

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Celso Tadeu Bielskis

**Efeito da tração a ré no torque inicial durante a laminação de tiras a
frio**

São Paulo

2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Celso Tadeu Bielskis

Efeito da tração a ré no torque inicial durante a laminação de tiras a frio

Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, para obtenção do título de Mestre em Processos Industriais.

Área de concentração: Desenvolvimento e Otimização de Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

São Paulo

Junho de 2006

A minha esposa Vânia e aos
meus filhos Celso e Júlia;

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury, pela orientação segura, disponibilidade e apoio.

Ao prof. Dr. Ronald Lesley Plaut, pela contribuição técnica para o desenvolvimento desta dissertação.

A diretoria da Brasmetal Waelzholz, em especial ao Dr. Antenor Ferreira Filho, pelo apoio e incentivo.

Ao pessoal da produção da Brasmetal Waelzholz, especialmente aos operadores do laminador EBT e ao encarregado Cláudio Ronqui, pelo apoio e paciência na realização dos experimentos.

Aos amigos de manutenção Carlos Paladini, Cláudio Monarini, Claudemir Coquetti, Vito Palo e Milton Oliveira, pela ajuda na realização dos experimentos e coleta de dados.

A todos que de alguma forma contribuíram de forma direta ou indireta para realização deste trabalho.

Sobretudo a Deus.

RESUMO

Na laminação a frio de tiras de aço realizada em um laminador quádruplo reversível, foi observado que durante a introdução, quando a ponta da tira de aço é transportada dos cilindros de laminação até o bobinador reversível, ocorrem picos no torque de laminação. Embora, esses picos ocorram em intervalos de tempo relativamente pequenos, na ordem de milisegundos, faz com que os componentes mecânicos do sistema de acionamento dos cilindros de laminação fiquem sujeitos a esforços superiores aos impostos durante o passe de laminação. Esta relação entre o pico de torque e o torque médio de laminação é denominada como fator de amplificação de torque – *TAF - Torque Amplification Factor*.

Redes Neurais Artificiais (RNA) foram utilizadas para relacionar os parâmetros operacionais com a ocorrência do *TAF* durante a introdução. Para a configuração da RNA, foram coletados dados reais de processo e com base na equação do torque de laminação elaborada por Ford [25], foram determinados os dados de entrada da RNA. Com isso verificou-se, entre os parâmetros operacionais, que a tração de ré influencia o torque durante a introdução.

Com base em trabalhos publicados por Ford, Ellis e Bland [10] e Pawelski e Lindemann [24], ensaios práticos foram realizados, e com isso, confirmada a influência da tração ré no torque de laminação durante a introdução.

Palavras-chave: Laminação a frio, Redes Neurais Artificiais, Fator de amplificação de torque.

ABSTRACT

During cold rolling of a steel strip in a four high mill, it has been observed that when the strip is transported between the rolls and the coiler, rolling torque peaks occurred. Although these peaks happen with a relatively short frequency, measured in milliseconds, the mechanical components that drive the working rolls are subject to higher loads than those observed during a regular pass. The relationship between the peak torque and the mean rolling torque is known as the Torque Amplification Factor – TAF.

Neural Networks have been utilized to relate the operational factors with the appearance of the TAF during introduction of the steel strips in the rolling mill. For the configuration of the neural network, regular process data were collected. Based on the rolling torque equation of Ford [25], the neural network entry data was selected. Some operation parameters were used to study the influence of the back tension on the torque during the introduction stage. Based on the publications of Ford, Ellis and Bland [10], Pawelski and Lindemann [24], experiments were carried out in order to confirm that influence.

Keywords: Cold rolling mill, Neural Networks, Torque amplification factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Produção mundial de aço.....	1
Figura 1.2	Gaiola de um laminador quádruo.....	3
Figura 1.3	Laminador quádruo reversível.....	4
Figura 1.4	Representação esquemática da gaiola.....	6
Figura 1.5	Representação esquemática do acionamento.....	7
Figura 2.1	Alongamento do fio sob ação de forças.....	9
Figura 2.2	Curva de tração real e convencional.....	11
Figura 2.3	Gráfico duplo logarítmico.....	11
Figura 2.4	Arco de contato.....	12
Figura 2.5	Representação do achatamento do cilindro de trabalho.....	14
Figura 2.6	Variação do coeficiente de atrito com a velocidade durante a laminação a frio de aço, utilizando emulsão como lubrificante.....	15
Figura 2.7	Representação da velocidade ao longo do arco de contato.....	17
Figura 2.8	Representação esquemática do braço de alavanca.....	18
Figura 2.9	Relação entre o torque de laminação e o braço de alavanca de acordo com O. Pawelski e F. Lindemann.....	19
Figura 2.10	Variação do braço de alavanca com a aplicação da tração.....	20
Figura 2.11	Diagrama proposto por Hill.....	21
Figura 2.12	Diagrama proposto por O. Pawelski e F. Lindemann.....	22
Figura 2.13	Influência da tração na pressão de laminação.....	23
Figura 2.14	Representação gráfica dos pulsos gerados pelo <i>Jog</i>	23
Figura 2.15	Esquema de introdução até os cilindros.....	25
Figura 2.16	Esquema de introdução até o mordente.....	25
Figura 2.17	Ocorrência do <i>TAF</i> durante a introdução.....	26
Figura 2.18	Eixo de transmissão dos cilindros de trabalho.....	27
Figura 2.19	Modelo de transmissão em neurônios biológicos.....	28
Figura 2.20	Modelo do neurônio artificial.....	28
Figura 2.21	Esquema de uma rede <i>Multilayer Perceptron</i>	29
Figura 4.1	Esquema da instrumentação para coleta de dados.....	34
Figura 4.2	Tela de configuração <i>Trigger Dialog</i>	35
Figura 4.3	Arquivos gerados pelo <i>ibaPda Lite</i>	36
Figura 4.4	Arquivo gerado com a coleta de dados.....	37
Figura 4.5	Análise do <i>TAF</i> com o acionamento do <i>Jog</i>	37
Figura 4.6	Análise do pico de torque com escala de 2 ms.....	38
Figura 4.7	Medição do torque médio de laminação.....	38
Figura 4.8	Relação entre o raio achatado do cilindro de laminação com a aplicação de tração e sem a aplicação de tração.....	40
Figura 4.9	Variação obtida do esforço de laminação com aplicação de tração e sem aplicação de tração.....	40
Figura 4.10	Configuração das RNAs.....	42
Figura 4.11	Proporções para treino, validação e teste da RNA.....	43

Figura 4.12	Representação esquemática do dispositivo.....	45
Figura 4.13	Resultados obtidos com a utilização do dispositivo.....	46
Figura 4.14	Resultados obtidos com a aplicação da carga cíclica.....	46
Figura 4.15	Curva Tensão x Número de ciclos.....	47
Figura 5.1	Erro médio.....	48
Figura 5.2	Relação entre dados obtidos e o desejado.....	49
Figura 5.3	Relevância entre os dados de entrada com relação ao dado de saída.....	49
Figura 5.4	Relação obtida através da RNA 1 entre o braço de alavanca e o torque.....	50
Figura 5.5	Relação obtida através da RNA 2 entre a tração de ré e o torque...	50
Figura 6.1	Resultados obtidos durante a introdução da tira com variações na tração de ré.....	52
Figura 6.2	Verificação da influência da tração conforme proposta de Pawelski e Lindemann.....	52
Figura 6.3	Verificação da influência da tração com base no método proposto por Hill.....	54
Figura 6.4	Avaliação do braço de alavanca durante a introdução e passe de laminação.....	55
Figura 6.5	Avaliação do braço de alavanca com variação da tração durante a introdução.....	55
Figura 6.6	Posição do ponto neutro fora do arco de contato.....	56
Figura 6.7	Ponto neutro posicionado no arco de contato.....	56
Figura 6.8	Distribuição do torque médio nos passes de laminação.....	57
Figura 6.9	Distribuição da força de laminação nos passes.....	58
Figura 6.10	Posicionamento do ponto neutro em relação ao arco de contato.....	59
Figura 6.11	Posicionamento do ângulo neutro corrigido através de cálculos.....	59
Figura 6.12	Distribuição da pressão nos passes de laminação.....	60
Figura 6.13	Estimativa da vida útil do pino de cisalhamento, em ciclos, com base em ensaio realizado com a variação da tração.....	61
Figura 6.14	Estimativa da vida útil do pino de cisalhamento, em horas, com base em ensaio realizado com a variação da tração.....	61
Figuras 6.15	Números de ciclos obtidos com os esquemas de passes.....	62
Figuras 6.16	Estimativa da vida dos pinos de cisalhamento, na ocorrência do TAF, nos esquemas de passes proposto e usual.....	62
Figuras 6.17	Estimativa da vida dos pinos de cisalhamento, no decorrer dos passes, nos esquemas de passes proposto e usual.....	63
Figura 7.1	Relação entre coeficiente de atrito e torque de laminação.....	65
Figura A1	Tela inicial do <i>Neurosolutions</i>	69
Figura A2	Menu do <i>Neurosolutions</i>	70
Figura A3	Diferentes tipos de rede neural.....	71
Figura A4	Planilha com dados para treinamento, validação e teste.....	72
Figura A5	Tela para configuração do processo de treino.....	72
Figura A6	Configurações da rede neural.....	73
Figura A7	Relatórios gerados na forma gráfica.....	73
Figura A8	Relevância dos dados de entrada em relação aos dados de saída..	74
Figura A9	Exemplo de dados produzido pela RNA.....	74
Figura B1	Esquema de montagem do pino de cisalhamento.....	76
Figura B2	Diagrama para obtenção de T.....	76
Figura B3	Diagrama para obtenção de S.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Configuração do laminador quádruplo reversível.....	5
Tabela 2.1	Constantes utilizadas para a determinação do coeficiente de atrito enquanto não é atingida a condição de lubrificação hidrodinâmica...	14
Tabela 2.2	Parâmetros de laminação para a realização do ensaio proposto por O. Pawelski e F. Lindemann.....	19
Tabela 4.1	Variáveis de entrada e saída utilizadas na elaboração da RNAs.....	41
Tabela 4.2	Resultados obtidos através de ensaios no pino.....	44
Tabela 4.3	Parâmetros utilizados no ensaio.....	45

LISTA DE SIMBOLOS

Δh	Redução na espessura
h_i	Espessura inicial
h_0	Espessura de entrada
h_f	Espessura de saída
h_n	Espessura no ponto neutro
e	Deformação convencional
ε	Deformação verdadeira
σ	Tensão
σ_{bi}	Tensão no estado biaxial
K	Coefficiente de resistência
n	Coefficiente de encruamento
l_d	Projeção do arco de contato
l'_d	projeção do arco de contato com raio achatado do cilindro de laminação
R	Raio do cilindro de laminação
R'	Raio achatado do cilindro de laminação
α	Ângulo de contato
α_N	Ângulo neutro
μ	Coefficiente de atrito
V	Velocidade de laminação
V_p	Velocidade periférica dos cilindros de laminação
V_i	Velocidade inicial
V_f	Velocidade final
M_d	Torque de laminação com a aplicação de tração
M	Torque de laminação sem aplicação de tração
P	Esforço de laminação sem aplicação de tração
F	Esforço de laminação com aplicação de tração
S_f	Deslizamento avante
P	Pressão específica
p_m	Pressão específica média
a	Braço de alavanca
w	Fração do braço de alavanca em relação ao arco de contato
σ_r	Tração de ré
σ_a	Tração avante
λ_1, λ_2	Adimensionais determinados por Hill
b	Largura da tira de aço

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1 Introdução	1
1.1 Forma construtiva do laminador.....	2

CAPÍTULO 2

2 Revisão bibliográfica	8
2.1 O Processo de laminação.....	8
2.2 Fator de amplificação de torque.....	23
2.3 Introdução a Redes Neurais Artificiais – RNA.....	27

CAPÍTULO 3

3 Objetivos	30
--------------------	-----------

CAPÍTULO 4

4 Procedimento experimental	31
4.1 Coleta e análise de dados.....	31
4.2 Configuração das RNAs.....	38
4.3 Curva teórica <i>Tensão x Número de ciclos</i> do pino rompedor.....	43

CAPÍTULO 5

5 Análise através das Redes Neurais Artificiais	48
--	-----------

CAPÍTULO 6

6 Resultados obtidos: Discussão	51
--	-----------

CAPÍTULO 7

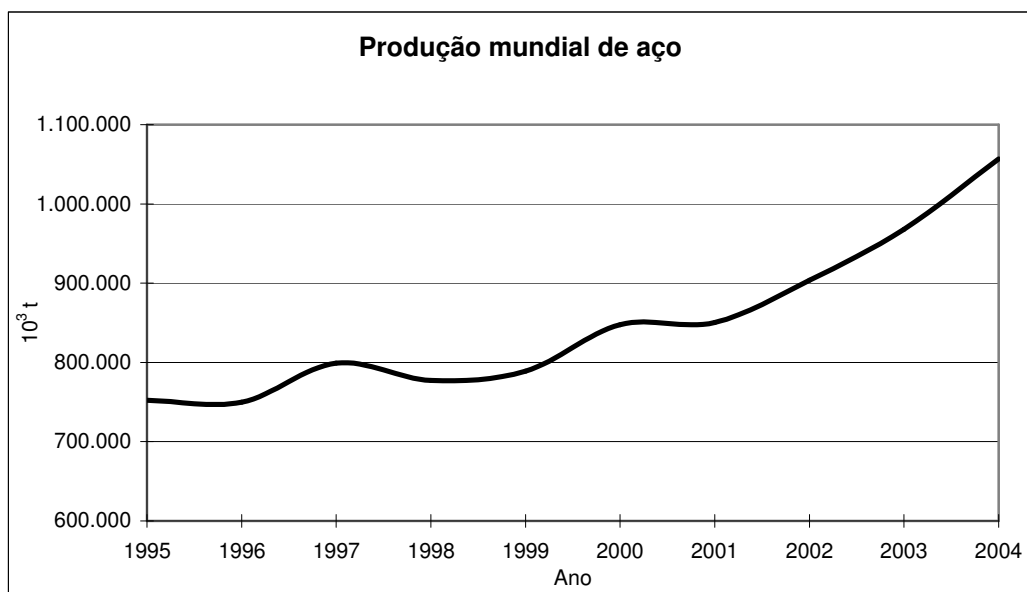
7 Conclusão e pesquisas futuras	64
7.1 Conclusão.....	64
7.2 Pesquisas futuras.....	65

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
APÊNDICE	69
Apêndice A Exemplo de utilização do <i>Neurosolutions</i>	69
Apêndice B Elaboração curva teórica Tensão x Número de ciclos	75
Apêndice C Seqüência de cálculo dos passes de laminação.....	78
Apêndice D Elaboração do diagrama “Pressão no arco de contato”	80
Apêndice E Elaboração do diagrama “Distribuição da força nos passes de laminação”	81

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Observando-se a tendência crescente da produção mundial de aço bruto (Fig 1.1), pode-se concluir que mesmo com o surgimento e aplicação de materiais alternativos, o aço ainda é um produto largamente utilizado devido as suas características e capacidade de reciclagem.



Fonte: IISI, 2005.

Figura 1.1- Produção mundial de aço

Parte da produção siderúrgica irá atender o mercado de aços planos, onde existe uma vasta gama de produtos disponíveis, sendo que, a grande maioria desses produtos provém de dois tipos de bobinas:

- a. Bobinas laminadas a quente
- b. Bobinas laminadas a frio

Os produtos laminados a quente atendem às principais aplicações do mercado transformador de aço. São usados especialmente na indústria automobilística, na construção civil, autopeças, tubos, vasilhames, implementos agrícolas e relaminação.

No caso específico da relaminação, as relaminadoras recebem boa parte das bobinas laminadas a quente e processam-nas visando à obtenção da fita de aço laminada a frio, com características de qualidade superiores à laminada a quente, como por exemplo: melhor acabamento superficial, tolerâncias dimensionais restritas e uniformes e propriedades mecânicas mais homogêneas e específicas de acordo com a necessidade de aplicação.

Para se chegar ao produto final no processo de relaminação, a fita de aço deverá passar por diversas etapas, que se iniciam pelo recebimento da bobina vinda da laminação a quente. A bobina, então, passa por um processo de decapagem e, em seguida, é dividida em rolos que vão para a laminação a frio de desbaste. Concluído o desbaste, o material vai para o recozimento e retorna para a laminação de acabamento, ficando pronto para ser dividido em rolos menores, receber acabamento superficial, como por exemplo, revestimento por eletrodeposição e finalmente ser embalado e enviado ao cliente final.

Esta dissertação será desenvolvida com foco numa etapa do processo de laminação a frio de uma importante relaminadora brasileira, a Brasmatal Waelzholz. E está subdividida em capítulos conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1: é feita uma introdução ao tema e uma descrição do laminador da Brasmatal Waelzholz.

- Capítulo 2: é feita uma revisão bibliográfica introdutória aos fundamentos da laminação a frio e sobre a utilização de redes neurais artificiais.

- Capítulo 3: são apresentados os objetivos da dissertação

- Capítulo 4: são apresentados os procedimentos utilizados na coleta de dados, configuração da rede neural e levantamento da curva teórica *Tensão x Número de ciclos* do pino rompedor.

- Capítulo 5: são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a utilização da rede neural artificial.

- Capítulo 6: são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o processo.

- Capítulo 7: são apresentadas as conclusões da dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Forma construtiva do laminador.

A laminação a frio do aço consiste em realizar sistematicamente uma deformação plástica na tira de aço, a fim de se obter uma redução da sua espessura transversal. Essa redução é alcançada através da passagem da tira entre dois cilindros girantes e é chamada a frio porque é executada abaixo da temperatura de

recristalização do aço conformado [3,15,31]. Essa operação é executada em equipamentos chamados laminadores.

A denominação dos laminadores pode vir da quantidade de cilindros e como estão arranjados dentro da gaiola (Figura 1.2), da quantidade de gaiolas ou cadeiras de laminação e do acionamento, reversível ou não reversível.[16,27]

Este trabalho é desenvolvido em um laminador do tipo quádruplo reversível (Fig. 1.3) da Brasmetal Waelzholz, (Características do laminador, vide Tabela 1.1). O laminador quádruplo é construído com quatro cilindros, sendo que os dois de menor diâmetro são chamados de cilindros de trabalho e os dois de maior diâmetro de cilindros de encosto ou apoio. Os cilindros de trabalho têm o contato direto com a chapa e os de encosto apóiam os de trabalho; isto é necessário porque, na laminação a frio, a espessura mínima tem relação direta com o diâmetro do cilindro de trabalho, ou seja, quanto menor o diâmetro, maior a possibilidade de se atingir espessuras menores [16]. Por outro lado, quanto menor o diâmetro do cilindro maior a sua deflexão durante a laminação e para minimizar essa deflexão utiliza-se o cilindro de encosto ou de apoio.[27]

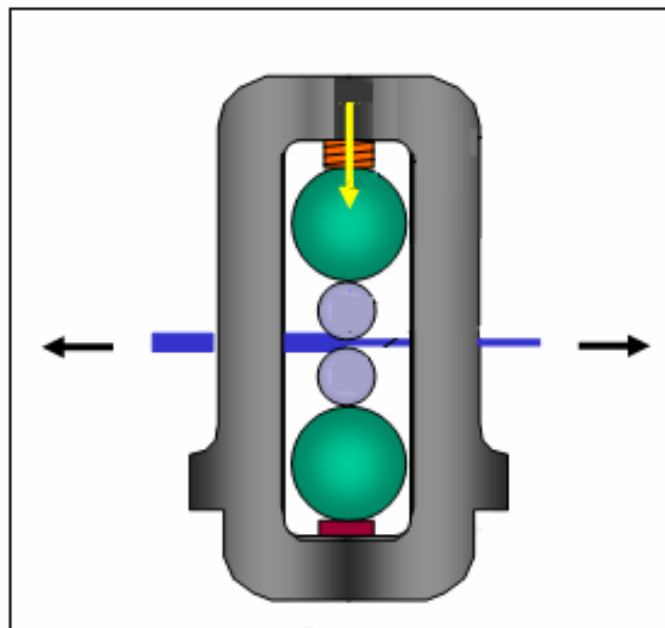


Figura 1.2 – Gaiola de um laminador quádruplo

Os cilindros de trabalho utilizados nesse laminador são fabricados em aço forjado. Na laminação a frio isso é comum, porque os cilindros de aço forjado proporcionam melhor qualidade no que se refere à forma, qualidade superficial e limpeza da tira laminada. Os cilindros possuem uma camada superficial temperada por indução e o núcleo tenaz, e desta forma obtém-se uma alta resistência ao desgaste e uma boa qualidade superficial do laminado. [8,37]. A camada temperada determina a vida útil do cilindro, que é retificado periodicamente para ser eliminado o encruamento superficial, e também, para ser mantida a rugosidade necessária para o acabamento superficial da tira.[1,25]

Assim como o cilindro de trabalho, o cilindro de encosto utilizado no laminador é fabricado em aço forjado, e também, possui uma camada temperada por indução que sofre retífica periódica para alívio de tensão e recuperação do acabamento da superfície. Outra característica do cilindro de encosto é possuir o diâmetro muito maior que o diâmetro do cilindro de trabalho para que possa dar a sustentação suficiente para minimizar a deflexão sofrida pelo cilindro de trabalho durante a laminação a frio. [1,12]

Os cilindros de laminação ficam alojados na gaiola ou cadeira de laminação. A gaiola (Fig. 1.4) é composta de dois montantes confeccionados em aço fundidos interligados por travessas, e deve ter como principal característica a rigidez. Quando são aplicadas as cargas de laminação para a redução da seção transversal da tira, ocorre uma deformação elástica na estrutura da gaiola de laminação. Esta deformação é decorrente do achatamento e flexão dos cilindros de laminação, compressão dos mancais dos cilindros e seus suportes e a deformação elástica dos montantes e travessas que compõem a estrutura da gaiola. A somatória desses fatores determina a deformação elástica total da gaiola que irá definir a tendência de separação entre os cilindros durante a laminação. De forma geral, pode-se considerar que a separação entre os cilindros aumenta linearmente com a carga aplicada e que a rigidez do laminador é de valor finito, e conseqüentemente a capacidade de redução da tira laminada será limitada por esta característica [1,16,25].



Figura 1.3 – Laminador quádruo reversível da Brasmetal Waelzholz

Quando a laminação é executada apenas com esforço aplicado nos cilindros para a conformação do metal, com o movimento do metal uniforme na entrada e na saída dos cilindros, com ambos os cilindros acionados, com diâmetros

e velocidades periféricas idênticas e com o metal homogêneo no que diz respeito a suas propriedades mecânicas, é denominada processo simples de laminação [27,30, 31,33]. Mas, na laminação a frio, normalmente existe a necessidade de se adicionar forças tracionando a tira de aço; isto ocorre porque freqüentemente a espessura desejada é obtida através de diversas passagens da tira metálica entre os cilindros de laminação. Quando os laminadores possuem apenas uma cadeira (ou gaiola) de laminação a espessura desejada é obtida laminando-se a tira em dois sentidos, ou seja, um passe no sentido horário e outro no sentido anti-horário, fluindo nessa seqüência até que se chegue a espessura final. Para que isso seja possível, a tira é enrolada e desenrolada na forma de rolos nos bobinadores reversíveis e, para que as condições de bobinamento sejam mais favoráveis, durante a laminação são aplicadas forças de tração avante, entre os cilindros de laminação e o enrolador, e a ré, entre o desenrolador e os cilindros de laminação. Ao serem aplicadas em um processo de laminação simples, as forças de tração promovem alterações (que serão tratadas mais adiante) importantes na pressão e no torque de laminação. Os laminadores que executam a laminação nos dois sentidos são denominados reversíveis [1, 27, 30, 31,33].

Descrição	Unidade	Características
Laminador	-	Quádruplo reversível
Diâmetro cilindro de trabalho	mm	160 a 180
Tipo do cilindro de trabalho	-	Aço forjado
Diâmetro do cilindro de apoio	mm	430 a 465
Tipo do cilindro de apoio	-	Aço forjado
Quantidade de gaiolas	-	1
Potência do motor da gaiola	kW	1000
Potência do motor do bobinador 1	kW	370
Potência do motor do bobinador 2	kW	370
Força de laminação	kN	3200 (máx)
Velocidade máxima de laminação	m/min	600
Força de bobinamento	kg	6000 (máx)
Torque máximo de laminação	kN	15

Tabela 1.1- Configuração do laminador quádruplo reversível

No laminador estudado, os cilindros de trabalho são acionados através de um conjunto composto de motor de corrente alternada, redutor, acoplamentos e eixos de transmissão entre redutor e cilindros de laminação (Fig 1.4), enquanto que, os cilindros de encosto são movidos através do contato com o cilindro de trabalho.

Como existe a necessidade de se variar a velocidade durante um passe de laminação, o motor de corrente alternada é controlado por um dispositivo eletrônico denominado “Conversor de freqüência”. Esse dispositivo converte uma entrada fixa de tensão elétrica e freqüência em uma saída trifásica de freqüência e tensão elétrica variável.

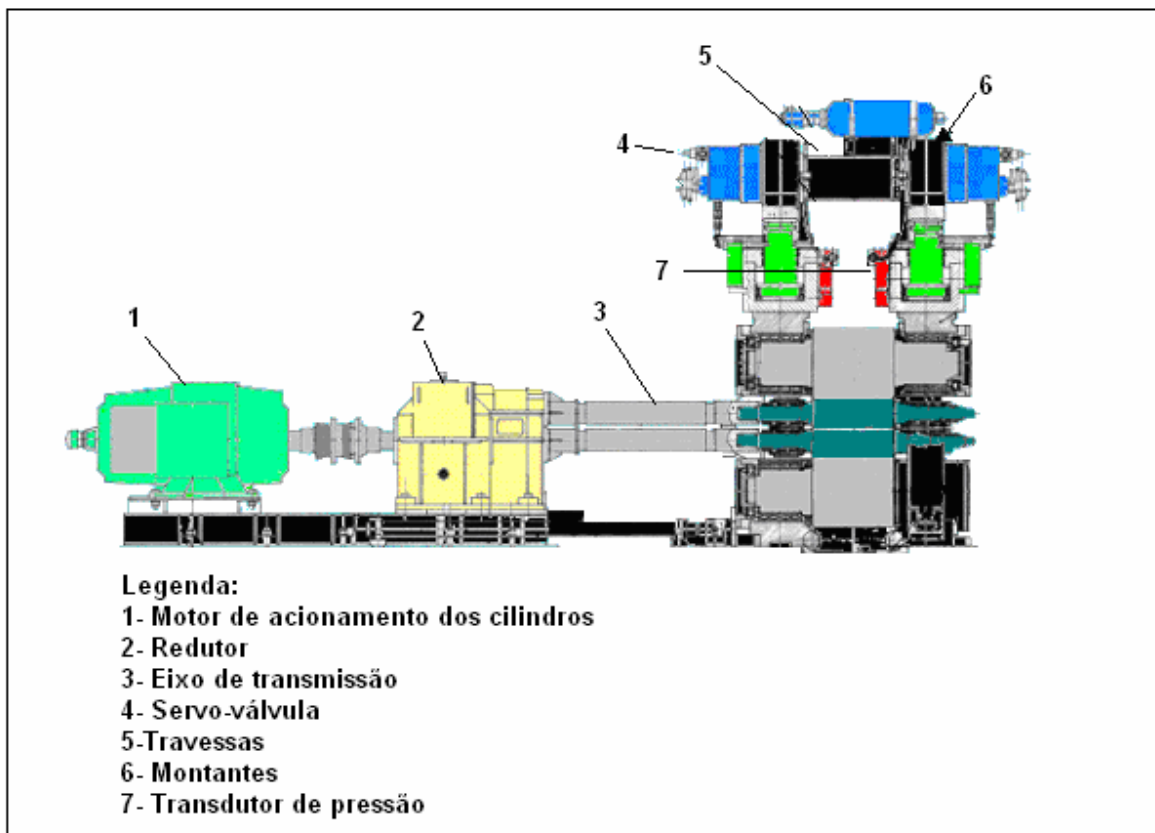


Figura 1.4 – Representação esquemática da gaiola

Esse dispositivo é interligado através de uma rede (Fig. 1.5) a um CLP (controlador lógico programável) e no CLP estão programadas todas as funções que irão determinar a lógica de controle dos motores (rotação, torque). Por outro lado o CLP também recebe as informações reais do processo, estas informações são lidas pelo CLP e, dessa forma, são efetuados automaticamente os ajustes necessários permitindo que o sistema opere de forma constante, de acordo com os parâmetros operacionais desejados no processo.

A exemplo dos cilindros de laminação, o enrolador e o desbobinador também são acionados por motor de corrente alternada, redutor e acoplamentos e o controle dos motores também se dão da mesma forma.

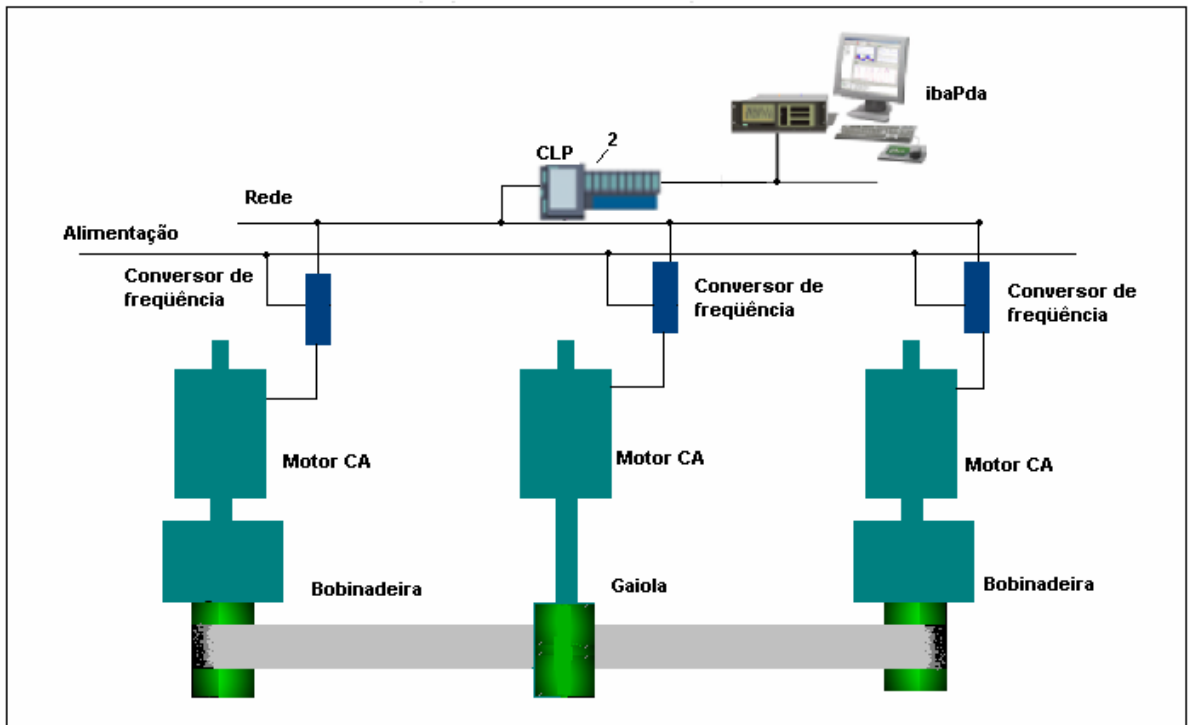


Figura 1.5 – Representação esquemática do acionamento

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo de laminação

Um grande número de modelos matemáticos referentes à laminação foram apresentados através dos anos e muitos derivam de Tselikov, Orowan, Bland e Ford e são baseados em diferentes suposições a fim de resolver a equação diferencial de Von Karman que expressa a distribuição da pressão ao longo do arco de contato.(13,20,36).

Segundo H. Han [13], em todos os modelos existem três variáveis principais: coeficiente de atrito, curva de fluxo do metal e o comprimento do arco de contato entre o cilindro e a chapa que esta sendo laminada. A. Tselikov [31], divide essas variáveis em dois grupos:

- As que afetam o esforço de laminação quando o metal é processado, atrito, tração, velocidade.
- As afetadas pelas propriedades mecânicas do material, isto é, resistência à deformação, encruamento do metal, taxa de deformação e temperatura,

Na laminação, a redução na espessura é dada pela diferença entre a espessura na entrada do cilindro de laminação e a espessura na saída (eq. 2.1).

$$\Delta h = h_0 - h_1 \quad (2.1)$$

Com a redução na espessura, a tira de aço sofre uma deformação plástica, ou seja, uma deformação permanente provocada por tensões que ultrapassam o limite de elasticidade [35].

