w} - \frac{F_{emin_i} + F_{emax_i}}{2}}{\frac{F_{emin_i} + F_{emax_i}}{2}} \right| + \sum_{i=1}^n \lambda_{Fmax_i} \max \left(0, \frac{f_i - F_i}{F_i} \right) \quad (3-18)$$

sendo i uma cadeira de 1 a n ; λ_{Fe_i} a penalidade aplicada à força específica imposta; f_i a força calculada; w a largura da tira; F_{emin_i} e F_{emax_i} os limites mínimo e máximo de força específica imposta; λ_{Fmax_i} a penalidade aplicada a restrição de força máxima; F_i a força disponível na cadeira.

A Tabela 3-14 apresenta os parâmetros da função de restrição que serão usadas neste trabalho. Elas são idênticas às utilizadas no laminador em estudo, já aplicadas por este autor antes da elaboração deste projeto, para permitir que o sistema de controle do laminador pudesse utilizar referências de força adequadas ao acabamento da tira, uma vez que o modelo utilizado atualmente não permite a combinação de modos de operação. Esta funcionalidade será obtida com a aplicação dos modelos que serão desenvolvidos neste trabalho.

A força de laminação é imposta apenas na última cadeira. Já as restrições de força máxima são definidas para todas as cadeiras. Estas restrições se aplicam a todos os materiais produzidos no laminador.

Tabela 3-14 – Parâmetros da função de restrição de força

Cadeira	$\bar{F}$ (tf/m)	F_{emin} (tf/m)	F_{emax} (tf/m)	λ_{Fe}	λ_{Fmax}
Faixa de redução 0 a 65%					
1 a 3	1500	0	3000	0	100
4	850	800	900	10	100
Faixa de redução 65% a 99%					
1 a 3	1500	0	3000	0	100
4	1050	1000	1100	10	100

3.4.3.4 Restrições de Tensão

A tira está sujeita às tensões na entrada, saída e entre as cadeiras no laminador, como mostrado na Figura 3-11. O controle destas tensões é essencial para o processo, pois influenciam diretamente na força, tração e potência necessárias à redução de espessura do material. No laminador estudado, um conjunto mecânico composto por dois rolos motorizados, denominado *bridle roll* atua de forma a conter o avanço da tira na entrada do laminador e consequentemente, permitindo que haja tensão na entrada do equipamento. Entre as cadeiras de laminação, a tensão é controlada pelo aumento e redução dinâmicos de velocidade das cadeiras subsequentes, pelo sistema de controle do laminador, que atua continuamente para a manutenção da tensão definida para o processo. Por último, a tensão de saída do laminador deve ser compatível com o próximo processo e deve ser suficiente para que as espiras formadas durante o bobinamento da tira não cedam com a movimentação da bobina entre os processos. Ao mesmo tempo, não deve ser excessiva, podendo causar o escorregamento das espiras durante o bobinamento e consequentemente, marcas ou aranhões no material, reduzindo a qualidade do produto acabado. Se o próximo processo for o Recozimento em Caixa, baixa tensão de bobinamento inviabiliza o empilhamento das bobinas devido ao espiralamento, quando a bobina é erguida com o eixo de bobinamento na vertical e o excesso resulta no colamento das espiras durante o processo, inutilizando a bobina.

As tensões desejadas em todas as zonas do laminador são definidas pela equipe de especialistas do processo, como tensão específica (MPa) para cada tipo de material, com valores distintos, em faixas de redução total e largura da tira. A tensão de bobinamento, como descrito acima, é definida também em função do próximo processo produtivo que a tira será submetida. As tensões específicas usadas na laminação do aço DP600 no laminador estudado são mostradas na Tabela 3-15.

Tabela 3-15 – Exemplo de tensões específicas para laminação do aço DP600

Redução Total (%)		Largura (mm)		Tensão Específica (MPa)				Saída
Min	Max	Min	Máx	Entrada	Vão Cadeiras 1-2	Vão Cadeiras 2-3	Vão Cadeiras 3-4	
35	60	750	1900	60	170	180	190	25
60	70	750	1900	60	170	200	220	25
70	99	750	1900	60	180	200	200	25

As tensões absolutas calculadas devem estar dentro da faixa operacional para cada zona do laminador. Assim, a função de restrição de tensões em cada cadeira pode ser definida como:

$$R_T = \sum_{j=1}^{n+1} \lambda_{T_j} \left| \frac{t_j - \frac{T_{min_j} + T_{max_j}}{2}}{\frac{T_{min_j} + T_{max_j}}{2}} \right| \quad (3-19)$$

sendo j a tensão de entrada da cadeira 1 a n e $j = n + 1$ a tensão de saída da cadeira n ; λ_{T_j} o peso da restrição da tensão j ; t_j a tensão calculada; T_{min_j} e T_{max_j} os limites mínimo e máximo de tensão respectivamente.

Os limites de tensão absoluta do laminador estudado são mostrados na Tabela 3-16.

Tabela 3-16 – Limites de tensão absoluta

Tensão Absoluta	Entrada	Vão Cadeiras 1-2	Vão Cadeiras 2-3	Vão Cadeiras 3-4	Saída
Mínimo (tf)	1	5	5	5	0.2
Máximo (tf)	30	85	75	70	20

3.4.3.5 Escolha dos Coeficientes da Função Custo

A função custo definida na Equação (3-11) permite que o cálculo de referências do laminador possa ser realizado visando à distribuição de reduções entre as cadeiras, potências ou forças, ao mesmo tempo em que são aplicadas as restrições de redução, potência, força e tensão necessárias a obtenção do produto acabado, de acordo com os limites de qualidade esperados. A seleção do modo de geração de referências é realizada através da definição dos pesos aplicados aos fatores da função de custo.

A seleção de um modo de geração de referências depende da escolha do especialista do processo. No laminador estudado, o modo de distribuição de redução é aplicado para a maioria dos materiais. Em alguns casos, devido à dureza elevada do material, é necessária a utilização plena de potência do laminador, sendo aplicado o modo de distribuição de potência. O modo de distribuição de força não é aplicado.

As restrições impostas pelos limites de operação do laminador modeladas através das Equações (3-14), (3-16) e (3-19) podem ser aplicadas em conjunto na função custo, independentemente do modo de geração de referências escolhido. Os pesos das restrições devem ser maiores que o peso usado no modo de geração de referências para que tenham efeito esperado. A restrição da redução de saída definida na Equação (3-14) deve prevalecer sobre as demais, uma vez que a espessura desejada de saída do laminador deve necessariamente ser obtida. Já as restrições de potência e força, como definidas nas Equações (3-16) e (3-17), podem ser parametrizadas de acordo com a necessidade em uma cadeira específica, com a aplicação de pesos por cadeira ou para toda a função, com a utilização dos pesos c_{P2} e c_{F2} .

A Tabela 3-17 apresenta os coeficientes aplicados à função custo estimados para o funcionamento dos algoritmos de otimização que serão aplicados de forma a minimizar a função custo global. Três modos de operação serão definidos: distribuição de redução, distribuição de potência e por último, um modo misto, baseado na distribuição de redução, com imposição de força de laminação na última cadeira. Vale ressaltar que o modelo atual em operação no laminador estudado não permite a parametrização combinada de funções de custo e restrições como proposto neste trabalho, de forma que o último modo de operação, distribuição de reduções com força imposta na última cadeira não é possível atualmente. Estes coeficientes foram ajustados durante as simulações e avaliação dos resultados.

Tabela 3-17 – Estimativa de coeficientes da função custo para geração de referências

Parâmetro	Modo de Operação		
	Redução	Potência	Misto
C_{R1}	1	0	1
C_{P1}	0	1	0
C_{F1}	0	0	1
C_{R2}	20	20	20
C_{P2}	20	20	20
C_{F2}	20	20	20
C_{T2}	10	10	10

A seguir, serão apresentados os algoritmos usados para a minimização da função custo definida pela Equação (3-11). No Capítulo 3.5.1 serão mostrados os resultados da otimização utilizando estes algoritmos.

3.4.4 Minimização da Função Custo pela Meta-heurística de Recozimento Simulado

A meta-heurística Recozimento Simulado é aplicada neste trabalho para a busca do mínimo global da função custo, em conjunto com o Método do Gradiente, para refinar periodicamente a melhor solução encontrada ao final de cada laço de iterações da meta-heurística numa mesma temperatura, até o “congelamento” do sistema.

A solução inicial é gerada pelo método não iterativo de obtenção do fator Beta (β) proposto por (PIRES, 2007) e reproduzido na Seção 3.4.2.1. Este método foi escolhido em detrimento ao método estocástico após a realização de testes comparativos de execução do algoritmo para uma bobina, uma vez que este último nem sempre constrói soluções iniciais factíveis, demanda um tempo elevado de processamento ou resulta em soluções finais infactíveis. As comparações dos resultados obtidos nas simulações para a determinação do algoritmo empregado encontram-se no Apêndice A.

A temperatura inicial é definida por simulação como descrito na Seção 2.5.1.2. Em seguida, a meta-heurística Recozimento Simulado mostrada na Seção 2.5.1.1 é utilizada para a busca da melhor

solução. Ao término do ciclo de avaliação da temperatura atual, o Método do Gradiente definido na Seção 2.5.3 é usado para refinar a melhor solução encontrada. A melhor solução (espessuras de saída de cada cadeira e tensões entre as cadeiras) é retornada, bem como a redução, força de laminação, torque e potência obtidos para cada cadeira.

Para o funcionamento da meta-heurística Recozimento Simulado na minimização da função custo do problema proposto, faz-se necessária a definição de uma estrutura de vizinhança e do movimento utilizado em uma mesma faixa de temperatura para a busca do conjunto de parâmetros que melhore a solução atual. A estrutura de vizinhança e o movimento usado neste trabalho são descritos a seguir.

Dada uma solução s , para se encontrar s' , onde s' é um vizinho de s , é aplicado o seguinte movimento: alteração da espessura de saída de uma cadeira. A alteração consiste em:

1º - Escolha de uma cadeira, entre 1 e $n - 1$ onde n é o número de cadeiras do laminador. A última cadeira nunca pode ter sua espessura de saída alterada, pois é um requisito do produto final.

2º - Definição de uma espessura a ser somada ou subtraída da cadeira. O passo a ser utilizado é definido como $\Delta r = rand[0,1] \cdot \psi$, sendo ψ um parâmetro do problema.

3º - Definição da operação soma ou subtração a ser aplicada: um número aleatório $z \in [0,1]$ é gerado. Se $z \geq 0.5$, a adição é selecionada; do contrário, a operação subtração é escolhida.

4º - Aplicação do movimento. Como exemplo, aplicando-se o movimento de adição com um passo de 0.002 mm na saída da cadeira 1, o novo vetor de espessuras é dado pela Tabela 3-18.

Tabela 3-18 – Exemplo de aplicação de movimento no algoritmo RS

Solução	Espessura da tira (mm)				
	h_0	h_1	h_2	h_3	h_4
s	2.680	1.320	1.170	0.852	0.700
s'	2.680	1.322	1.170	0.852	0.700

As tensões de entrada, entre as cadeiras e saída são mantidas constantes durante a otimização, em seus valores máximos. Uma vez definidas as tensões e espessuras de entrada e saída de cada cadeira, o método de cálculo de forças de Bland e Ford é aplicado, seguido do cálculo de tração e potência. A função custo é avaliada e o resultado utilizado para guiar o algoritmo na busca do valor ótimo global. O algoritmo é executado até o congelamento do sistema, ou seja, atingida a temperatura mínima especificada ou que a função custo calculada apresente um valor menor ou igual a um valor mínimo especificado. Os valores da função objetivo, bem como o conjunto de dados calculados para cada iteração de melhora são armazenados em uma estrutura de dados adequada para a análise e comparação com os resultados obtidos da otimização usando os outros algoritmos definidos a seguir.

O pseudocódigo do algoritmo proposto é mostrado na Figura 3-12.

```

Algoritmo RSProposto(Params)
  Espessuras ← GeraSoluçãoInicial(MétodoFatorBeta);
  Custos ← CalculaCustos(Espessuras);
  TemperaturalInicial ← CalculaTemperaturalInicial(Custos);
  Espessuras ← Resfriamento(Espessuras,Custos, TemperaturalInicial);
  Retorna Espessuras;
Fim AGProposto.

```

Figura 3-12 - Pseudocódigo do Algoritmo de Recozimento Simulado proposto

3.4.5 Minimização da Função Custo Através de Algoritmo Genético

A utilização de Algoritmos Genéticos para a determinação do coeficiente de atrito μ a partir da força de laminação e tensões medidas, além das propriedades do material laminado é proposta por (DUROVSKY, ZBORAY e KERKOVA, 2008). A dureza do material é considerada constante, e a força de laminação medida é usada para o cálculo do coeficiente de atrito. A função custo (*fitness*) é definida como a diferença entre a força medida e a força calculada usando a modelagem tradicional de Bland e Ford e as deformações elásticas na entrada e saída do laminador em função da tensão aplicada. Após a obtenção de uma solução aproximada, é utilizado um algoritmo de busca local (*hill climbing*) para o refinamento da solução. No trabalho de Durovsky et al., a solução foi desenvolvida utilizando-se um computador equipado com processador Athlon 2.5 GHz e o pacote de software Matlab® com o toolbox de Algoritmos Genéticos. Não foram apresentados resultados quantitativos que permitissem a avaliação da eficiência do método utilizado, com exceção do tempo de processamento de 50 segundos para a obtenção de uma solução para uma única cadeira de laminação, o que é inviável para um processo real.

Neste trabalho, um Algoritmo Genético foi desenvolvido para a otimização da função custo definida na Seção 3.4.3 e não apenas o cálculo do coeficiente de atrito. Os resultados obtidos foram comparados com os produzidos pelos demais métodos de otimização propostos nesta Seção. As definições do funcionamento do algoritmo genético proposto são apresentadas abaixo.

1º - Um indivíduo é composto por um conjunto de espessuras de entrada e saída fixas, com espessuras intermediárias definidas de forma aleatória, conforme descrito na Seção 3.4.2.2. Um conjunto composto por um número fixo de indivíduos é considerado como população inicial;

2º - Os indivíduos da população são selecionados aleatoriamente e disputam um torneio dois a dois. O vencedor de um torneio é o indivíduo com a melhor função objetivo e pode participar da geração da nova população, através do cruzamento. Esta abordagem elitista mostrou-se eficaz na geração de soluções do problema em análise;

3º - Os indivíduos selecionados na etapa anterior formam pares, a partir da escolha aleatória destes indivíduos, e participam do processo de cruzamento. O cruzamento dá origem a um novo indivíduo e consiste na alteração da espessura de saída de uma cadeira, limitada às espessuras de entrada e saída da cadeira de um dos pais. As demais espessuras são copiadas do pai utilizado na

obtenção dos limites de espessura. A função custo é calculada para cada novo indivíduo gerado. Cada par de pais dá origem a dois indivíduos e se não houver cruzamento, cada pai é considerado um filho;

4º - Alguns indivíduos gerados podem sofrer mutação, com uma baixa probabilidade. A mutação neste caso consiste na alteração da espessura de saída do material em uma cadeira de laminação distinta dos limites impostos pelas reduções previstas da mesma cadeira para os pais;

5º - A geração atual e a nova geração são agrupadas e selecionados os melhores indivíduos (aqueles que possuem a menor função custo calculada) de ambas as gerações, resultando em uma população do mesmo tamanho da população inicial;

6º - O melhor indivíduo da nova população é copiado para uma lista de melhores indivíduos de todas as gerações, para análise do refinamento da solução. Caso sua função custo seja inferior ao custo mínimo esperado, o processo de evolução é interrompido; as espessuras de entrada e saída de cada cadeira associadas ao indivíduo são utilizadas no cálculo das reduções de espessura de cada cadeira e os valores obtidos são retornados;

7º - Uma nova população é gerada e participa do processo de evolução (cruzamento, mutação, seleção) com os melhores indivíduos da população atual;

8º - O processo é interrompido quando o número máximo de gerações é atingido ou a função custo calculada para o melhor indivíduo de todas as gerações é menor ou igual ao valor mínimo desejado. As espessuras de entrada e saída de cada cadeira associadas ao indivíduo são utilizadas no cálculo das reduções de cada cadeira e os valores obtidos são retornados.

A seguir é apresentado um exemplo da utilização do algoritmo genético proposto para a otimização da função custo descrita Seção 3.4.3. Apenas o valor final calculado da função custo calculado é mostrada.

Exemplo: Obter o esquema de redução de espessura da bobina D5144721 de 3.375 mm para 0.758 mm (redução total de espessura de 77,55%) considerando os parâmetros do laminador mostrados na Tabela 3-19. A configuração do algoritmo genético é dada na Tabela 3-20.

Tabela 3-19 – Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – parâmetros de entrada

Parâmetro	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Cadeira 4
Redução de espessura desejada (%)	36.00	32.00	30.00	2.00
Tensão de entrada (MPa)	51.11	120.1	152.9	183.6
Tensão de saída (MPa)	120.10	152.90	183.60	49.10
Redução mínima (%)	25.00	0.20	0.20	1.00
Redução máxima (%)	50.00	50.00	50.00	3.00
Coefficiente de atrito tira – cilindro	0.017	0.020	0.016	0.095

Parâmetro	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Cadeira 4
Potência mínima (KW)	1500	1500	1500	1500
Potência máxima (KW)	1500	1500	1500	1500
Força mínima (tf)	100	100	100	100
Força máxima (tf)	3000	3000	3000	3000

Tabela 3-20 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – parâmetros do algoritmo

Parâmetro	Valor
Curva de fluxo do material	$\alpha=63.09$; $\beta=0.21$; $\gamma=0$; Offset = 15
Módulo de elasticidade da tira e do cilindro	230 GPa
Fator de cruzamento	0.98
Fator de mutação	0.02
Número máximo de gerações	100
Número de indivíduos	10

1ª etapa: Criação da população inicial– Cada indivíduo é composto por um conjunto de espessuras (Tabela 3-21):

Tabela 3-21 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – Etapa 1

Indivíduo (1ª Geração)	Espessuras					Custo (Fitness)
$l1_1$	3.375	3.152	2.924	1.504	0.758	104.72
$l2_1$	3.375	2.343	1.834	0.942	0.758	33.28
$l3_1$	3.375	3.145	2.306	1.844	0.758	112.79
$l4_1$	3.375	1.446	1.101	0.921	0.758	35.26
$l5_1$	3.375	3.354	3.297	2.161	0.758	124.64
$l6_1$	3.375	3.286	3.173	2.529	0.758	121.88
$l7_1$	3.375	2.890	2.551	1.998	0.758	127.69
$l8_1$	3.375	3.362	3.346	2.504	0.758	121.88
$l9_1$	3.375	3.123	2.764	2.664	0.758	123.48
$l10_1$	3.375	2.568	1.207	1.137	0.758	74.72

2ª etapa: Seleção aleatória de indivíduos para torneio 2 a 2. O vencedor é o indivíduo que apresenta o menor custo. São selecionados n indivíduos, sendo n o número de indivíduos da população inicial (Tabela 3-22).

Tabela 3-22 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – Etapa 2

Torneio	Indivíduos	Vencedor	Torneio	Indivíduos	Vencedor
1	(I4 ₁ ;I5 ₁)	I4 ₁	2	(I4 ₁ ;I6 ₁)	I4 ₁
3	(I3 ₁ ;I1 ₁)	I1 ₁	4	(I3 ₁ ;I7 ₁)	I3 ₁
5	(I5 ₁ ;I1 ₁)	I1 ₁	6	(I2 ₁ ;I8 ₁)	I2 ₁
7	(I5 ₁ ;I2 ₁)	I2 ₁	8	(I5 ₁ ;I8 ₁)	I5 ₁
9	(I1 ₁ ;I5 ₁)	I1 ₁	10	(I4 ₁ ;I1 ₁)	I3 ₁

3ª etapa: Seleção de indivíduos (pais) e cruzamento: filho é copiado de um dos pais e apenas uma espessura intermediária entre entrada e saída é alterada. Cada casal dá origem a 2 filhos (Tabela 3-23).

Tabela 3-23 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – Etapa 3

Pais (1ª Geração)	Filhos (2ª Geração)	Espessuras do filho após cruzamento					Custo (Fitness)
(I1 ₁ ;I6 ₁)	I1 ₂	3.375	1.446	1.101	0.931	0.758	37.17
	I2 ₂	3.375	2.343	1.809	0.942	0.758	33.28
(I2 ₁ ;I7 ₁)	I3 ₂	3.375	2.343	1.834	0.942	0.758	33.27
	I4 ₂	3.375	2.890	2.551	1.998	0.758	127.70
(I3 ₁ ;I8 ₁)	I5 ₂	3.375	3.152	3.058	1.504	0.758	101.18
	I6 ₂	3.375	3.354	3.297	1.970	0.758	118.65
(I4 ₁ ;I9 ₁)	I7 ₂	3.375	3.145	2.635	1.844	0.758	112.80
	I8 ₂	3.375	3.152	2.924	1.507	0.758	104.87
(I5 ₁ ;I10 ₁)	I9 ₂	3.375	3.152	1.687	1.504	0.758	106.02
	I10 ₂	3.375	1.446	1.101	1.389	0.758	85.64

4ª etapa: Mutação. Neste exemplo, apenas um filho sofreu mutação, na espessura de saída da cadeira 3 (Tabela 3-24).

Tabela 3-24 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – Etapa 4

Filhos Mutantes (2ª Geração)	Espessuras do filho após mutação					Custo (Fitness)
I6 ₂	3.375	3.354	3.297	3.150	0.758	141.47

5ª etapa: Seleção dos melhores indivíduos da população atual e dos filhos gerados. Os indivíduos que possuírem menor custo (melhor *fitness*) são selecionados (Tabela 3-25).

Tabela 3-25 - Exemplo de Minimização da função custo aplicando AG – Etapa 5

Nova População	Custo (Fitness)	Nova População	Custo (Fitness)
I3 ₂	33.27	I10 ₁	74.72
I2 ₁	33.28	I10 ₂	85.64
I2 ₂	33.28	I5 ₂	101.18
I4 ₁	35.26	I1 ₁	104.72
I1 ₂	37.17	I8 ₂	104.87

6ª etapa: O melhor indivíduo (I3₂) é copiado para a lista de melhores indivíduos. Como sua função custo (33.27) é maior que o valor mínimo esperado e o número máximo de gerações não foi atingido, uma nova geração deverá ser criada.

7ª etapa: Os indivíduos mostrados na Tabela 3-25 compõem a nova geração. O algoritmo retorna à etapa 2.

8ª etapa: Seleciona o melhor indivíduo de todas as gerações e a partir das espessuras associadas a este indivíduo, calcula as forças de laminação e demais grandezas necessárias à laminação, como pode ser mostrado no Capítulo 4 .

O pseudocódigo do algoritmo proposto é mostrado na Figura 3-13.

```

Algoritmo AGProposto(Params)
  Geração ← 0;
  TodosIndividuos ← 0;
  MelhorEncontrado ← 0;
  MaxIndividuos ← Params. MaxIndividuos;
  Para Geração < Params .MaxGerações faça
    NovosIndividuos ← CriaPopulação(MaxIndividuos);
    CalculaCustos(NovosIndividuos);
    TodosIndividuos ← TodosIndividuos + NovosIndividuos;
    IdxPais ← Torneio2x2(TodosIndividuos, MaxIndividuos);
    Filhos ← Cruzamento(TodosIndividuos, IdxPais, Params.PropCruzamento);
    Filhos ← Mutação(Filhos, Params.PropMutação);
    CalculaCustos(Filhos);
    TodosIndividuos ← SeleccionaMelhores(TodosIndividuos, Filhos, MaxIndividuos);
    MelhorIndividuo ← SeleccionaMelhores(TodosIndividuos, 1);
    Se MelhorIndividuo.Custo < Params.CustoMinimo então
      MelhorEncontrado ← MelhorIndividuo;
    Fim Se;
  Fim Para;

  Se MelhorEncontrado <> 0 então
    Retorna MelhorEncontrado.Espessuras;
  Senão
    Retorna 0;
  Fim Senão;
Fim AGProposto.

```

Figura 3-13 - Pseudocódigo do Algoritmo Genético proposto

3.5 Adaptação do Cálculo de Força

O objetivo da adaptação é o ajuste de parâmetros usados no cálculo da força e potência aplicadas em cada cadeira de laminação para atingir a redução de espessura objetivada, com a menor atuação possível do sistema de controle no ajuste dos parâmetros de laminação durante o processo, garantindo a máxima qualidade do produto acabado. A adaptação de parâmetros é uma etapa de otimização que ocorre após a produção de ao menos uma bobina. Uma vez laminada, os dados de processo em cada cadeira são coletados e utilizados no ajuste dos parâmetros aplicáveis a produção da próxima bobina.

Considerando a laminação de uma sequência de bobinas, mantidas constantes as condições operacionais, alguns parâmetros da laminação são alterados, sem que seja possível a atuação direta sobre eles: ocorre o desgaste superficial dos cilindros em função do atrito com a tira em processo, resultando no aumento da força necessária para a manutenção do mesmo torque; a temperatura da emulsão se eleva e sua composição é alterada, com a incorporação de impurezas do aço laminado; há o aumento da temperatura dos cilindros de laminação em função da dinâmica do processo; a dureza do aço pode variar entre bobinas do mesmo grau do aço ou até mesmo ao longo da bobina; além da intervenção manual da operação no ajuste da tensão, *bending* dos cilindros de trabalho, velocidade de laminação, apenas para citar alguns fatores que podem influenciar no processo.

Um parâmetro ajustado é o coeficiente de atrito dos cilindros de trabalho com a tira, pois o desgaste dos cilindros influencia diretamente na força de laminação. Outro parâmetro que pode ser adaptado é a curva de fluxo do aço: em função de variações no processo de Laminação à Quente, predecessor à Decapagem e a Laminação a Frio, variações no processo de resfriamento da tira influenciam na dureza do material. Esta influência pode ocorrer ao longo de toda a tira ou concentrada em regiões longitudinais. Processada uma bobina de um lote, as forças de laminação resultantes podem ser usadas para determinar o ajuste dos parâmetros da curva tensão - deformação do aço que, usados no cálculo das forças de laminação de uma bobina do mesmo material, resultem em forças de laminação idênticas ou muito próximas às medidas. Bryant e Spooner (1973) sugerem que não é possível separar os efeitos de dureza do aço e o coeficiente de atrito, por não ser possível a medição individual destes fatores durante o processo. Assim, consideram que um dos fatores deve ser mantido constante, enquanto o outro é ajustado.

A adaptação do coeficiente de atrito e da força de laminação para o aumento da precisão dos resultados dos cálculos de força de laminação e distribuições de forças e potências entre as cadeiras serão aplicadas neste trabalho.

3.5.1 Algoritmo de Otimização da Adaptação

O esquema de adaptação proposto neste trabalho pode ser dividido em duas etapas, como pode ser visto na Figura 3-14. Na primeira etapa, a partir dos dados reais de produção de uma bobina, dos parâmetros da curva tensão - deformação do aço obtidos após o ensaio de tração em laboratório e utilizando os coeficientes de atrito em cada cadeira como parâmetros iniciais, a distribuição da força de laminação entre as cadeiras é calculada. Em seguida, os coeficientes de atrito são ajustados utilizando o Método do Gradiente, através da minimização da soma da diferença quadrática das forças de laminação calculadas e medidas. Os coeficientes de atrito ajustados são utilizados no cálculo dos *presets* da próxima bobina. A segunda etapa consiste no ajuste dos parâmetros C e α da curva tensão - deformação do aço proposta por (SWIFT, 1952), com *offset*, mantidos constantes os coeficientes de atrito. Os parâmetros ajustados são utilizados na produção da próxima bobina. Para evitar que os efeitos da variação elevada da dureza do aço em uma bobina específica alterem substancialmente as forças calculadas para a bobina seguinte, havendo mais de uma bobina produzida do mesmo grau do aço, os parâmetros da curva tensão - deformação de m bobinas produzidas em sequência são ajustados e aplicados na produção da próxima bobina. O parâmetro m foi ajustado durante os testes e sua influência na qualidade dos resultados é apresentado na Seção 4.4.

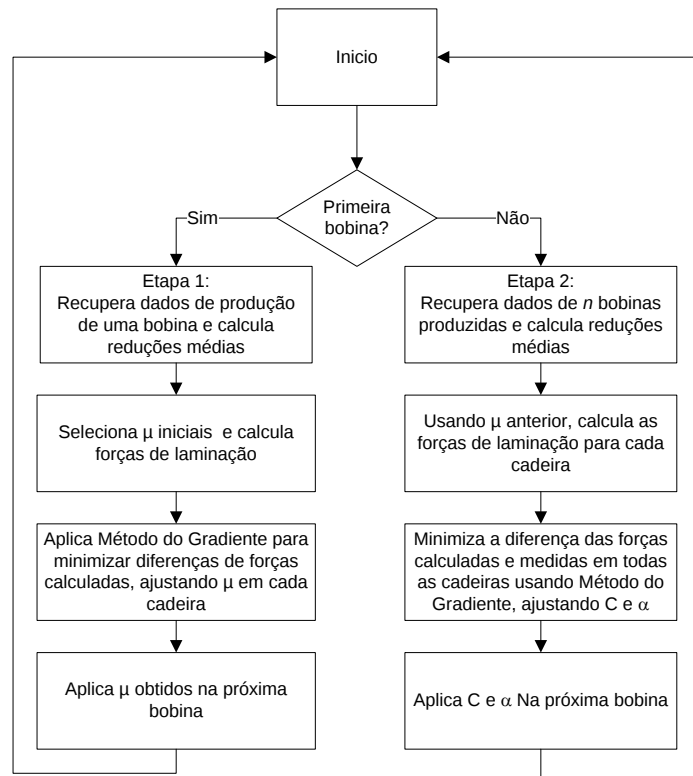


Figura 3-14 – Fluxograma do algoritmo de adaptação

Ambas as etapas de otimização da adaptação minimizam a diferença entre a força calculada e a força medida, mas cada uma utiliza uma função custo distinta. Na Etapa I, a função custo é dada por

$$J(\mu_i) = \arg \min (F_{i_{calc}} - F_{i_{medida}})^2 \quad (3-20)$$

sendo i o índice da cadeira, de 1 a 4, μ_i o coeficiente de atrito calculado para a cadeira i , $F_{i_{calc}}$ a força calculada e $F_{i_{medida}}$ a força medida. Como cada par de cilindros de trabalho instalado em uma cadeira de laminação está sujeito a esforços e condições de lubrificação distintos em relação às demais, o coeficiente de atrito ajustado é específico para cada cadeira.

O ajuste do coeficiente de atrito é efetuado através de um método de busca local (Método do Gradiente), tomando como valores iniciais os coeficientes de atrito 0.03 para as três primeiras cadeiras que utilizam cilindros “lisos” e 0.09 para a última cadeira, que utiliza cilindros com superfície “rugosa”. Estes valores são típicos na literatura, como citado na Seção 3.3. A força de laminação é calculada e comparada com a força medida. Em seguida, um novo coeficiente de atrito é calculado, objetivando a minimização da diferença entre as forças, dada pela Equação (3-20). O coeficiente de atrito encontrado é aplicado na etapa II, na otimização dos parâmetros da curva tensão – deformação.