Analisando o exemplo proposto por Helman e Celtin [3]:

“Suponha um fio de comprimento inicial l_0 (Fig 2.1). Sob a ação de uma tensão σ_1 , ele irá alongar Δl . Se l_0 é pequeno, o valor Δl pode representar um alongamento considerável. Mas se l_0 é muito grande, o mesmo Δl pode ter efeito desprezível”.

Portanto, conclui-se que, para a tensão aplicada σ_1 , Δl não representa a melhor resposta. Para se obter um resultado mais significativo, utiliza-se a deformação convencional linear (eq. 2.2) [3,31]

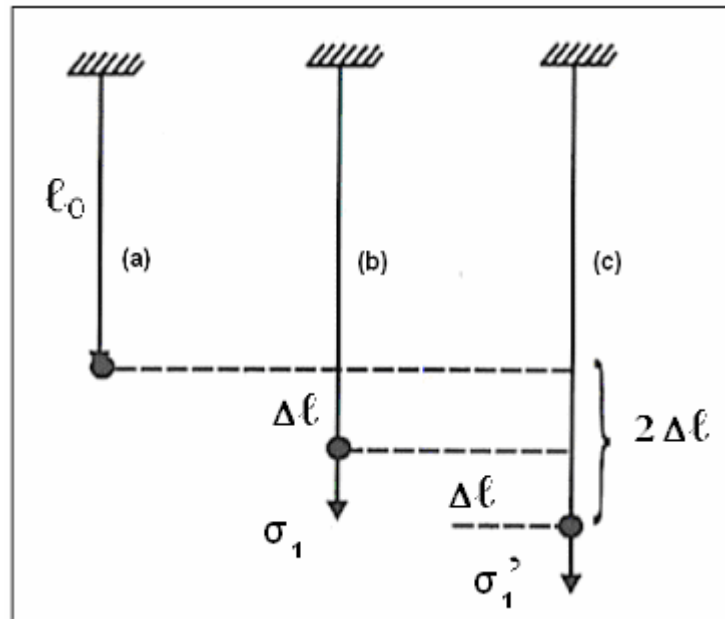


Figura 2.1 – Alongamento do fio sob a ação de forças

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

No caso da espessura a equação é dada por: [9,31]

$$e = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2.3)$$

Como se sabe, dificilmente o processo de laminação a frio é realizado em um único passe, e normalmente, são aplicados vários passes para se atingir a espessura desejada [3,15]. Com isso na região do arco de contato, a tira de aço sofre um encruamento ao ser deformada, ou seja, a cada passe imprimido na tira para a sua redução, torna-se mais difícil a sua conformação.[25]

Esta resistência à deformação do metal pode ser obtida através de um ensaio de tração e a sua representação gráfica (Fig. 2.2) se dá pela curva *Tensão* (σ) \times *Deformação Verdadeira* (ϵ), que comumente é chamada de curva de fluxo ou de escoamento [15, 28]. No entanto, no ensaio de tração obtém-se a curva *Tensão* \times *Deformação Convencional*. Segundo Souza [28] os resultados obtidos através da curva convencional são sujeitos a erros, porque se baseiam na secção inicial do corpo de prova S_0 , e durante o ensaio essas medidas se alteram, e quando é atingida a zona plástica, são suficientemente grandes para imprimir erros consideráveis nos resultados. Por isso que, para ser determinada curva de fluxo do metal, que será utilizado nos cálculos da laminação, adota-se o ensaio real ou verdadeiro, que compreende no ensaio convencional corrigido [11,20].

O primeiro passo para se obter a curva *Tensão* \times *Deformação verdadeira* é a transformação da deformação linear em deformação verdadeira. Utiliza-se a deformação verdadeira porque ela é a soma dos incrementos da deformação sofridos pelo corpo de prova, que resulta na deformação total. No caso do exemplo

apresentado anteriormente, a deformação verdadeira no comprimento do fio é expressa como [3,8,9,15,25]:

$$\varepsilon_l = \int_{l_i}^{l_f} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_f}{l_i} = \ln(1 + e) \quad (2.4)$$

Portanto, para a espessura a deformação verdadeira é expressa como:

$$\varepsilon_h = \int_{h_i}^{h_f} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_i}{h_f} = \ln(1 + e) \quad (2.5)$$

Ainda no diagrama *Tensão x Deformação* convencional tem-se que [25]:

$$\sigma_{conv} = \frac{F}{S_0} \quad (2.6)$$

Onde:

σ_{conv} = Tensão convencional
 F = Força aplicada
 S_0 = Seção inicial do corpo de prova

E através da equação 2.7, é possível a obtenção da tensão real [15,25,28]

$$\sigma = \sigma_{conv}(1 + \varepsilon) \quad (2.7)$$

A representação matemática da curva de fluxo é dada pela equação de Hollomon (eq. 2.8) Na equação os valores de K e n são constantes para cada tipo de material, e são denominados coeficiente de resistência e coeficiente de encruamento, respectivamente [11,15,25,28].

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (2.8)$$

Os valores de K e n da equação de Hollomon, podem ser determinados através de um gráfico duplo logarítmico (Fig. 2.3). No gráfico duplo logarítmico são plotados os dados experimentais e o valor de K é a tensão real medida para $\varepsilon=1$ e o valor de n é dado pela inclinação da reta [11,15,28].

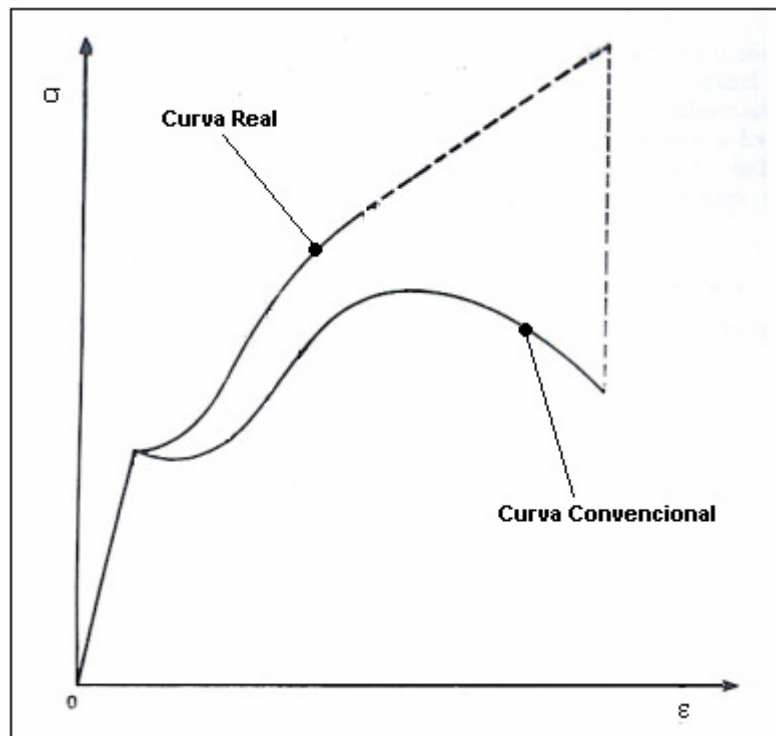


Figura 2.2- Curva de tração real e convencional

Na região da deformação, os pontos limite do contato entre a chapa laminada e o cilindro de trabalho é denominado arco de contato [30,31]. Esses pontos são caracterizados de acordo com a direção de laminação, sendo que o ponto A é a entrada e o ponto B a saída. (Fig. 2.4)

Como, normalmente, os raios dos cilindros de trabalho são muito maiores que a espessura da chapa laminada, pode-se admitir que o arco de contato AB é aproximadamente igual a sua projeção horizontal AC e a equação que o representa pode ser considerada sem grandes erros como sendo [1,6,8,9,15,25,27,30,33]:

$$l_d = \sqrt{\Delta h \cdot R} \quad (2.9)$$

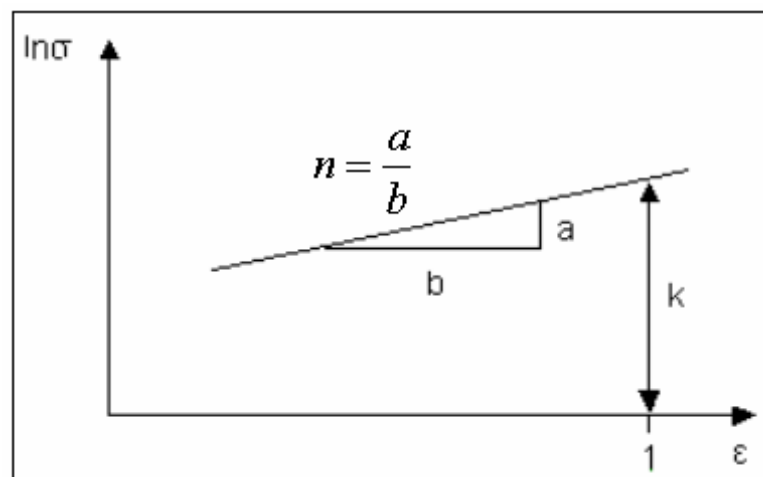


Figura 2.3 – Gráfico duplo logarítmico

Ainda na Figura 2.4, observa-se que o ângulo α é o ângulo correspondente ao ângulo do arco de contato, que segundo Tselikov [30,31], na laminação a frio varia entre 4° e 8° e pode ser calculado como [8,15]:

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{l_d}{R} \approx \frac{\sqrt{\Delta h \cdot R}}{R} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (2.10)$$

Para ângulos pequenos, admite-se que $\operatorname{sen} \alpha \approx \alpha$, então o ângulo de contato pode ser expresso em radianos como [9,15,33]:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (2.11)$$

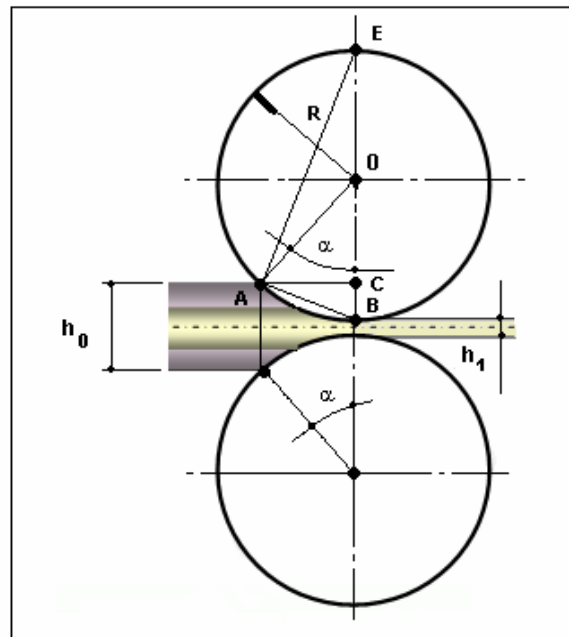


Figura 2.4 – Arco de contato

A equação 2.9 refere-se a projeção do arco de contato sem o achatamento do cilindro de trabalho. Na laminação a frio, o material é conformado sob elevadas pressões, e, com isso, os cilindros de laminação sofrem um achatamento ou deformação elástica (Fig. 2.5). Com o achatamento do cilindro ocorre um aumento do arco de contato e conseqüentemente uma elevação na carga de laminação [1,9,15,25,36]. Desta forma o novo arco de contato pode ser calculado como:

$$l_d' = \sqrt{R'(\Delta h)} \quad (2.12)$$

Hitchcock [1,13,15,25], em 1935, determinou uma equação para o cálculo do raio do arco deformado R' .

$$R' = R \left(1 + \frac{cP}{b \Delta h} \right) \quad (2.13)$$

Onde:

$$c = \frac{16(1-\nu^2)}{\pi E} \quad (2.14)$$

Sendo que E é o módulo de *Young* e ν o módulo de *Poisson* do material empregado na construção de cilindros. Para cilindros de aço tem-se: [15,25]

$$c = 2,2 \cdot 10^{-4} \frac{mm^2}{kgf}$$

É importante ressaltar que na equação proposta por Hitchcock, a carga de laminação P aparece de forma explícita, por isso, o cálculo deve ser feito de maneira iterativa, até se obter valores consistentes de P e R' . Inicialmente o esforço de laminação é calculado com o diâmetro do cilindro de trabalho sem achatamento. Em seguida o esforço de laminação, inicialmente calculado, é substituído na equação de Hitchcock, de onde se obtém o raio achatado do cilindro de laminação. Com o raio achatado do cilindro, calcula-se o novo esforço de laminação. Esta operação deve ser feita até que a relação expressa pela equação 2.15 tenha sido satisfeita. [15,24,25,36]

$$\frac{R'_n}{R'_{n-1}} \cong 1,05 \quad (2.15)$$

Outro fator de grande importância na laminação a frio é o atrito, porque, além de ser a força que impulsiona a tira de aço entre os cilindros [8,15], o atrito pode influenciar: [19,20,33]

- A distribuição das pressões que agem entre os cilindros e o material,
- A potência necessária para reduzir o material,

O coeficiente de atrito entre a tira laminada e os cilindros de laminação depende de condições como: qualidade do metal laminado, tipo de lubrificante, velocidade de laminação, tipo de escorregamento entre outros fatores. E a combinação de todos estes fatores irá determinar a magnitude do coeficiente de atrito. [20].

Em altas velocidades o coeficiente de atrito é pequeno e constante (Fig. 2.6), porém, para baixas velocidades, enquanto não é atingida a condição de lubrificação hidrodinâmica, utilizando-se cilindros de trabalho em aço, o coeficiente de atrito pode ser dado por [25]:

$$\mu = Q_1 + Q_2 \cdot \ln V_p \quad (2.16)$$

Onde Q_1 e Q_2 podem ser obtidos na tabela 2.1

Acabamento superficial do cilindro	Tipo de lubrificação	Q_1	Q_2
Polido/ Fosco	Emulsão	0,14238	- 0,01537
Liso	Seco	0,10052	0,00412

Tabela 2.1 – Constantes utilizadas para a determinação do coeficiente de atrito enquanto não é atingida a condição de lubrificação hidrodinâmica [25]

D.R Bland e H. Ford [30,31] propuseram um método para determinar o coeficiente de atrito aplicando-se tensões avante e a ré durante a laminação. Para isso a tensão de ré foi aumentada gradualmente até que a secção neutra chegasse no ponto de saída e o escorregamento avante próximo de zero. Então, medindo nessa situação a força resultante P e o torque M_d , o coeficiente de atrito pode ser calculado como:

$$\mu = \frac{M_d}{PR} \quad (2.17)$$

Assim verificaram que para o aço de baixo carbono laminado com cilindro de aço com uma velocidade de 0,15 m/s, o coeficiente de atrito variou entre 0,043 a 0,085 de acordo com a redução aplicada e tipo de lubrificação utilizado.

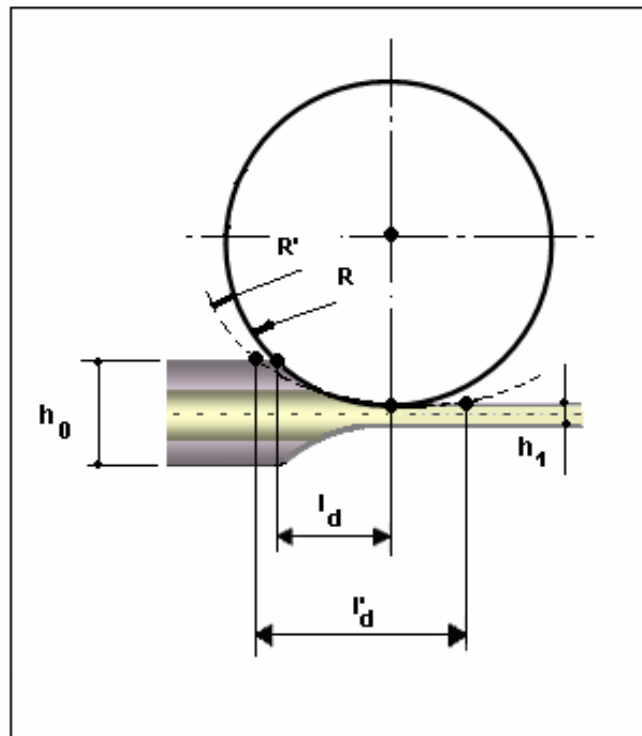


Figura 2.5 – Representação do achatamento do cilindro de trabalho.

Ainda com base no deslizamento avante e assumindo o cilindro de laminação sem achatamento, Ford [13] elaborou a seguinte equação para determinar o coeficiente de atrito:

$$\mu = \frac{\Delta h}{2\sqrt{R\Delta h} - 4\sqrt{S_f Rh_2}} \quad (2.18)$$

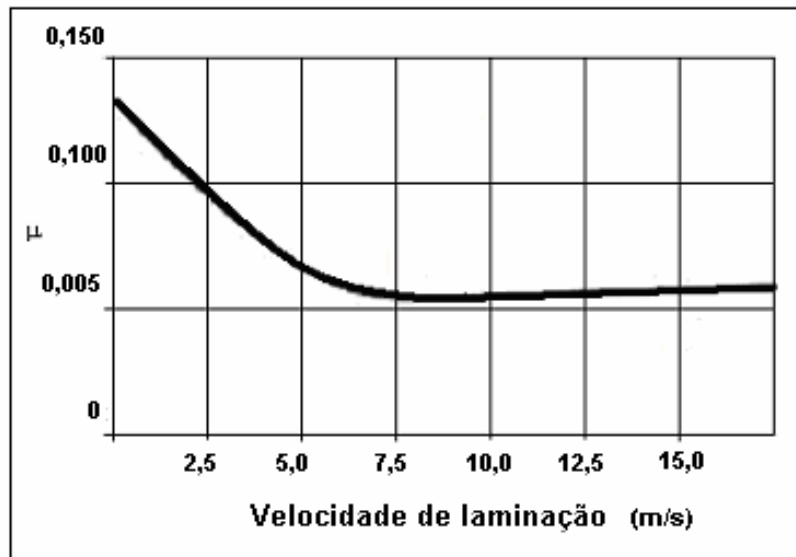


Figura 2.6 – Variação do coeficiente de atrito com a velocidade durante a laminação a frio de aço, utilizando emulsão como lubrificante. [10]

Neste trabalho o método utilizado para determinação do coeficiente de atrito, foi o calculado através da equação 2.17. Esta opção foi adotada porque a determinação do deslizamento avante (que será tratado mais adiante) tem como uma das suas principais variáveis, a velocidade de saída da tira de aço dos cilindros de laminação e, na ocasião da coleta de dados, não estavam disponíveis meios confiáveis para a aquisição dessa velocidade.

Pomp e Lueg [8,14] também utilizaram o deslizamento avante para determinar o coeficiente de atrito na laminação. Para isto, usaram o critério que o deslizamento avante atinge o seu valor máximo quando o ângulo de contato máximo é igual ao ângulo de atrito. Nos ensaios foram levadas em consideração à influência da composição do material e dos cilindros e a utilização de lubrificantes. Então, constataram que o coeficiente na laminação a frio varia de 0,057 a 0,15, sendo que:

- Para cilindros retificados lisos com lubrificação:

$$\mu = 0,057 - 0,07$$

- Para cilindros de aço ao cromo, jateados, com lubrificação:

$$\mu = 0,105 - 0,123$$

- Para cilindros rugosos, secos:

$$\mu \leq 0,15$$

O deslizamento avante, utilizado por D.R Bland e H. Ford [30,31] e Pomp e Lueg [8,14] para determinação do coeficiente de atrito, ocorre porque durante a laminação a velocidade varia ao longo de todo o arco de contato (Fig 2.7), sendo que na saída dos cilindros de laminação, a velocidade V_f é maior que a velocidade periférica dos cilindros V_p e V_i , e a velocidade na entrada dos cilindros é menor que V_p , ou seja, [1,9,13,14,15,25,33]

$$V_i < V_p < V_f$$

Como a velocidade de saída do material laminado é maior do que a velocidade periférica dos cilindros, aparece um deslizamento entre o material e o cilindro que é denominado deslizamento avante, e com a velocidade de entrada menor que a velocidade periférica do cilindro, ocorre o deslizamento a ré. Na região do arco de contato, porém, existe um plano onde a velocidade periférica do cilindro é igual à velocidade da chapa laminada. Este plano é denominado plano neutro (Fig 2.7) e seu ângulo correspondente é o anglo neutro, α_n . [15,25,30].

Então, a partir da condição de constância de volume em estado plano de deformação, verifica –se que: [8,9,15,31,33]:

$$V_i \cdot h_i = V_f \cdot h_f = V_p \cdot h_N \cdot \cos \alpha_N \quad (2.18)$$

O deslizamento avante, então, pode ser calculado como:

$$S_f = \frac{V_f - V_p}{V_p} \quad (2.19)$$

Na figura 2.7 pode-se constatar que as forças de atrito convergem para o plano neutro, ocasionando uma restrição ao fluxo do material na zona de deformação. Desta forma, ocorre uma distribuição da pressão ao longo do arco de contato na forma de colina de atrito, tendo o seu valor máximo próximo do plano neutro. [15,30,31]. A representação da distribuição da pressão ao longo do arco de contato, é resultado de um ensaio pioneiro realizado por Siebel e Lueg em 1933 [1,14]. Para efetuar o ensaio, instalaram no cilindro superior de um pequeno laminador células de carga, e efetuaram a laminação de corpos de prova de materiais diferentes - chumbo, cobre e alumínio – com cilindros de rugosidades diferentes. Com isso verificaram que, com a isenção de tração, o ângulo neutro corresponde a aproximadamente um terço do arco de contato [1,14,15]. Em função da existência de duas regiões distintas, é muito comum o cálculo da distribuição da pressão ao longo arco de contato ser feita em duas etapas, tendo o ângulo neutro

como referência, ou seja, p^+ do ponto de entrada até o ângulo neutro e p^- do ponto neutro até a saída [15,33].

$$\frac{P}{b} = R * \left(\int_0^{\alpha_n} p^+(\Phi) d\Phi + \int_{\alpha_n}^{\alpha} p^-(\Phi) d\Phi \right)$$

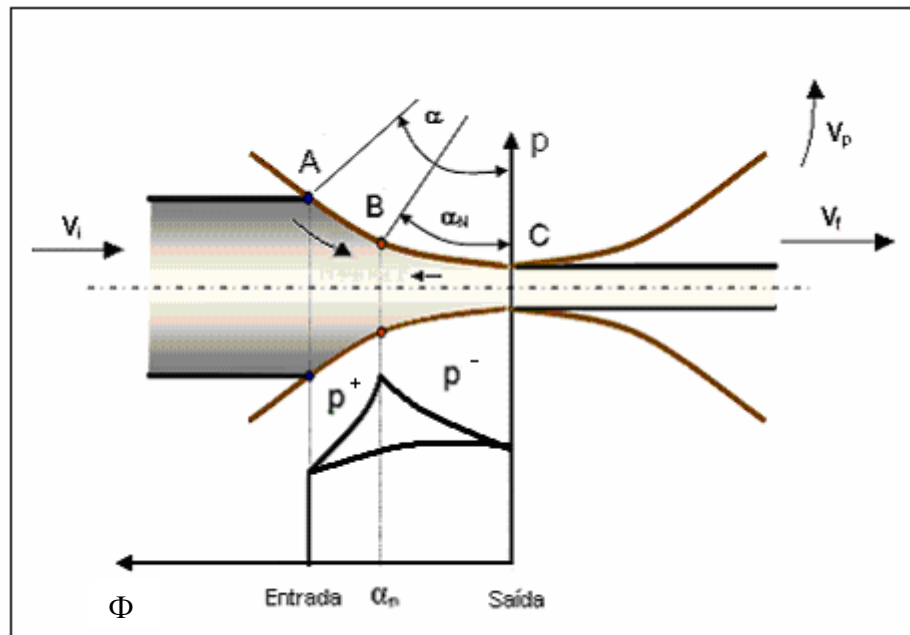


Figura 2.7 – Representação da velocidade ao longo do arco de contato

É muito importante evidenciar, que a carga de laminação P é definida como a força que pressiona a tira de aço entre os cilindros de laminação, enquanto que a pressão específica p , é definida como a carga de laminação dividida pela área de contato entre a tira laminada e o cilindro de laminação. Desta forma o esforço de laminação P , pode ser estimado pela relação [25,30,31,33]:

$$P = p_m \cdot F_d \quad (2.20)$$

Assumindo um cilindro de laminação sem achatamento (Fig. 2.8), verifica-se que a resultante da pressão aplicada sobre os cilindros para a conformação do metal é deslocada em relação ao centro dos cilindros, convergindo para o plano neutro. Essa distância entre o ponto de aplicação da força resultante e do centro dos cilindros é denominada braço de alavanca [27,31]. O braço de alavanca pode ser considerado como uma fração do arco de contato (equação 1.21) [15,25,27,31].

$$a = w l_d \quad (2.21)$$

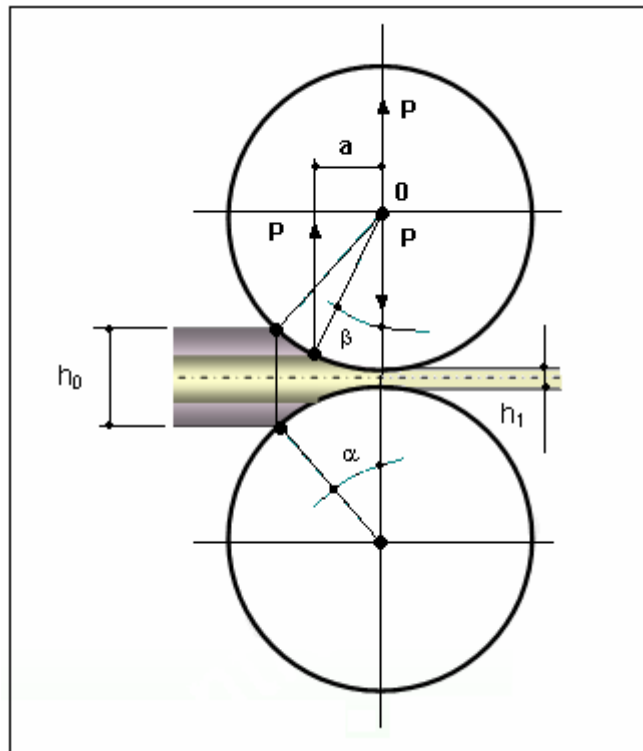


Figura 2.8 – Representação esquemática do braço de alavanca

A. Tselikov [15,25,31], sugere que o valor de w para a laminação a frio corresponde de 0,4 a 0,48 do arco de contato. Polukhin *et al* [27], sugere que o valor de w oscile entre 0,35 e 0,45 do arco de contato para a laminação a frio.

Portanto, para um processo de laminação quando os dois cilindros têm os diâmetros iguais e desenvolvem a mesma rotação, o torque pode ser expresso por [6,15,25,27]:

$$M = 2Pa \quad (2.22)$$

Mas, como se sabe, durante a laminação os cilindros achatam-se em função da carga de laminação e como o centro do arco de contato não está sobre a linha de centro dos cilindros, com o achatamento ocorre uma alteração no torque de laminação. Desta forma o braço de alavanca passa a ser uma fração do arco de contato entre o cilindro achatado e a tira de aço laminada. [15, 31]. Então o braço de alavanca passa a ser:

$$a = w.l'_d \quad (2.23)$$

O. Pawelski e F. Lindemann [24] apresentaram um diagrama (Fig 2.9) onde pode ser observada a evolução de w com o torque de laminação. Para a elaboração do diagrama foi laminada uma tira de aço de acordo com o apresentado na tabela 2.2.

b (m)	h ₀ (mm)	h ₁ (mm)	μ	σ _{br} (kgf/mm ²)	σ _{ba} (kgf/mm ²)	l _d '	σ̄ (kgf/mm ²)
1,00	1,80	1,60	0,07	5,00	10,00	8,30*	62,00

*Resultado obtido após três iterações

Tabela 2.2 – Parâmetros de laminação para a realização do ensaio proposto por O. Pawelski e F. Lindemann [24]

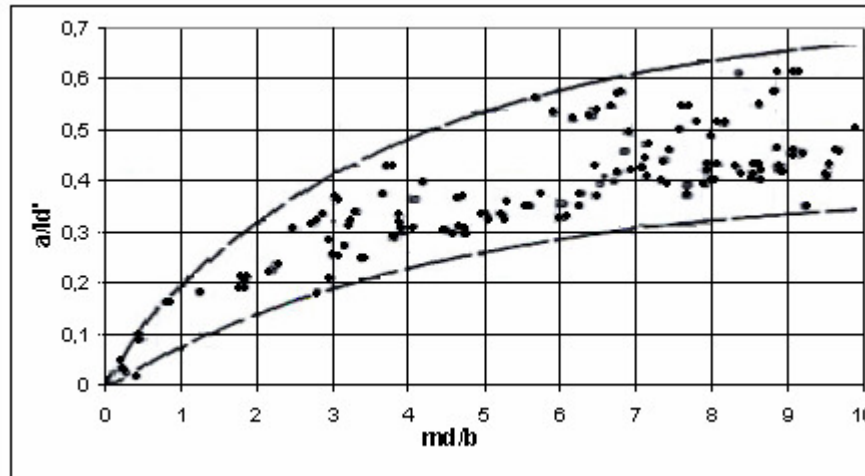


Figura 2.9 - Relação entre o torque de laminação e o braço de alavanca de acordo com O. Pawelski e F. Lindemann [24]

Na prática, freqüentemente, o processo de laminação simples (ver definição no capítulo 1), é realizado com a aplicação de forças adicionais de tensão, σ_r na entrada, entre o desbobinador e os cilindros de laminação e, σ_a na saída, entre os cilindros de laminação e o enrolador. A utilização da tração no material durante a laminação influencia a carga de laminação e o torque aplicado nos cilindros de laminação. A alteração no torque pode ser constatada pela variação no tamanho do braço de alavanca com a aplicação da tração (Fig 2.10). Supondo que a tração de ré, σ_r , é igual à tração avante, σ_a , verifica-se que a resultante P é vertical e paralela ao eixo central que une os cilindros de laminação (Fig. 2.8). Quando $\sigma_r < \sigma_a$ a resultante P é inclinada na direção da laminação, mas, se $\sigma_r > \sigma_a$, a resultante P será inclinada na direção oposta. [27,30,31,33]

A. Tselikov [30,31] propõe um método para o cálculo do torque em ambos os cilindros de laminação, determinando que θ é o ângulo entre linha central que une os cilindros de laminação e a direção a resultante P . Desta forma a equação que irá determinar o torque será:

$$M_d = 2Pa = P.D.\text{sen}(\beta \pm \theta) \quad (2.24)$$

Sendo que para $\sigma_r < \sigma_a$:

$$\text{sen}\theta = \frac{\sigma_a - \sigma_r}{2.P} \quad (2.25)$$

E para $\sigma_r > \sigma_a$:

$$\text{sen } \theta = \frac{\sigma_r - \sigma_a}{2.P} \quad (2.26)$$

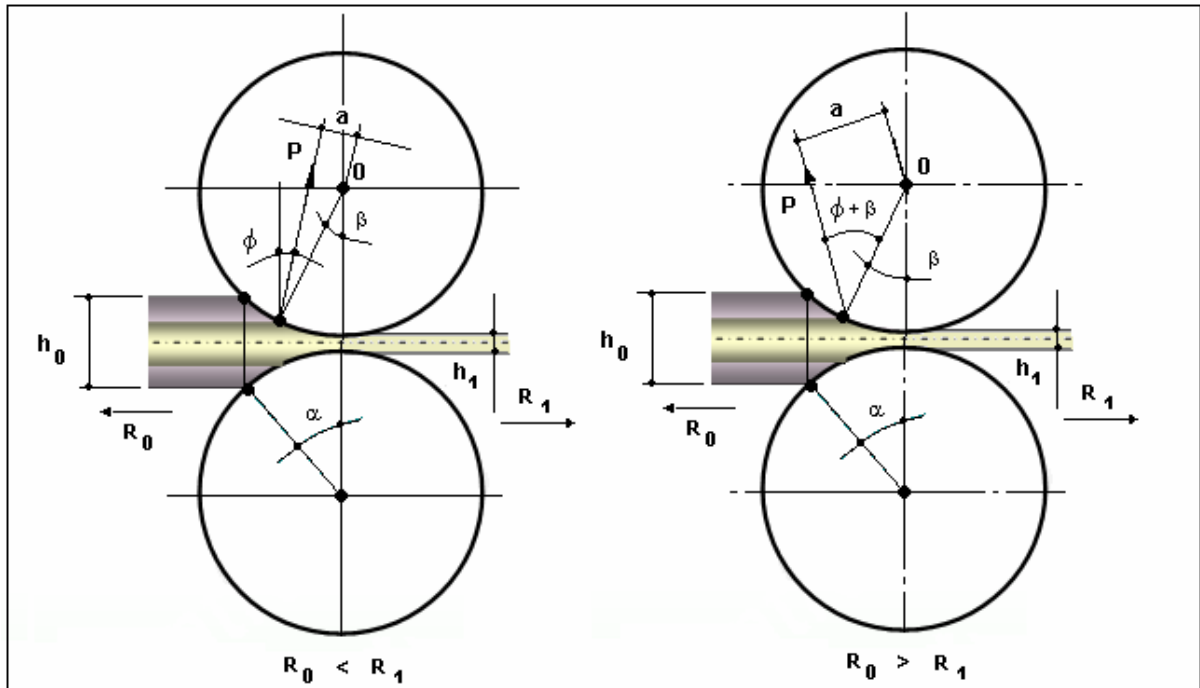


Figura 2.10 – Variação do braço de alavanca com a aplicação da tração

H. Ford, F. Ellis e D.R. Bland [10] analisaram os métodos de cálculo para o processo de laminação a frio, desenvolvido por Hill, Siebel, Tselikov e Nadai e compararam com apresentado por Orowan. A comparação entre os diversos métodos foi feita através de um diagrama elaborado por Hill. Utilizando uma solução de óleo solúvel como lubrificante, o coeficiente de atrito 0,063 e o ângulo de contato 0,0655, Hill mostra a linha média obtida, através de dados experimentais, da relação entre:

$$\lambda_1 = \frac{M_d}{\frac{F}{b} R} \quad (2.27)$$

E:

$$\lambda_2 = \frac{\sigma_a h_1 - \sigma_r h_0}{\frac{F}{b}} \quad (2.28)$$

As equações 2.27 e 2.28 representam os adimensionais, que neste trabalho serão chamados λ_1 e λ_2 , definidos por Hill para a elaboração do gráfico da Figura

2.11. O adimensional representado pela equação 2.27 é desenvolvido levando em consideração o torque de laminação, o esforço de laminação e o raio do cilindro de laminação, enquanto que o adimensional representado pela equação 2.28 é desenvolvido com as variáveis trações avante e a ré, espessuras de entrada e saída e esforço de laminação. No capítulo 6, são apresentados resultados, onde é mostrada a relação entre o torque de laminação e aplicação da tração de ré na tira de aço, e para melhorar a compreensão desta relação, os resultados obtidos foram plotados no gráfico proposto por Hill, de acordo com a sua metodologia adotada.