Na etapa II, a curva tensão - deformação do aço é ajustada, considerando as forças de laminação calculadas e medidas para todas as cadeiras e bobinas simultaneamente. Durante a

minimização, a cada ajuste dos parâmetros da curva tensão - deformação, as forças de laminação são recalculadas para todas as cadeiras. A função custo neste caso é dada por:

$$J(C, \alpha) = \arg \min \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (F_{i_{calc}} - F_{i_{medida}})^2 \right) \quad (3-21)$$

sendo i o índice da cadeira, de 1 a 4; j o índice da bobina produzida de 1 a m ; $F_{i_{calc}}$ a força calculada e $F_{i_{medida}}$ a força medida; C e α os coeficientes da curva tensão - deformação do aço.

3.6 Dados de Produção Utilizados no Desenvolvimento do Trabalho

A validação do funcionamento dos algoritmos de otimização foi realizada baseada em dados reais de produção do LTF da ArcelorMittal Vega. Os dados foram coletados de agosto/2015 a novembro/2015 com autorização da ArcelorMittal Vega, através de uma aplicação de comunicação modificada pelo autor. Atualmente, o Controlador Lógico Programável (CLP), responsável pela aplicação de *setups* no laminador, solicita o cálculo dos parâmetros de produção a um aplicativo desenvolvido em linguagem Microsoft® Visual Basic 6. Esta aplicação faz uso de uma Biblioteca de Ligação Dinâmica (*Dynamic Link Library* ou DLL) desenvolvida em Microsoft® Visual C++ 6.0, que implementa as funções do modelo matemático utilizado na geração dos *presets*. A modificação realizada pelo autor permite que todas as solicitações e resultados de cálculos de *presets*, bem como as medições coletadas pelo CLP enviadas ao modelo atual para adaptação a cada dois segundos, sejam armazenados em arquivos estruturados. Estes arquivos são mantidos em disco por um tempo indeterminado, para validações de longo prazo do funcionamento do modelo matemático.

Para que os dados armazenados em arquivos estruturados pudessem ser empregados na validação dos modelos desenvolvidos, uma aplicação foi construída em linguagem Microsoft® C-Sharp para a leitura destes arquivos e foi criado um banco de dados baseado na plataforma Microsoft® Sql Server® Standard 2014, associando cada bobina aos arquivos que continham seus dados correspondentes: solicitação de cálculo de *preset*, resultado do cálculo de *preset* e medições periódicas.

Os dados principais de cada bobina, como identificação, grau do aço, espessura de entrada e saída, foram armazenados em tabela para permitir a seleção de bobinas sem que houvesse a necessidade da leitura dos arquivos de dados para a obtenção destes parâmetros. Assim, para a utilização dos dados de uma bobina nas simulações, uma aplicação de teste desenvolvida em linguagem Microsoft® C-Sharp toma como chave a identificação da bobina, acessa o banco de dados,

recupera os nomes dos arquivos de dados correspondentes, lê os arquivos do disco, decodifica-os e organiza-os em estruturas de dados (listas) acessados pelos algoritmos desenvolvidos.

4 Resultados

Na Seção 4.1, o objetivo dos testes realizados é verificar se os algoritmos propostos são capazes de encontrar valores razoáveis de forças de laminação, de acordo com a distribuição de redução, força específica ou potência desejada. São avaliados os cálculos realizados e a repetibilidade dos algoritmos. Para isto, os dados de uma bobina laminada em condições normais do laminador, ou seja, redução de velocidade durante a passagem da solda que une a bobina precedente entre as cadeiras de laminação para evitar a ruptura em alta velocidade, aceleração à velocidade de laminação e manutenção desta durante o processo e por fim, desaceleração para passagem da solda da bobina seguinte, são utilizados.

Na Seção 4.2, o algoritmo proposto é empregado para o *setup* do LTF empregando parâmetros de produção e dados reais de laminação distintos de 250 bobinas para verificação de seu funcionamento.

Na Seção 4.3, os modelos propostos são empregados no cálculo das distribuições de *presets* utilizados na produção de um conjunto de 1000 bobinas e os resultados comparados aos valores reais obtidos durante a laminação destas bobinas. O objetivo deste teste é a verificação da precisão dos algoritmos propostos e sua aplicação real em um processo produtivo.

Na Seção 4.4, são apresentados resultados da adaptação de parâmetros da curva tensão - deformação do aço do material visando a melhora da precisão dos algoritmos. Os parâmetros e as medições efetuadas durante a produção do mesmo conjunto de bobinas utilizado nos testes apresentados na Seção 4.3 são empregados. A força de laminação obtida para cada cadeira é comparada com a força real aplicada e os resultados analisados.

4.1 Verificação do Funcionamento dos Algoritmos Propostos

O funcionamento dos algoritmos propostos foi verificado a partir de dados reais de uma bobina produzida no laminador em estudo. A bobina foi escolhida em função da estabilidade da velocidade ao longo de todo o processo de laminação, com exceção das fases de aceleração e desaceleração. Os dados das fases de aceleração e desaceleração foram excluídos e as médias dos dados coletados da fase estável foi utilizada como valores objetivados nas distribuições de redução, potência ou força específica (na última cadeira).

Os parâmetros físicos do laminador aplicados são mostrados na Tabela 4-1. Os dados dos cilindros utilizados na laminação da bobina são mostrados na Tabela 4-2. Os dados da bobina e as características do aço são mostrados na Tabela 4-3 e Tabela 4-4 respectivamente.

Tabela 4-1 - Configuração do LTF para verificação dos algoritmos propostos

Parâmetro	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Cadeira 4
Relação da caixa de redução (%)	0.38	0.38	0.38	0.42
Eficiência do inversor de frequência (%)	100	100	100	100
Eficiência da caixa de redução (%)	100	100	100	100
Número de motores na cadeira	2	2	2	1
Potência elétrica total (KW)	5500	5500	5500	3000
Fator de utilização da potência instalada	1	1	1	1
Força mínima (tf)	100	100	100	100
Força máxima (tf)	3000	3000	3000	3000
Potência mínima (KW)	0	0	0	0
Potência máxima (KW)	5500	5500	5500	3000

Tabela 4-2 - Dados dos cilindros usados laminação da bobina D506901

Parâmetro	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Cadeira 4
Rugosidade inicial média (u/Ra)	0.745	0.695	0.710	5.025
Diâmetro médio (mm)	455.0	483.2	497.1	516.8
Comp. laminado médio (Km)	38.724	58.996	81.088	84.051

Tabela 4-3 - Dados da bobina D506901 usada na validação dos algoritmos propostos

Nome	Grau do Aço	Largura (mm)	Espessura de Entrada (mm)	Espessura de Saída (mm)	Módulo de Elasticidade (Pa)	Coefficiente de Poisson
D506901	ES_ARCE01	1206	4.637	1.921	230x10 ⁹	0.3

Tabela 4-4 - Parâmetros da curva tensão - deformação do aço ES_ARCE01

Alfa	Beta	Gama	Offset
63.0926	0.2067	0.0010	15.000

Tabela 4-5 - Restrições e parâmetros do processo para validação dos algoritmos

Parâmetro	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Cadeira 4
Cilindro - coeficiente de Atrito[0,1]	0.017	0.020	0.016	0.095
Tensão de entrada (MPa)	53.9	98.9	104.2	108.6
Tensão de saída (MPa)	98.9	104.2	108.6	36.0

Os algoritmos Recozimento Simulado e Algoritmo Genético foram parametrizados de acordo com os dados mostrados Tabela 4-6 e Tabela 4-7 respectivamente. Para cada modo de

funcionamento dos algoritmos, as restrições foram aplicadas de acordo com os dados mostrados na Tabela 4-8 e Tabela 4-9.

Tabela 4-6 - Parâmetros do algoritmo RS

Parâmetro	Valor
Temperatura Inicial	0.1
Temperatura Final	0.001
Fator de Aumento de Temperatura	1.1
Coeficiente de Mudança Inicial de Temperatura Aceita	.98
Fator de Resfriamento	.98
Número máximo de iterações	100
Fator de Vizinhaça	0.5
Função Objetivo Mínima	10^{-5}
Gradiente – Alfa Inicial	10^{-6}
Gradiente – Eps	10^{-6}
Gradiente – Delta	10^{-10}

Tabela 4-7 - Parâmetros do AG

Parâmetro	Valor
Número de Gerações	100
Número de Indivíduos	100
Probabilidade de Cruzamento	0.98
Probabilidade de Mutação	0.02
Valor mínimo da função objetivo	10^{-5}

Tabela 4-8 - Pesos e restrições para validação da distribuição da redução entre as cadeiras

Parâmetro	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Cadeira 4
Custo Restrição Força Máxima	10	10	10	10
Custo Potência Máxima	10	10	10	10
Custo Restrição Redução	10	10	10	10
Redução Mínima (%)	20.00	0.20	0.20	0.20
Redução Máxima (%)	50.00	50.00	50.00	4.00
Distribuição de Redução Requerida (%)	24.35	27.93	21.37	3.34

A potência desenvolvida em cada cadeira de laminação não está disponível entre os dados coletados da bobina e assim, torna-se necessário sua obtenção a partir das grandezas disponíveis.

A medição do torque e velocidade estão disponíveis, bem como o diâmetro dos cilindros de trabalho, acoplados aos motores do laminador, através da caixa de redução. A medição do torque é uma medição indireta, calculada pelo sistema de controle do laminador, a partir do torque entregue no eixo dos cilindros de trabalho pelos motores elétricos, a relação de redução da caixa de engrenagens que acopla os motores aos cilindros de trabalho e o diâmetro médio destes cilindros.

A potência mecânica pode ser derivada das grandezas torque e rotação, a partir da relação $P = \tau \cdot \omega$. Sendo τ o torque (N), ω a velocidade angular (rad/s) e P a potência (W). A velocidade angular ω pode ser obtida da relação $\omega = v/r$ sendo v a velocidade linear (m/s) e r o raio (m). Assim, dada a velocidade linear (m/min) e o torque (kNm), a potência mecânica (W) pode ser obtida pela relação $P = \tau \cdot 1000 \cdot \frac{v}{60 \cdot r}$.

A velocidade considerada para o cálculo da potência deve ser a velocidade linear de entrada do material em cada cadeira, uma vez que a velocidade de saída é função da redução de espessura aplicada ao material durante a laminação. A velocidade linear média de saída da última cadeira medida foi utilizada como velocidade máxima na simulação e obtida a velocidade de entrada correspondente, descontada a redução. O mesmo processo de obtenção da velocidade linear de entrada foi utilizado para as demais cadeiras. A distribuição de potência entre as cadeiras pode ser obtida pela normalização da potência média medida. A potência média calculada a partir dos dados disponíveis, a distribuição de potência normalizada, os pesos e restrições aplicados para a validação da distribuição da potência entre as cadeiras são dados na Tabela 4-9.

Tabela 4-9 - Pesos e restrições para validação da distribuição da potência entre as cadeiras

Parâmetro	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Cadeira 4
Custo Restrição Força Máxima	10	10	10	10
Custo Potência Máxima	10	10	10	10
Custo Restrição Potência	10	10	10	10
Custo Restrição Redução	0	0	0	0
Potência Média Medida	2256	4506	3559	1622
Dist. Potência Requerida (%)	22.09	31.22	30.09	16.60

Para a distribuição de potência com a redução fixa na última cadeira, foram usados os mesmos custos aplicados na distribuição de potência. Foi considerada a restrição de redução fixa de 3.34% na cadeira 4 e relaxada a contribuição de potência requerida desta cadeira (contribuição nula). Como os algoritmos propostos normalizam as distribuições antes da fase de otimização, a distribuição original foi mantida.

Para a distribuição de potência com a força específica na última cadeira, foram usados os mesmos custos aplicados na distribuição de potência. Foi considerada a força específica de 584 tf/m nesta cadeira e relaxada a sua contribuição de potência.

Cada algoritmo foi executado 50 vezes. O valor da função tempo e o custo de execução de cada algoritmo foram coletados e são apresentados nos *boxplots* mostrados na Figura 4-1 e Figura 4-2 respectivamente. Para proporcionar uma melhor visualização dos resultados, foi utilizado o

logaritmo na base 10 do tempo de execução e do custo obtido pelos algoritmos antes da criação dos *boxplots*.

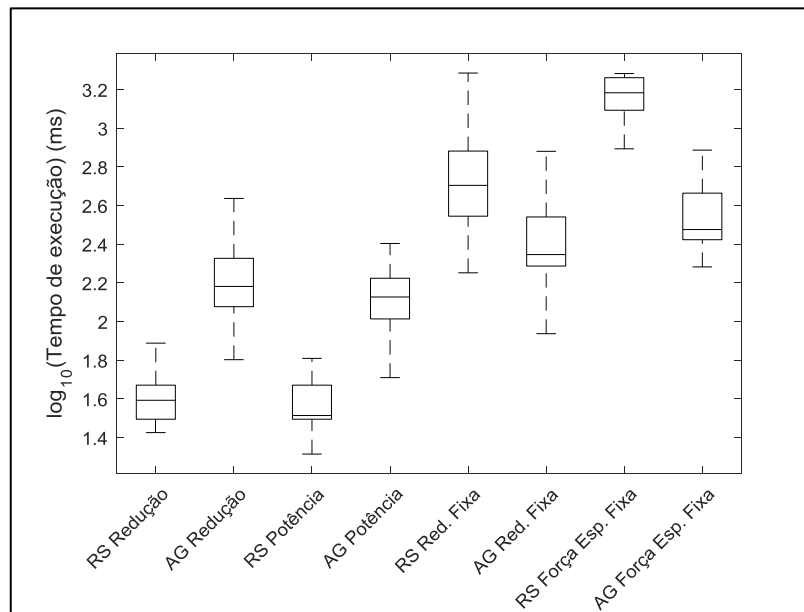


Figura 4-1 - Boxplot do tempo de execução para 50 execuções dos algoritmos Recozimento Simulado (RS) e Algoritmo Genético (AG) para bobina D506901

A análise dos *boxplots* mostra que o algoritmo de Recozimento Simulado apresentou um desempenho melhor que o Algoritmo Genético na obtenção das distribuições de redução de espessura e potência, considerando o tempo de execução e o valor final da função custo minimizada. Já o Algoritmo Genético apresentou um tempo de execução melhor que o Algoritmo de Recozimento Simulado para as distribuições de redução com espessura fixa e força específica na última cadeira. Os valores da função custo obtidos, todos inferiores a 10^{-4} indicam um bom comportamento dos algoritmos propostos, ambos atendendo às necessidades do processo quanto a repetibilidade dos *presets* gerados.

Para ambos os algoritmos, uma das condições de parada usada foi o valor da função custo minimizada inferior a 10^{-5} . A utilização do Método Gradiente no refinamento da melhor solução encontrada em qualquer fase do processamento do algoritmo Recozimento Simulado permitiu a este algoritmo apresentar melhores resultados da minimização da função custo em todas as distribuições verificadas, com exceção da distribuição de potência com força específica na última cadeira. Neste caso, verificou-se que a condição de parada do algoritmo do Recozimento Simulado foi o congelamento do sistema na temperatura mínima especificada e posterior utilização do Método do Gradiente para o refinamento da melhor solução final encontrada.

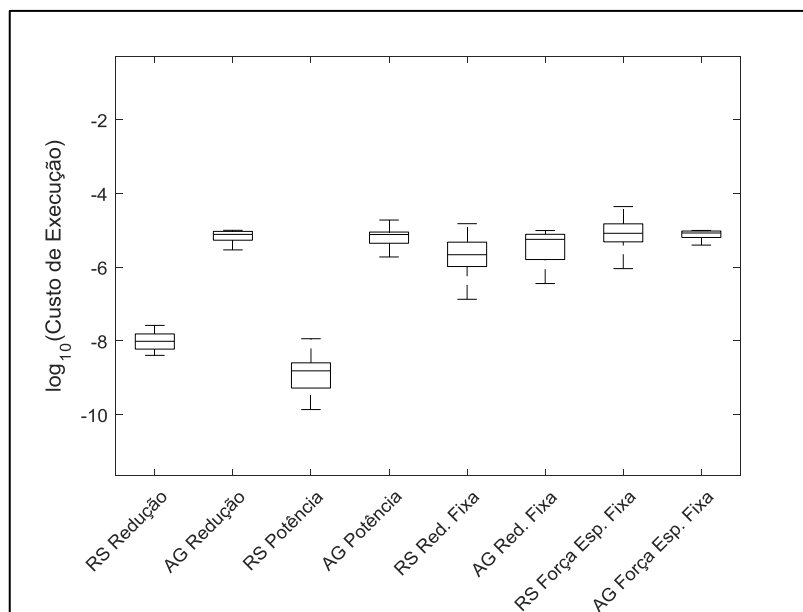


Figura 4-2 - Boxplot da função custo para 50 execuções dos algoritmos Recozimento Simulado e Algoritmo Genético para a bobina D506901

No modo de distribuição de potência com redução de espessura fixa na última cadeira, o valor da redução desejada é definido como restrição de redução mínima e máxima de -0.001 mm e $+0.001$ mm a partir da redução real média obtida durante a produção da bobina. Esta estreita faixa de redução impede a rápida convergência do algoritmo de Recozimento Simulado. Os movimentos que resultam na alteração das reduções aplicadas nas cadeiras de laminação em cada iteração do algoritmo dependem de um fator de movimento, que é sensível aos limites de redução em cada cadeira. Quando um fator de movimento elevado (ex: 0.5) é aplicado, a alteração de espessura de uma cadeira pode variar em até 50% do valor da redução na cadeira atual e as cadeiras adjacentes. Este fator elevado beneficia uma busca mais ampla no espaço de soluções possíveis, permitindo uma rápida distribuição de reduções quando os limites de reduções possíveis são amplos. No entanto, quando uma estreita faixa de restrição é aplicada, como ocorre na distribuição de potência com redução fixa na última cadeira, uma busca com um fator de movimento 0.5 impede que um valor adequado de redução seja obtido rapidamente para a última cadeira, resultando na aplicação recorrente das penalidades à função custo. Por outro lado, quando um fator de movimento pequeno é empregado (ex: 0.01), o espaço de busca em torno da distribuição inicial é reduzido. Neste caso, um número maior de iterações é necessário para que haja alguma melhora na função objetivo. O mesmo comportamento ocorre quando é definida uma força específica para a última cadeira. A utilização de um fator de movimento elevado beneficia uma distribuição inicial rápida de reduções entre as cadeiras, mas as penalizações aplicadas impedem a obtenção de uma melhora da função objetivo e aplicação do Método do Gradiente durante a fase de resfriamento.

Para exemplificar este comportamento do algoritmo de Recozimento Simulado, foram realizados dois testes: no primeiro, foi aplicado um fator de movimento de 0.5 e no segundo 0.01, ambos com valor mínimo da função objetivo aceitável igual a zero, para forçar a execução do algoritmo até o congelamento do sistema. Foram utilizados os dados da bobina D506901 e mantidos os demais parâmetros do algoritmo e configuração do laminador. A Figura 4-3 apresenta os valores da função custo ao longo do processo de otimização. Nota-se que a utilização de um fator de movimento menor produz uma descida mais suave na função custo, com um número maior de soluções intermediárias.

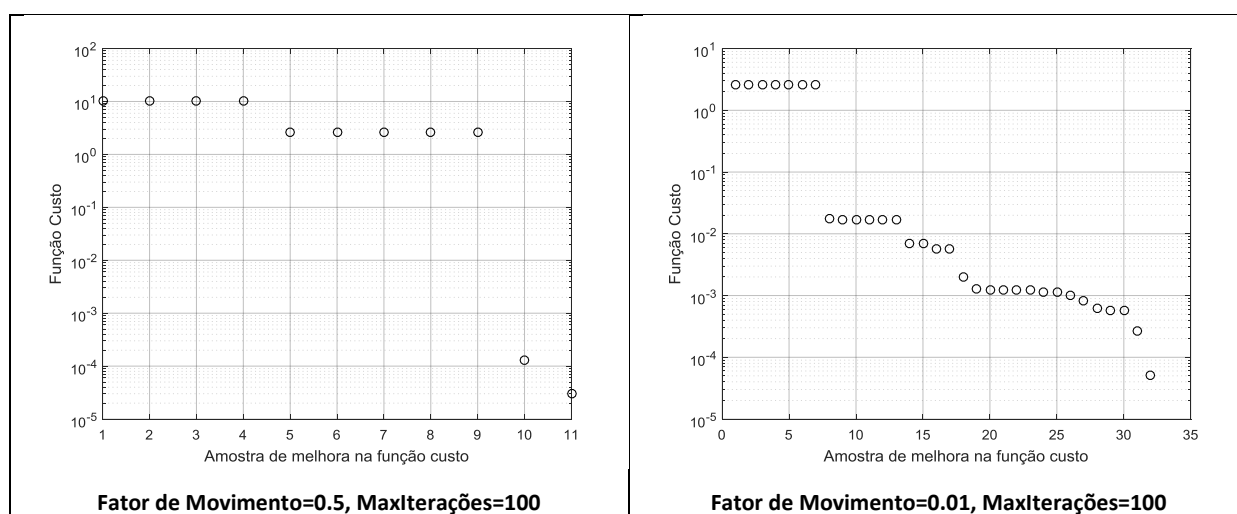


Figura 4-3 – Evolução da função custo para distribuição de potência com força fixa na última cadeira usando algoritmo de Recozimento Simulado, fator de movimento = 0.01, máx. iterações = 10000, Bobina D506901

A Tabela 4-10 apresenta a melhor distribuição de redução entre cadeiras encontrada por ambos os algoritmos para a bobina testada. A

Tabela 4-11 apresenta a melhor distribuição de potência. A Tabela 4-12 apresenta a melhor distribuição de potência com redução fixa na última cadeira e a Tabela 4-13 apresenta a melhor distribuição de potência com redução fixa na última cadeira para a bobina testada. O erro médio quadrático (EMQ) entre a distribuição desejada e a distribuição obtida por cada algoritmo é apresentada para fins de verificação das distribuições obtidas.

Tabela 4-10 - Melhor distribuição de redução entre as cadeiras encontrada para a bobina D506901

Parâmetro	Cad. 1	Cad. 2	Cad. 3	Cad. 4	EMQ
Redução Requerida (%)	24.35	27.93	21.37	3.34	
Distribuição de Redução Normalizada	31.627	36.277	27.778	4.338	
Distribuição Obtida – Recozimento Simulado	31.643	36.274	27.754	4.332	6.95×10^{-4}
Distribuição Obtida – Algoritmo Genético	31.604	36.356	27.67	4.371	4.88×10^{-3}

Tabela 4-11 - Melhor distribuição de potência entre as cadeiras encontrada para a bobina D506901

Parâmetro	Cad. 1	Cad. 2	Cad. 3	Cad. 4	EMQ
Distribuição de Potência Requerida	22.09	31.22	30.09	16.60	
Dist. Obtida – Recozimento Simulado	22.09	31.22	30.09	16.60	0.00
Dist. Obtida – Algoritmo Genético	22.19	31.32	29.98	16.51	1.00×10^{-2}

Tabela 4-12 - Melhor distribuição de potência entre cadeiras encontrada para a bobina D506901, com redução fixa na última cadeira

Parâmetro	Cad. 1	Cad. 2	Cad. 3	Cad. 4	EMQ
Distribuição de Potência Requerida	22.09	31.22	30.09	0	
Redução Requerida (%)	-	-	-	3.34	
Distribuição de Potência Requerida Normalizada	26.49	37.43	36.08	0	
Dist. Obtida – Recozimento Simulado	26.52	37.53	35.95	0	6.95×10^{-3}
Dist. Obtida – Algoritmo Genético	26.68	37.38	35.94	0	1.45×10^{-2}
Redução Calculada – Recozimento Simulado	26.94	24.497	22.297	3.34	0
Redução Calculada – Algoritmo Genético	27.16	24.44	22.12	3.34	0

Tabela 4-13 - Melhor distribuição de potência entre as cadeiras encontrada para a bobina D506901, com força específica na última cadeira

Parâmetro	Cad. 1	Cad. 2	Cad. 3	Cad. 4	EMQ
Distribuição de Potência Requerida	22.09	31.22	30.09	0	
Força específica requerida (tf/m)	-	-	-	584.0	
Dist. de Potência Requerida Normalizada	26.49	37.43	36.08	0	
Dist. Obtida Normalizada – Recozimento Simulado	26.49	37.43	36.08	0	0
Dist. Obtida Normaliza – Algoritmo Genético	26.47	37.42	36.11	0	3.51×10^{-4}
Redução Calculada – Recozimento Simulado	26.94	24.497	22.30	584.0	0
Redução Calculada – Algoritmo Genético	27.16	24.44	22.12	584.0	0

4.2 Verificação do Funcionamento dos Algoritmos Para Bobinas Distintas

Visando a verificação da estabilidade dos algoritmos propostos, estes foram aplicados sobre 250 bobinas de grau de aço, dimensões e padrões de reduções distintos, escolhidas aleatoriamente em um conjunto de 5000 bobinas. Para cada bobina, foi calculada a distribuição de redução de espessura, distribuição de força, distribuição de força com redução fixa na última cadeira e distribuição de força com força específica na última cadeira. Os dados médios de produção foram utilizados na determinação das distribuições necessárias de redução, potência e força específica aplicada na última cadeira. O tempo de execução e o valor final da função custo são mostrados na Figura 4-4 e Figura 4-5 respectivamente.

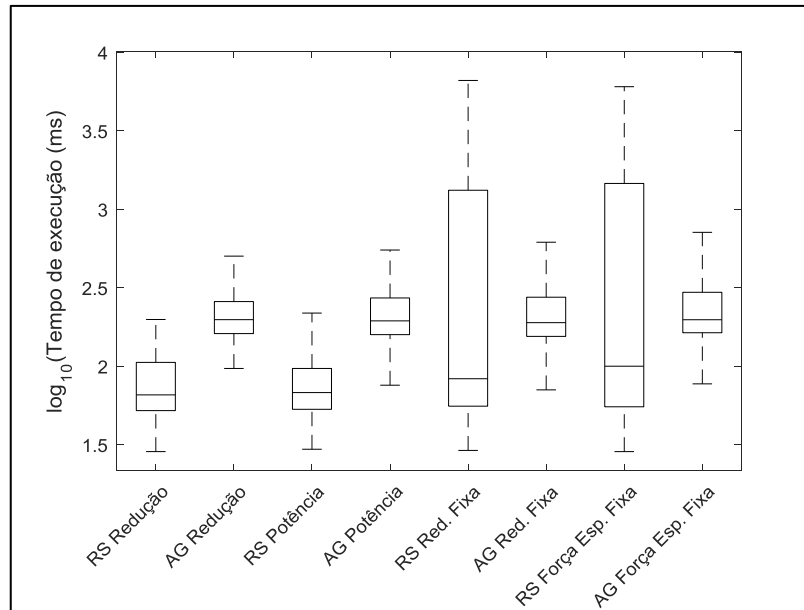


Figura 4-4 - Tempo de execução dos algoritmos Recozimento Simulado e Algoritmo Genético para 250 bobinas distintas

Os tempos de execução dos algoritmos para bobinas distintas seguem o mesmo comportamento apresentado para a execução da adaptação para uma única bobina, como mostrado na Seção 4.1. O algoritmo genético apresentou um tempo estável de execução em todos os casos, com variação mínima em torno da mediana. Já o algoritmo de Recozimento Simulado apresentou um tempo reduzido de execução apenas para as distribuições de redução e potência. O comportamento deste último algoritmo pode ser explicado pela ativação do método de descida (Método do Gradiente), quando uma solução de melhora foi encontrada durante a otimização e a obtenção de um valor da função objetivo menor que o especificado, para as distribuições de redução de espessura e potência. Para os demais modos, foi observado que em alguns casos, houve o congelamento do sistema, sem que nenhuma melhora intermediária ocorresse, com posterior ativação do método de descida, permitindo alguma melhora nos resultados.

Em todos os casos, a função custo otimizada usando o algoritmo de Recozimento Simulado apresentou resultados mais precisos que o obtido com a utilização do Algoritmo Genético. Novamente, este último apresentou um comportamento estável na minimização da função custo, mesmo não utilizando um método de busca local como aplicado no algoritmo de Recozimento Simulado.

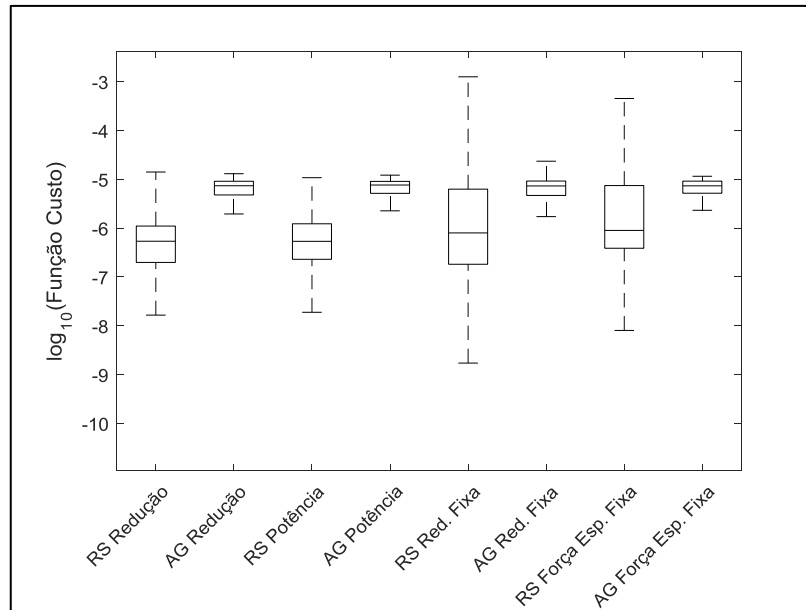


Figura 4-5 - Custo de execução dos algoritmos Recozimento Simulado e Algoritmo Genético para 250 bobinas distintas

4.3 Aplicação dos Algoritmos Propostos ao Processo Produtivo

Após a verificação do correto funcionamento dos algoritmos propostos de acordo com o grau do aço e o modo de distribuição desejado, a aplicação do modelo deve ser validada em relação a uma base de dados real. As perguntas “os algoritmos desenvolvidos produzem resultados com qualidade? ”; “eles podem ser aplicados em um processo produtivo? ” e “quais restrições se aplicam?” devem ser respondidas. Nesta seção, serão empregados dados reais obtidos durante a laminação de materiais no LTF em estudo e respondidas estas questões.

O modelo matemático atualmente em operação no laminador em estudo trabalha predominantemente em modo de distribuição de redução de espessuras entre as cadeiras, com força específica fixa na última cadeira. O objetivo da força aplicada na última cadeira é a transferência de rugosidade do cilindro para a tira e a manutenção da planicidade do material, sendo estes objetivos definidos pelos especialistas do processo. A medição da espessura não está disponível na saída das cadeiras 2 e 3 e é calculada pelo sistema de controle a partir da velocidade medida no eixo dos motores acoplados às caixas de redução, que por sua vez transferem o torque necessário à laminação aos cilindros de trabalho, considerando o princípio de conservação de massa do material laminado, sem alteração de largura. O escorregamento existente entre a interface cilindro – tira também é desconhecido.

Uma tabela de força específica é aplicada para todos os materiais produzidos no laminador, independentemente do grau do aço, espessuras ou redução total. A tabela é organizada em faixas de redução total, para as quais uma força específica de laminação é definida. A tabela de força específica aplicada na última cadeira do laminador é reproduzida na Tabela 4-14.