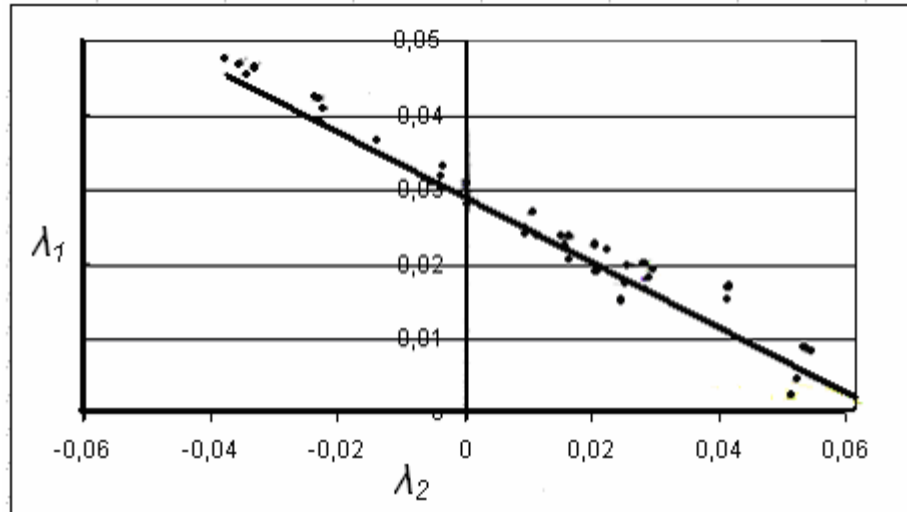


Figura 2.11 – Diagrama proposto por Hill [10]

De acordo com Ford [25] na laminação a frio com a aplicação da tração, o torque pode ser calculado por:

$$M_d = M + \left(\frac{\sigma_r h_1 - \sigma_a h_2}{2} \right) \cdot R \cdot b \cdot 10^{-3} \quad (2.29)$$

O. Pawelski e F. Lindemann [26] realizaram experimentos, conforme dados da tabela 2.2, onde verificaram como a aplicação da tração influencia no torque de laminação. Na figura 2.10 pode-se verificar que com um incremento da tração de ré ocorreu um acréscimo no torque de laminação, mas também se verifica uma redução no esforço de laminação.

Assim como o torque é influenciado pela aplicação das tensões avante e a ré a pressão de laminação também sofre alterações. O efeito da aplicação de tensões durante a laminação na pressão é resultado de diversas investigações experimentais. Os resultados obtidos dessas investigações mostram que ao ser aumentada a tração ocorre uma redução da pressão específica observada. E esta redução na pressão específica é maior com a aplicação da tração de ré se comparado com a aplicação da tração avante. [30,31,33]

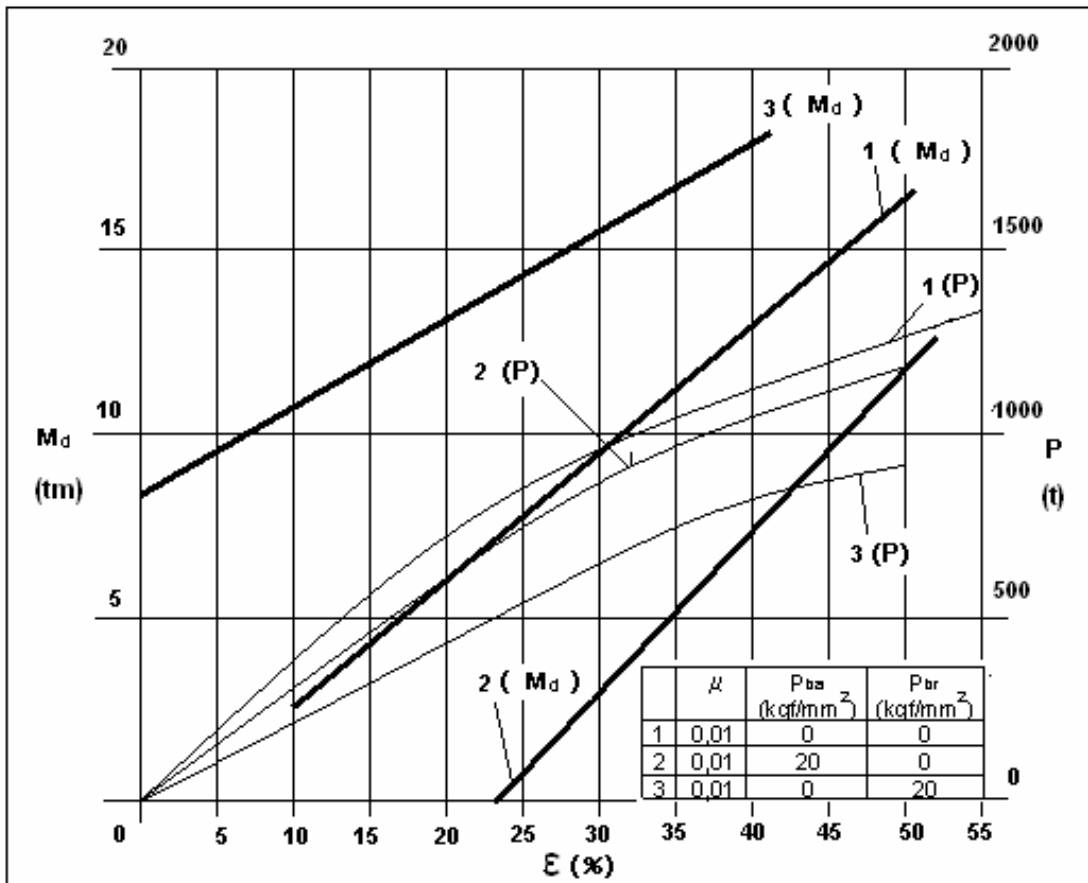


Figura 2.12 – Diagrama proposto por O. Pawelski e F. Lindemann [26]

A necessidade de se conhecer a influência da tração, aplicada na tira de aço, no processo de laminação foi alvo de alguma pesquisas, como por exemplo, um ensaio realizado por Tselikov [31]. Nesse ensaio, Tselikov verificou que, ao ser incrementada a tração, ocorre uma diminuição na pressão específica, sendo que esta redução é maior sob a influência da tração de ré. A figura 2.13 ilustra a influência da aplicação da tração na pressão específica durante a laminação. Na curva 1, é verificada a atuação da tensão avante, e na curva 3, a atuação da tensão avante e da tensão a ré. Comparando individualmente cada curva pode-se verificar que a pressão específica reduz com o incremento da tração. Comparando a curva 1 com a curva 3, pode-se verificar que, ao ser aplicada a tração de ré, há uma redução na pressão específica em relação à situação de ser aplicada apenas à tração avante [20].

Com a influência da tração, a pressão média pode ser calculada como [30,31]:

$$\frac{pm}{\sigma_{bi}} = \frac{1}{\Delta h} \left\{ \varepsilon_0 \frac{h_0}{\delta - 2} \left[\left(\frac{h_0}{h_n} \right)^{\delta - 2} - 1 \right] + \varepsilon_1 \frac{h_1}{\delta + 2} \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^{\delta + 2} - 1 \right] \right\} \quad (2.30)$$

Com:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\sigma_r}{\sigma_{Bi}}$$

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_{Bi}}$$

$$\delta = 2\mu \sqrt{\frac{R'}{\Delta h}}$$

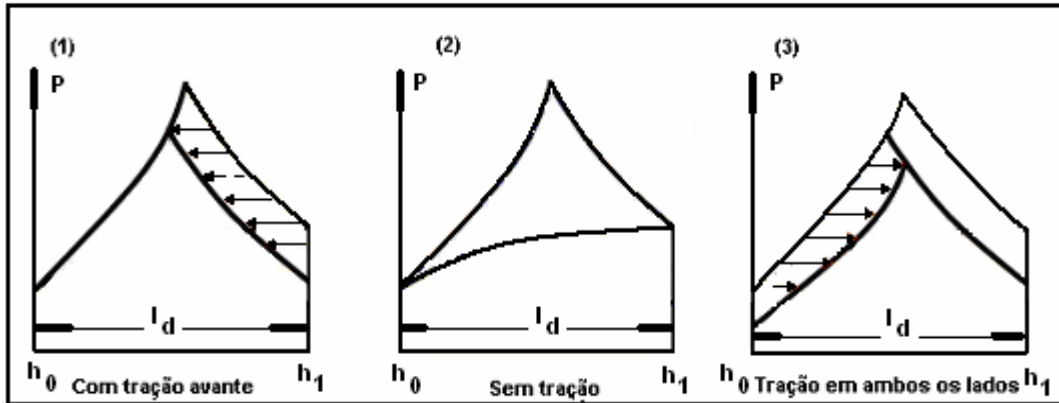


Figura 2.13 – Influencia da tração na pressão de laminação [20]

Ainda na figura 2.13 pode-se observar que o ponto neutro se desloca com a aplicação das trações avante e a ré. Quando a tração avante é muito alta, o ponto neutro desloca-se para o lado da maior espessura (entrada) e, quando a tração de ré é muito alta, ocorre o contrário, isto é, o ponto neutro desloca-se para o lado da menor espessura (saída). [30,31,33]. Então, o ponto neutro pode ser calculado como [25]:

$$h_n = 2\delta \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} h_0^{\delta-1} h_1^{\delta+1}} \quad (2.31)$$

2.2 Fator de amplificação de torque.

No laminador quádruplo reversível, a cada novo rolo que deve ser laminado, existe a necessidade de uma operação que é denominada introdução. A introdução da fita compreende em levar a ponta do rolo do desenrolador até o mordente do enrolador reversível, Figuras 2.15 e 2.16. Esta operação pode ser dividida em duas etapas; a primeira etapa, quando a ponta sai do desenrolador e chega nos cilindros de laminação e, a segunda, quando a ponta é levada dos cilindros de laminação até o mordente no enrolador reversível. Durante a introdução, o acionamento dos motores dos cilindros de laminação, enrolador e desbobinador são comandados por uma chave denominada *Jog* (Fig. 2.14).

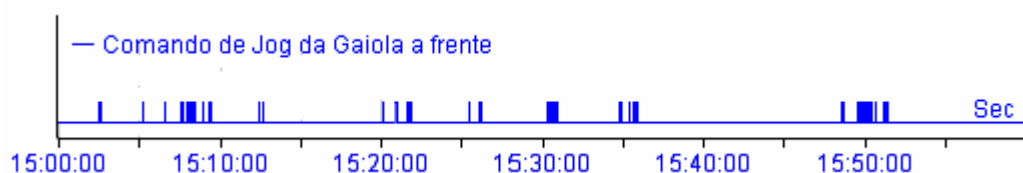


Figura 2.14 – Representação gráfica dos pulsos gerados pelo *Jog*

Quando o *Jog* é atuado, os motores são movimentados de acordo com o solicitado pelo operador, podendo oscilar, desde longos períodos, até acionamentos freqüentes, onde o operador atua a chave por varias vezes em um curto espaço de tempo. Basicamente a introdução é executada da seguinte forma:

a) Alimentação: O rolo é colocado através de uma ponte rolante no berço de espera do carro do desenrolador, onde a sua amarração é cortada;

b) Transporte: Através do carro transportador o rolo é colocado no mandril expansível do desenrolador;

c) Introdução inicial: O mandril é expandido para travamento do rolo. Em seguida o rolo de arraste desce sobre o material; neste momento o operador aciona a chave de “Jog” do motor da desbobinadeira, fazendo com que o rolo gire em seu próprio eixo e com o auxilio de uma mesa com movimentos telescópicos e basculantes destaca a ponta do material que em seguida é levada até o rolete puxador. O rolete puxador auxilia o transporte da ponta até os cilindros de laminação;

d) Introdução nos cilindros de laminação: Quando a ponta do material chega na gaiola, os cilindros estão abertos com uma fenda maior que a espessura do material, permitindo que o material os cruze, apenas com o auxilio do conjunto de introdução inicial, o suficiente para a mordida. Com o material entre os cilindros de laminação, o operador digita a espessura desejada e os cilindros se fecham comprimindo o material. Feito isto, o rolo puxador e o rolo de arraste são abertos, a mesa de introdução é recuada, e o operador transfere o *Jog* do desenrolador para a gaiola.

e) Transporte da fita até o mordente: Neste momento o operador aciona a chave de “Jog” do motor da gaiola para o transporte do material até o mordente;

f) Introdução no mordente: Com o auxilio de uma mesa o material é guiado e introduzido no mordente. Em seguida o operador expande o mandril e fecha o mordente, ficando a máquina pronta para a operação.

Em alguns casos, durante a introdução, observa-se a ocorrência de picos no torque dos cilindros de laminação (Fig. 2.17), e, normalmente, a amplitude desses picos é maior do que o torque médio de laminação. A esses picos no torque dá-se o nome de *TAF* – “*Torque Amplification Factor*”. O *TAF* é definido como o torque de pico, em regime transitório, dividido pelo torque médio de laminação [16,23.]

$$TAF = \frac{T_{pico}}{T_{médio}} \quad (2.32)$$

Na literatura, a ocorrência do *TAF* é mais explorada no processo de laminação a quente. Nesse caso, os cilindros de trabalho estão operando em vazio no momento em que recebem a tira que irá ser laminada, e, em decorrência do impacto entre a tira e os cilindros de laminação, ocorre um torque nos cilindros de laminação cujo efeito é a propagação de uma onda pelos componentes de acionamento. [16,23].

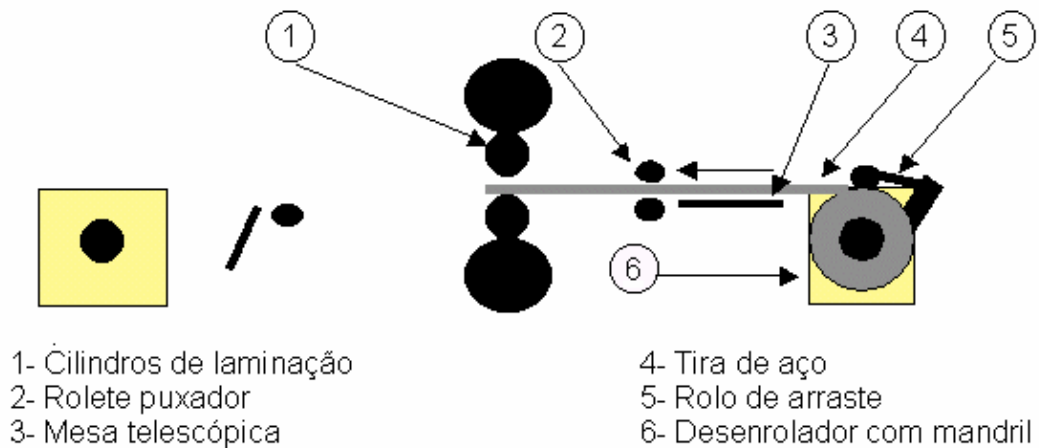


Figura 2.15 – Esquema de introdução até os cilindros

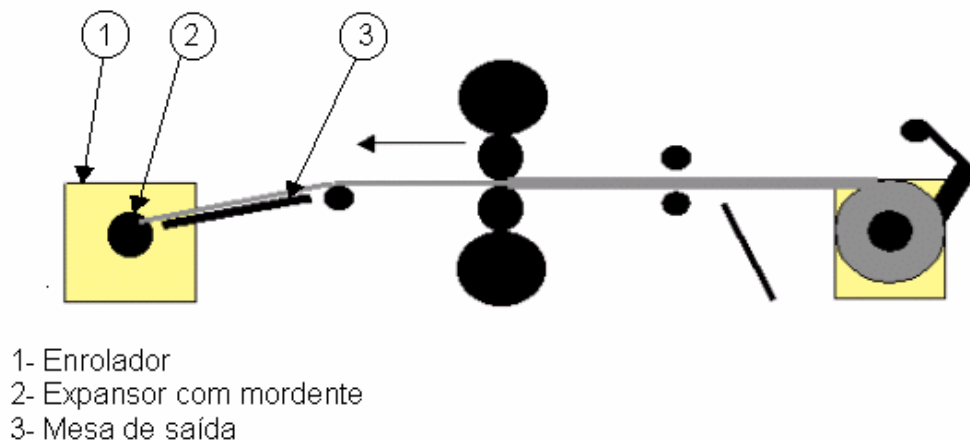


Figura 2.16 – Esquema de introdução até o mordente

H. Honjyo e H. Watanabe [16] definem que o *TAF* pode ser influenciado por diversos fatores e que a sua amplitude será determinada pela somatória desses fatores e conforme os autores, na laminação a quente, o *TAF* pode ser decorrente de dois aspectos:

- Impacto puro
 - Subdividido em:
 - Velocidade de introdução
 - Resposta no acionamento dos motores dos cilindros de laminação
 - Impacto da força de laminação
 - Estrutura mecânica do acionamento
- Equipamento ou manutenção e operação
 - Subdividido em:
 - Falha no sincronismo entre os cilindros de laminação e a tira laminada

- Folgas no conjunto de acionamento
- Falhas de sincronismo entre as cadeiras de laminação vizinhas.
- Falha do sistema de refrigeração e lubrificação
- Torque desbalanceado entre os cilindros de laminação superior e inferior. Quando para cada cilindro existe um acionamento independente.

Observando a ocorrência do *TAF* durante a laminação a frio, pode-se verificar que alguns aspectos são comuns entre os dois processos de laminação (a quente e a frio) e fazendo uma analogia aos fatores especificados por Honjyo e Wataname [16] foi verificada a ocorrência em:

- Impacto puro:
 - Rompimento ou dobra da tira.
 - Paradas de emergência
 - Velocidade de introdução e resposta do sistema de acionamento decorrentes da frequência de acionamento do *Jog*
- Equipamento ou manutenção e operação:
 - Falha no controle de tração avante e de ré
 - Falhas no sistema de controle do motor da gaiola
 - Aplicação de reduções incorretas
 - Utilização de trações incorretas
 - Paradas através do acionamento do botão de emergência

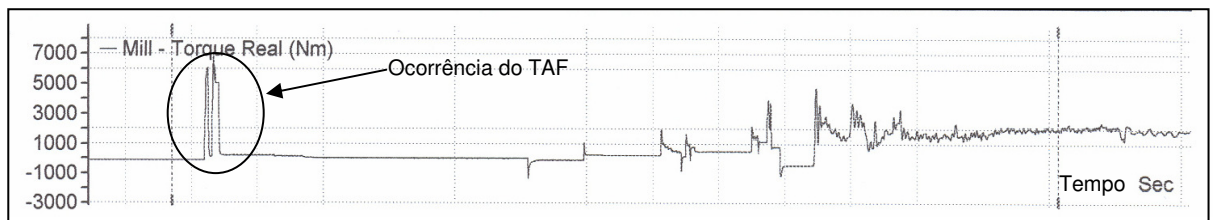


Figura 2.17 – Ocorrência do *TAF* durante a introdução

Dependendo da amplitude e da frequência de ocorrência do *TAF*, no laminador estudado, a principal consequência é a quebra dos pinos de segurança (ou cisalhamento) que estão instalados no eixo de transmissão dos cilindros de trabalho (Fig. 2.18). Obviamente a função dos pinos é o rompimento quando ocorre alguma sobrecarga durante o processo que possa vir a danificar o conjunto de acionamento (reductor, motor, acoplamentos, etc), mas, apesar do conjunto de acionamento estar protegido, quando os pinos de segurança rompem, em muitos casos ocorrem danos ao acabamento superficial dos cilindros de laminação e o rompimento da tira laminada, além da necessidade de paradas do laminador para a substituição dos pinos. Diante dos problemas decorrentes do *TAF* ao processo produtivo do laminador, fica evidente que, assim como na laminação a quente, na laminação a frio também é de fundamental importância conhecer e eliminar os fatores que influenciam na sua ocorrência.

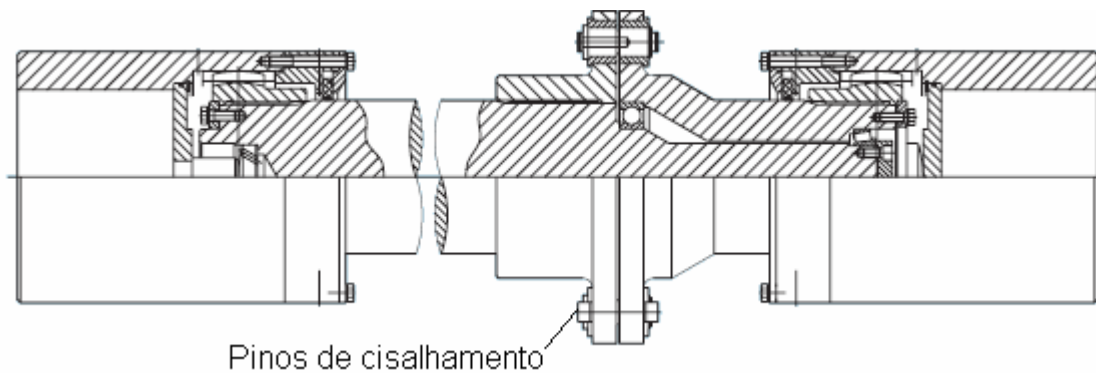


Figura 2.18 – Eixo de transmissão dos cilindros de trabalho

2.3 Redes Neurais Artificiais - RNA

As Redes Neurais Artificiais (RNAs), são programas de computador que podem reconhecer padrões em uma dada coleta de dados e produzir um modelo para esses dados. São ferramentas utilizáveis em diversas áreas de conhecimento, e as suas aplicações já podem ser encontradas em [26,32,34]:

- Modelamento de processo,
- Controle de qualidade,
- Controle de processo,
- Diagnósticos de máquinas,
- Reconhecimento de caracteres, sons,
- Diagnósticos de medicina,
- Previsões de mercado financeiro, etc.

No caso da laminação, existem alguns trabalhos publicados para a modelagem do esforço de laminação, tanto na laminação a frio como na laminação a quente [5]. A opção da utilização de RNAs para relacionar os parâmetros operacionais do processo de laminação com o *TAF* se deu, porque devido as suas características as RNAs são uma boa ferramenta para se obter respostas válidas para dados que não coincidam exatamente com aqueles que foram originalmente utilizados para o aprendizado. [25,32].

As RNAs são baseadas na estrutura de uma célula nervosa (Fig. 2.19) também chamada de neurônio. O neurônio biológico pode ser dividido em três partes [2,4,25,32]:

- Dendritos: Conexões pelas quais os sinais de outras células chegam até o neurônio.
- Corpo do neurônio ou *somma*: é o responsável pelo processamento dos estímulos de entrada provenientes dos dendritos e geração do estímulo de saída no axônio.
- Axônio: Ramificação onde acontece o sinal de saída.

A região entre o axônio de um neurônio e o dendrito de outro é chamada sinapse e é nessa região que ocorre a transmissão dos sinais entre as células nervosas [5,32].

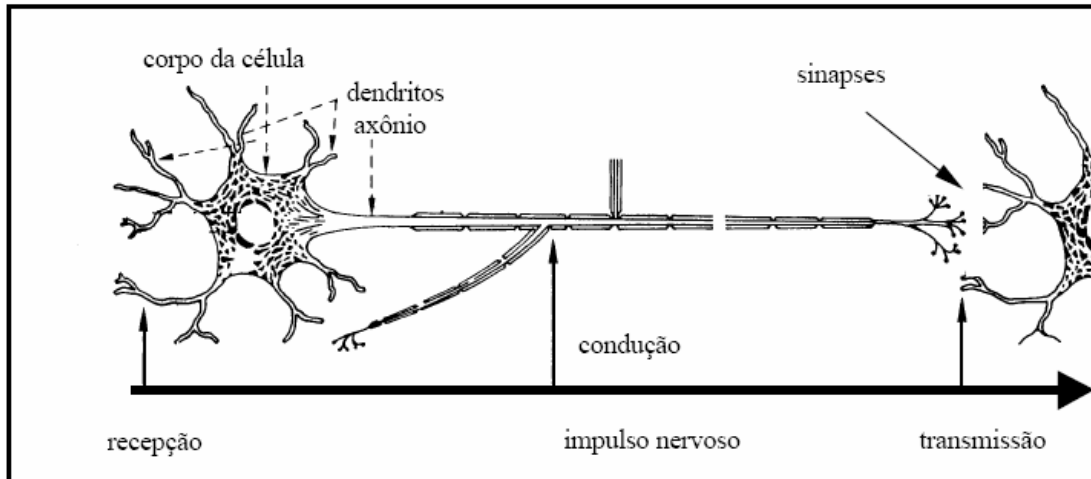


Figura 2.19 – Modelo de transmissão em neurônios biológicos [2]

O neurônio artificial foi inspirado em uma simplificação do modelo do neurônio biológico. No neurônio artificial os dendritos são representados por x_n terminais de entrada e o axônio como um terminal de saída y . As sinapses são representadas por pesos w_n , responsáveis pela soma ponderada das entradas x_n . Quando a soma dos impulsos recebidos pelo neurônio ultrapassa o seu limiar de excitação, ele dispara. No modelo do neurônio artificial (Fig 2.20) a sua ativação é conseguida através de uma função de ativação [2,4,25,32].

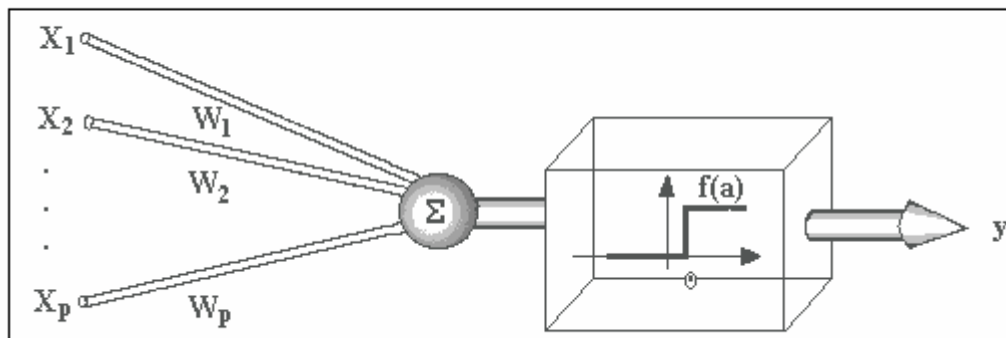


Figura 2.20 – Modelo do neurônio artificial [32]

Uma das principais características das redes neurais é a sua capacidade de aprendizado e com isso a possibilidade de melhorar o seu desempenho. A fase de aprendizagem é feita através de um processo iterativo de ajustes aplicados a seus pesos e é realizado junto a um conjunto bem definido de regras denominado algoritmo de aprendizado. Para que a rede tenha uma fase de aprendizado verdadeira, é muito importante que a coleta de dados seja feita de forma criteriosa de modo a serem evitados modelos espúrios [2,32].

A RNA possui uma camada de entrada e uma de saída e sua configuração mais comum é a *Multilayer Perceptron*. Nessa configuração, as camadas são classificadas em três grupos [2,22,32]:

- Camada de entrada: onde são inseridos os padrões na rede
- Camada intermediária ou oculta: nessa camada é feito o processamento
- Camada de saída: nessa camada é obtido o resultado desejado.

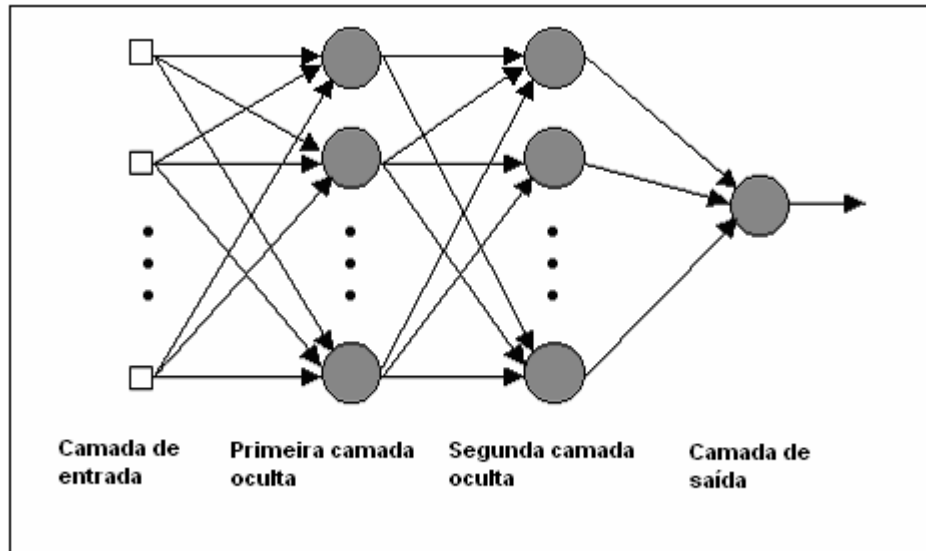


Figura 2.21 – Esquema de uma rede *Multilayer Perceptron* [22]

No diagrama (Fig. 2.21) é apresentada uma rede *Multilayer Perceptron* com duas camadas ocultas (MLP), nela, os dados são inseridos na camada da entrada e começam ser multiplicados por pesos da interconexão, enquanto são transferidos da camada de entrada à primeira camada oculta. Dentro da primeira camada oculta, são somados e processados. Enquanto os dados processados saem da primeira camada oculta, são novamente multiplicados por pesos da interconexão, somados e então processados pela segunda camada oculta. E finalmente os dados são multiplicados por pesos da interconexão e processados por uma última vez dentro da camada da saída [22].

Para a obtenção dos resultados necessários deste trabalho foi utilizado um software denominado *Neurosolutions for Excel* [22]. Esse software utiliza uma interface com o Microsoft Excel, o que facilita a sua operação. No anexo A do apêndice é apresentada uma introdução à utilização desse software.

CAPÍTULO 3

3 OBJETIVOS

O estudo do TAF durante a introdução da tira metálica no laminador foi motivado pela sua ocorrência sistemática durante a operação de introdução, que ao contrário das outras fases do processo, quando a sua ocorrência é esporádica, leva a quebras mais freqüentes dos pinos de cisalhamento dos eixos de transmissão conforme descrito no capítulo 2. Portanto o objetivo deste trabalho é:

- Aplicação de Redes Neurais Artificiais para relacionar parâmetros operacionais com o TAF.
- Verificação da influência da tração de ré no torque de laminação, e conseqüentemente no TAF, durante a introdução da tira de aço no laminador.
- Otimização do esquema de passes de laminação, visando à minimização do TAF durante a introdução.

CAPÍTULO 4

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Coleta e análise de dados

A coleta e a análise de dados foram feitas em três etapas.

Na primeira etapa, a introdução da tira foi feita com variações na tração de ré. O objetivo deste ensaio foi à verificação da influência da tração de ré no torque de laminação. Como descrito no capítulo 2, assim que a ponta do rolo chega aos cilindros de laminação e o comando *Jog* é transferido para o púlpito de comando da gaiola, foi aplicado um valor de tração igual ao valor mínimo possível atingido pelo laminador. Sob essa tração, o comando *Jog* foi acionado e um trecho do material foi laminado e alguns parâmetros operacionais monitorados. Em seguida, esse trecho de aço laminado foi cortado e descartado e, para o mesmo rolo, mantendo-se as mesmas condições de lubrificação, redução e esforço de laminação, foi aplicada uma tração de ré maior (em média 3,4 vezes maior). Sob a influência desse novo valor de tração foi laminado mais um trecho de aço, e monitorados os mesmos parâmetros operacionais monitorados anteriormente.

Na segunda etapa, durante 200 horas foram monitorados parâmetros operacionais, a fim de se identificar às diferenças dos parâmetros durante a ocorrência do *TAF* em relação à laminação em condições normais de laminação.

Na terceira etapa, o objetivo foi comparar a amplitude do *TAF*, com a tira de aço laminada em uma condição usual de laminação com uma nova condição que foi definida através de simulações utilizando-se as metodologias de cálculo apresentadas na teoria de laminação. Para isso, um rolo de aço foi dividido em dois novos rolos. Então, o primeiro rolo foi laminado dentro do método usual de laminação e o segundo rolo conforme a sugestão obtida através de simulação.

Nas três etapas, os dados coletados foram:

- Espessura inicial no passe
- Espessura final no passe
- Velocidade de laminação
- Torque nos cilindros de laminação
- Força de bobinamento
- Força de desbobinamento
- Força de laminação

Na Figura 4.1 é representado, o posicionamento dos instrumentos necessários para coleta de dados. Analisando a figura, primeiramente pela coleta de dados referentes a espessura, verifica-se que, a cada novo rolo que deverá ser processado ou a cada passe de laminação, o operador, através de uma IHM – Interface Homem Máquina – instalada no púlpito de operação, irá inserir os dados referentes a espessura inicial e desejada da tira a ser laminada. Ao serem inseridos, os dados serão transmitidos, através de uma rede, ao CLP – Controlador Lógico Programável. No CLP, os dados serão processados de acordo com a lógica de programação do laminador, e um sinal será enviado a uma servo - válvula que irá liberar a passagem do óleo hidráulico necessário para a movimentação do cilindro hidráulico, que é responsável pelo posicionamento dos cilindros de laminação e pela força de laminação. Durante o deslocamento do cilindro hidráulico, um transdutor de posicionamento irá monitorar e informar ao CLP a posição e a respectiva abertura entre os cilindros de laminação. O CLP, por sua vez, fará a comparação do valor de posicionamento lido, pelo transdutor, com o valor desejado, inserido pelo operador, e irá indicar o momento em que o movimento dos cilindros hidráulicos deverá ser cessado. Mas, quando os cilindros de laminação encontram a tira de aço que será laminada, surge uma força contrária decorrente da resistência à deformação que é imposta pela tira de aço. Quando os cilindros de laminação se deparam com esta força contrária, ocorrerá uma tendência de parada do movimento antes que seja atingido o posicionamento desejado que satisfaça o valor de espessura inserido pelo operador. Através do transdutor de posicionamento, o CLP é informado do posicionamento dos cilindros, este por sua vez, envia um comando para a servoválvula, que efetuará um controle na pressão hidráulica e proporcionará o esforço de laminação necessário para que a tira metálica seja conformada de acordo com a espessura desejada. Esta pressão hidráulica é monitorada e controlada por um transdutor de pressão que está instalado na linha de alimentação dos cilindros hidráulicos. As informações referentes ao posicionamento dos cilindros de laminação e da pressão hidráulica necessária para o esforço de laminação, são coletadas e armazenadas no sistema de aquisição de dados e, no caso da espessura são armazenadas em milímetros, e no caso da pressão hidráulica, esta é transformada através de cálculos efetuados pelo CLP e armazenada na forma de esforço de laminação, em Newtons.

Quando a laminação é iniciada, os medidores de espessura podem ser atuados, e se for o caso, irá auxiliar no controle da espessura da tira laminada. Nesta situação, os medidores efetuam a leitura da espessura da tira laminada e então, os dados referentes à espessura são enviados ao CLP. O CLP, por sua vez, processa os dados e efetua o controle do processo, de forma que a espessura seja obtida dentro das tolerâncias requeridas na operação. Os medidores de espessura trabalham em conjunto com sensores que medem a velocidade de laminação. A indicação da velocidade de laminação irá determinar o tempo de resposta do sistema automático de correção da espessura.

A exemplo de espessura, os valores desejados de velocidade de laminação e força de bobinamento (que irá determinar a tração que será imposta a tira), também são inseridos no púlpito de comando através da interface homem máquina (Fig. 4.1).

Durante o processo de introdução da tira, com o rolo já posicionado no desbobinador, o operador irá acionar o *Jog* a fim de conduzir a ponta do rolo até os cilindros de laminação. O movimento de *Jog* da bobinadeira já tem uma velocidade pré-estabelecida, e quando acionado, através de uma rede envia um sinal ao CLP que, associado ao conversor de frequência, irá efetuar o controle da velocidade e do torque necessário para o deslocamento da ponta do rolo até o local desejado.

Quando a tira atinge os cilindros, o operador insere a espessura desejada, os cilindros de laminação então, conformam a tira metálica, até que a espessura desejada seja atingida. Para que a ponta do rolo seja transportada até o mordente do enrolador, o comando *Jog* é acionado novamente, só que nesse momento, ao ser acionado, o comando *Jog* irá controlar simultaneamente o desbobinador e o acionamento da gaiola. Quando o *Jog* é acionado, os cilindros de laminação tentarão girar, porém encontrarão a resistência imposta pelo esforço de laminação, pelo atrito nos mancais dos cilindros de laminação e pela tração de ré que imposta pelo desbobinador. Então, para vencer esta resistência, o CLP e o conversor de frequência, operando em conjunto, irão disponibilizar a tensão e a corrente elétrica para que se obtenha o torque necessário para a movimentação dos cilindros de laminação e conseqüentemente o deslocamento da tira.

Basicamente, pode-se considerar que todo o controle é feito atuando-se na corrente e tensão elétrica do motor de corrente alternada. A tensão elétrica, a corrente elétrica, e a rotação dos motores, são coletadas no sistema de aquisição de dados, que após a realização de cálculos efetuados pelo CLP, são disponibilizadas na forma de torque, em *Newton x Metro*, como força de bobinamento, em *Quilograma força* e velocidade de laminação, em *metros por minutos*.

Para a obtenção dos dados e facilitar a análise desses dados foi utilizado um pacote de supervisão composto de dois módulos [17,18,19]:

- *ibaPDA Lite* – Para aquisição de dados
- *ibaAnalyser* – Para a análise dos dados

O *ibaPDA Lite* é um sistema para a aquisição de dados baseado em uma arquitetura *IBM PC* que utiliza o sistema operacional *Windows*. O sistema é conectado a um CLP através de uma rede (Fig. 4.1), tornando-se um participante dessa rede (Escravo). Assim as informações geradas no CLP são obtidas, disponíveis para a análise gráfica e armazenadas para análises futuras.

Os parâmetros necessários para a coleta dos dados, são configurados em uma tela denominada *Trigger Dialog* (Fig 4.2). Nesse local podem ser determinados, os intervalos de gravação, o tempo de gravação de cada arquivo e a quantidade de arquivos que serão gerados. Esta configuração irá determinar a ocupação do espaço de memória e, conseqüentemente, de acordo com o espaço de memória disponível, esses dados deverão ser apagados ou salvos em outra mídia.

Para que ocorra a comunicação entre o PC e o CLP é necessária que seja instalada uma placa eletrônica no PC. A finalidade dessa placa é a interface do PC com a rede. Com ela podem ser instalados os módulos participantes na rede, onde este tem a possibilidade de ler canais analógicos (responsáveis pela leitura de

variáveis como velocidade, corrente elétrica, torque, etc) e canais digitais (para a leitura de sinais, como por exemplo, posicionamento de sensores). Para que ocorra a transmissão de sinais, as estações participantes devem ser endereçadas na configuração do CLP.

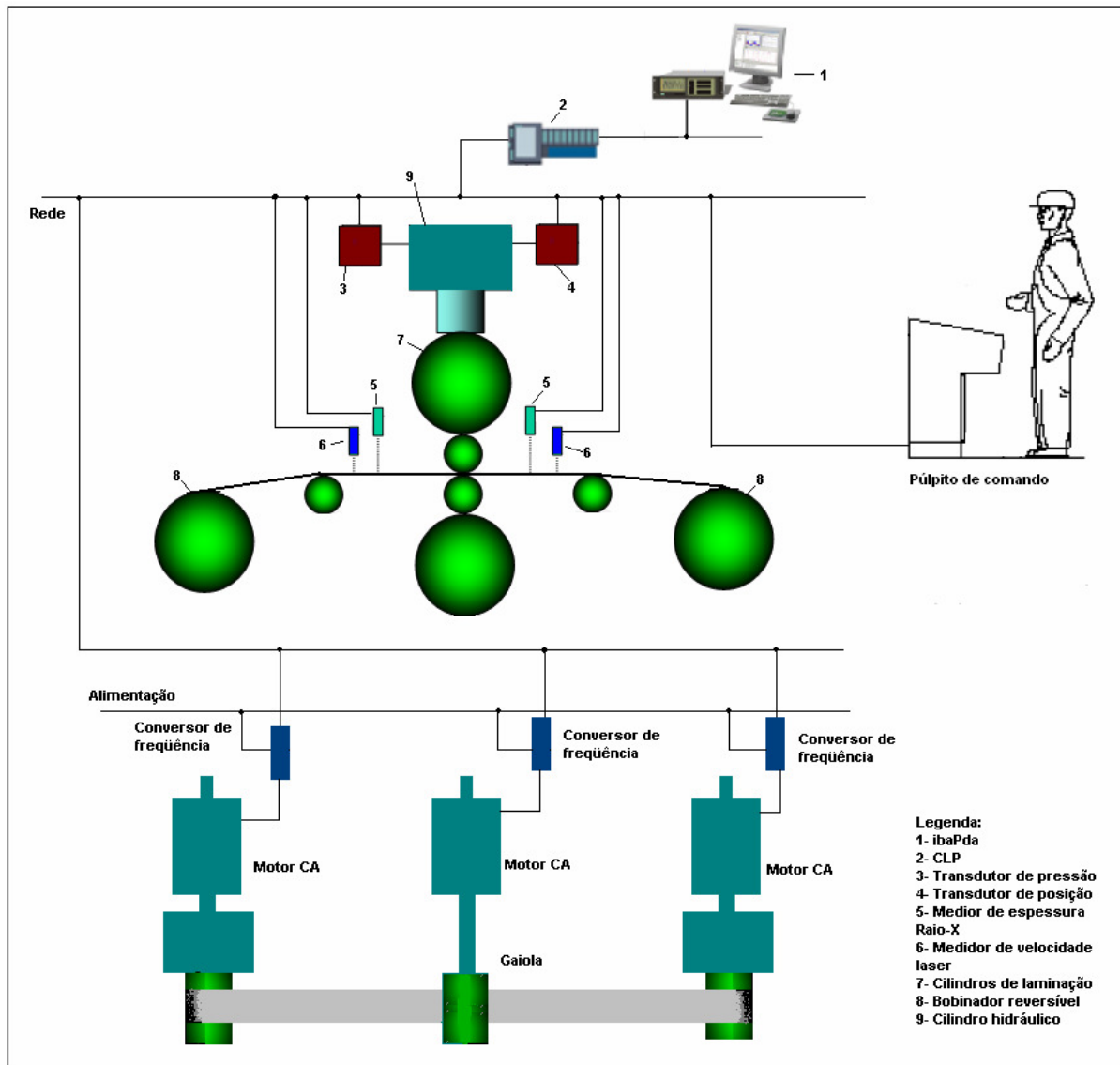


Figura 4.1 - Esquema da instrumentação para coleta de dados

Após a coleta, os dados podem ser analisados através do *ibaAnalyser* de acordo com a configuração estabelecida no *ibaPDA Lite*. A primeira etapa da análise dos dados, é a abertura de um arquivo gerado pelo *ibaPDA Lite*, esses dados estarão disponíveis de acordo com a configuração *ibaPDA Lite*. Nesse trabalho foi utilizada a opção *Default* do sistema de coleta, neste caso o eixo X representa o tempo, e o eixo Y a variável monitorada. Portanto, de acordo com a configuração descrita, quando é aberto um novo arquivo para análise, ele estará disponível em uma pasta (Fig 4.3), identificada pela data da análise e dentro desta pasta os arquivos serão identificados por uma seqüência numérica que irá identificar o código da medição.

Ao ser aberto o arquivo, do lado esquerdo da tela irá aparecer uma janela denominada *Signal Tree*. Nessa janela estarão disponíveis todos os sinais que foram previamente configurados na coleta de dados. Então os sinais desejados para a análise são selecionados e aparecerão na forma gráfica no lado direito da tela.

O eixo X do gráfico representa o intervalo de tempo do registro de uma variável, conforme configurado no *ibaPDA Lite* e através de um mecanismo simples de clicar e arrastar, o gráfico poderá ser ajustado até o mínimo intervalo de tempo entre leituras. Para se obter a leitura de uma variável em um determinado espaço de tempo, utiliza-se o recurso *Markers*. Quando este recurso é selecionado surgem na tela duas régua que podem ser deslocadas ao longo da tela gráfica e os valores referentes ao seu posicionamento, lidos pontualmente. Ainda utilizando os marcadores, mas selecionando o recurso *Statistics*, obtém-se a leitura de alguns valores estatísticos – Média, mínimo, máximo, e desvio padrão – de um determinado intervalo de tempo.

Descrever todo o processo de instalação, configuração e utilização do *ibaPDA Lite* e do *ibaAnalyser*, seria uma reprodução do manual de operação e instalação do *software*, que pode ser acessado no *site* do fabricante [22], porém a seguir, são destacadas as configurações que envolvem os parâmetros que irão definir a precisão da análise e da coleta de dados

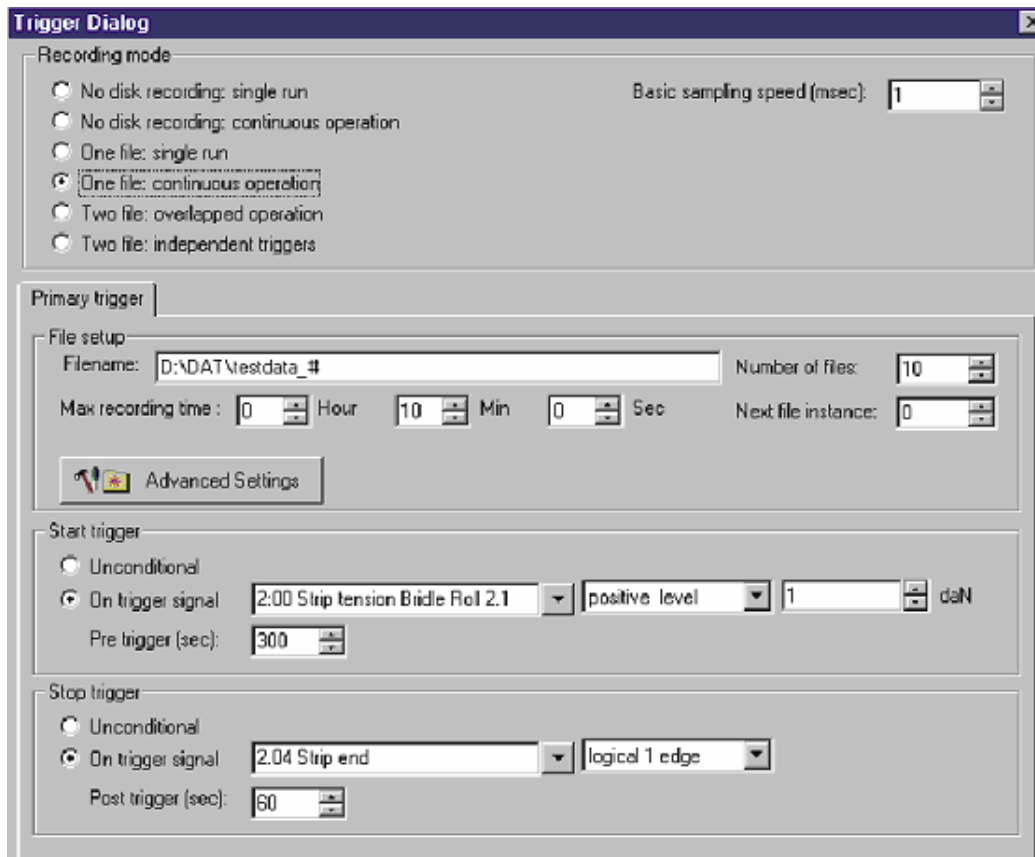


Figura 4.2- Tela de configuração *Trigger Dialog* [17,18,19].

A aquisição dos dados foi executada dentro de um processo permanente de coleta de dados, que neste caso são resultados de uma série de medições dentro de

intervalos de tempo idênticos. Neste trabalho foi utilizado o menor intervalo de tempo disponível pelo sistema de aquisição de dados, 2 ms e os arquivos, configurados para armazenagem, a cada uma hora. No exemplo apresentado na Figura 4.3, verifica-se um arquivo gerado com uma hora de dados coletados, e intervalo de coleta de 2 ms.

Ainda na Figura 4.4, pode-se verificar que durante a introdução da tira de aço no laminador, o comando *Jog* é acionado diversas vezes. Para uma melhor visualização, foi expandida a escala de tempo de um determinado intervalo entre medições, conforme apresentado na Figura 4.4. Analisando os pulsos de “Jog” apresentados na Figura 4.4, verifica-se que durante a introdução, o *Jog* foi acionado seis vezes, e cada acionamento com duração média de 5,25s. Com base no exemplo citado, e levando-se em consideração o intervalo entre medições de 2 ms, pode-se concluir que, para cada acionamento do *Jog* foram coletados, em média, 2625 dados.

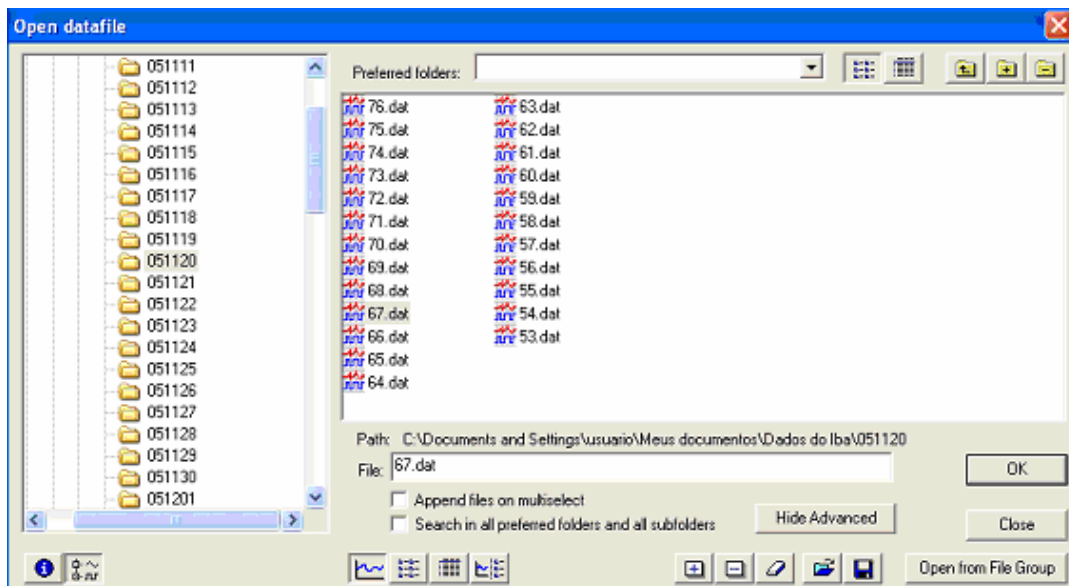


Figura 4.3 – Arquivos gerados pelo *ibaPda Lite* [17,18,19]

Ainda no exemplo citado, também se constata que, cada pulso de *Jog* corresponde a uma curva de torque com o seu respectivo pico de torque. Durante a análise dos dados, para se certificar que se estaria trabalhando com o maior pico de torque ocorrido, foi adotado o seguinte procedimento:

- a- Selecionado um arquivo com um determinado intervalo de coleta de dados,
- b- Identificados os intervalos, onde foi efetuada a introdução do rolo, com seus respectivos acionamentos de *Jog*,
- c- Ampliada a escala de medição, de forma que todos os pulsos de *Jog* ficassem visíveis na tela. E com o recurso *Statistics*, foi feito um filtro buscando o maior pico de torque apresentado neste intervalo.
- d- Identificado o pico de torque, a escala neste ponto foi ampliada para 2 ms, e com o recurso *Markers* (barras vermelhas da Figura 4.6), foram

coletadas todas as informações necessárias, conforme descrito no início do item.

Como descrito anteriormente, o *TAF* é resultado do quociente entre o torque de pico pelo torque médio. Para ser coletado o torque médio foi utilizado o recurso *Statistics* disponível no *Software*. Neste caso, as barras vermelhas *Markers*, selecionaram uma fase estável do processo de laminação como mostra a Figura 4.7.

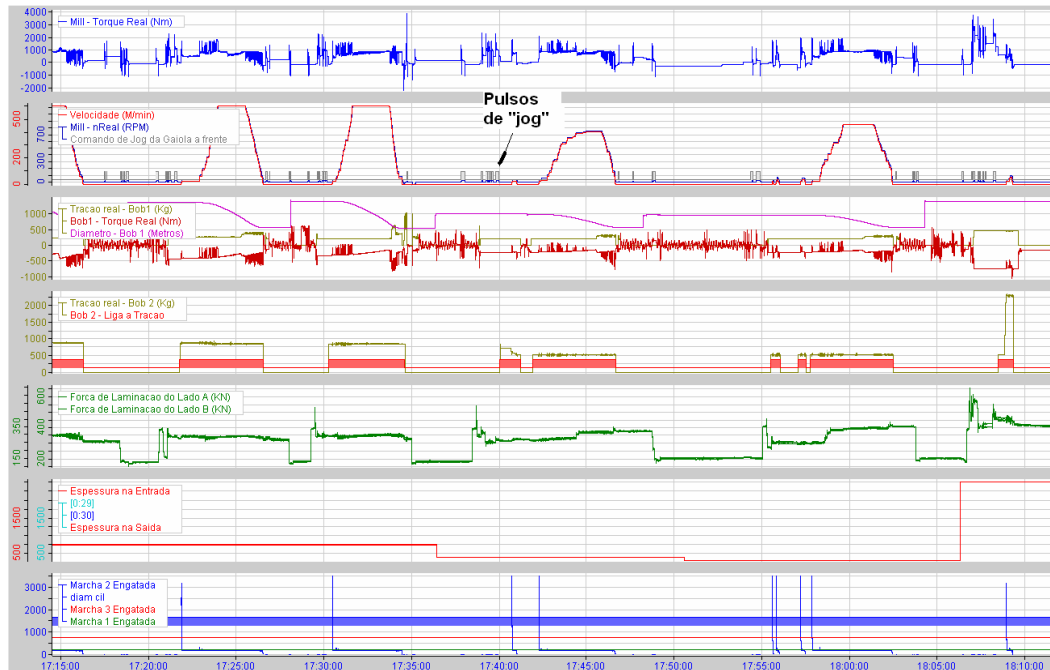


Figura 4.4 – Arquivo gerado com dados coletados

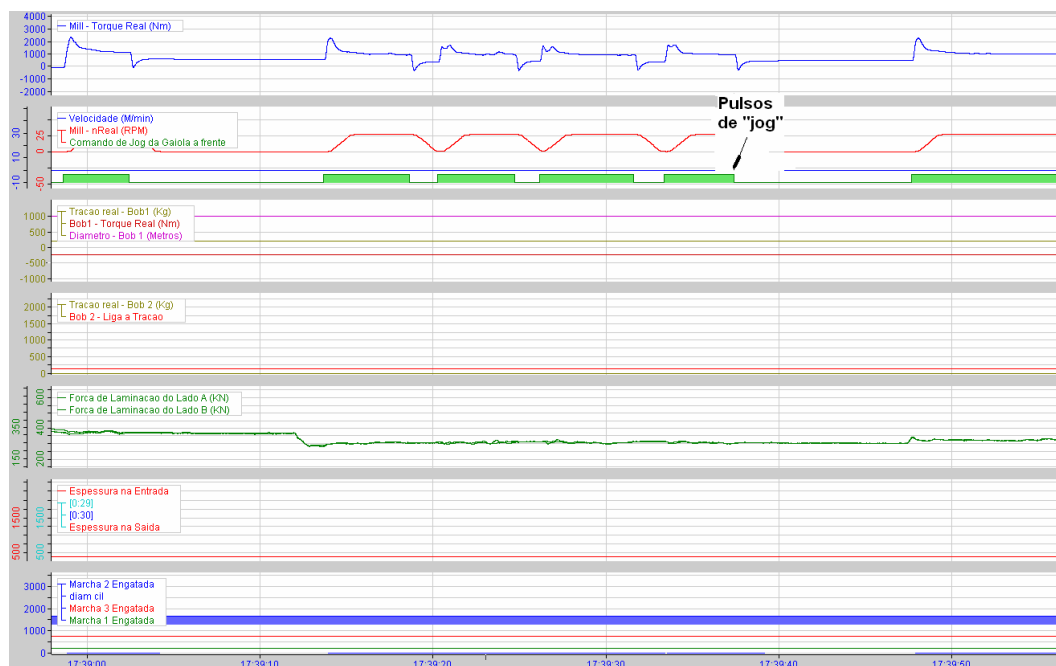


Figura 4.5 - Análise da ocorrência do *TAF* com o acionamento do *Jog*

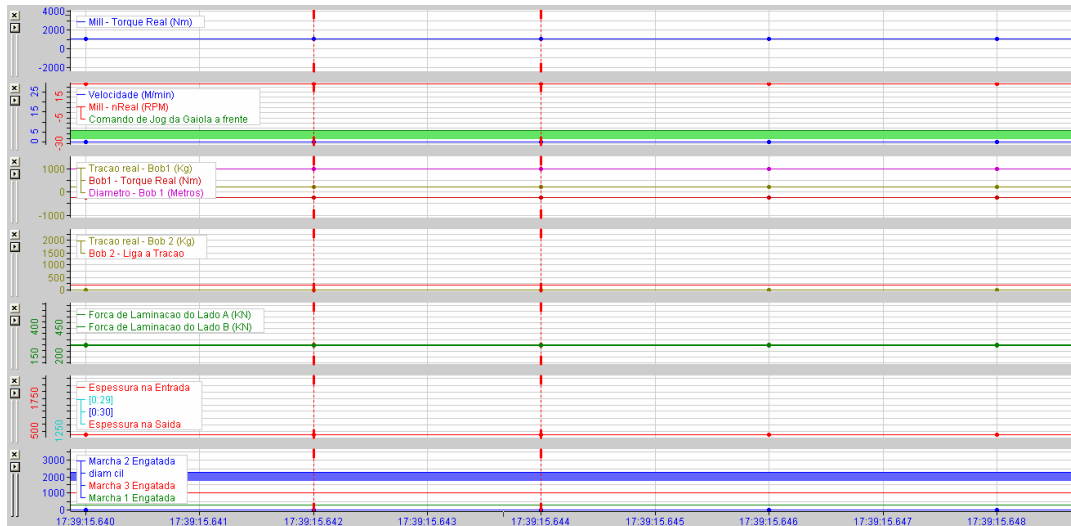


Figura 4.6 - Análise do pico de torque com escala de 2 ms

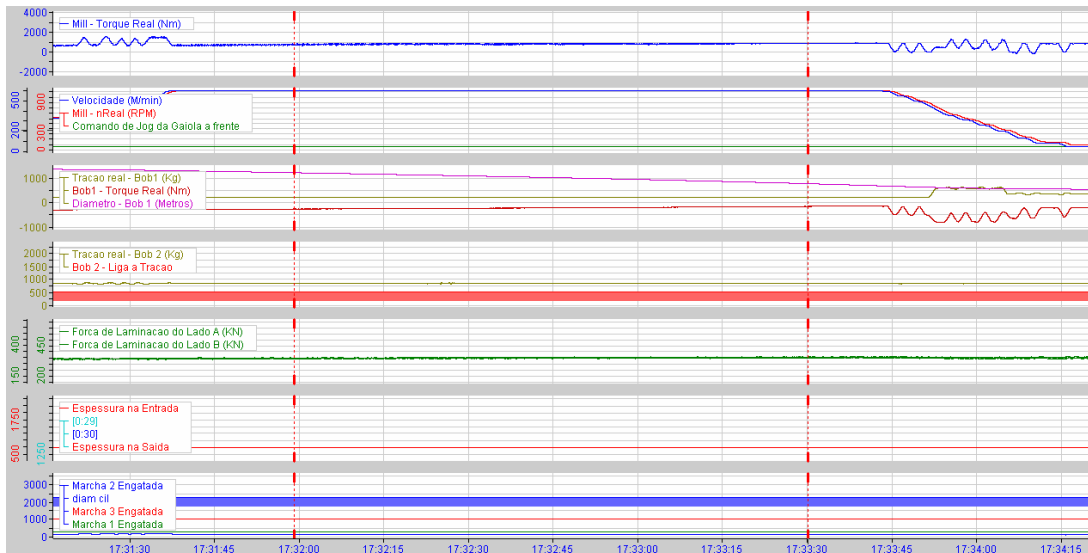


Figura 4.7 – Medição do torque médio de laminação

4.2 Configuração das RNAs

Em um ambiente industrial, onde o principal objetivo é a realização de uma produção que atenda os anseios do mercado consumidor, torna-se muito difícil a realização de experimentos que sigam determinados padrões de repetibilidade e os dados coletados estão dentro de um universo muito variável de condições operacionais para o atendimento de cada especificação dos produtos. Por isso, o principal objetivo da utilização da RNA foi relacionar os parâmetros operacionais à ocorrência do TAF.

Para que o objetivo fosse atendido, foram elaboradas vinte redes neurais artificiais com dados de entrada diferentes. Estas redes, então, foram validadas testadas e com as seguintes configurações:

- Camadas Intermediárias:
 - 2 camadas
 - 3 camadas
 - 4 camadas
- Função de transferência:
 - Linear TanhAxon.
 - BiasAxon

Neste capítulo serão apresentadas as duas que obtiveram a melhor aderência.