Tabela 4-14 - Força específica aplicada na última cadeira em função da redução total desejada

Redução Total (%)	Força Específica (tf/m)
35	650
65	650
80	850
99	850

O modelo atual em operação calcula a distribuição de reduções entre as cadeiras seguindo o padrão de redução parametrizado para cada grau do aço, faixa de largura e espessura. Definido o padrão de redução, os demais parâmetros são calculados, como as forças, torque e tensões. A força calculada para a última cadeira é então recalculada em função da redução total desejada para o material e a força específica em função da largura, obtida a partir da Tabela 4-14. A força calculada na última cadeira resulta em uma redução de espessura que não é realimentada no modelo para a redistribuição de reduções entre as demais cadeiras. Consequentemente, a distribuição de redução fica prejudicada, por não considerar a redução objetivada nesta cadeira.

O laminador em estudo, por ser diretamente acoplado à Linha de Decapagem Contínua, responsável pela remoção da camada externa de óxido do material, pré-condição para a laminação, está sujeito às variações de velocidade desta linha. Em condições normais de operação, o acumulador de tira instalado entre a saída da Linha de Decapagem e a entrada da Laminação é utilizado para a manutenção da velocidade estável do processo de laminação, mesmo havendo parada momentânea da entrada da Linha de Decapagem ou variações de velocidade inerentes a este processo. Dependendo da gravidade do distúrbio na Linha de Decapagem, pode ser necessária a redução da velocidade do processo por um período elevado, resultando na redução de velocidade da laminação ou até sua parada.

Diversos fatores influenciam diretamente na força de laminação aplicada em cada cadeira. A seguir, os principais fatores são descritos e exemplificados com dados reais do laminador em estudo.

Quando ocorre a mudança de espessura entre duas bobinas, durante a passagem de solda, é necessária a redução de velocidade do laminador, para permitir seu ajuste aos novos parâmetros de laminação (força, tensão, gap etc.) e reduzir ao máximo o comprimento da tira com variação de espessura indesejada. Em baixa velocidade, ocorre a elevação do coeficiente de atrito entre a tira e o cilindro devido à baixa lubrificação proporcionada pela emulsão, resultando no aumento da força de laminação para que seja mantida a taxa de redução.

Variações de espessura de saída no Laminador de Tiras a Quente, processo anterior à Decapagem, resultam na variação da espessura de entrada do Laminador de Tiras a Frio e

consequentemente, necessidade de atuação do sistema de controle sobre a força de laminação para garantir uma espessura de saída uniforme.

A instabilidade no sistema de resfriamento no acabamento da tira na Laminação a Quente resulta na variação da dureza do material. Esta variação pode ocorrer ao longo de uma tira, em zonas definidas do material ou mesmo em um conjunto de bobinas. Um problema comum neste tipo de laminador é o mau funcionamento das válvulas que regulam o fluxo de água do resfriamento: quando o perfil de temperatura da tira é medido após o sistema de resfriamento, o sistema de controle é realimentado com esta informação, alterando o *setpoint* de abertura das válvulas. Como estas não atuam de maneira adequada, muitas vezes trabalhando no regime *on/off* ao invés de atuação proporcional e apresentando falhas frequentes, é inevitável a oscilação do resfriamento ao longo da tira e consequentemente, a variação da dureza do aço produzido.

Os casos abaixo exemplificam o comportamento do processo de Laminação a Frio em função das principais variações que podem ocorrer.

Caso 1: Processo normal de laminação.

A Figura 4-6 mostra a velocidade de entrada do laminador, a espessura de entrada e a força aplicada em cada cadeira. Em uma condição normal de laminação, a velocidade da linha é reduzida para uma faixa segura, que permite a passagem da solda que une duas tiras entre os cilindros de trabalho, sem que haja o rompimento da solda e a parada do processo.

Comparando as medições da velocidade e das forças aplicadas em cada cadeira, é possível observar que a força na cadeira 1 aumenta proporcionalmente com o aumento da velocidade. Já a força aplicada nas cadeiras 2 e 3 é reduzida com o aumento da velocidade. A força na cadeira 4 não sofre alteração considerável (observar a escala do gráfico). Este comportamento pode ser explicado pela estratégia de controle do laminador: antes e após a cadeira 1, ocorre a medição da espessura da tira. Em função da espessura de entrada medida, a força aplicada é automaticamente ajustada para compensar as variações de espessura (controle *feedforward*): maior espessura de entrada, maior força e vice-versa. A espessura da tira medida na saída desta cadeira é realimentada no controlador de força aplicada (controle *feedback*). A mesma medição é usada como entrada na cadeira 2 (controle *feedforward*), que ajusta a força aplicada de acordo com a redução ou força desejada, somada ao erro da saída da cadeira 1. Como não há medição da espessura entre as cadeiras 2 e 3, a redução de espessura é estimada em função da diferença de velocidade da cadeira e a cadeira seguinte, considerando que não há escorregamento da tira durante o processo. A força de laminação na cadeira 4 é mantida constante para garantir uma transferência uniforme de rugosidade dos cilindros desta cadeira para a tira.

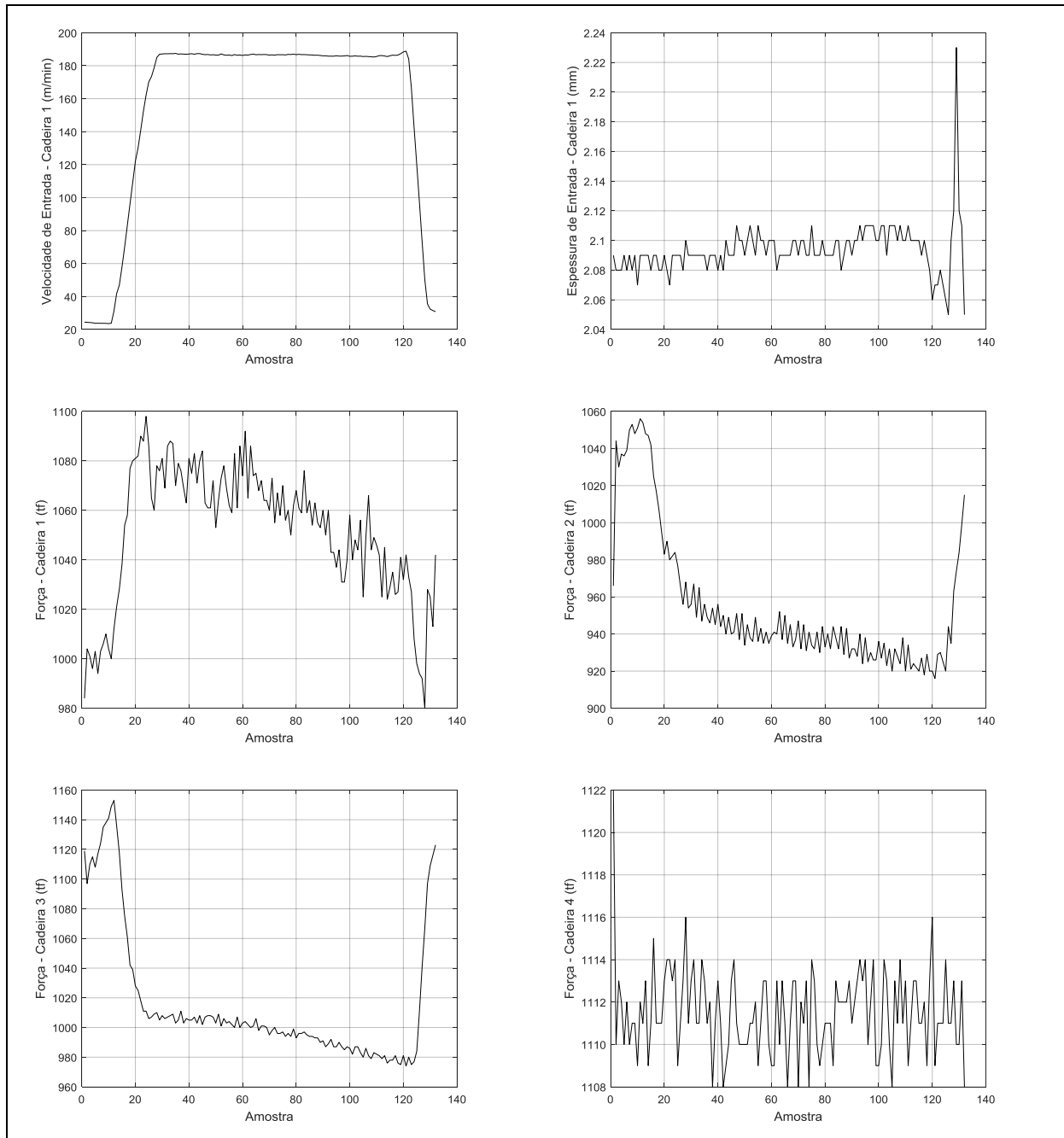


Figura 4-6 - Comportamento das forças no laminador em regime normal de operação. Bobina D5042711

Durante a aceleração, a redução de espessura inferior a desejada na cadeira 1 resulta no aumento da força aplicada nas cadeiras 1, 2 e 3. Atingida a velocidade de processo, as variações de força são consequência da atuação do sistema de controle na manutenção da redução, além de intervenções manuais dos operadores alteração da curvatura dos cilindros de trabalho (*bending*) e tensões entre as cadeiras. Na fase de desaceleração, a redução excessiva de espessura é compensada pela rápida redução da força aplicada, o que explica os picos e vales mais acentuados nesta região.

Caso 2: Variação de velocidade durante o processo

Pela Figura 4-7, é possível verificar claramente a influência da velocidade na força aplicada em cada cadeira. Após a fase de aceleração, o laminador permanece em velocidade média de 190 m/min até a amostra 160, quando a velocidade é reduzida para menos de 20 m/min até a amostra 320. Durante a fase de velocidade elevada, a força de laminação na cadeira 1 permanece em torno de 1100 tf, reduzindo para 980 tf em média, quando a velocidade é reduzida. O inverso ocorre nas cadeiras 2 e 3, onde a força de laminação é alterada de 980 tf para 1125 tf na cadeira 2 e de 1100 tf para 1480 tf na cadeira 3.

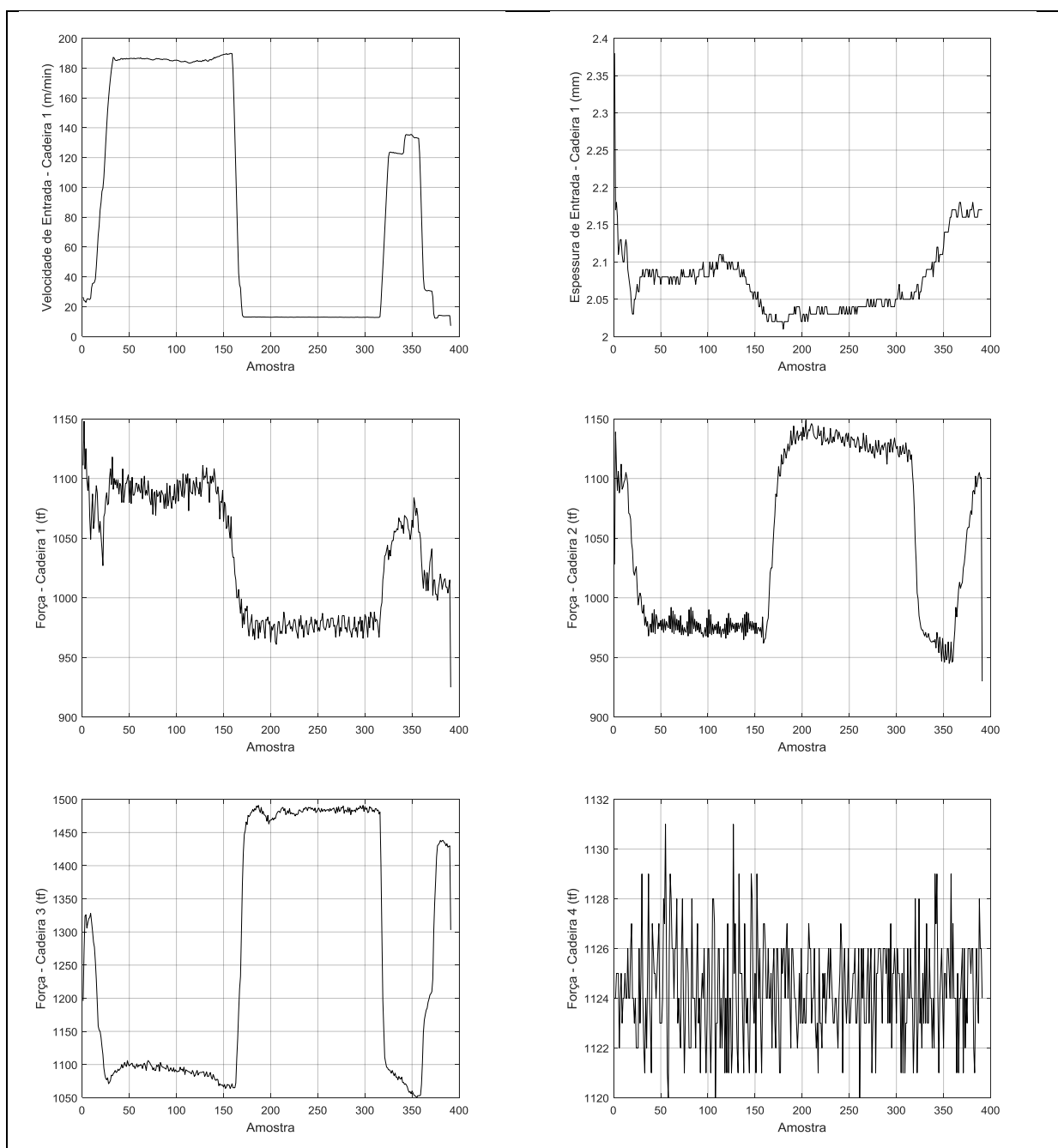


Figura 4-7 - Comportamento das forças no laminador com variação de velocidade durante o processo. Bobina D507712

Caso 3: Variação de espessura de entrada

A Figura 4-8 (bobina D506722) apresenta a força de laminação aplicada nas quatro cadeiras em função da velocidade e da espessura de entrada do material. A análise da força de laminação na cadeira 3 revela que a variação de velocidade de laminação possui um efeito muito maior na variação da força resultante do que a variação da espessura de entrada do material. Entre as amostras 50 a 75, a velocidade de entrada no laminador foi, em média 160 m/min enquanto a força de laminação na cadeira 3 foi aproximadamente 920tf.