As variáveis de entrada e saída, utilizadas na elaboração das duas RNAs, foram determinadas com base na equação para o cálculo do torque elaborada por Ford, equação apresentada no capítulo 1, e que será reescrita a seguir:

$$M_d = M + \left(\frac{\sigma_r h_0 - \sigma_a h_1}{2} \right) . R . b . 10^{-3} \quad (4.1)$$

Sabendo que o torque sem a influência da tração é dado por:

$$M = 2 . P . a \quad (4.2)$$

Na equação 4.2, P , representa o esforço de laminação sem a influência da tração. Porém, o esforço de laminação obtido na coletada de dados estava sob a influência da tração, e como explicado no capítulo 2, a aplicação de trações interfere no esforço de laminação. Para ser verificada a magnitude da influência da tração no esforço de laminação, foi feita a avaliação de um grupo de dados através da relação de Hessenberg e Sims (eq. 4.3) [24].

$$F = P \cdot \left[1 - \frac{1}{3 \cdot \bar{\sigma}} (2 \cdot \sigma_r + \sigma_a) \right] \quad (4.3)$$

Obtido o esforço de laminação sem a influência da tração, foi avaliado o raio achatado do cilindro de laminação sob a influencia das duas condições de esforço de laminação, com tração e sem tração. A avaliação foi feita com base na relação, já apresentada no capítulo 2, e descrita a seguir:

$$\frac{R'_n}{R'_{n-1}} \cong 1,05 \quad (4.4)$$

Na Figura 4.8 pode-se observar que a grande maioria dos resultados obtidos satisfazem a relação dada pela equação 4.4, foi então, avaliada a diferença entre os esforços de laminação sob a influência da tração e obtidos através da relação de Hessenberg e Sims.

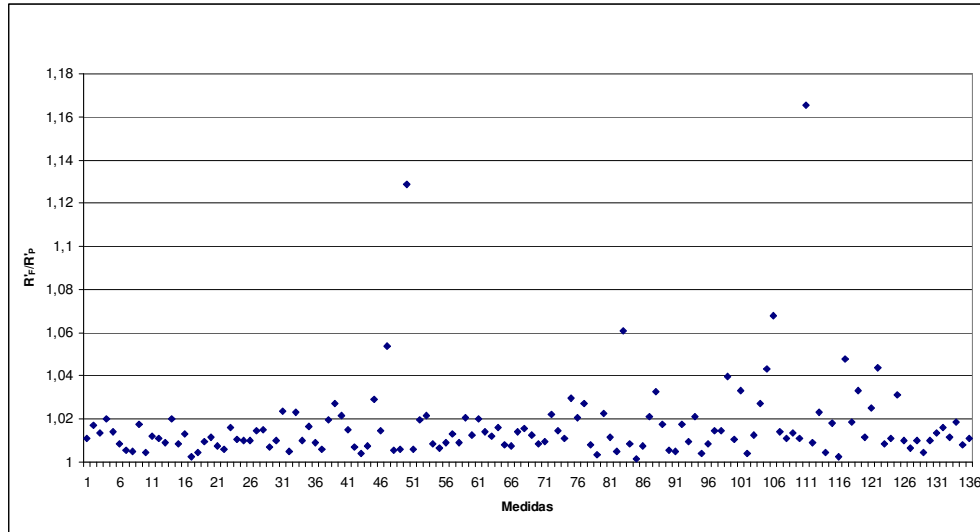


Figura 4.8 – Relação entre o raio achatado do cilindro de laminação com a aplicação de tração e sem a aplicação de tração

No gráfico da Figura 4.9 observa-se que o esforço de laminação é sistematicamente maior sem a aplicação de trações, porém pode-se verificar que no caso avaliado esta diferença foi relativamente pequena, sendo a maioria dos pontos plotados no gráfico ficaram abaixo de 4% e apenas alguns casos acima de 8%.

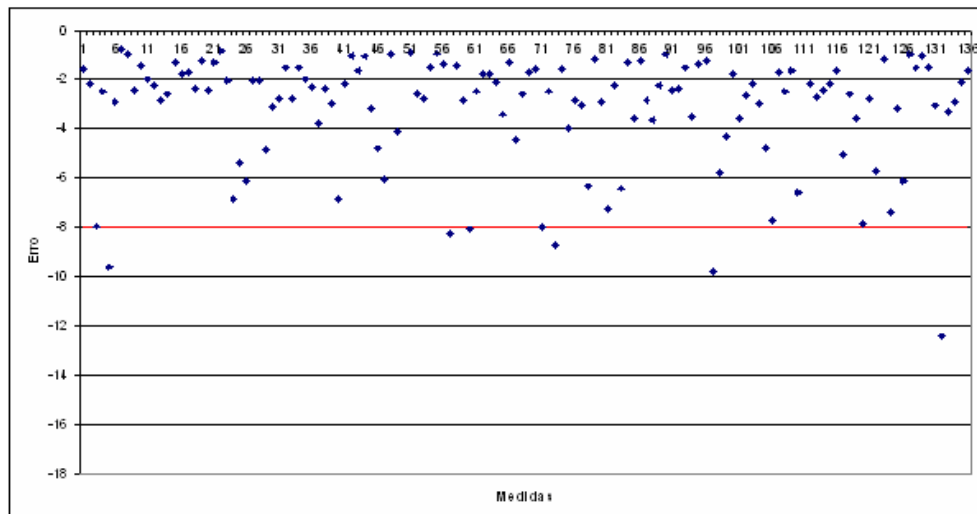


Figura 4.9 – Variação obtida do esforço de laminação com a aplicação de tração e sem a aplicação de tração

Então, como foi verificada uma pequena variação entre as duas situações, o esforço de laminação sem a influência da tração, P , foi substituído pelo esforço de laminação, F , coletado em condições normais de operação. Desta forma a equação 4.2 foi reescrita como:

$$M = 2.F.a \quad (4.5)$$

Substituindo a equação 4.5, na equação proposta por Ford, equação. 4.1, obtém-se:

$$M_{do} = 2.F.a + \left(\frac{\sigma_r.h_0 - \sigma_a.h_1}{2} \right).R.b.10^{-3} \quad (4.6)$$

Na tabela 4.1 são apresentadas as variáveis de entrada e saída que compuseram as duas redes apresentadas neste capítulo. Na RNA 1, a composição dos dados de entrada reproduziram as variáveis utilizadas, na equação 4.6, para o cálculo do torque, e neste caso, a primeira coluna leva em consideração o esforço de laminação, a segunda coluna leva em consideração a tração aplicada na tira e a terceira coluna leva em consideração o braço de alavanca, calculado através da equação 4.6.

RNA 1			
Dados de entrada			Dados de saída
1	2	3	
F	$\frac{\sigma_r.h_0 - \sigma_a.h_1}{2}$	a	M_d
RNA 2			
Dados de entrada			Dados de saída
1	2	3	
2.F.l _d '	$\frac{\sigma_r.h_0 - \sigma_a.h_1}{2}$	R.b	M_d

Tabela 4.1 – Variáveis de entrada e saída utilizadas na elaboração das RNA

A exemplo da RNA 1, a RNA 2 também foi elaborada com base na equação 4.6. Nesta configuração, na segunda e terceira coluna, os dados utilizados reproduziram as variáveis da equação 4.6, ficando o destaque para a composição da variável descrita na primeira coluna da tabela 4.1, isto porque, reproduz a relação direta entre o torque de laminação e a fração, w , do braço de alavanca em relação ao arco de contato. Sabendo-se que:

$$a = w.l_d' \quad (4.7)$$

Como:

$$a = \frac{M_d}{2F} \quad (4.8)$$

Ou:

$$w.l_d' = \frac{M_d}{2F} \quad (4.9)$$

Então se pode considerar que:

$$2.F.l_d' = \frac{M_d}{w} \quad (4.10)$$

Definidas as variáveis de entrada e saída, o passo seguinte foi a configuração das RNAs, que neste trabalho foram desenvolvidas no software *NeuroSolutions for Excel*.

A RNA adotada foi a do tipo *Multilayer Perceptron*. Este tipo de rede é composto de camadas (ver capítulo 2), e nela, os dados são inseridos na camada de entrada, em seguida processados nas camadas ocultas e o resultado obtido na camada de saída. A quantidade de camadas ocultas, o tipo da função de transferência utilizada e o método de treinamento da rede foram obtidos através de tentativas, avaliando-se da capacidade de aprendizado da rede e aderência entre os dados inseridos e os testados. Então, a melhor configuração, utilizada neste trabalho, é a apresentada na Figura 4.10.

As redes foram elaboradas com 380 dados, e, como explicado anteriormente, a capacidade de aprendizado da rede irá definir a qualidade do seu desempenho, por isso, a fase de aprendizado deve ser feita de forma criteriosa, a fim de que o resultado proporcionado seja consistente. Neste trabalho a proporção definida para treino foi de 75% dos dados, de 12,5% para validação e de 12,5% para teste (Fig. 4.11).

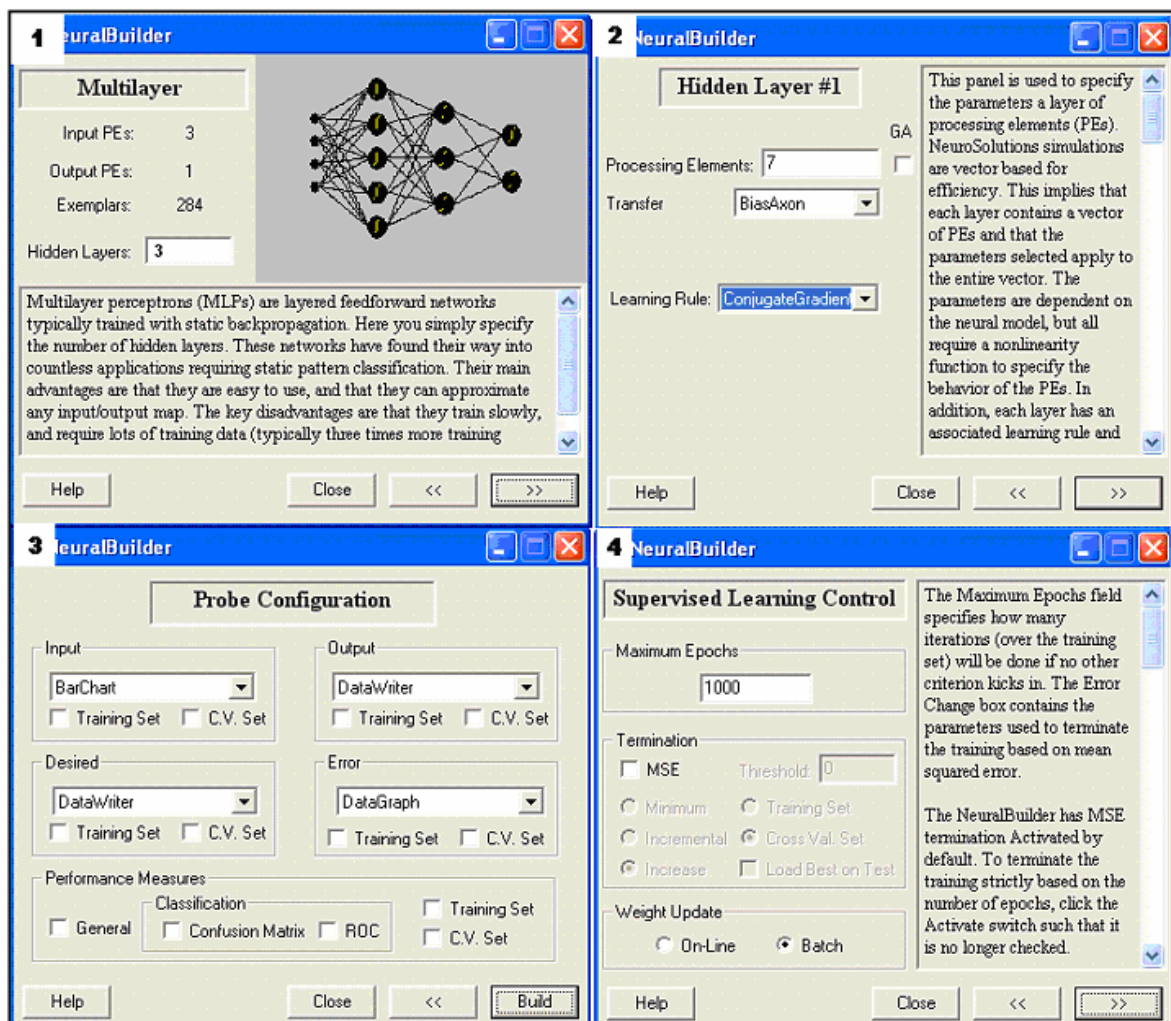


Figura 4.10 – Configuração das RNAs

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Força de laminação										
1	o ton	Tração	a	Md kgm							
274	155	0,479405	2,59722	823,4694							
275	54	-0,8119	1,518344	136,5306							
276	56	0,793443	2,034816	248,4694							
277	278	-7,00133	1,119531	398,3673							
278	116	3,270026	1,576723	473,3673							
279	125	2,734848	1,671962	480,7143							
280	50	0,515909	1,839812	193,0612							
281	112	2,7	2,041224	518,5714							
282	68	-0,49992	0,993608	120,5102							
283	104	0,5225	2,739862	586,7347							
284	231	-9,51068	1,855393	626,0204							
285	220	-5,7153	1,93279	716,3265							
286	195	1,537594	3,049171	1242,551							
287	131	2,529825	2,140101	623,4694							
288	160	-7,48151	2,05567	420,9184							
289	58	3,715789	2,039589	298,3673							
290	48	1,3	2,229351	245,5102							
291	83	2,627341	2,638776	498,9796							
292	66	0,509091	1,673387	232,8571							
293	62	-0,58133	1,351258	149,898							
294	79	0,536782	1,880325	316,9388							
295	114	0,714953	1,453869	344,898							
296	185	2,763258	1,741774	707,9592							
297	53	0,254453	1,764151	195							
298	152	-8,0653	2,490231	568,9796							
299	64	0,636637	1,897613	261,0204							
300	68	1,171429	1,723501	255,3061							
301	69	-2,29735	0,884238	57,85714							
302	50	0,741313	1,969453	213,2653							
303	64	0,656364	1,701817	233,2653							
304	66	-1,38462	1,192142	129,4898							
305	46	0,470667	2,455248	241,3265							
306	66	-1,8444	1,706882	189,0816							
307	93	0,672026	2,37926	459,3878							
308	99	-1,29258	1,493068	259,1837							
309	51	0,542667	2,360432	258,1633							
310	80	2,851724	2,048893	433,2653							
311	79	1,331099	2,812799	484,4898							
312	94	1,308311	2,085356	431,4286							
313	98	3,780749	2,258351	503,9796							
314	116	-13,6703	2,242096	294,1837							
315	139	1,792553	1,489775	473,4694							
316	90	2,285135	1,562269	349,6939							
317	61	-1,01506	0,991736	89,59184							

Figura 4.11 – Proporções para treino, validação e teste da RNA

4.3 Curva teórica *Tensão x Número de ciclos* do pino rompedor

Os eixos de transmissão, que transmitem o torque do conjunto de acionamento (motor e redutor) para os cilindros de laminação, são dotados de um conjunto de segurança (um em cada eixo) que visa preservar os componentes da gaiola (cilindros e conjunto de acionamento) de sobrecargas que podem surgir, como por exemplo, de algum tipo de acidente. Este dispositivo de segurança é composto de pinos de cisalhamento dimensionados para o rompimento no caso da

ultrapassagem de um torque pré-determinado. De acordo com o projeto do laminador, o torque necessário para o rompimento dos pinos é resultado do produto entre o torque nominal e um fator de segurança.

Os pinos, porém, além da situação de sobrecarga, durante a introdução ou passes de laminação, ficam sujeitos a aplicação de uma carga cíclica, em torno da qual, suspeitava-se que, poderia proporcionar a ruptura por fadiga.

Pereira [29] define fadiga como: “Um processo de acúmulo de dano permanente, progressivo e localizado, que ocorre em materiais, componentes e estruturas sujeitos a condições dinâmicas de carregamento e que pode culminar na nucleação e conseqüente propagação de trincas ou numa fratura completa, após número suficiente de variações de carga ou ciclos de carregamento”.

August Wöhler, na década de 1850, efetuou experimentos nos quais, através dos resultados obtidos, determinou um gráfico que relaciona a *Tensão x Número de ciclos* até a fratura. Então a curva de Wöhler tornou-se uma forma usual de apresentação dos resultados obtidos para ensaios de fadiga [11]

Para ser determinada a curva *Tensão x Números de ciclos* dos pinos de cisalhamento, foi elaborado um dispositivo (Fig. 4.12) onde o pino foi submetido, através de um cilindro hidráulico comandado por um CLP, a aplicação de uma carga cíclica. Antes, porém, para que o dispositivo fosse validado, foram enviados dois pinos para um laboratório (credenciado pelo INMETRO), onde foram realizados ensaios de tração e cisalhamento (Tabela 4.2).

Limite de Cisalhamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)
407	817

Tabela 4.2 – Resultados obtidos através de ensaios no pino

Então, foram efetuados, através do dispositivo, os ensaios de cisalhamento de cinco pinos. Neste ensaio, através da válvula limitadora de pressão, instalada no dispositivo, a pressão hidráulica, responsável pela força do cilindro hidráulico, foi aumentada gradativamente até o rompimento do pino. O valor de pressão de ruptura foi lido no pressostato disponível no dispositivo, e, através da relação entre a pressão hidráulica e a área do cilindro, foi determinada a força exercida que levou o pino ao cisalhamento. O quociente entre a força aplicada e a área circular do pino determinou a tensão de cisalhamento. Os resultados obtidos podem ser comparados com o laboratorial, através da Figura 4.13.

Como o erro máximo obtido entre os dois ensaios não foi superior a 4%, concluiu-se que o dispositivo estava apto a realização do teste de fadiga dos pinos. Para a realização do ensaio de fadiga, o pino foi submetido a uma carga cíclica, esta carga foi obtida, através da válvula limitadora de pressão, que foi regulada para uma pressão hidráulica que determinaria a tensão sob o pino. O CLP, então, comandou a válvula direcional, de forma que fosse comutada fazendo com que houvesse um carregamento e descarregamento sobre o pino dentro de um intervalo de tempo.

Quando o sistema hidráulico atingia a pressão regulada, o pressostato enviava um sinal a um contador que efetuava o registro dos ciclos. Com o rompimento do pino, a mesa móvel desloca-se até a atuação do sensor, com a atuação do sensor o sistema é desligado automaticamente, ficando o número de ciclos registrado no contador.

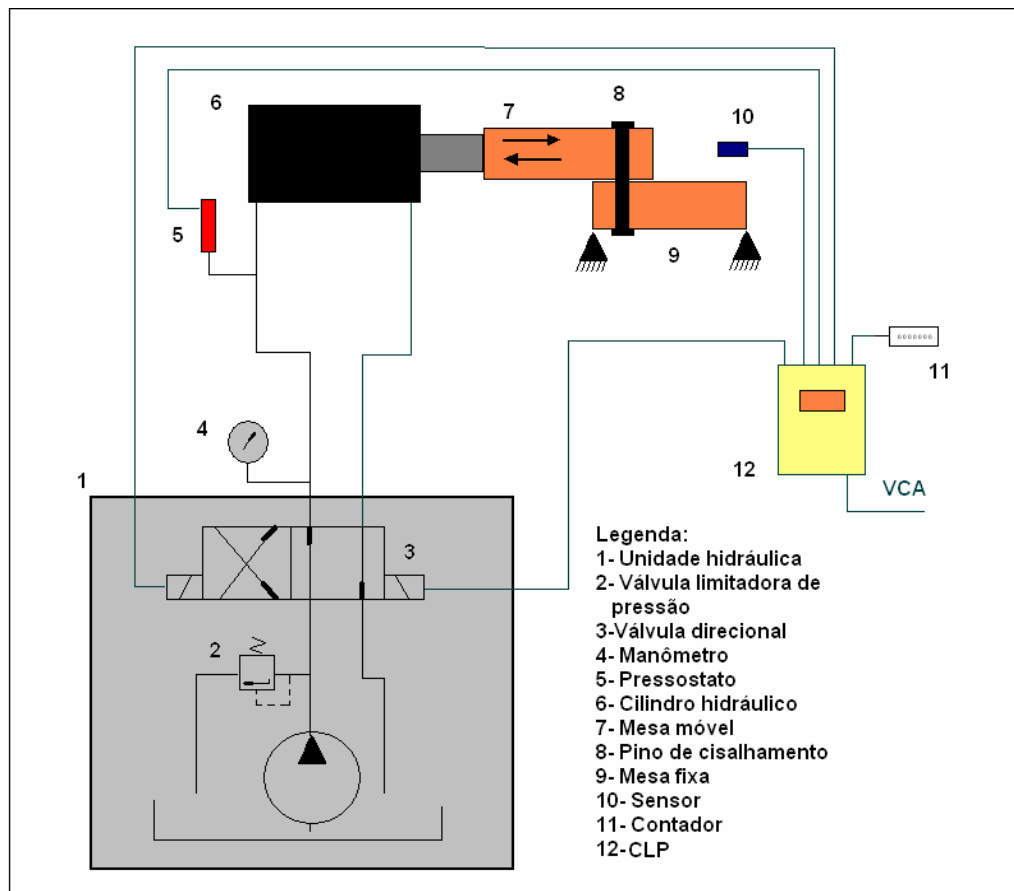


Figura 4.12 - Representação esquemática do dispositivo

Na tabela 4.3, são apresentados os parâmetros utilizados no ensaio, a frequência (ciclos por minutos) e a tensão aplicada, que foram determinados com base nas limitações do dispositivo, para a frequência, e no tempo de realização do ensaio, conforme esquema de cálculo apresentado no Anexo B do Apêndice [7].

Tensão aplicada (MPa)	Ciclos por minuto
340	18

Tabela 4.3 – Parâmetros utilizados no ensaio

No gráfico da Figura 4.14, é apresentada a quantidade de ciclos suportados pelos pinos. Com base nesses resultados, foi obtido o fator T [7] que está relacionado ao tamanho do pino e o fator S [7] relacionado ao acabamento superficial do pino, conforme esquema de cálculo apresentado no Anexo B do Apêndice, e então, elaborada a curva que irá determinar a vida do pino (Fig. 4.15).

A curva Tensão x Número de ciclos que foi apresentada nesse capítulo, deve ser considerada como teórica, isto porque, os ensaios realizados serviram para o ajuste do modelo de cálculo apresentado no Anexo B do Apêndice, e os pontos plotados na elaboração da curva foram obtidos através desse modelo de cálculo. Portanto, a curva será utilizada como uma referência na análise dos resultados obtidos na otimização dos passes de laminação, bem como, na influência da tração de ré na vida dos pinos.

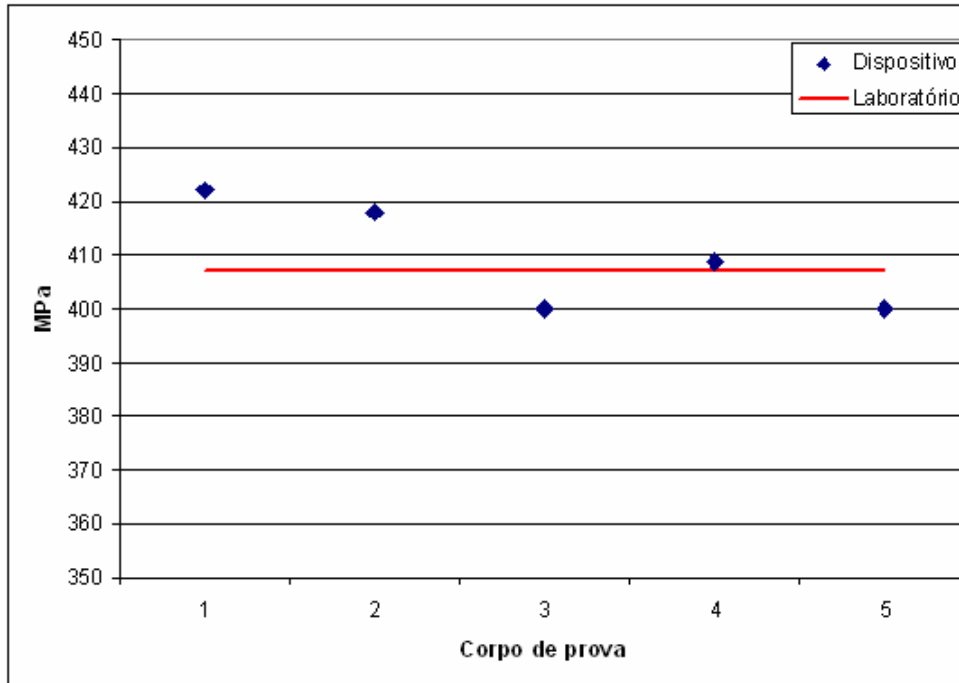


Figura 4.13 – Resultados obtidos com a utilização do dispositivo

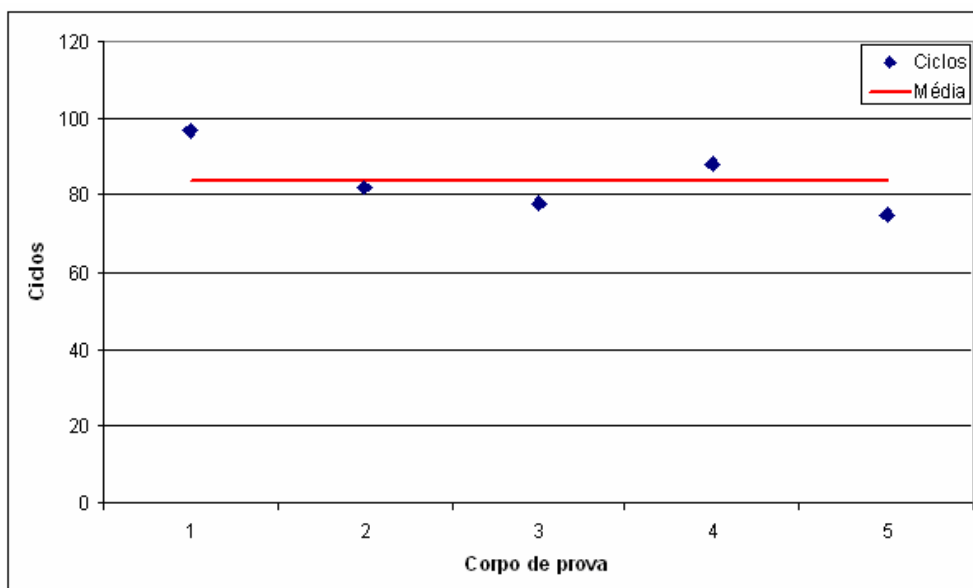


Figura 4.14 – Resultados obtidos com a aplicação da carga cíclica.

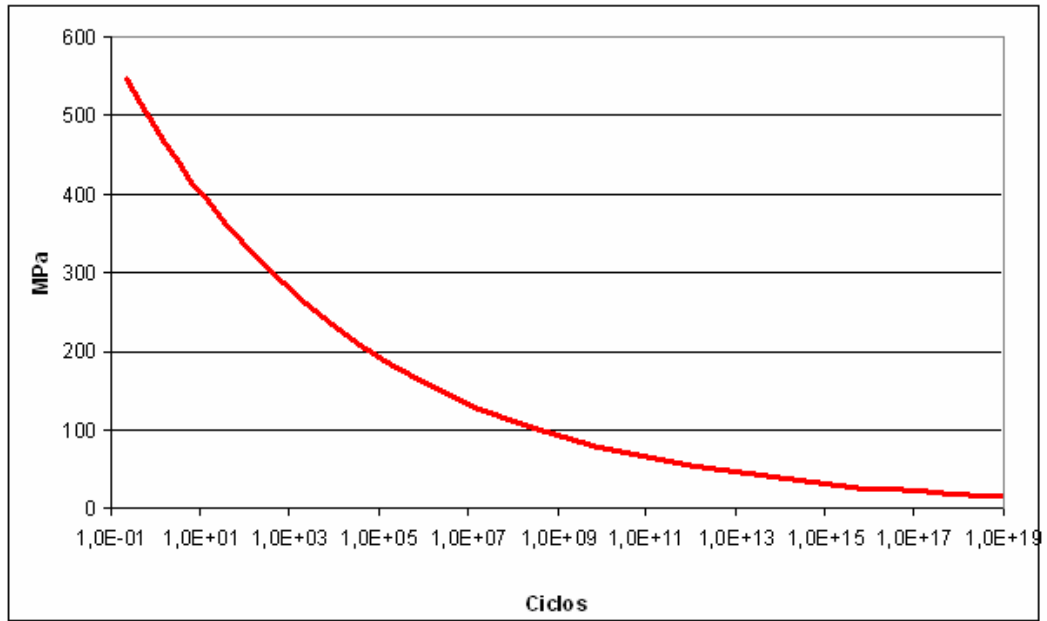


Figura 4.15 - Curva Tensão x Número de ciclos

CAPÍTULO 5

5 ANÁLISE ATRAVÉS DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.

As duas redes neurais, RNA 1 e RNA 2, apresentaram uma boa convergência ao erro (Fig. 5.1), ou seja, o processo de aprendizagem foi assimilado rapidamente. As duas redes também apresentaram uma boa aderência conforme é apresentado na Figura 5.2. sendo que a RNA 1 apresentou $r \cong 0,98$ enquanto que a RNA 2 apresentou $r \cong 0,94$.

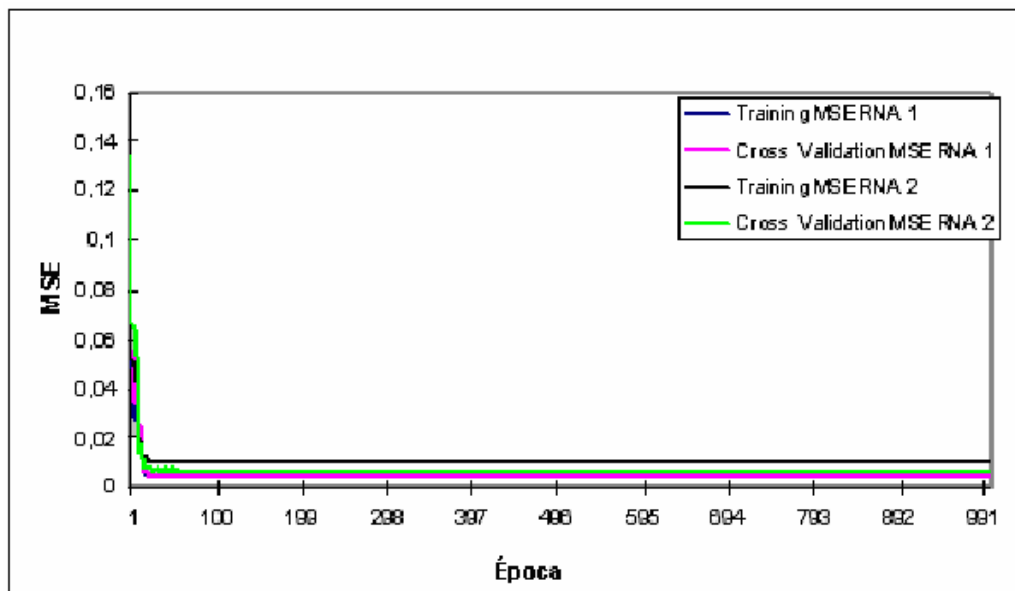


Figura 5.1- Erro médio

Com já apresentado no capítulo 3, o principal objetivo da utilização de redes neurais artificiais, foi a determinação da relevância dos dados de entrada em relação aos dados de saída. Então após a configuração das redes e confirmação de sua operacionalidade, obteve-se o relatório onde a relevância dos dados é apresentada. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 5.3, na figura verifica-se que, na RNA 1, o dado de maior relevância foi o braço de alavanca, e na RNA 2 a aplicação de tração. Fazendo uma análise preliminar, maiores detalhes serão tratados no próximo capítulo, verifica-se que, baseando-se na teoria de laminação, os resultados apresentados são consistentes. Analisando inicialmente a influência tração, neste caso, através da Figura 2.10 do capítulo 2 proposta por Tselikov [31], verifica-se que o braço de alavanca é alterado com aplicação de trações na tira laminada. Com a alteração do braço de alavanca o torque também será alterado, já que o torque é obtido pelo produto entre o esforço de laminação e o braço de alavanca.