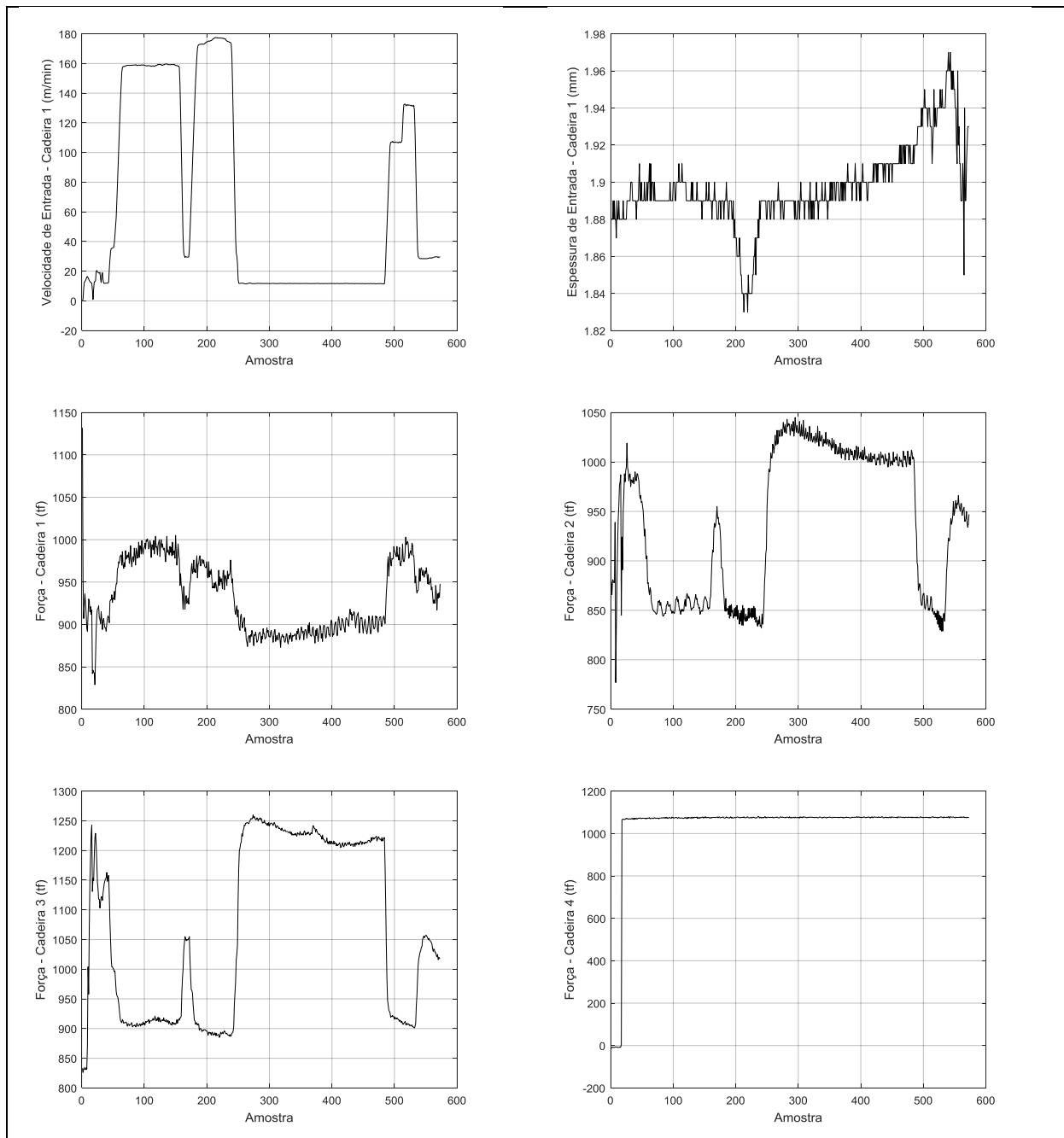


Figura 4-8 - Comportamento das forças no laminador com variação de velocidade durante o processo. Bobina D506722

A variação da força de laminação na cadeira 3 apresentada no caso 2 mostra a necessidade do estabelecimento de regras de comparação dos resultados para que sejam respondidas as perguntas sobre a aplicabilidade direta dos modelos propostos, bem como a existência de restrições de aplicação.

Como no Caso 3, a variação de velocidade possui uma influência dominante na variação da força necessária à redução de espessura do material quando comparada à variação da espessura de entrada da tira. O modelo matemático do cálculo de força, desenvolvido por Bland e Ford aplicado neste trabalho, não apresenta nenhuma relação direta entre a força de laminação e a velocidade do processo. A influência da velocidade linear só é encontrada no cálculo da potência empregada pela relação $P = \tau \cdot \omega$ sendo P a potência, τ o torque e ω a velocidade angular. Desta forma, algumas premissas devem ser estabelecidas para que seja possível a comparação de dados reais de produção e os resultados obtidos pelos algoritmos propostos:

1 – Os dados coletados devem ser filtrados para que sejam utilizados dados obtidos apenas durante a operação estável do laminador. Deve-se considerar a maior velocidade estável de laminação;

2 – A redução realizada na cadeira deve ser calculada para períodos de produção com a velocidade estável, uma vez que a mudança de velocidade resulta na mudança de espessura de entrada e saída em cada cadeira;

3 – Determinado um período de produção estável, os valores médios das variáveis amostradas são calculados e comparados com os valores preditos pelos algoritmos propostos;

4 – A força calculada na última cadeira não é comparada, já que o LTF aplica uma força fixa por unidade de largura nesta cadeira, independentemente das características do material.

Para a determinação das sequências de amostras de velocidade estáveis, é usado o princípio de janela móvel, com largura variável. Dado um conjunto de n amostras, é calculada a média da razão entre uma amostra i , as $\frac{k}{2}$ amostras anteriores e $\frac{k}{2}$ amostras posteriores. Se o valor médio de cada amostra i comparado com a vizinhança for inferior a um determinado parâmetro φ , o ponto i da sequência é considerado estável. Concluída a avaliação de todos os pontos disponíveis, os pontos consecutivos classificados como estáveis representam as regiões de pequena ou nenhuma variação de velocidade, de acordo com o valor de φ . A classificação pode ser representada pelo pseudo-código mostrado na Figura 4-9:

```

Algoritmo ClassificaVelocidade()
  v ← amostras de velocidade de entrada da cadeira;
  n ← número de amostras;
  k ← número de amostras à agrupar;
  Para i = k/2 até n - k/2 faça
    
$$z_i \leftarrow \sum_{m=i-\frac{k}{2}}^{i+\frac{k}{2}+1} \left| 1 - \frac{v_i}{v_m + 1} \right|$$

    Se  $z(i) < \varphi$  então
       $v_i$  é estável
    Senão
       $v_i$  é instável;
    Fim Se;
  Fim Para;
Fim Algoritmo

```

Figura 4-9 – Pseudocódigo do algoritmo de classificação de dados de laminação estáveis

A Figura 4-10 mostra a velocidade de entrada da cadeira 1 medida para a bobina D507712 e a classificação de sequências de amostras de velocidade estáveis. Foi usado $k = 10$ amostras consecutivas e $\varphi = 0.01$. Verifica-se que o algoritmo de classificação de velocidade estáveis identificou duas regiões distintas. Os pontos pertencentes à região de maior velocidade estável são usados na comparação dos resultados produzidos pelos algoritmos propostos e as medições disponíveis.

Para esta comparação, foram selecionadas as medições e a configuração utilizadas na produção de 1000 bobinas do mesmo grau do aço, com espessura de saída superior a 0.7 mm, de acordo com os dados disponíveis. A primeira bobina selecionada corresponde a sexta bobina produzida após a troca dos cilindros de trabalho de todas as cadeiras, quando os picos de rugosidade dos cilindros já foram atenuados, reduzindo o atrito da interface tira – cilindro para valores normais de operação (~ 0.01 a ~ 0.03). Os valores médios das medidas foram obtidos na região de maior estabilidade de velocidade de laminação como descrito acima. As reduções médias foram calculadas e definidas como a redução objetivada das três primeiras cadeiras. Para a quarta cadeira, a força específica média foi calculada a partir da força medida média e da largura da tira.

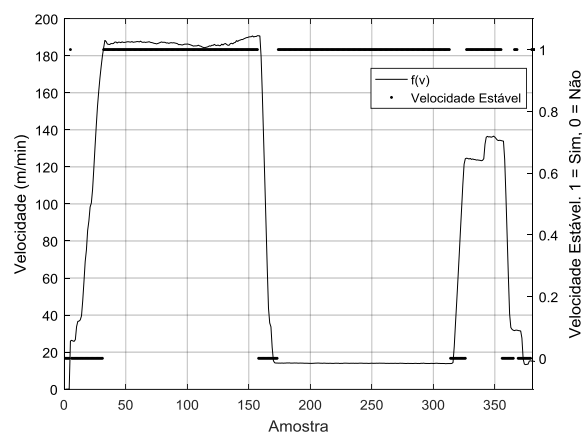


Figura 4-10 - Classificação de estabilidade da velocidade de entrada da cadeira 1 para a bobina D507712

Em função do tempo de execução estável do Algoritmo Genético verificado na seção anterior, este foi empregado para a determinação das forças de laminação, uma vez que ambos os algoritmos produzem distribuições de forças com precisão, superiores ao exigido pelo processo produtivo. Este algoritmo foi configurado no modo de distribuição de redução com força específica fixa na última cadeira. Para a primeira bobina, a força de laminação foi calculada para todas as cadeiras e comparada com a força medida. Em seguida, os coeficientes de atrito entre os cilindros de trabalho e a tira foram ajustados manualmente, até a convergência das forças calculadas e medidas.

Os coeficientes de atrito obtidos foram usados no cálculo das forças de laminação para as demais bobinas. A correlação linear entre a força calculada e a força medida em cada cadeira, com intervalo de confiança de 95%, é apresentada na Figura 4-11. Como a força objetivada na última cadeira é a mesma força calculada, a correlação não é mostrada, pois os valores objetivado e medido são idênticos neste caso.

A correlação obtida para a primeira cadeira sugere que os algoritmos propostos apresentam uma elevada precisão no cálculo das forças de laminação para esta cadeira. Já para as cadeiras 2 e 3, há uma redução na precisão do cálculo, com uma concentração de forças calculadas maiores que as medidas.

Como já descrito acima, diversos fatores podem influenciar na força de laminação, sendo os principais: a variação do coeficiente de atrito na interface cilindro-tira e variações na dureza do aço. Para verificar a influência destes parâmetros, é proposta a adaptação da curva tensão - deformação do aço e do coeficiente de atrito em cada cadeira. Os resultados destas adaptações são mostrados na Seção 4.4.

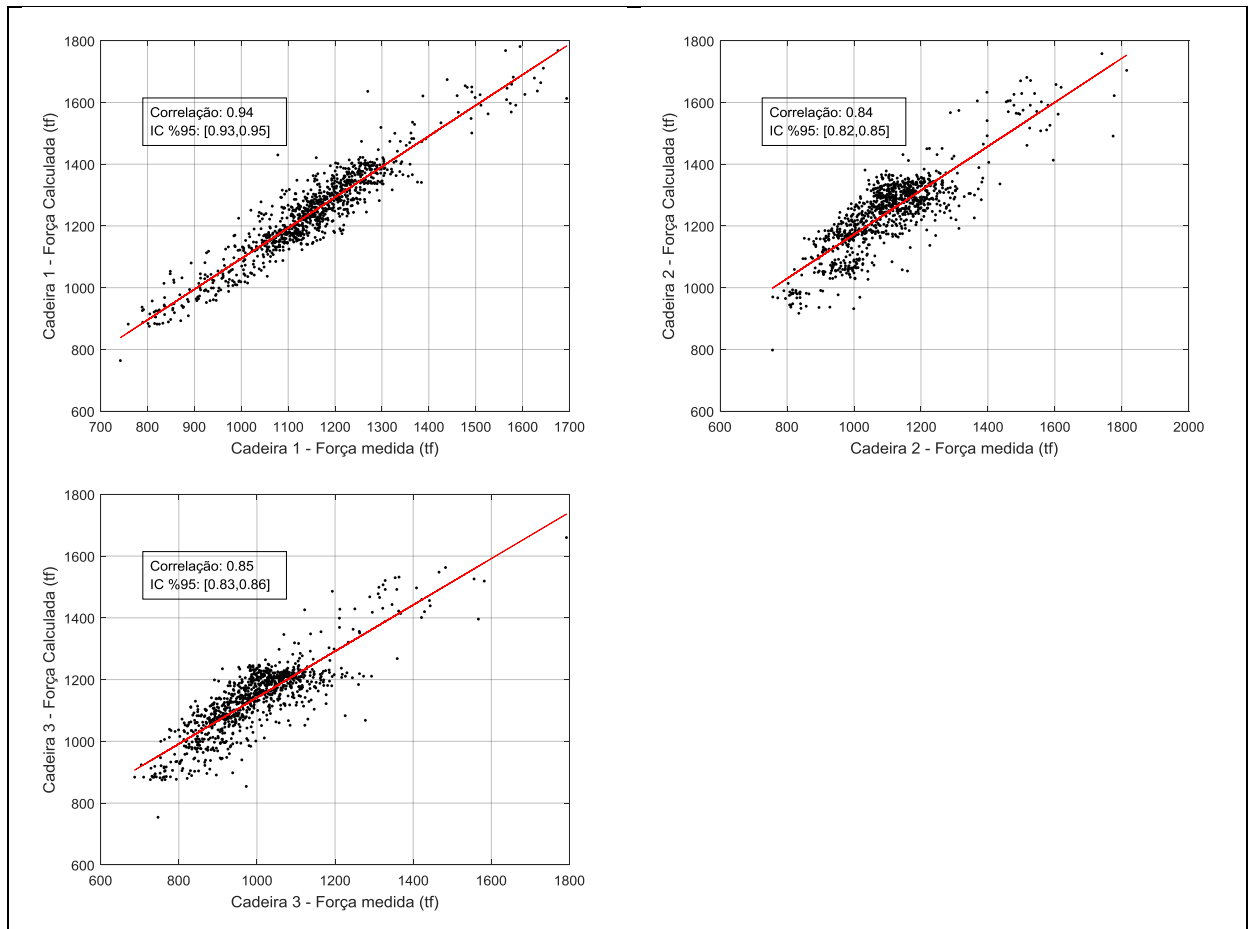


Figura 4-11 - Correlação entre força calculada e força medida em cada cadeira. Espessura de saída > 0.7 mm para 1000 bobinas produzidas em sequência, grau do aço: ES_ARCE01

4.4 Adaptação do Coeficiente de Atrito e Curva de Fluxo

Para a verificação da possível melhora na determinação das forças de laminação utilizando a técnica de adaptação do coeficiente de atrito na interface cilindro-tira e os parâmetros da curva de fluxo do material, o algoritmo apresentado na Seção 3.5.1 foi implementado. Um conjunto de 50 bobinas do mesmo grau do aço, produzidas sequencialmente, foi selecionado e calculada a distribuição de forças de laminação, sem adaptação, utilizando a redução média em cada cadeira e a redução fixa na última cadeira, considerando como coeficiente de atrito 0.017, 0.020, 0.016, 0.095 para as cadeiras 1 a 4 respectivamente, obtidos na adaptação dos coeficientes de atrito. A correlação linear entre as forças calculadas e obtidas para cada cadeira é mostrada na Figura 4-12.

Em seguida, o algoritmo de adaptação foi empregado sobre o mesmo conjunto de bobinas, tomando dados de 1 a 10 bobinas por vez, para a definição dos parâmetros de produção da próxima bobina. Para cada conjunto de dados de bobinas para adaptação, foi calculada a correlação linear da força estimada pelo modelo de Bland e Ford e a força medida, apresentada na Tabela 4-15.