No gráfico apresentado na Figura 5.4, verifica-se a relação entre o braço de alavanca e o torque de laminação, sendo que o incremento do braço de alavanca reflete em um aumento do torque de laminação. Na Figura 5.5, verifica-se a relação entre a aplicação da tração, representada pela equação da coluna 2 da tabela 4.1, com o torque de laminação. Neste caso, verifica-se que, mantendo-se constante a tração avante, espessuras de entrada e saída, com o incremento da tração de ré ocorrerá um aumento do torque de laminação, como demonstra a Figura 5.5.

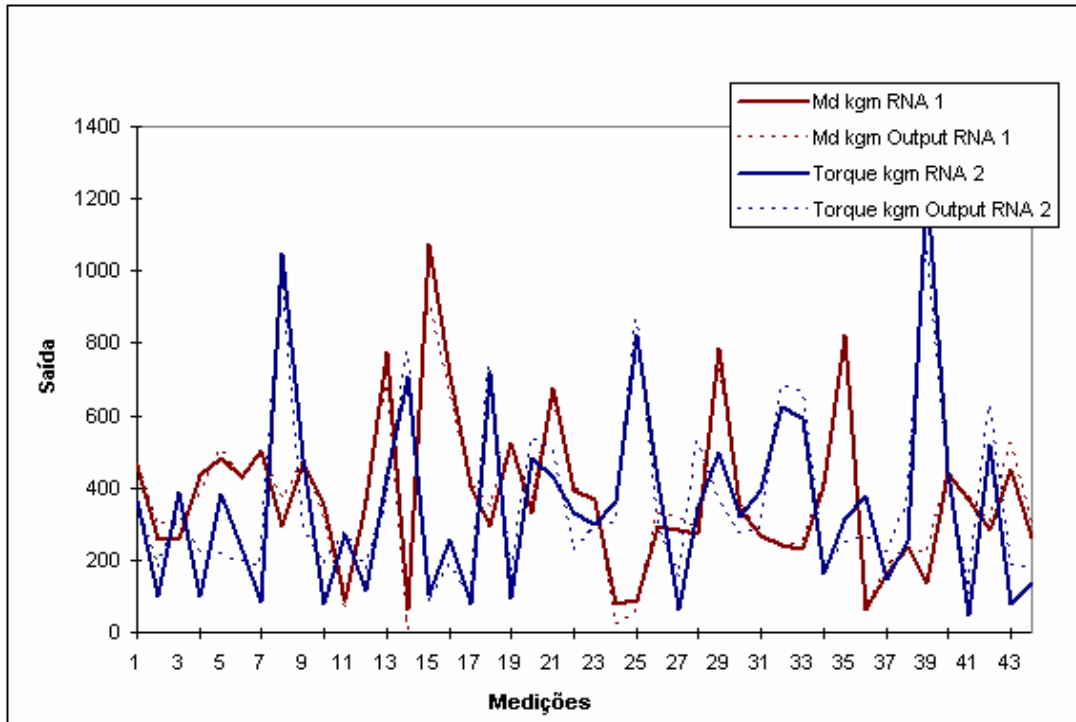


Figura 5.2 - Relação entre os dados obtidos e o desejado.

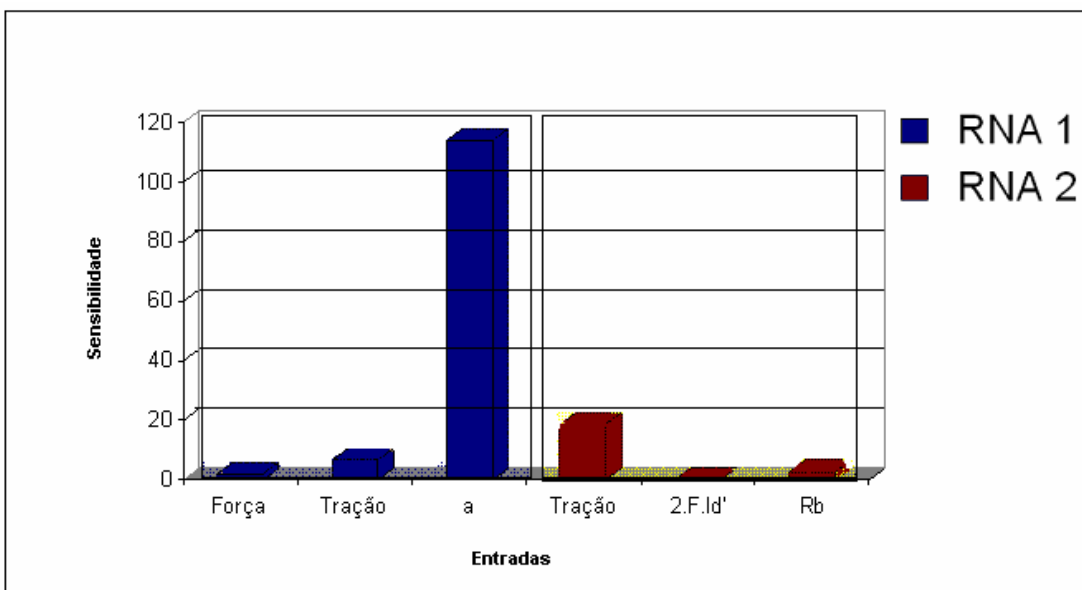


Figura 5.3 – Relevância entre os dados de entrada com relação ao dado de saída

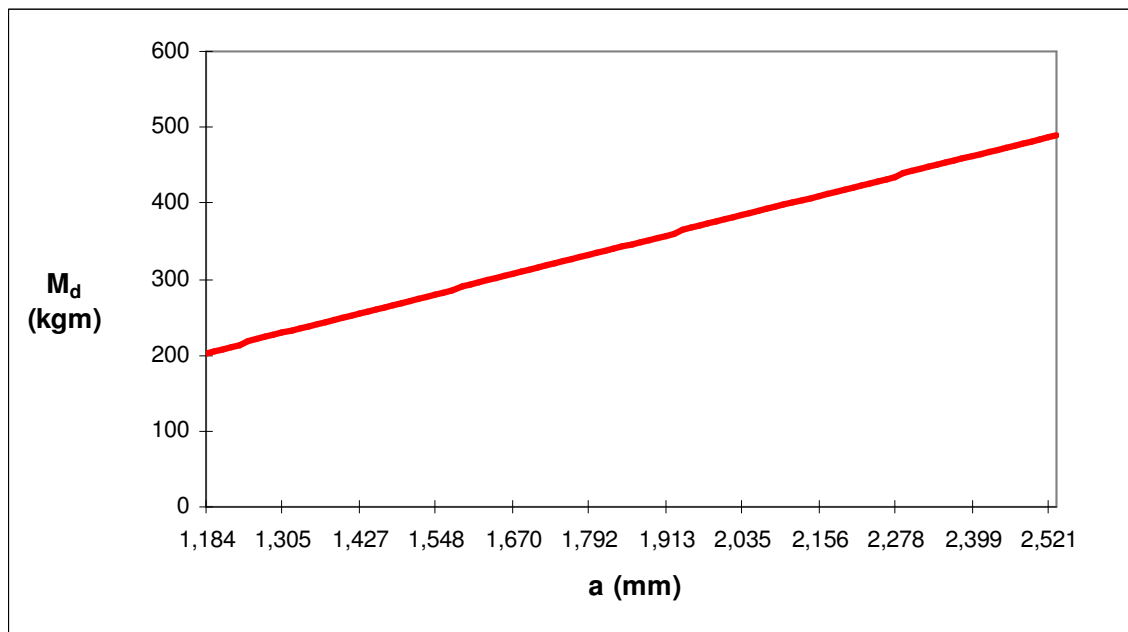


Figura 5.4 – Relação obtida através da RNA 1 entre o braço de alavanca e o torque.

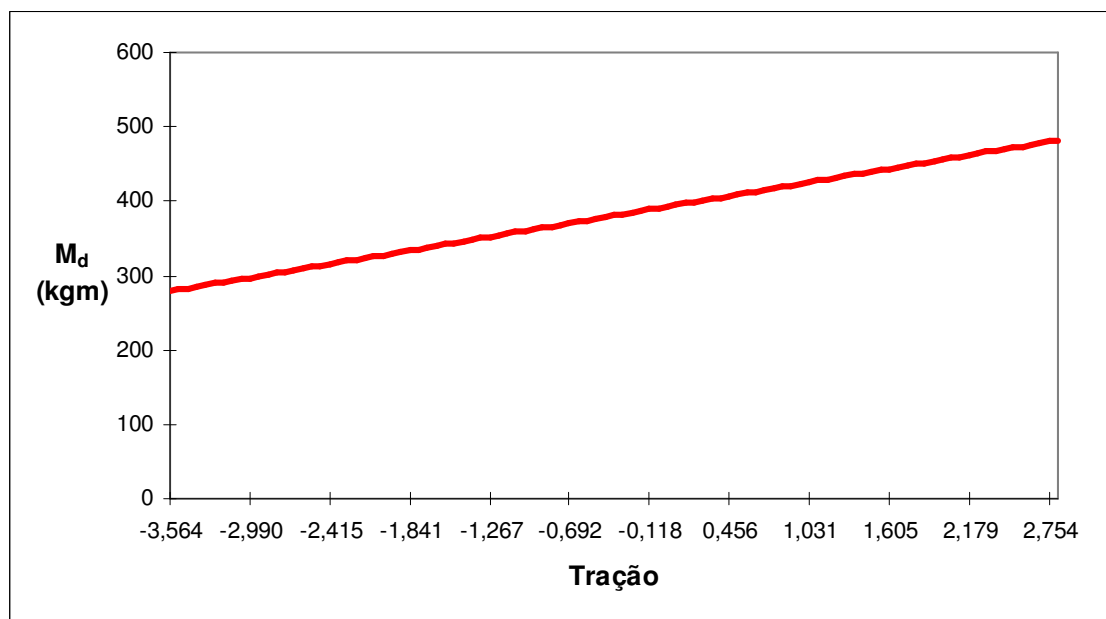


Figura 5.5 - Relação obtida através da RNA 2 entre a tração de ré e o torque

CAPÍTULO 6

6 RESULTADOS OBTIDOS: DISCUSSÃO

Partindo dos resultados obtidos através das redes neurais, os aspectos relacionados abaixo foram avaliados, a fim de se verificar a influência da aplicação da tração de ré e da variação do braço de alavanca e no torque de laminação durante a introdução. Estes aspectos foram:

- Relação direta da tração de ré *versus* torque de laminação;
- Relação entre tração de ré, redução aplicada e torque de laminação;
- Relação entre o braço de alavanca *versus* torque de laminação com aplicação da tração de ré;
- Distribuição da pressão de laminação ao longo do arco de contato com a aplicação da tração de ré.

Para ser avaliada a influência da tração de ré sobre o torque de laminação, foi feita a coleta de dados durante a introdução de diversos rolos, laminando-se um trecho do material sob a influência de um valor de tração e em seguida um novo trecho do mesmo rolo foi laminado com um novo valor de tração, mas com os parâmetros operacionais, força, velocidade, lubrificante, redução, mantidos.

Os dados de tração e torque para cada situação foram plotados no gráfico da Figura 6.1. No eixo X do gráfico estão representados os 52 ensaios realizados com a variação da tração de ré durante a introdução. Então, pode-se observar que, em cada ensaio ocorreu um aumento do torque de laminação com o incremento da tração de ré. Porém, o aumento do torque não se deu na mesma ordem de grandeza entre os casos analisados. Este fato pode ser compreendido pela própria definição do *TAF*, onde, a sua amplitude é resultado da somatória de todos os fatores que exercem influência sobre a sua ocorrência.

O experimento realizado por O. Pawelski e F. Lindemann [24] (ver detalhes capítulo 2) foi reproduzido na laminação de tiras de aço SAE 1006. O resultado deste experimento está representado no gráfico da Figura 6.2, e nele pode ser verificado que existe um aumento do torque de laminação com o aumento da redução aplicada na tira laminada durante os passes de laminação, porém há um aumento do torque com o incremento da tração de ré utilizada. Comparando o resultado obtido neste trabalho com o resultado alcançado por Pawelski e Lindemann [24], verifica-se que ambos acompanham a mesma tendência de crescimento no torque, mas com ordem de grandeza diferente. Este fato ocorre porque há uma diferença nos parâmetros operacionais entre os dois experimentos, além do que, a tração aplicada no experimento dos pesquisadores foi maior do que

a aplicada no processamento das tiras de aço SAE 1006. Com base na literatura e com os resultados obtidos, tinha-se forte indício que a tração de ré iria gerar um aumento no torque de laminação, por isso, optou-se em realizar o experimento com faixas de trações relativamente baixas, a fim de não comprometer a integridade do laminador, o que poderia trazer danos irreparáveis ao processo produtivo.

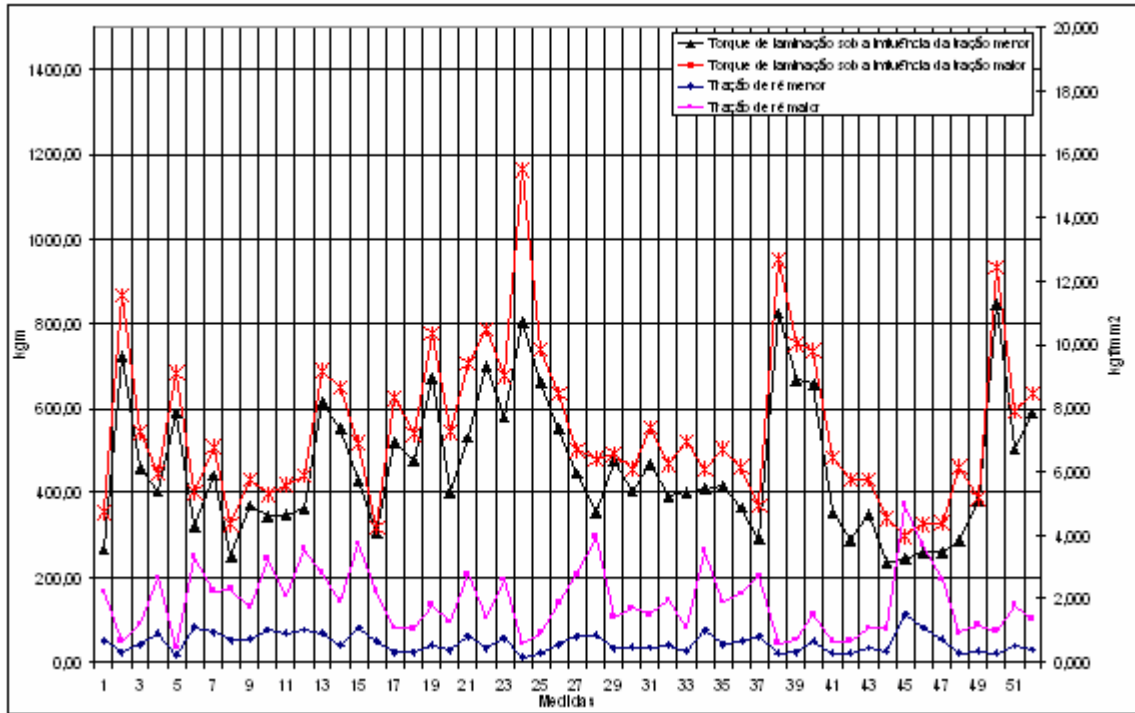


Figura 6.1 – Resultados obtidos durante a introdução com variações na tração de ré

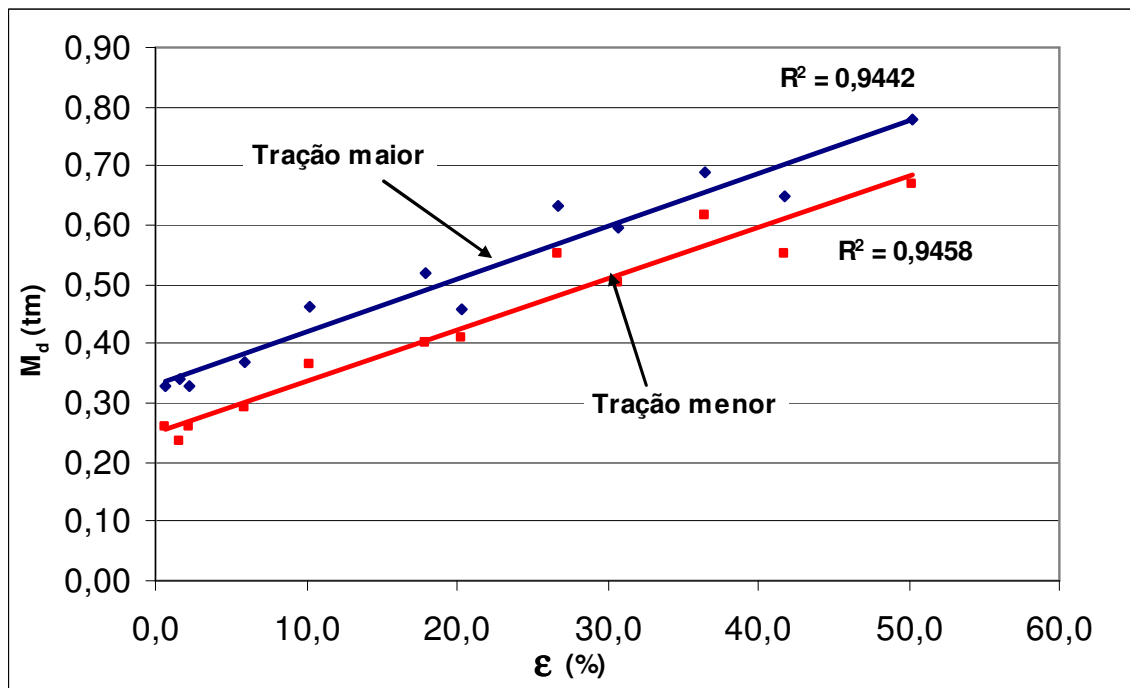


Figura 6.2- Verificação da influência da tração conforme proposta Pawelski e Lindemann [24]

Outro método utilizado para ser verificada a influência da aplicação de tração na tira laminada, sobre o torque de laminação, foi baseado no gráfico proposto por Hill [10], Figura 2.11 do capítulo 2. Analisando, inicialmente, a inclinação da reta média do gráfico de Hill em relação aos adimensionais λ_1 (eq. 6.1) e λ_2 (eq. 6.2), verifica-se que, mantendo-se constantes as variáveis força de laminação, espessuras de entrada e saída e tração avante, e incrementando a tração de ré, o resultado atribuído ao adimensional λ_1 será aumentado. Isto ocorre, como conseqüência do aumento no torque de laminação.

$$\lambda_1 = \frac{\frac{M_d}{b}}{\frac{F}{b}R} \quad (6.1)$$

$$\lambda_2 = \frac{\frac{\sigma_d h_1 - \sigma_r h_0}{F}}{\frac{F}{b}} \quad (6.2)$$

Na elaboração dos gráficos seguintes, uma mesma tira de aço foi laminada em três situações distintas de aplicação de trações, mas com as variáveis, força de laminação e espessura de entrada e saída constantes. As trações avante e a ré variaram da seguinte forma:

- Durante a introdução da tira de aço aplicando-se a tração de ré decorrente da menor força de desbobinamento disponível no laminador. Neste caso não foi aplicada a tração avante.
- Durante a introdução da tira de aço com o incremento da tração de ré. Neste caso também não foi aplicada a tração avante.
- Durante o passe de laminação, com a aplicação das trações avante e de ré usuais do processo.

Com base no experimento proposto por Hill [10], após a coleta, os dados durante a introdução com variações na tração de ré, foram substituídos nas equações 6.1 e 6.2, e os adimensionais λ_1 e λ_2 plotados no gráfico da Figura 6.3. Neste caso, os dados plotados foram aqueles em que não houve variação na força de laminação, com isto verificou-se a tendência de aumento no torque com o incremento da tração de ré durante a introdução. Como o diâmetro do cilindro de trabalho utilizado por Hill era maior, para que se obtivesse ordens de grandeza semelhantes nos experimentos, o adimensional λ_1 foi corrigido, multiplicando-se o resultado obtido pelo quociente entre o diâmetro do cilindro de trabalho utilizado durante a realização do ensaio pelo diâmetro cilindro do experimento de Hill. Então a equação 6.1 passa a ser:

$$\lambda_1 = \frac{\frac{M_d}{b}}{\frac{F}{b}R} \cdot \frac{D}{D_{Hill}} \quad (6.3)$$

Os gráficos das Figuras 6.4 e 6.5 apresentam a relação entre o braço de alavanca e o torque de laminação em duas situações: No gráfico da Figura 6.4,

durante a introdução e durante o primeiro passe de laminação, e, no gráfico da Figura 6.5 durante a introdução com variações na tração de ré. Ambos os gráficos foram elaborados com base no estudo realizado por Pawelski e Lindemann [24] (Fig. 2.9).

Analisando primeiramente o gráfico da Figura 6.4, nele constata-se que, durante a introdução, para os casos analisados, o torque de laminação é sistematicamente maior do que durante o passe de laminação e a fração do braço de alavanca w em relação ao arco de contato é maior do que os dados experimentais apresentados por Pawelski e Lindemann [24] para um determinado torque de laminação. Durante o passe de laminação, quando as condições operacionais são mais favoráveis, ocorre uma redução no torque de laminação e a fração w converge aos valores obtidos experimentalmente pelos pesquisadores.

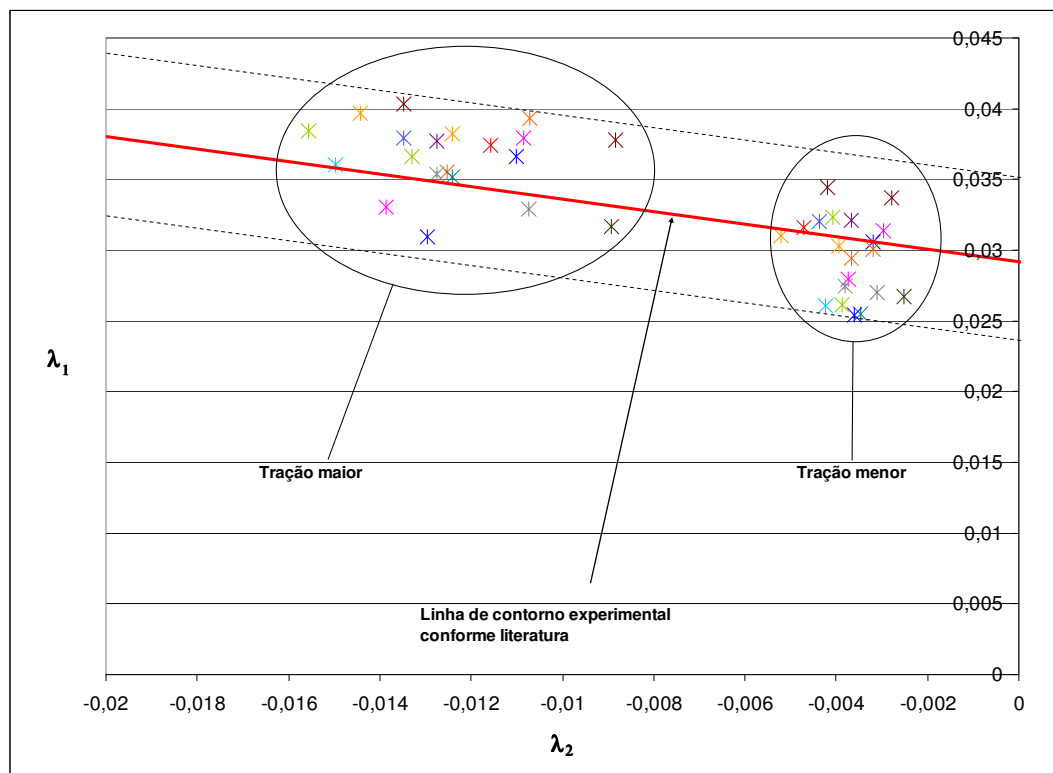


Figura 6.3–Verificação da influência da tração baseado no método der Hill [10]

No gráfico da Figura 6.5, os pontos plotados foram obtidos com a introdução da tira de aço com variações na tração de ré, ou seja, foram mantidas as condições operacionais para um determinado rolo de aço e feita a introdução da tira com variações na tração de ré, e esta operação foi realizada em 52 amostras. No caso do gráfico 6.5 foram selecionadas as amostras que apresentavam um arco de contato dentro da faixa proposta no experimento de Pawelski e Lindemann [24]. Assim como no gráfico da Figura 6.4, no gráfico da Figura 6.5 também se observa uma grande dispersão entre os pontos plotados e um valor de w acima do obtido experimentalmente, sendo que w torna-se mais alto sob a influência de trações de ré maiores.

Na literatura [10] verifica-se que ao ser aplicada uma tração de ré muito alta o ponto neutro irá deslocar-se na direção de menor espessura, ou seja, na direção de saída do passe de laminação e de forma contrária ao ser aplicada elevada tração

avante. Este fato pode explicar, o porque do valor de w ficar acima das linhas de contorno experimental, chegando em alguns casos a ser quase igual ou maior do que a projeção do arco de contato.

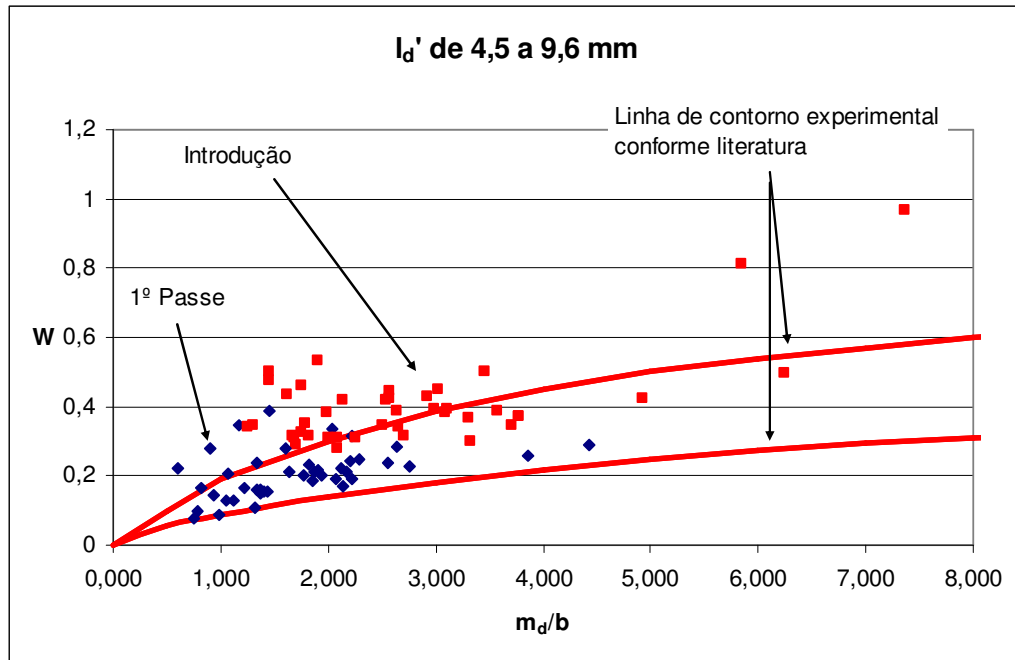


Figura 6.4- Avaliação do braço de alavanca durante a introdução e passe de laminação [24]

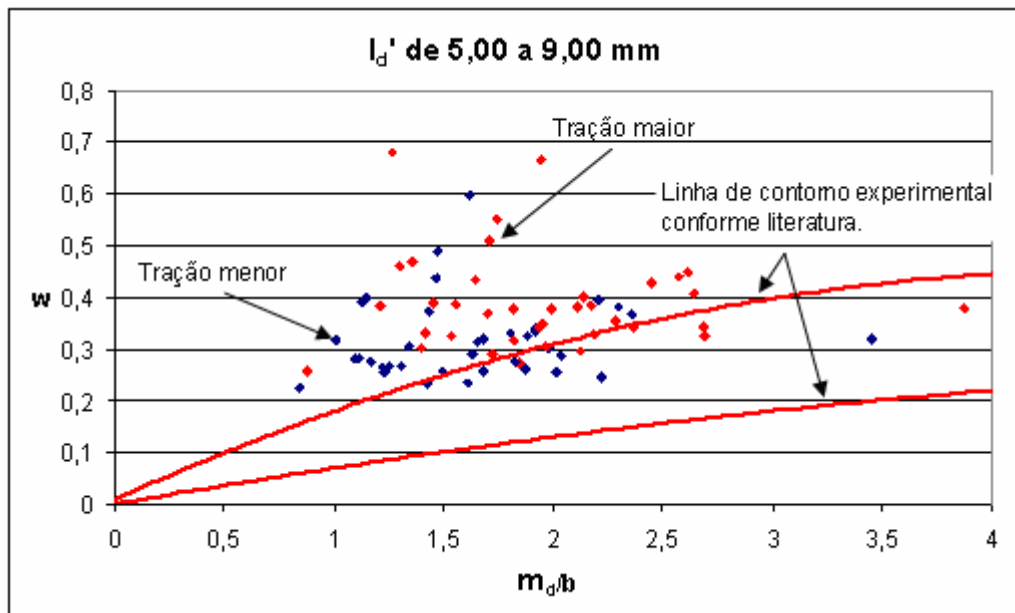


Figura 6.5- Avaliação do braço de alavanca, com variação de tração durante a introdução [24]

Nos gráficos da Figuras 6.6 e 6.7 verifica-se, que com aplicação da tração de ré à espessura no plano neutro tende a deslocar-se na direção de menor espessura, como descrito no parágrafo anterior, e durante o passe com a aplicação da tração avante ocorre uma inversão no posicionamento da espessura no plano neutro, ficando mais próxima do ponto de entrada do passe de laminação. No caso

especifico do gráfico da Figura 6.6, verifica-se que durante a introdução, a utilização de uma elevada tração de ré aliada a uma redução aplicada na tira de aço fez com a espessura no plano neutro tendesse a ser deslocada para fora do arco de contato na direção de saída de menor espessura, e durante o passe, foi verificado que a redução na tira mais à elevada tração avante aplicada fez com que houvesse uma tendência de deslocamento do ponto neutro para fora do arco de contato na direção da entrada do passe de laminação. No gráfico da Figura 6.7 também pode ser observado o deslocamento do ponto neutro com a aplicação variada da tração de ré e durante o passe de laminação, mas, nesse caso, verifica-se que as condições de operação são mais favoráveis porque o ponto neutro encontra-se dentro do arco de contato.