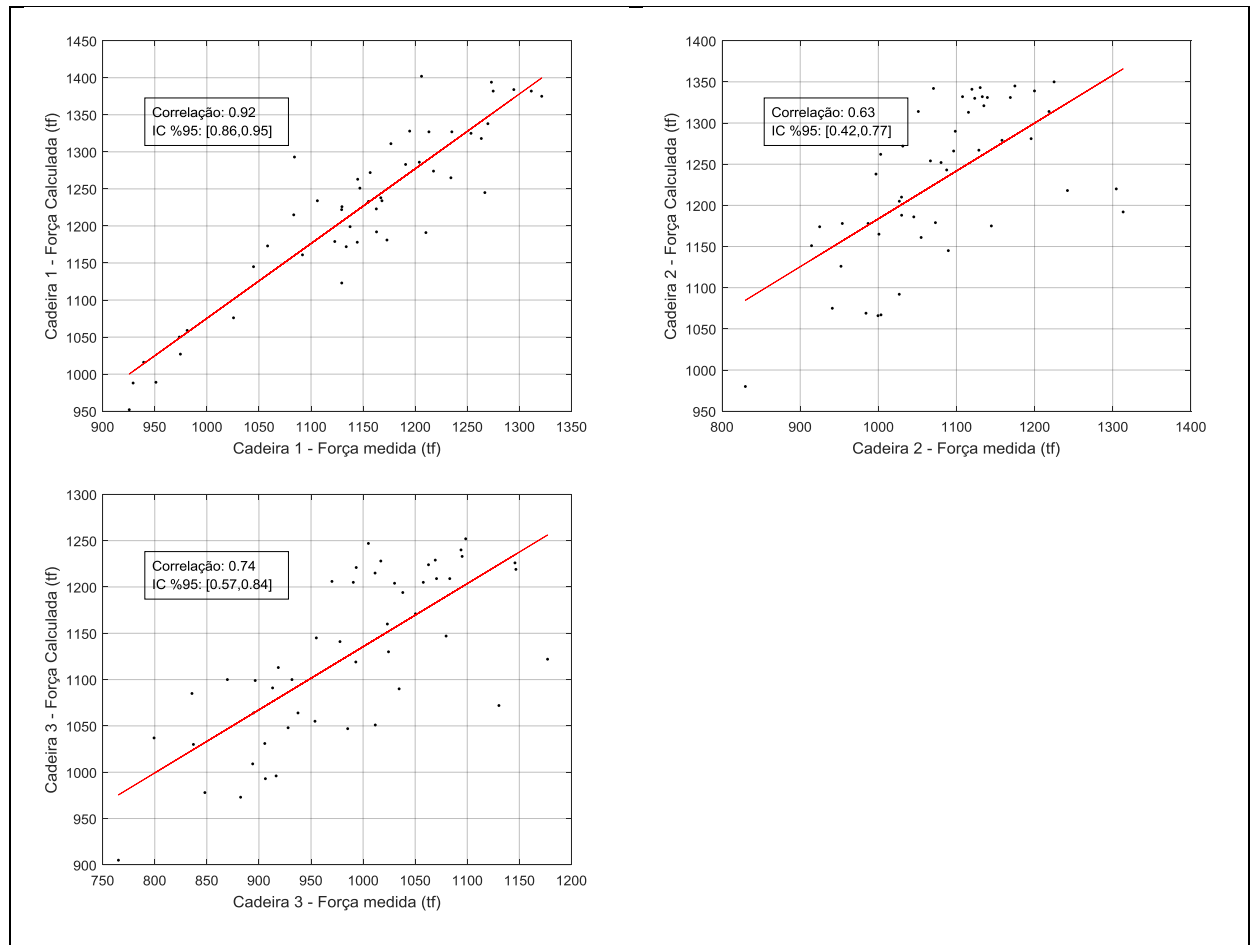


Figura 4-12 - Correlação linear entre força calculada e força medida sem adaptação da curva tensão - deformação ou coeficientes de atrito para 50 bobinas produzidas em sequência

Tabela 4-15 - Correlação Linear entre Força Calculada e Força Medida usando adaptação de coeficientes da curva de fluxo do material para 50 bobinas. Espessura de saída > 0.7mm

Nº de bobinas para adaptação	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Média
2	96	88	90	91.3
3	96	89	91	92.0
4	97	89	91	92.3
5	97	89	91	92.3
10	97	88	90	91.6
Coef.de Atrito	0.03	0.03	0.03	0.07

Os resultados mostrados Tabela 4-15 na indicam que, para o conjunto de bobinas utilizado nos testes, a melhor configuração do algoritmo de adaptação é aquela em que os resultados de produção de 4 ou 5 bobinas produzidas sequencialmente são utilizadas para a adaptação dos coeficientes da curva de fluxo do material, após a adaptação dos coeficientes de atrito tomando como base os resultados de produção da primeira bobina. A correlação das forças calculadas e medidas após a

adaptação para 4 bobinas produzidas sequencialmente é mostrada na Figura 4-13 e a comparação dos resultados sem e com adaptação é sumarizada na Tabela 4-16.

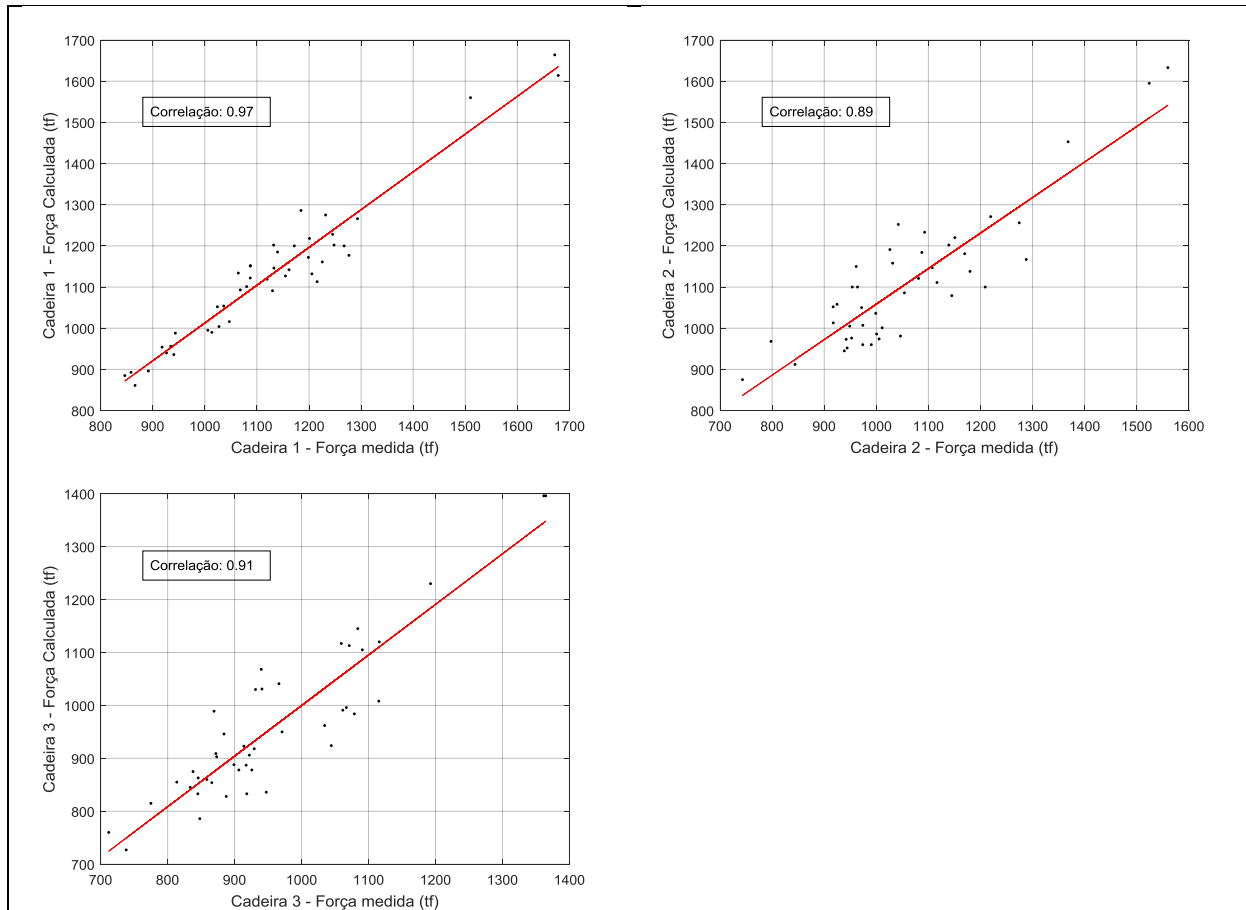


Figura 4-13 - Correlação linear entre força calculada e a força medida sem adaptação para 50 bobinas, espessura de saída > 0.7 mm, janela fixa de 4 bobinas

Tabela 4-16 – Correlação de forças de laminação calculadas e medidas para 50 bobinas em função da adaptação do coeficiente de atrito e curva de fluxo

Cadeira	Correlação de Forças	
	Sem Adaptação'	Com Adaptação
1	92	97
2	63	89
3	74	91

Para verificar a contribuição da adaptação no cálculo de forças de um elevado número de bobinas, a adaptação foi aplicada sobre o mesmo conjunto de bobinas utilizado na Seção 4.3, composto de 1000 bobinas do mesmo grau do aço. A correlação linear entre a força calculada e a força medida para cada cadeira neste caso é mostrada na Figura 4-14. Em função do número elevado de bobinas, não foi possível a seleção de um conjunto de bobinas produzidas sequencialmente.

Assim, as trocas de cilindros de trabalho, que influenciam diretamente no cálculo e adaptação do coeficiente de atrito, não foram consideradas. Todavia, a comparação entre as correlações lineares das forças de laminação calculadas e medidas para cada cadeira com e sem a aplicação da adaptação mostram que a adaptação do coeficiente de atrito e os parâmetros da curva de fluxo do aço resultam em um significativo aumento da precisão do cálculo de força de laminação, como sumarizado na Tabela 4-17.

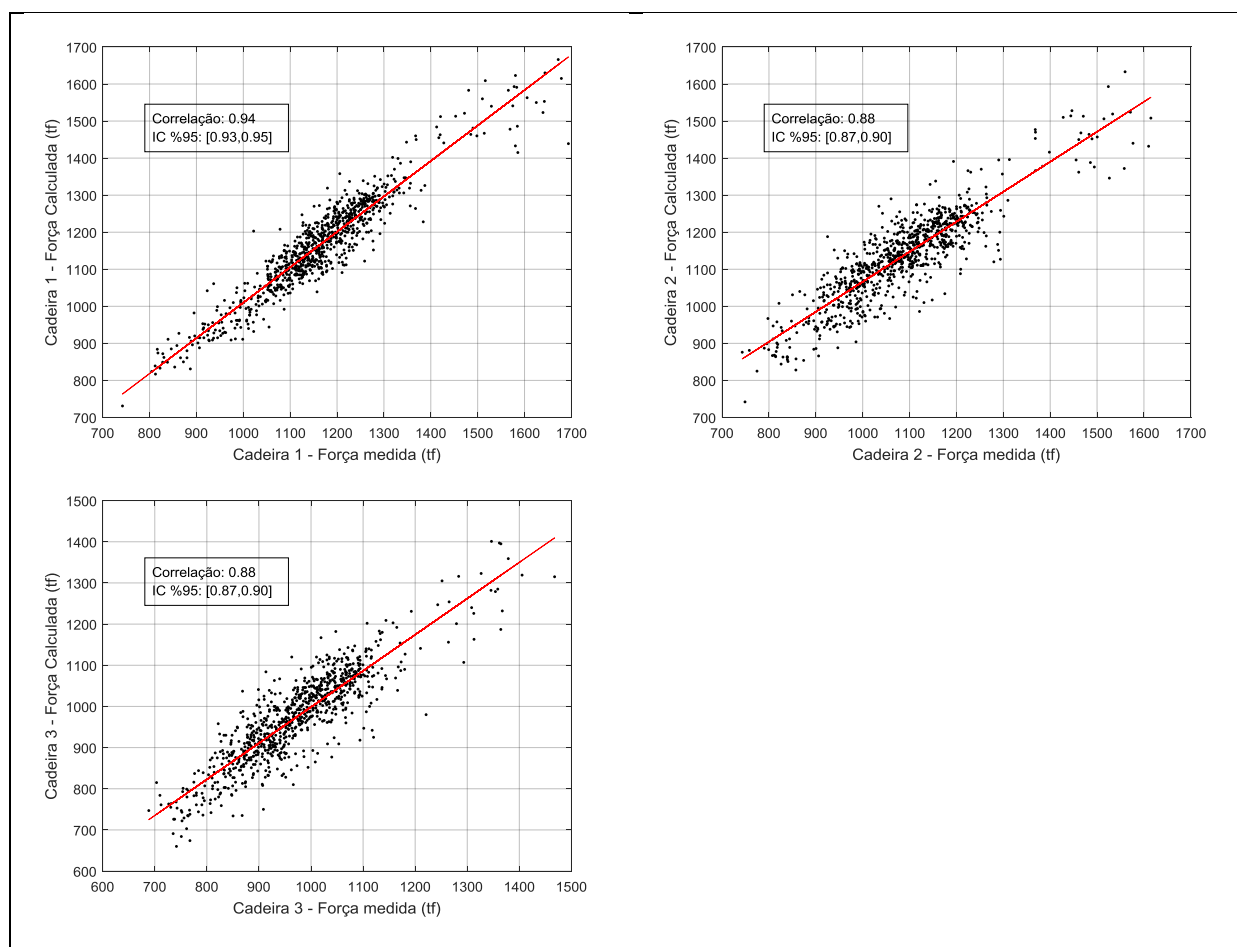


Figura 4-14 - Correlação linear entre força calculada e força medida usando adaptação para 1000 bobinas produzidas em sequência, espessura de saída > 0.7 mm, janela fixa de 4 bobinas

Tabela 4-17 – Correlação de forças de laminação calculadas e medidas para 1000 bobinas, em função da adaptação do coeficiente de atrito e curva de fluxo

Cadeira	Correlação de Forças	
	Sem Adaptação	Com Adaptação
1	94	94
2	84	88
3	85	88

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi abordado o problema de distribuição de forças de laminação em um Laminador de Tiras a Frio em *tandem*, baseado no modelo de Bland e Ford. Uma vez que o problema de distribuição de forças apresenta uma natureza não linear, foi criada um método baseado nas meta-heurísticas Recozimento Simulado (RS) e Algoritmo Genético (AG) para resolver o problema.

Foi verificado que a o algoritmo RS não convergia para as distribuições requeridas, tomando como ponto de partida uma distribuição estocástica. Esta deficiência foi suprida com a utilização do método do fator Beta (β), proposta por Guo, que emprega os limites de redução objetivado das cadeiras para obter uma solução inicial factível.

O AG foi desenvolvido aplicando funções simples de cruzamento e mutação entre indivíduos inicializados com distribuições de reduções de espessura entre as cadeiras, obtidas de forma estocástica, e não apresentou problemas de convergência em nenhuma condição analisada. A características mais importante deste método é sua independência de uma solução inicial para a geração de resultados de qualidade.

O RS mostrou-se mais eficiente que o AG, quando comparado o tempo de execução, para a distribuição de reduções e potências entre as cadeiras, desde que uma boa distribuição inicial de reduções de espessura seja empregada no primeiro, como a obtida com a aplicação do método do Fator Beta (β). Já o AG mostrou-se mais eficiente que o RS para distribuições de potência com redução fixa e distribuição de potência com força específica na última cadeira.

Ambos os algoritmos desenvolvidos apresentaram uma baixa variabilidade dos resultados produzidos e baixo tempo de execução, da ordem de 250 ms, executados em um computador pessoal (PC). Este tempo é pelo menos oito vezes menor que o necessário à execução do algoritmo empregado no laminador em estudo atualmente, que utiliza um servidor com hardware dedicado para esta tarefa.

Após a verificação do correto funcionamento dos algoritmos, estes foram empregados na obtenção de distribuições de redução de espessura ou potência, e ainda considerando a força ou redução específica na última cadeira, tomando dados reais de produção como referência. Os resultados obtidos com a aplicação destes algoritmos foram comparados com os resultados reais de produção de um tipo de aço específico e apresentaram boa correlação.

Foi desenvolvido um algoritmo de adaptação do coeficiente de atrito da interface cilindro-tira e dos parâmetros da curva tensão - deformação do aço, visando a melhoria na precisão da estimação das forças de laminação. Aplicado à mesma base de dados empregada na validação dos algoritmos, verificou-se sua eficácia no ajuste dos parâmetros e contribuição para a obtenção de forças de laminação mais precisas através do aumento da correlação entre as forças calculadas e medidas.

Como trabalhos futuros, propõe-se a análise do desempenho dos algoritmos implementados para diferentes tipos de aço, utilizando curvas de fluxo de materiais de maior resistência e menor espessura, cada vez mais exigidos pela indústria. Quanto à adaptação, propõe-se a utilização de um algoritmo de minimização de busca global, com restrições de variação dos parâmetros, para evitar que convergências para mínimos locais afetem a qualidade da solução obtida. Ainda, é necessário o estudo da influência da troca dos cilindros de trabalho na estimação do coeficiente de atrito tira-cilindro, para uma melhor estimação das forças de laminação logo após este evento.

Finalmente, propõe-se a utilização dos algoritmos em ambiente real de produção, em função do alto desempenho e eficiência na geração das distribuições de forças e reduções requeridas.