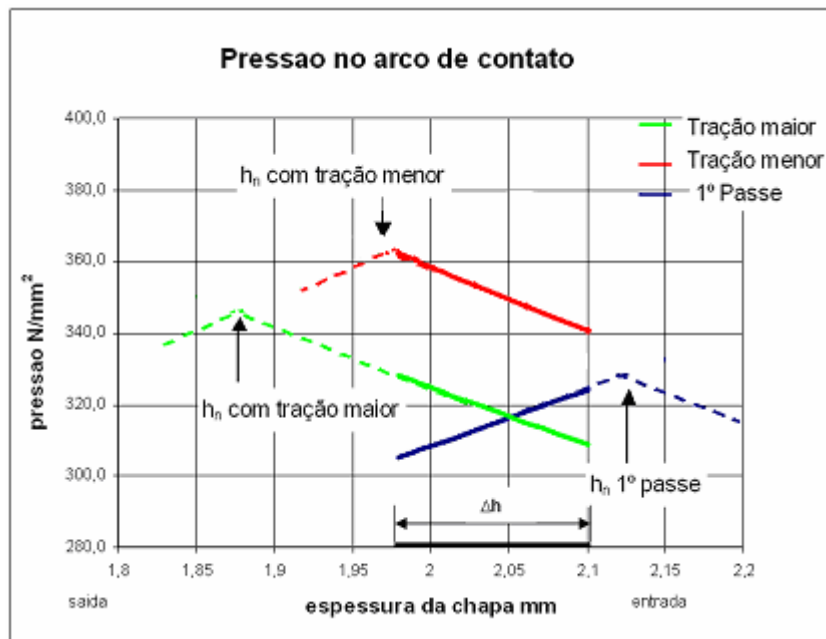


Figura 6.6- Posição do ponto neutro fora do arco de contato. [28]

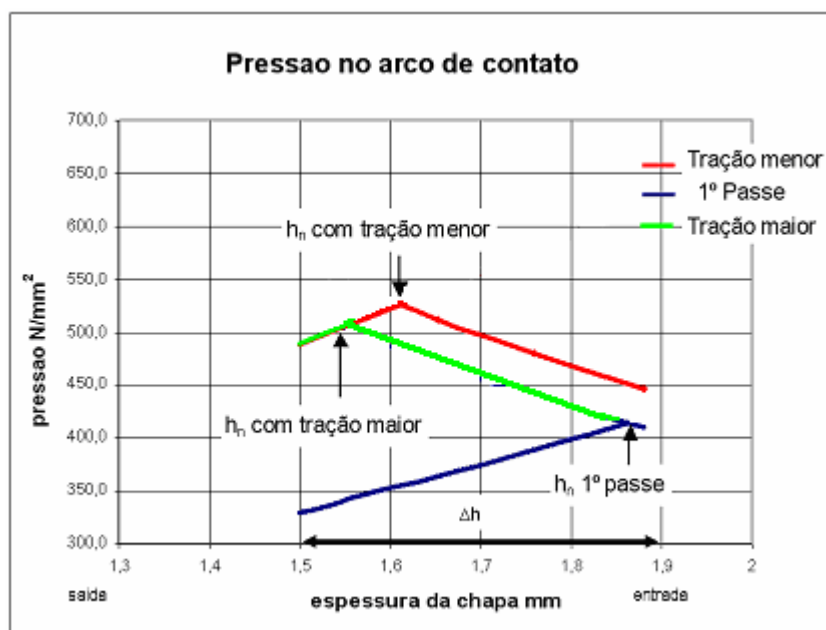


Figura 6.7- Ponto neutro posicionado no arco de contato [26]

Com objetivo de se reduzir o torque de laminação durante a introdução, um rolo de aço foi dividido em dois rolos menores, laminados em duas condições distintas, uma condição dentro da forma usual de laminação e outra com sugestões de alteração na redução aplicada na tira durante os passe e na tração de ré durante a introdução da tira no laminador. Parâmetros como velocidade e tração (avante e de ré) no decorrer dos passes foram mantidas.

A distribuição dos passes de laminação para a nova condição foi feita com base em um rolo com características semelhantes que havia sido laminado anteriormente. Do processamento desse rolo, foram extraídos dados (força, torque, velocidade e tração) e através dos cálculos sugeridos na teoria de laminação (ver Anexo C do Apêndice) foram feitos ajustes no coeficiente de atrito e no braço de alavanca até que fossem obtidos valores aproximados entre o valor calculado e o medido de força e torque de laminação. Com base no coeficiente de atrito e braço de alavanca pré-determinados, os passes foram redistribuídos objetivando-se uma distribuição mais homogênea no esforço de laminação (Fig. 6.9), e no torque de laminação, principalmente na ocorrência do TAF (Fig. 6.8). A análise do torque e do esforço de laminação foi realizada em todos os passes de laminação para que se tivesse a certeza que esta nova configuração de operação fosse viável.

No gráfico da Figura 6.8 são apresentados o resultados obtidos para o torque de laminação. Inicialmente verifica-se uma discrepância entre o valor calculado (simulado) e o realizado através do método proposto. Esta diferença pode ser explicada, pelo fato, da utilização do coeficiente de atrito e do braço de alavanca nos cálculos do processamento de um rolo com condições operacionais semelhantes, porém não idênticas, mas de qualquer forma observa-se que o método pode ser utilizado perfeitamente como uma referência inicial do processo.

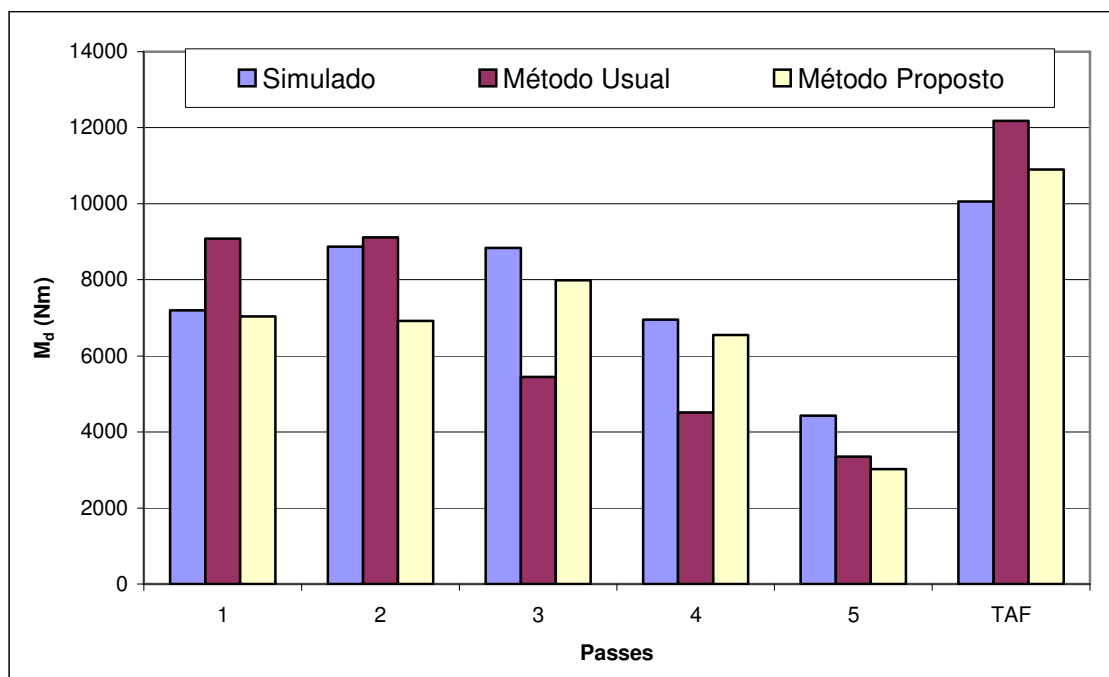


Figura 6.8- Distribuição do torque médio nos passes de laminação

Um fato interessante está na avaliação do método de passes de laminação aplicado. Se o método for avaliado exclusivamente com relação à amplitude do TAF deverá ser concluído que o método usual é o mais recomendado, isto porque, no método usual o TAF encontrado foi de 1,34 enquanto que no método proposto o TAF foi de 1,55. Mas, avaliando o processo de forma global se verifica que no método proposto as condições de operação são muito mais favoráveis, ou seja:

- O torque de laminação durante a introdução é menor
- Houve uma distribuição mais homogênea do torque durante todos os passes de laminação (gráfico 6.8), sendo que no primeiro e segundo passes o torque foi menor, fato que irá melhorar a vida dos pinos se for levado em consideração a fadiga (este ponto será tratado mais adiante)
- Ocorreu uma distribuição mais homogênea do esforço de laminação durante os passes (gráfico 6.9)

Quanto à posição do ponto neutro ao longo do arco de contato, no gráfico da Figura 6.10, verifica-se que durante a introdução, com a aplicação do método proposto, ocorre um deslocamento do ponto neutro na direção da entrada da tira nos cilindros de laminação, porém durante o primeiro passe observa-se que o ponto neutro tem um deslocamento total para o lado de entrada tendendo a ficar fora da região do arco de contato. Neste caso com uma simples correção, efetuada com base em cálculos, na tração utilizada, o ponto neutro irá retornar a região do arco de contato como demonstra o gráfico da Figura 6.11.

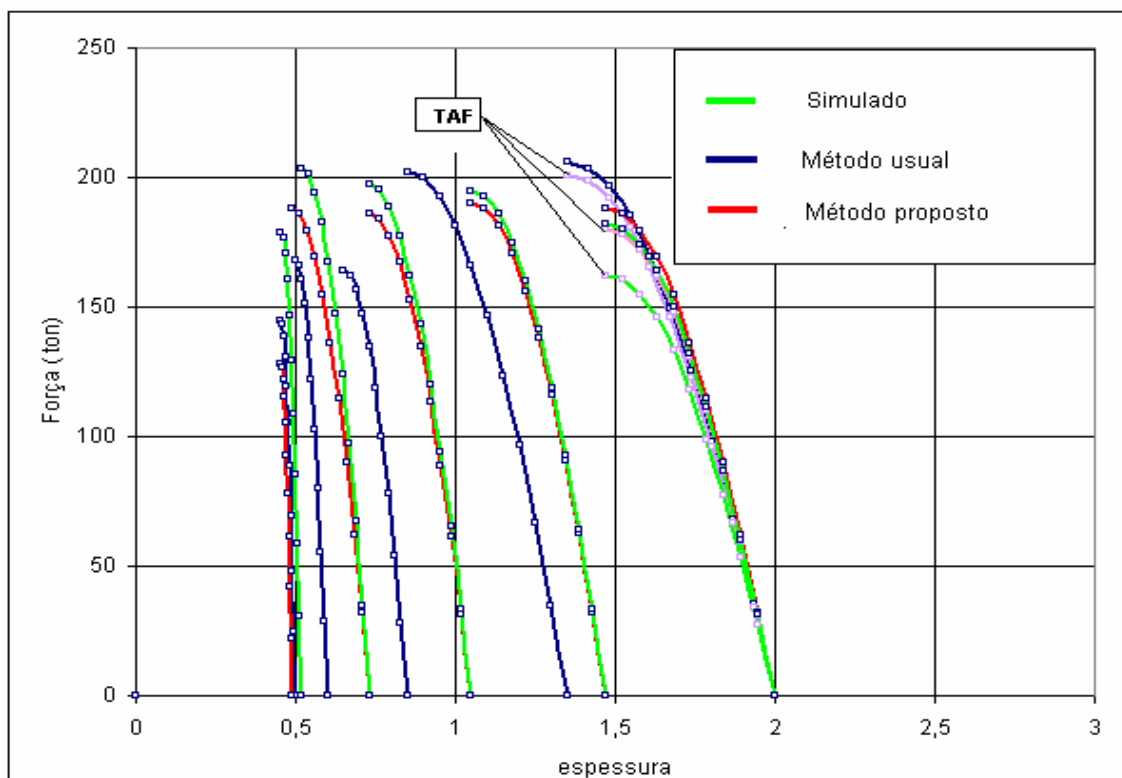


Figura 6.9- Distribuição da força de laminação nos passes [26]

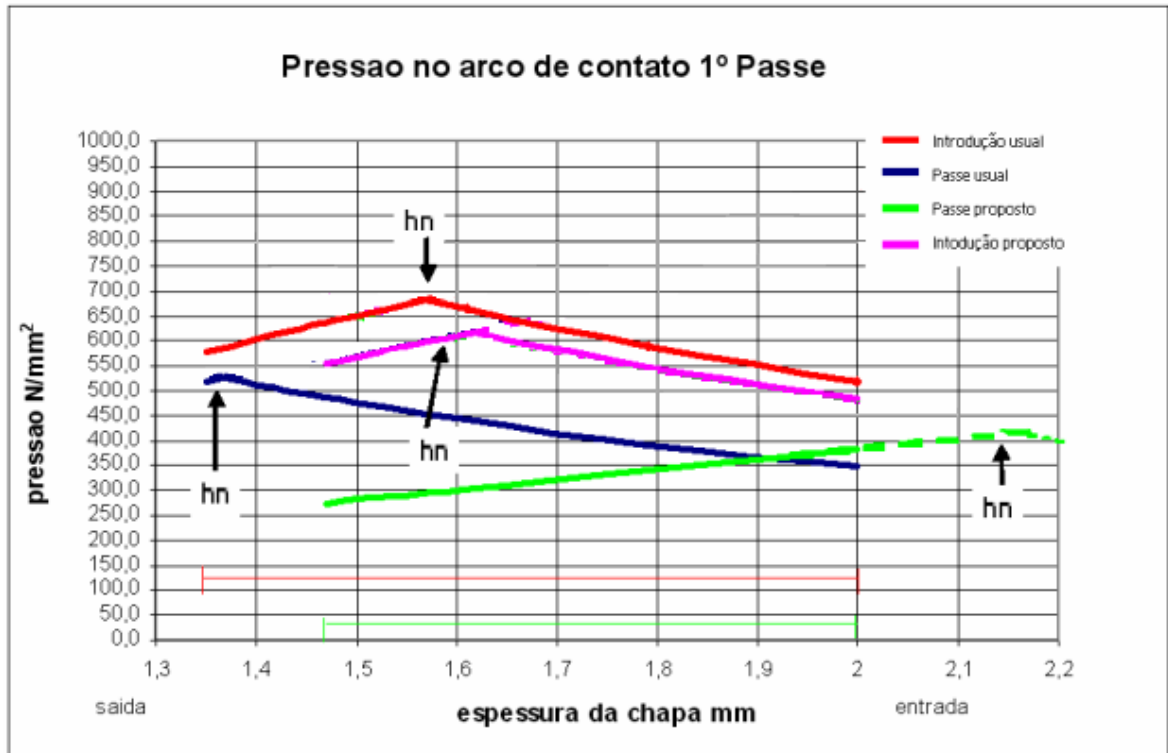


Figura 6.10 – Posicionamento do ponto neutro em relação ao arco de contato [26]

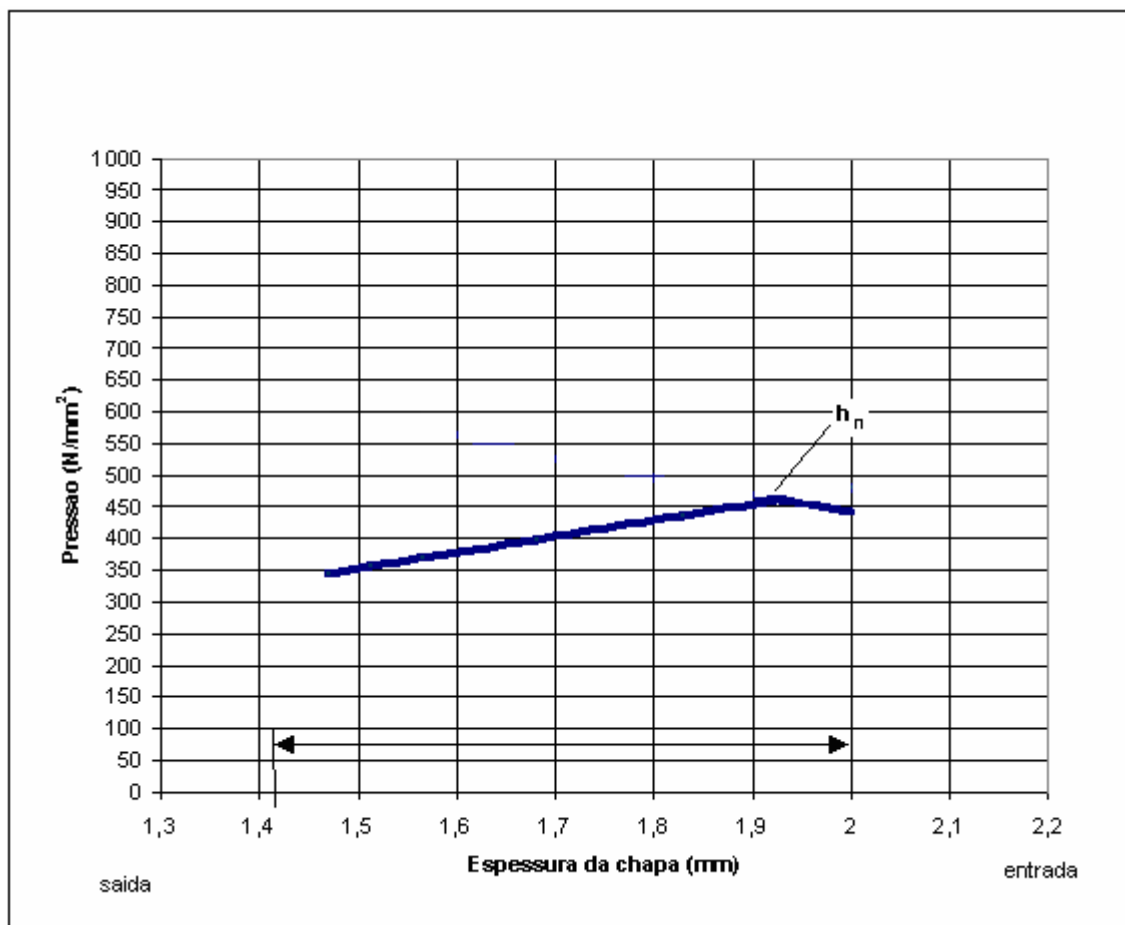


Figura 6.11 – Posicionamento do ângulo neutro corrigido através de cálculos [26]

Nos passes seguintes, Figura 6.12, observa-se que o ponto neutro possui posicionamento semelhante, na aplicação dos dois métodos, com variações apenas decorrentes do novo arco de contato e pressão de laminação necessária para conformar o material na nova realidade do passe.

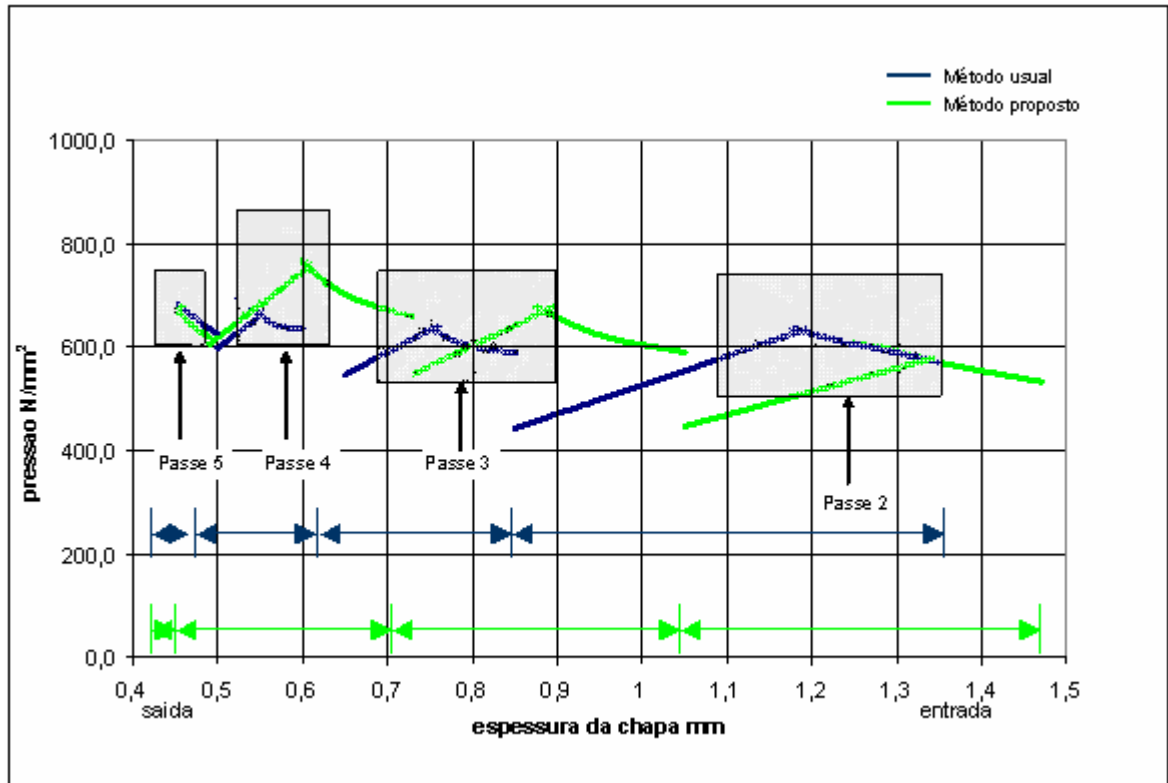


Figura 6.12 – Distribuição da pressão nos passes de laminação [26]

Durante a coleta de dados, foram observadas situações, onde, o torque inicial na introdução era maior do que o torque médio no passe, o que configurava a existência do *TAF*. Porém, nesta situação, em nenhum momento, independentemente da amplitude do *TAF*, esse torque ultrapassou o torque limite do laminador, por isso que, diante deste fato, concluiu-se que o rompimento dos pinos é decorrente de um processo de fadiga ocasionado pelas altas cargas cíclicas a que o pino é submetido.

No capítulo 4, a partir de ensaios práticos, foi determinada a curva teórica *Tensão x Número de ciclos* para o pino de cisalhamento. Com base na curva, foram plotados, no gráfico da Figura 6.13, alguns valores de tensão obtidos através do ensaio realizado com a variação da tração de ré durante a introdução. No gráfico da Figura 6.1, observa-se que, a redução da tração de ré durante a introdução, resulta em uma redução no torque de laminação, com isso, a carga sobre os pinos torna-se menor, e conseqüentemente, a expectativa de vida do pino será aumentada.

No gráfico da Figura 6.13, verifica-se o aumento na expectativa da vida, em ciclos, do pino com a redução na tração. Levando em consideração uma velocidade de introdução máxima de 20 m/min, para ser ilustrado melhor, o número de ciclos foi

transformado em horas de operação (Fig.6.14), desta forma pode-se observar que em alguns casos o aumento da expectativa de vida do pino passa a ser significativa.

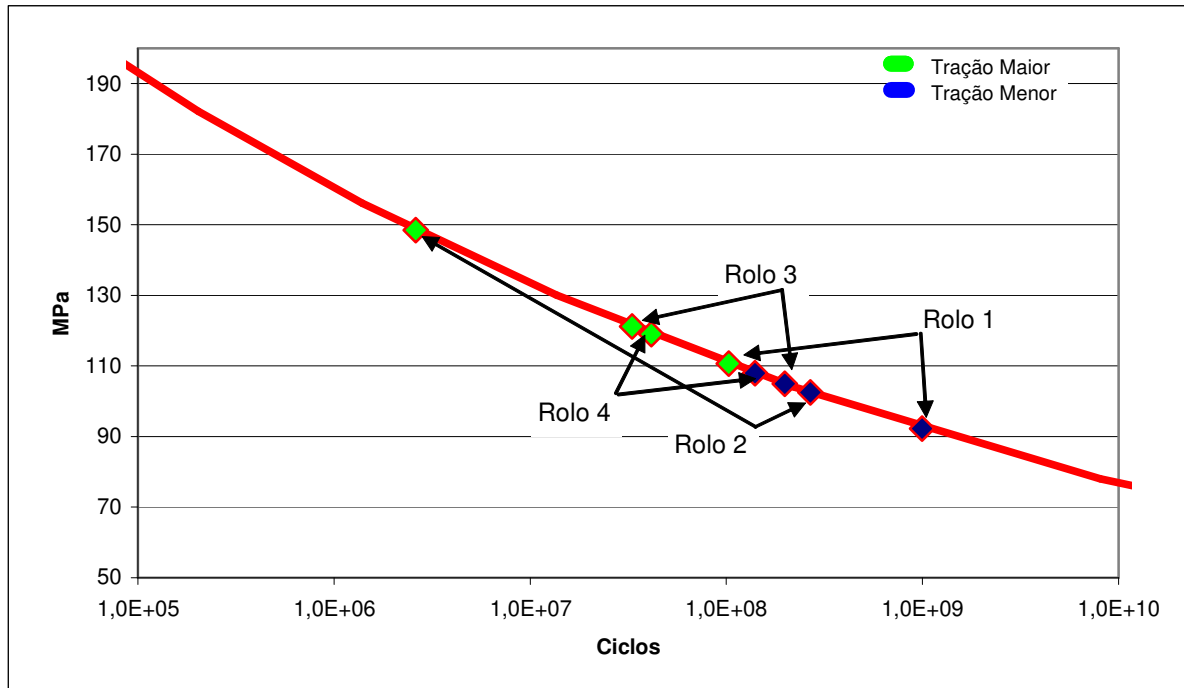


Figura 6.13 – Estimativa da vida útil do pino de cisalhamento, em ciclos, com base em ensaio realizado com a variação da tração durante a introdução.

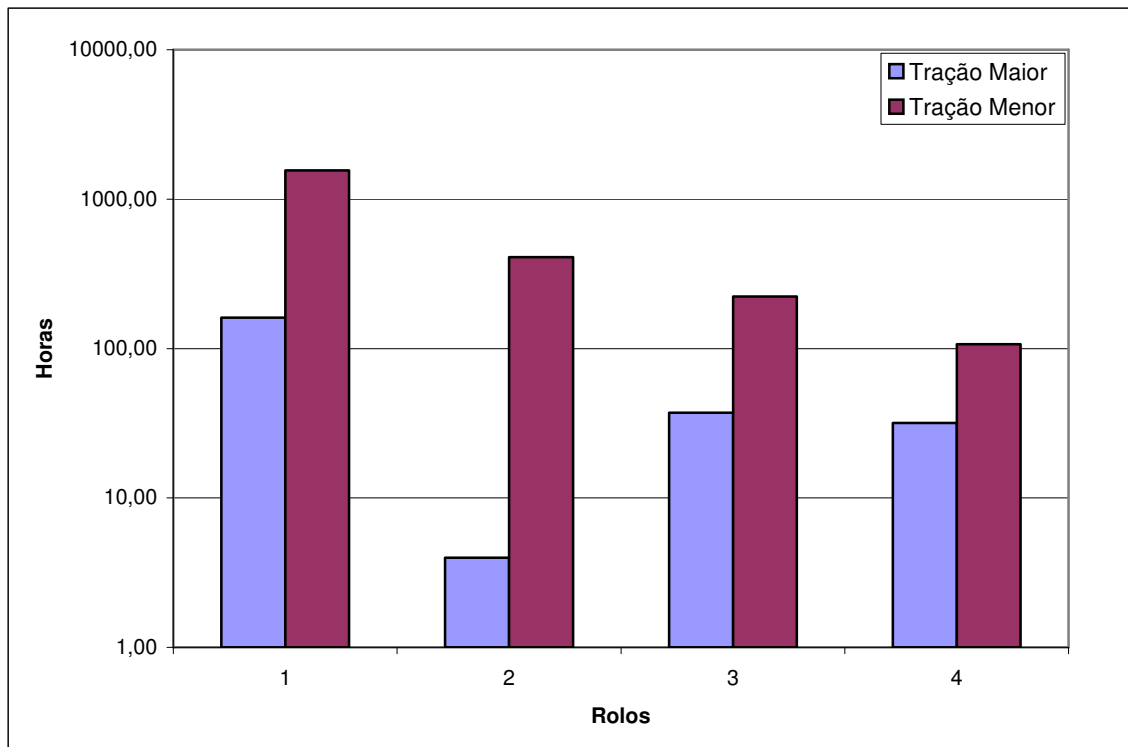


Figura 6.14 – Estimativa da vida útil do pino de cisalhamento, em horas, com base em ensaio realizado com a variação da tração durante a introdução.

Nos gráficos das Figuras 6.15, 6.16 e 6.17, os esquemas de passes proposto e usual (Fig. 6.8) foram analisados sob o aspecto da fadiga do pino. Avaliando a expectativa da vida útil do pino na ocorrência do TAF, gráfico da Figura 6.16, observa-se um aumento no ciclo de vida do pino em relação ao método usual. Nos passes seguintes, apesar da expectativa de vida do pino no terceiro e quarto passes ser maior no método usual, verifica-se que, de forma global, no método proposto o aproveitamento da vida do pino será melhor. Isto ocorre porque a expectativa de vida do pino na pior condição do método proposto, terceiro passe, ainda é melhor do que a pior condição do método usual, segundo passe, sendo aproximadamente quatro vezes maior.

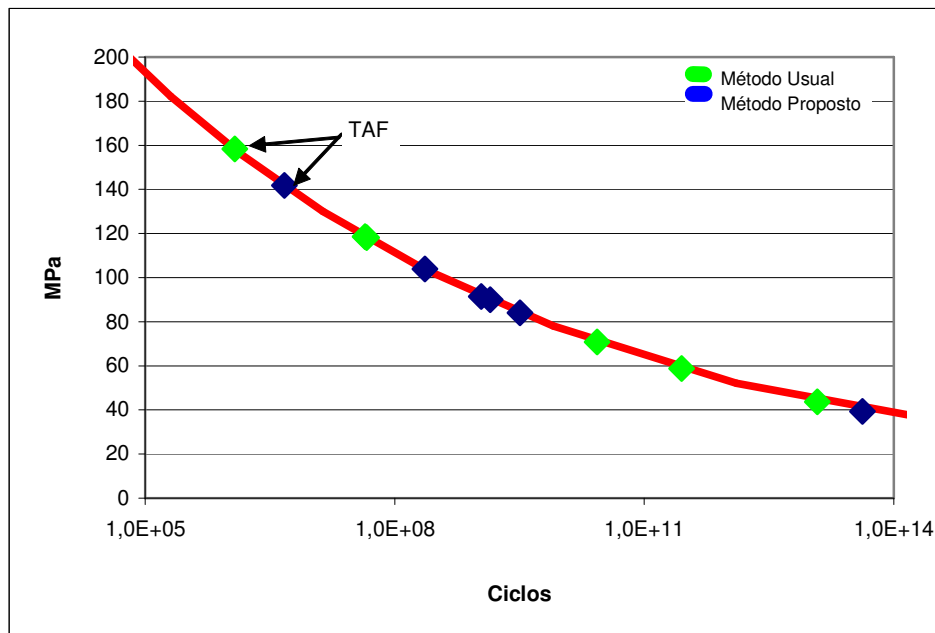


Figura 6.15 – Números de ciclos obtidos com os esquemas de passes

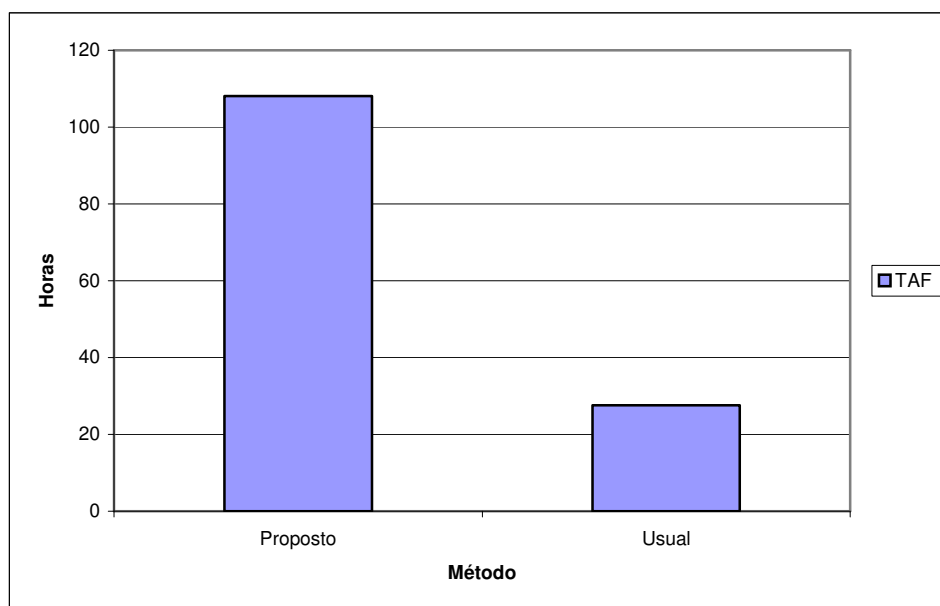


Figura 6.16 – Estimativa da vida dos pinos de cisalhamento, na ocorrência do TAF, nos esquemas de passes proposto e usual.

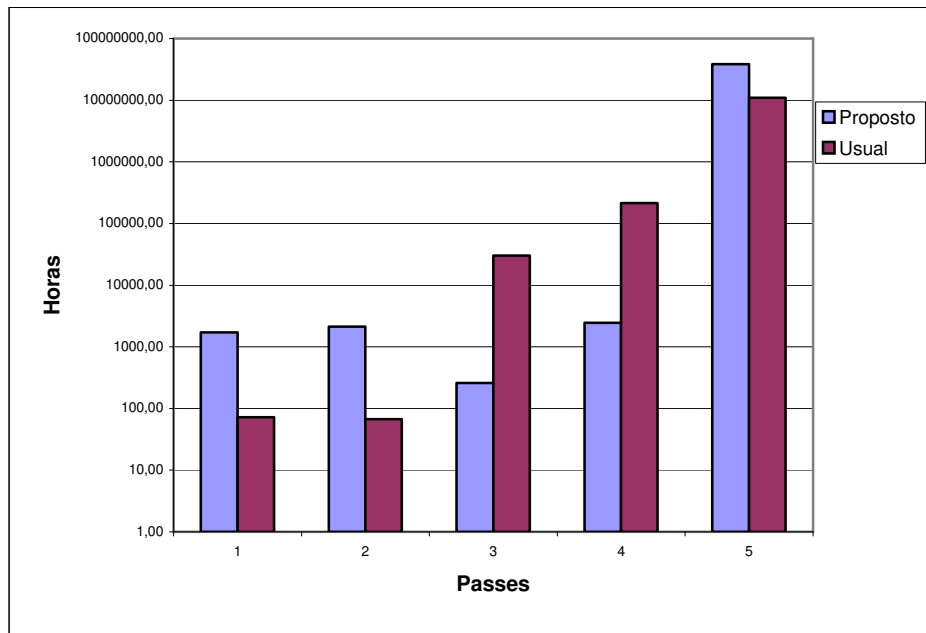


Figura 6.17 – Estimativa da vida dos pinos de cisalhamento, no decorrer dos passes, nos esquemas de passes proposto e usual.