5.1 Produtos da Dissertação

- OLIVEIRA, M. R. S., Souza, Marcone J.F. SA-LTF: Um Algoritmo baseado em *Simulated Annealing* para distribuição de forças em um laminador de tiras a frio In: XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SBPO 2015, 2015, Porto de Galinhas. Anais do XLVII SBPO. Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2015. v.47. p.1428 – 1439
- Desenvolvimento de uma Biblioteca de Ligação Dinâmica (DLL) em linguagem de alto nível (C-Sharp), contendo os algoritmos para cálculo da força de laminação a frio baseado no modelo de Bland e Ford, bem como das distribuições de forças e reduções entre as cadeiras, facilmente aplicáveis em ambiente real de produção em Laminadores de Tiras a Frio em *tandem* e em outros tipos de laminadores a frio.

Referências Bibliográficas

ANSI/ISA, ed., 2010. *88.00.01: Batch Control Part 1: Model and Terminology*.

Araújo, F.C.R. e Souza, M.J.F., eds., 2006. Um método híbrido, baseado em Simulated Annealing e Método da Descida, para resolver o Problema da Seleção de Projetos Mineiros Concorrentes. Em: *Anais do IV CBMCA*. Belo Horizonte, 2006. p. 1-11. IBRAM.

ASTM, I., ed., 2007. *E646-07 Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials*. Palo Alto, EUA.

ASTM, I., ed., 2015. *E8/E8M - 15a Standard test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Palo Alto, EUA.

Bedi, D.S., ed., 1969. Effect of speed in cold strip rolling with Coulomb friction. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 11, p. 961-970.

Bland, D.R. e Ford, H., eds., 1952. Cold Rolling with Strip Tension - Part III - An Approximate Treatment of the Elastic Compression of the Strip in Cold Rolling. *Journal of the Iron and Steel Institute*, de Julho. p.129-133.

Bryant, F.G. e Spooner, P.D., eds., 1973. On-line adaptation of Tandem-mill schedules. *The Iron and Steel Institute*, p.141-157.

Chakrabarty, J., ed., 2006. *Theory of Plasticity, 3rd Edition*. United Kingdom: Elsevier Butterworth-Heinemann.

Courtney, T.H., ed., 2005. *Mechanical Behaviour of Materials*. 2nd ed. Long Grove, Illinois: Waveland Press, Inc.

Dagnese, J., ed., 2012. *Análise do Comportamento Elasto-plástico de um Aço AISI 1045 em Baixas Deformações*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação.

Dorigo, M. e Stützle, T., eds., 2004. *Ant Colony Optimization*. MIT Press, Bradford Books.

Durovsky, F., Zboray, L. & Kerkova, Z., eds., 2008. Computation of Rolling Stand Parameters by Genetic Algorithm. *Acta Polytechnica Hungarica*, v. 5 n. 2, p. 59-69.

Du, K.-L. e Swamy, M.N.S., eds., 2016. *Search and Optimization by Metaheuristics - Techniques and Algorithms Inspired by Nature*. Switzerland: Springer International Publishing AG.

Eiben, A.E. e Smith, J.E., eds., 2003. *Introduction to Evolutionary Computing*. Berlin: Springer.

Fleck, N.A. e Johnson, K.L., eds., 1987. Towards a new theory of cold rolling thin foil. *Pergamon Journals Ltd*, v. 29 n. 7, p. 507-523.

Fleck, N.A., Johnson, K.L., Mear, M.E. & Zhang, L.C., eds., 1992. Cold rolling of foil. *Proc Instn Mech Engrs*, v. 206, p. 119-131.

Ford, H., Ellis, F. & Bland, D.R., eds., 1951. Cold Rolling with Strip Tension - Part I - A New Approximate Method of Calculation and a Comparison with Other Methods. *Journal of The Iron and Steel Institute*, v. 168, p. 107-122.

Gudur, P.P., Salunkhe, M.A. & Dixit, U.S., eds., 2007. *A theoretical study on the application of asymmetric rolling for the estimation of friction*. [Online], Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM324/gudur.pdf> [Acessado em: 14 de Setembro de 2014].

Guo, R.M., ed., 1997. Application of PC and LAN for a Level 2 Setup Model of a Single Stand Reversing Mill. *Iron and Steel Engineering*, v. 8, p. 41-46.

Hibbeler, R.C., ed., 2010. *Resistência dos Materiais*. 7th ed. Traduzido por A.S. Marques. São Paulo: Pearson Prentice Hall.

Holland, J.H., ed., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Holman, J.P., ed., 1994. The Correlation Coefficient. Em: J.J. Corrigan & E. Castellano, eds. *Experimental Method for Engineers*. New York: McGraw-Hill, Inc. p.88-90.

Jiang, W., Liu, L., Wang, Y. & Mao, B., eds., 2011. Application of improved ant colony algorithm in load distribution optimization of tandem cold rolling. Em: *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference on*. Hohhot, 2011. p. 1070-1075. IEEE.

Johnson, K.L. e Bentall, R.H., eds., 1969. The onset of yield in the cold rolling of thin strip. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 17 n. 4, p. 253-264.

Johnson, W. e Mellor, P.B., eds., 1962. *Plasticity for mechanical engineers*. London, Princeton: Van Nostrand Reinhold.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. & Vecchi, M.P., eds., 1983. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, v. 220 n. 4598, p. 671-680.

Le, H.R. e Sutcliffe, M.P.F., eds., 1999. A robust model for rolling of thin strip and foil. *International Journal of Mechanic Sciences*, v. 43 n. 6, p. 1405-1419.

Liu, Y., ed., 2002. *Friction at strip-roll interface in cold rolling, Doctor of Philosophy thesis*. [Online] Wollongong: Faculty of Engineering, University of Wollongong, 2002, Disponível em: <http://ro.uow.edu.au/theses/1827>.

Luke, S., ed., 2013. *Essentials of Metaheuristics*. [Online], Disponível em: <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics> [Acessado em: 03 de Abril de 2016].

McConnel, C. e Lenard, F.G., eds., 2000. Friction in cold rolling of a low carbon steel with lubricants. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 99 n. 1, p. 86-93.

McGregor, T.W.j., ed., 1966. *Elements of Mechanical Metallurgy*. New York: Macmillan.

- Metropolis, N. et al., eds., 1953. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, v. 21 n. 6, p. 1087-1092.
- Nelder, J.A. e Mead, R.A., eds., 1965. A Simplex Method for Function Minimization. *Computer Journal*, v. 7 n. 4, p. 308-313.
- Orowan, E., ed., 1943. Graphical calculation of roll pressure with the assumptions of homogeneous compression and slipping friction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, v. 150, p. 141.
- Pereira, F.J.B., ed., 2013. Algoritmos Genéticos. Em: *Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística*. Belo Horizonte, Minas Gerais: Editora UFMG. p.26-28.
- Pires, C.T.d.Á., ed., 2007. *Sistema de Otimização e Adaptação para a geração de Referência em um Laminador de Tiras a Frio (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica)*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Pires, C.T.d.Á., Ferreira, H.C. & SALES, R.M., eds., 2006. Set-up optimization for tandem cold mills: a case study. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 173 n. 3, p. 368-375.
- Roberts, W.L., ed., 1978. *Cold Rolling of Steel*. New York e Basel: Marcel Dekker, Inc.
- Roweis, S., ed., 1999. *Levenberg-Marquardt Optimization*. [Online], Disponível em: <https://www.cs.nyu.edu/~roweis/notes/lm.pdf> [Acessado em: 19 de Outubro de 2016].
- Shu-zong, C. et al., eds., 2012. Online calculation model of rolling force for cold rolling mill based on numerical integration. Em: *2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Taiyuan, 2012. p. 3951 - 3955. IEEE.
- Skiena, S.S., ed., 2008. The Algorithm Design Manual. Em: Skiena, S.S. *The Algorithm Design Manual*. Springer. p.254-258.
- Swift, H.W., ed., 1952. Plastic Instability Under Plane Stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 1 n. 1, p. 1-18.
- Takahashi, R.H.C., ed., 2009. *Notas de Aula - Otimização Escalar e Vetorial*. [Online] Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Matemática, Disponível em: <http://www.mat.ufmg.br/~taka/Download/OTEV-Vol3.pdf>.
- Takahashi, R.H.C. e Gaspar-Cunha, A., eds., 2013. *Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística*. Belo Horizonte, Minas Gerais: Editora UFMG.
- Tieu, A.K. e Liu, Y.J., eds., 2004. Friction variation in the cold-rolling process. *Tribology International*, p.177-183.
- Tieu, A.K. et al., eds., 2005. Material Resistance and Friction in Cold Rolling. Em: *6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization*. Rio de Janeiro, 2005.

Udomphol, T., ed., 2007. *Rolling of Metals - Chapter 3*. [Online], Disponível em: http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/03_Rolling%20of%20metals.pdf [Acessado em: 4 de Dezembro de 2014].

Underwood, L.R., ed., 1950. *The Rolling of Metals*. New York: John Wiley and Sons, Inc.

von Karmann, T., ed., 1925. Beitrag zur theorie des Walzvorganges. *Z. angew Math. Mech.*, v. 5, p. 139.

Wang, J.S. et al., eds., 2005. Adaptive calculation of deformation resistance model of online process control in tandem cold mill. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 162, p. 586-590.

WorldAutoSteel, ed., 2015. *Dual Phase (DP) Steels*. [Online] World Auto Steel, Disponível em: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/dual-phase-dp-steels/> [Acessado em: 06 de Dezembro de 2015].

Apêndice A

Escolha da Solução Inicial no Algoritmo de Recozimento Simulado

O Algoritmo de Recozimento Simulado utiliza uma solução inicial do problema proposto para o qual deseja-se a minimização ou maximização da função custo. Neste trabalho, a função custo deve ser minimizada para a obtenção da melhor distribuição de reduções de espessura ou potências entre as cadeiras do Laminador de Tiras a Frio.

Dois métodos de obtenção de uma solução inicial foram verificados e escolhido o mais adequado à aplicação, usando como critério de escolha a melhor solução final obtida a partir da solução inicial. Neste caso, a melhor a distribuição de reduções ou potências entre as cadeiras do Laminador de Tiras a Frio. Para os testes, foram utilizados os parâmetros do Laminador, restrições e distribuição de reduções mostrados na Tabela A.1. Os dados da bobina utilizada são mostrados na

Tabela A.2.

Os parâmetros da curva tensão - deformação do aço usados são mostrados na Tabela A.3 . Os parâmetros do algoritmo, mostrados na Tabela A.4 , foram mantidos constantes, com exceção do método de geração da solução inicial. O algoritmo foi executado 50 vezes para cada método de geração da solução inicial. O método estocástico foi capaz de gerar apenas 24 soluções factíveis. Para as demais execuções, não foi possível obter uma temperatura inicial que permitisse sua utilização na otimização. Os valores da função objetivo minimizada e o tempo de execução de cada algoritmo, considerando 24 execuções de cada, são apresentados na Figura A.1.

Tabela A.1 - Configuração do LTF para verificação do método de geração de solução inicial

Parâmetro	Cadeira 1	Cadeira 2	Cadeira 3	Cadeira 4
Relação da caixa de redução (%)	0.38	0.38	0.38	0.42
Eficiência do inversor de frequência (%)	100	100	100	100
Eficiência da caixa de redução	100	100	100	100
Número de motores na cadeira	2	2	2	1
Potência elétrica total (KW)	5500	5500	5500	3000
Fator de utilização da potência instalada	1	1	1	1
Força Mínima (tf)	100	100	100	100
Força Máxima (tf)	3000	3000	3000	3000
Potência Mínima (KW)	0	0	0	0
Potência Máxima (KW)	5500	5500	5500	3000
Cilindro - Rugosidade Inicial Média (u/Ra)	0.745	0.695	0.710	5.025
Diâmetro Médio (mm)	455.0	483.2	497.1	516.8
Comp. Laminado Médio (Km)	38.724	58.996	81.088	84.051
Cilindro - Coef. Atrito[0,1]	0.017	0.020	0.016	0.095
Tensão de entrada (MPa)	53.9	98.9	104.2	108.6
Tensão de saída (MPa)	98.9	104.2	108.6	36.0

Dist. Redução Requerida (%)	33.00	35.00	30.00	2.00
-----------------------------	-------	-------	-------	------

Tabela A.2 - Dados da bobina usada na verificação do método de geração de solução inicial para o Algoritmo de Recozimento Simulado

Grau do Aço	Largura (mm)	Espessura de Entrada (mm)	Espessura de Saída (mm)	Módulo de Elasticidade (Pa)	Coefficiente de Poisson
ES_ARCE01	1206	4.637	1.921	230×10^9	0.3

Tabela A.3 - Parâmetros da curva de fluxo do aço testado

Alfa	Beta	Gama	Offset
63.0926	0.2067	0.0010	15.000

Tabela A.4 - Parâmetros do algoritmo Recozimento Simulado

Parâmetro	Valor
Temperatura Inicial	0.1
Fator de Aumento de Temperatura	1.1
Coefficiente de Mudança Inicial de Temperatura	.98
Aceita	.98
Fator de Resfriamento	.98
Número máximo de iterações	100
Fator de Vizinhaça	0.5
Função Objetivo Mínima	10^{-5}
Número Máximo de Reinícios	2
Gradiente – Alfa Inicial	10^{-6}
Gradiente – Eps	10^{-6}
Gradiente – Delta	10^{-10}

Analisando os *boxplots* da função objetivo minimizada e o tempo de execução do algoritmo utilizando o método de Guo e o método estocástico para a obtenção da solução inicial, é clara a superioridade do método de Guo em ambos os casos. Como observado acima, em 50 execuções, a função estocástica falhou em 26 execuções na geração da solução inicial. Assim, é possível concluir que o método de Guo é recomendado para a geração da solução inicial no algoritmo de Recozimento Simulado para a otimização da distribuição de reduções e forças do Laminador de Tiras a Frio.

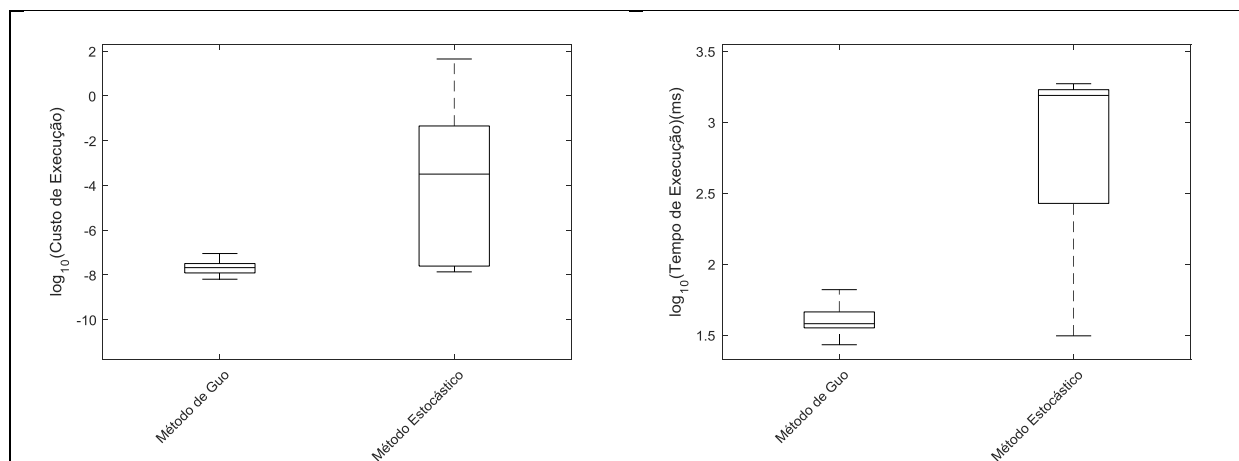


Figura A.1 – *Boxplots* do custo e tempo de execução do Algoritmo de Recozimento Simulado utilizando solução inicial pelo método de Guo e método estocástico