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSÃO E PESQUISAS FUTURAS

7.1 Conclusão

Com base nos resultados obtidos verificou-se que, com o incremento da tração de ré aplicada na tira de aço, ocorre um aumento no torque de laminação, e conseqüentemente, este é um dos fatores que irá determinar a amplitude do *TAF*. Com isso, também pôde - se verificar, através da realização de ensaios práticos, que a operação de introdução, com a tração de ré controlada mantendo-a no mínimo disponível pelo laminador, mostrou-se um método eficiente para a redução torque inicial de laminação. Por outro lado, com exceção de situações de acidentes, não foi verificada a ultrapassagem do torque nominal do laminador durante a ocorrência do *TAF*. Este fato leva à conclusão que, a ocorrência sistemática do *TAF*, causado pelo alto torque inicial, faz com que os pinos rompam por fadiga após um reduzido número de ciclos.

Sob a ótica da fadiga, verificou-se através de ensaios práticos, que a otimização dos passes de laminação somada ao controle da tração de ré durante a introdução, demonstraram - se eficientes, para o caso analisado, no aumento da vida do pino. Com a otimização dos passes, ocorreu uma melhor distribuição do torque ao longo dos passes de laminação, o que proporcionou a laminação, com os pinos sendo solicitados em uma região mais favorável da curva teórica *Tensão x Número de ciclos*. E como exposto anteriormente, com o controle da tração de ré, reduzindo-a, obteve-se um menor torque de partida. Ainda com referência à fadiga, de acordo com os resultados obtidos, verifica-se que, o esquema de passes aplicado, não pode ser avaliado exclusivamente com relação à amplitude do *TAF*. Neste caso, independente da amplitude do *TAF*, conclui-se que, quanto maior o torque, mais solicitado será o pino, e como conseqüência o número de ciclos de operação será reduzido.

Devido a grande diversidade de especificações dos produtos processados, o que gera uma dificuldade de repetição imediata de parâmetros no processo de laminação, utilizou-se uma Rede Neural Artificial (RNA) como ferramenta para levantamento dos aspectos operacionais relevantes que interferem no torque inicial, e conseqüentemente no *TAF*. A utilização da RNA, através do software *Neurosolutions*, mostrou-se eficiente para serem atingidos os objetivos propostos no trabalho, no caso, os parâmetros indicados como relevantes, foram confirmados na literatura e com base em ensaios práticos.

7.2 Pesquisas futuras

Na definição do *TAF*, capítulo 2, foi exposto que o *TAF* é resultado do quociente entre um pico de torque em regime transitório, pelo torque médio de laminação, e a sua amplitude será obtida pela a somatória de diversos fatores ocasionados durante a sua ocorrência [16, 23]. No desenvolvimento da dissertação foi verificado, assim com na literatura [1, 10, 21, 27], que existe uma relação entre o torque de laminação e coeficiente de atrito. No gráfico da Figura 7.1 pode-se verificar a relação entre o torque de laminação e o coeficiente de atrito. Neste caso, o coeficiente de atrito foi determinado pelo método proposto por D.R Bland e H. Ford [30,31], onde o torque de laminação aparece com variável explícita na equação. Portanto, com uma sugestão de pesquisa futura, fica a avaliação da influência do atrito no torque de partida durante a introdução.

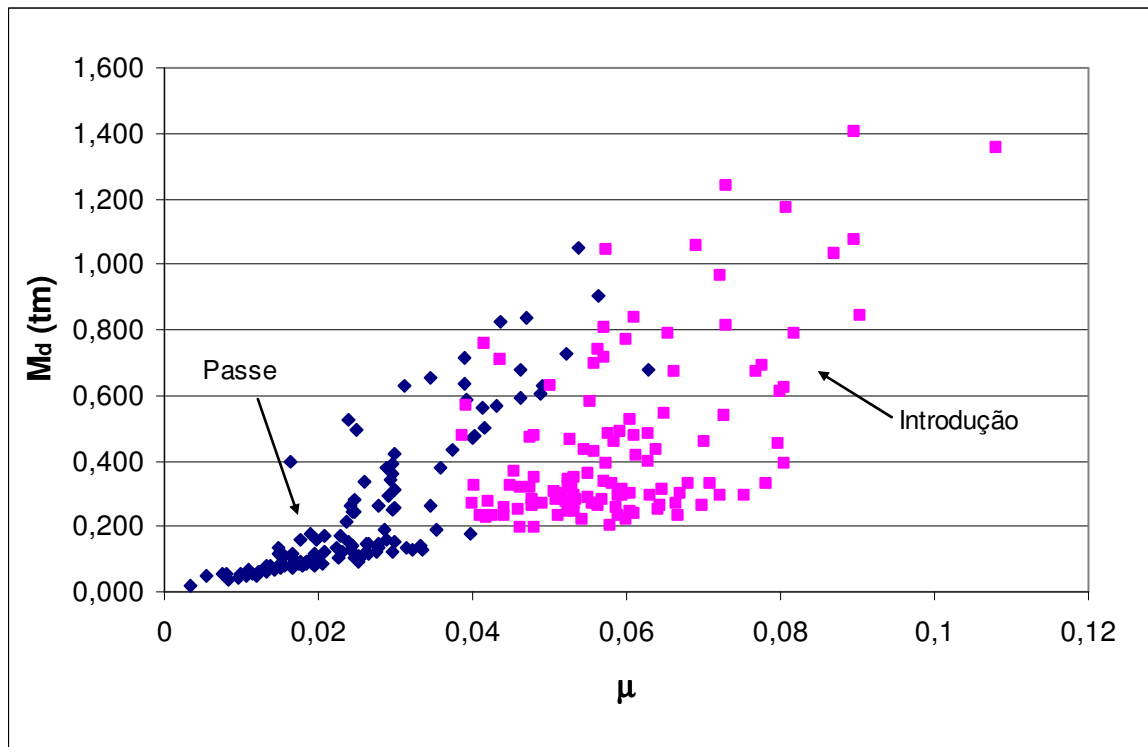


Figura 7.1 – Relação entre coeficiente de atrito e torque de laminação

Dentro da gama de produtos processados, existe uma grande variedade de especificações, como por exemplo: qualidade, largura, espessura inicial, espessura final, acabamento superficial, etc. Esta variedade dificulta a otimização dos passes, sendo necessário um estudo específico para cada item. Diante disto, uma outra sugestão de pesquisa futura, é a utilização de redes neurais artificiais (RNA) na otimização dos passes de laminação. Esta recomendação surge do bom desempenho apresentado pela RNA no levantamento dos aspectos operacionais relevantes que interferem no torque inicial, e conseqüentemente no *TAF*. Neste caso, foi possível o levantamento da relevância dos parâmetros dentro de um universo variado de produtos processados, porém, vale ressaltar que, a quantidade e a qualidade dos dados utilizados em sua configuração irão determinar a sua eficiência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] BLAIN,P. **Laminação e forjamento dos aços**. Tradução de João Mendes França, Jardel Borges Ferreira. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1964.
- [2] CARDOSO, A. A, **Redes neurais artificiais na avaliação de concentração de tensões em juntas tubulares soldadas**. 1999. 99f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- [3] CETLIN, P.R; HELMAN, H. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2.ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 1004.
- [4] CERQUEIRA, E.O. *et al.* Redes neurais e suas aplicações em calibração de multivariadores. **Química Nova**. São Paulo, v. 24, p. 864-873,ago. 2001.
- [5] DUKMAN, L.; YONGSUG, L. Application of neural-network for improving accuracy of roll-force model in hot-rolling mill. **Control Engineering Practice**. South Korea, v10. p 473-478, 2002.
- [6] FAG. **Calculation of rolling load and power requirements for rolling work**. [S.l.:s.n]
- [7] Faires, V.M. **Elementos orgânicos de máquinas**. Tradução de Humberto César Tavares Gonçalves. 2 ed. v1 Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1976.
- [8] FERRAZ,N.J.O. *et al.* **Laminação dos aços**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1975.
- [9] FERREIRA, H.C. **Geração de referências para malhas de controle de um laminador de tiras a frio**. 2004. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- [10] FORD, H.; ELLIS, F.; BLAND, D.R. 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**. P 57-72. Mai 1951
- [11] GARCIA, A; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. **Ensaio dos materiais**. Campinas: LTC Editora, 1999.
- [12] GORNI, A.A. Cálculo da profundidade de retificação de cilindros de encosto em laminadores de produtos planos. **Metalurgia & Materiais**. P. 103-106, abr.jun. 2003. Disponível em: http://www.gorni.eng.br/rem_022003_gorni.pdf Acesso em: 17 mar. 2005.

- [13] HAN, H. Determination of mean flow stress and friction coefficient by the modified two-specimen method in cold rolling. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 401-408, 2005. Disponível em <http://www.elsevier.com/locate/jmatprotec>. Acesso em: 17 Jun. 2005
- [14] HARTLEY, P. *et al.* Experimental and theoretical studies of workpiece deformation, stress, and strain during flat rolling. **International Materials Reviews**. v. 34. p. 19-33. 1989
- [15] HELMAN, H. *et al.* **Fundamentos da laminação: produtos planos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1988.
- [16] HONJYO, H; WATANABE, H. Impact loading and vibration of the slabbing mill. **Iron and Steel Engineer**. Mai 1975
- [17] IBA AG. **IbaPDA V6**. Alemanha, 10 out. 2005. Disponível em www.iba-ag.com. Acesso em: 10 out. 2005
- [18] _____. **IbaPDA V 5.28 and ibaAnalyzer V 4.3.2: Manuals**. sep. 2005. CD-ROM
- [19] _____. **IbaAnalyzer**. Alemanha, 10 out. 2005. Disponível em www.iba-ag.com. Acesso em: 10 out. 2005
- [20] I2S. **Basic rolling force theory**. Disponível em <http://70.134.19.113/prjCtiWeb/Home/home.asp?ht=600&wd=800&br=0>. Acesso 10 jan 2006.
- [21] McCONNELL, C; LENARD, Friction in cold rolling of a low carbon steel with lubricants. **Journal of Materials Processing Technology**. P 86-93. 2000
- [22] NEUROSOLUTIONS. **What is a Neural Network?** Disponível em www.neurosolutions.com/products/ns/whatisNN.html Acesso em 1 fev 2006
- [23] PADOVESE, L.R.; SOTELO, J. **Influência do torque nos rolos de carga na análise dos fatores de amplificação de torque (TAF) em acionamento de laminadores**. In: IV Simpósio de Conformação Plástica dos Metais. São Paulo. Nov. 1990
- [24] PAWELSKI, O; LINDEMANN, F. Theoretische Betrachtungen zum Kaltwalzen von Breitband im Zusammenhang mit Betriebsmessungen an einem Vierwalzen-Umkehrgerüst. **Archiv für das Eisenhüttenwesen**, Düsseldorf, 1964.
- [25] PLAUT, R.L. **Laminação dos aços: tópicos avançados**. 3ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1984.
- [26] _____. **Redes Neurais Artificiais aplicadas à laminação a frio**. Notas do treinamento realizado na Brasmetal Waelzholz. Diadema. 2006

- [27] POLUKHIN, P. *et al.* **Rolling Mill Practice**. Tradução de Nicholas Weinstein. Moscow: Peace Publishers.
- [28] SOUZA, S.A. **Ensaio mecânico de materiais metálicos**: Fundamentos teóricos e práticos. 5.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda p.45 a p 57
- [29] PEREIRA, M.V.S. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O RETARDO DE TRINCAS DE FADIGA. **Metalurgia e Materiais**. Jun 2005
- [30] TSELIKOV, A. **Stress and strain in metal rolling**. Tradução de W.U. Sirk. Moscow: Mir Publishers, 1964.
- [31] TSELIKOV, A. I; NIKITIN, G.S; ROKOTYSN, S.E. **The theory of lengthwise rolling**. Tradução de V. Afanaseyev. 1.ed. Moscow: Mir Publishers, 1980.
- [32] TATIBANA, C.Y;KAETSU, D.Y. **Uma introdução às redes neurais**. Disponível em: www.din.uem.br/ia/neurais/ Acesso em: 13 fev 2006.
- [33] UNDERWOOD, L.R. **The rolling of metals**: The theory and experiment. 2.ed. London: Chapman & Hall Ltd, 1952. v.1.
- [34] USP. **Linhas de Pesquisa – Classificador com redes neurais**. Disponível em: www.sim.lme.usp.br/linhas/iinteligente/rneurais/rneu.html Acesso em 13 fev 2006.
- [35] VAN VLACK, L.H. **Princípios da ciência dos materiais**. Tradução de Luiz P. C. Ferrão. São Paulo: Edgard Blücher. 1970. Cap 1, p.2-7
- [36] VENTER, R.; ABD-RABBO, A. Modeling of the Rolling Process. **Inst. J. Mech. Sci.** V. 22, p 83-92. Pergamon Press Ltd. 1980
- [37] VILLARES. **Cilindros de trabalho de aço forjado para laminadores de tiras a frio**. Disponível em: <http://www.villares.com.br>. Acesso em: 15 mar. 2005

APÊNDICE

APÊNDICE A - EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO *NEUROSOLUTIONS* [22]

Para que o leitor tenha uma noção do processo de configuração e utilização do *Neurosolutions*, nesse anexo, será desenvolvido um exemplo de configuração de rede neural. Se houver a necessidade de mais informações, essas poderão ser obtidas no site do fabricante do *software* [22].

Assim que o *Neurosolutions* é aberto, clica-se no botão *NS Excel* (Fig A1), com isso irá aparecer na barra de ferramentas do *MS Excel* uma janela chamada *Neurosolutions* (Fig. A2).

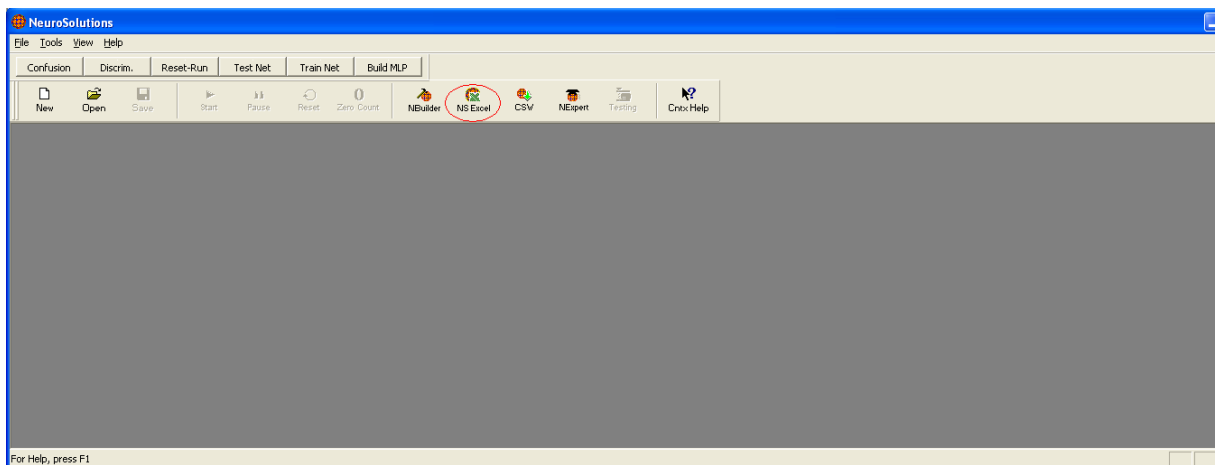


Figura A1 – Tela inicial do *Neurosolutions*

Os dados que foram definidos como de entrada e de saída, são inseridos em uma planilha do Excel, sendo que cada um ocupará uma célula e serão ordenados em colunas de acordo com a variável correspondente. No exemplo dado na Figura A4, as colunas A, B e C representam os dados de entrada e a coluna D o dado desejado. Essas variáveis de entrada e saída são definidas clicando-se no menu *Neurosolutions* na barra de ferramentas, ao ser clicado, através do caminho *Tag Data/ Column(s) as Input*, definem-se os dados que serão a entrada, e através do caminho *Tag Data/ Columns as Desired*, define-se o dado desejado.

Ainda no menu *Neurosolutios*, mas no caminho, *Preprocess Data/ Randomize Rows* (Fig. A2), pode-se fazer uma distribuição aleatória dos dados, evitando dessa

forma, o risco de se ter uma rede tendenciosa decorrente da forma de inserção dos dados.

Nos caminhos *TAG Data/ Row(s) as Training*, *Row(s) as Cross Validation* e *Row(s) as Testing*, os dados são separados em linhas, para treinamento validação e teste.

Definidos e endereçados os dados, o passo seguinte é a montagem da rede. No caminho *Create/Open Network*, inicia-se a construção da rede. Dentro do menu, quando é selecionada a opção *New*, irá ser aberta uma janela onde será definido o tipo de rede, no caso da Figura A3, foi selecionada a *Mutilayer Perceptron*.

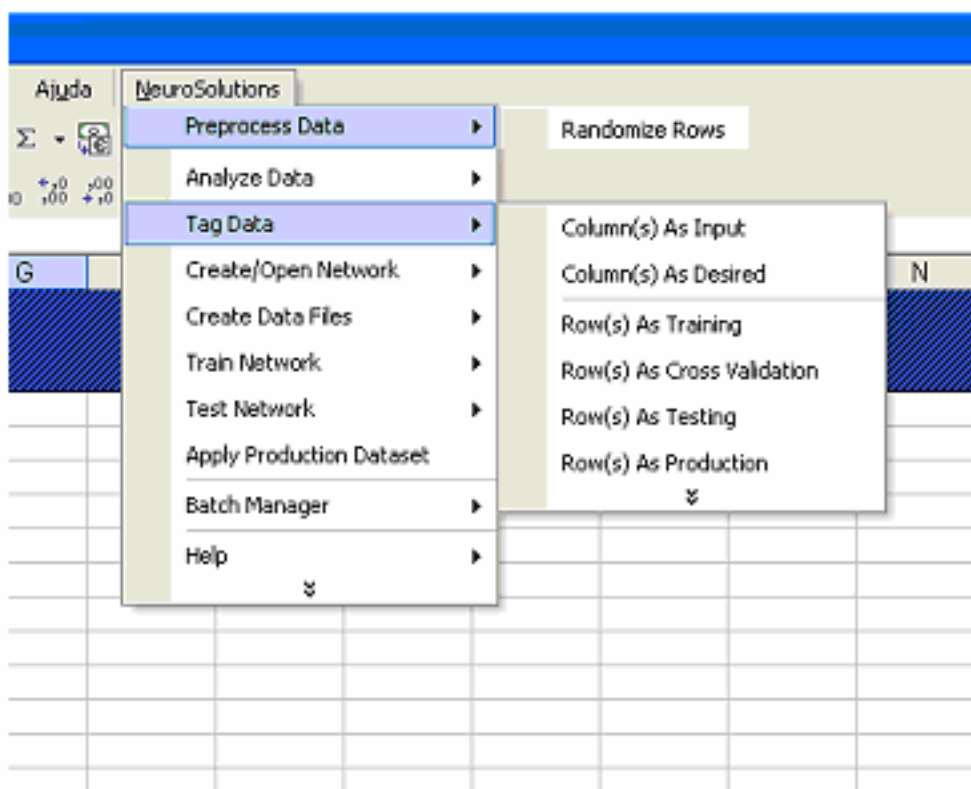


Figura A2- Menu do *Neurosolutions*

Selecionado o tipo de rede, deve-se determinar o número de camadas que será utilizado, o tipo da função de transferência que deverá ser utilizada e a característica para o treinamento (Fig. A5).

Com a rede construída e configurada pode ser iniciado o processo de treinamento. O *NeuroSolutions for Excel* irá abrir uma janela (Fig. A6) para configuração do treinamento da rede. No campo *Number of Epochs* será determinada a quantidade de iterações que serão feitas durante o treinamento. Uma vez treinada, são gerados relatórios (Fig. A7), onde são fornecidas as curvas obtidas, a partir do conjunto de dados utilizados para treinamento e validação. O gráfico da Figura A7 apresenta o erro médio (MSE) obtido durante o treinamento. Os

pesos da rede são salvos automaticamente a partir do ponto onde o erro de validação é muito pequeno.

Para ser verificada a aderência de um conjunto de dados à Rede Neural, o *NeuroSolutions* dispõe de um campo para teste, dentro do menu *Teste Network/Test*. Neste menu pode ser configurado o modo, e disparado, o processo de teste da rede, que é feito a partir dos dados rotulados como *Testing* durante a seleção das variáveis que irão compor a rede. Concluído o teste será gerado um relatório, gráfico 2 da Figura A7, onde poderá ser verificada a aderência da rede.

Acessando-se o menu *Neurosolutions/Sensitivity About the Mean*, pode-se verificar a relevância de cada dos dados de entrada, em relação ao dado de saída desejado. Na Figura A8, verifica-se que a variável kgf/mm^2 , tem maior relevância na obtenção do resultado $m_d/(b.l'_d)$.

Com a rede definida e testada, é possível realizar simulações que irão reproduzir um ambiente operacional. Para isso, deve-se definir na planilha inicial (Fig. A4), as linhas que servirão para a produção dos dados de simulação. Esta operação é feita através do menu *Tag Data/Row(s) as Production*. A produção dos dados será feita, acessando-se, no menu *NeuroSolutions*, a opção *Apply Production Dataset* (Fig. A2)

Na Figura A9, está um exemplo de dados gerados através de simulações feitas através da Rede Neural. Neste caso o valor desejado (coluna D) foi obtido através da simulação com a inserção dos dados de entrada nas colunas A, B e C.

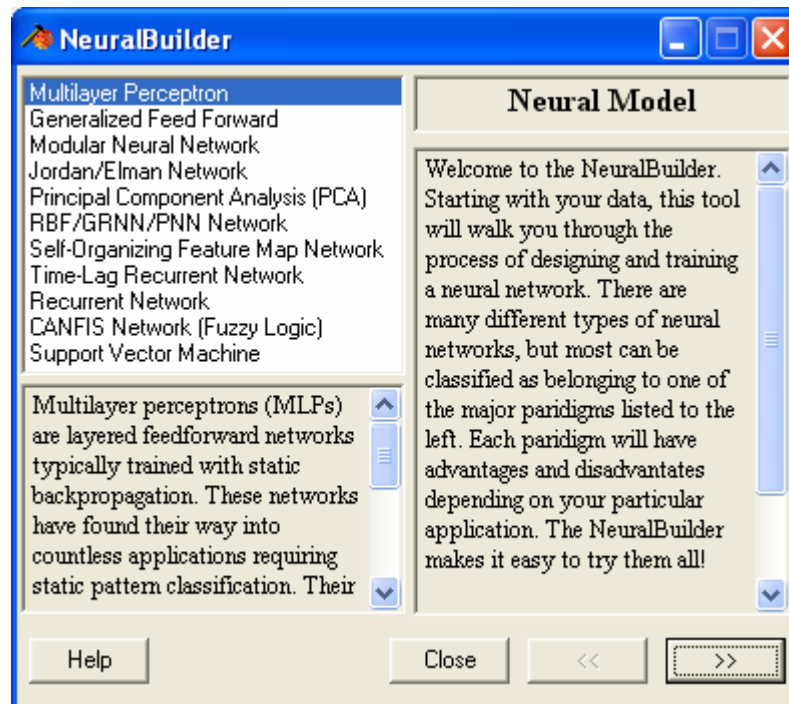


Figura A3 – Diferentes tipos de rede neural

	Força de laminação (ton)	Tracção	a	Mód.kem
274	155	0,479405	2,59722	823,4694
275	54	-0,81119	1,518344	136,5306
276	56	0,793443	2,034816	248,4694
277	278	-7,00133	1,119531	308,3673
278	116	3,270026	1,576723	473,3673
279	125	2,734848	1,671962	480,7143
280	50	0,519009	1,839812	193,0612
281	112	2,7	2,041224	518,5714
282	68	-0,49992	0,993608	120,5102
283	104	0,5225	2,739052	586,7347
284	231	-9,51068	1,855393	626,0204
285	220	-5,7153	1,93279	716,3265
286	155	1,537594	3,049171	1242,551
287	131	2,529825	2,140101	623,4694
288	160	-7,48151	2,05567	420,9184
289	58	3,715789	2,039599	298,3673
290	48	1,3	2,229351	245,5102
291	83	2,627341	2,636776	498,9796
292	66	0,508091	1,673387	232,8571
293	62	-0,58133	1,351258	149,898
294	79	0,536782	1,880325	316,9388
295	114	0,714953	1,453869	344,898
296	185	2,763258	1,741774	707,9592
297	53	0,254453	1,764151	195
298	152	-8,0653	2,480231	568,9796
299	64	0,636637	1,897613	261,0704
300	68	1,171429	1,723801	255,3067
301	69	-2,29735	0,884238	57,85714
302	50	0,741313	1,969453	213,2653
303	64	0,656364	1,701817	233,2653
304	66	-1,38462	1,192142	129,4998
305	48	0,470867	2,455248	241,3265
306	66	-1,8444	1,706892	189,0916
307	93	0,672026	2,37926	459,3878
308	99	-1,29258	1,493068	259,1837
309	51	0,542667	2,360432	258,1633
310	80	2,851724	2,048893	433,2653
311	79	1,331099	2,812799	484,4998
312	94	1,308311	2,085356	431,4286
313	98	3,780749	2,258351	503,9796
314	116	-13,6703	2,242036	294,1837
315	139	1,792553	1,489775	473,4694
316	90	2,265135	1,562289	349,6939
317	61	-1,01506	0,991736	89,59184

Figura A4 – Planilha com dados para treinamento, validação e teste.

Train

Output Location

Trial Name:

Training Options

Number of Epochs:

Use Cross Validation Randomize Initial Weights

Cross Validation Termination

Terminate after epochs w/o improvement

For Classification problems, make classes evenly weighted

Help OK Cancel

Figura A5 – Tela para configuração do processo de treino

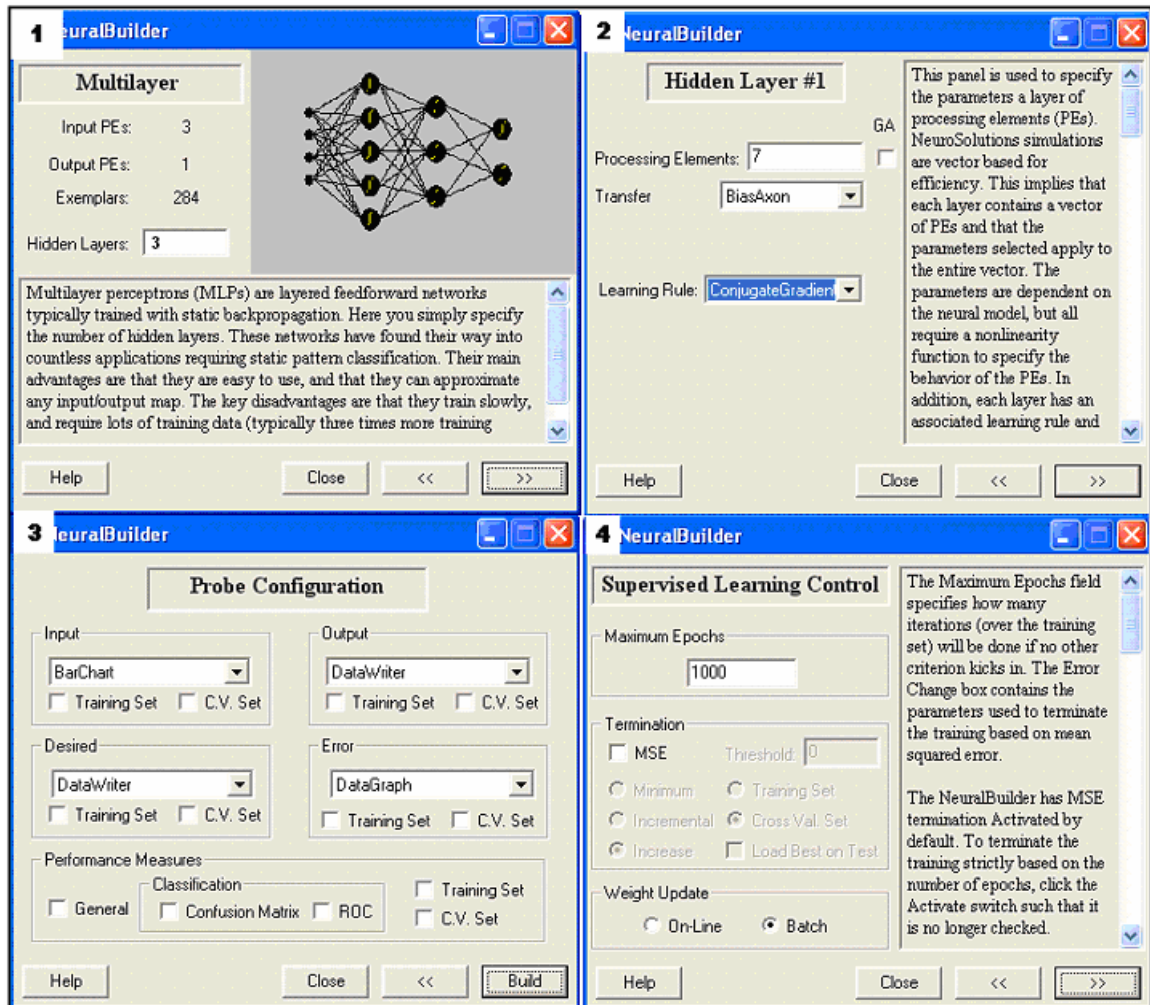


Figura A6 – Configurações da rede neural

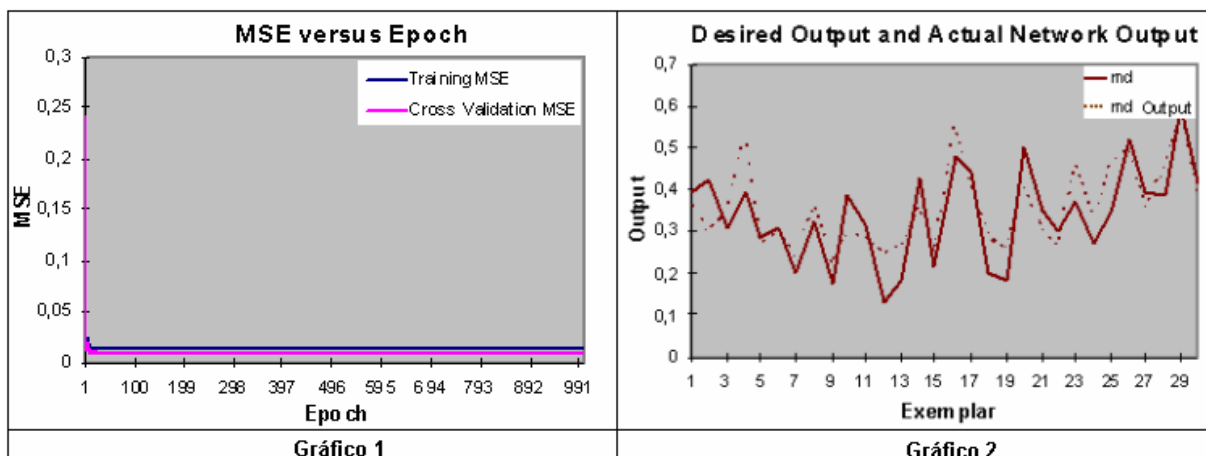


Figura A7 – Relatórios gerados na forma gráfica

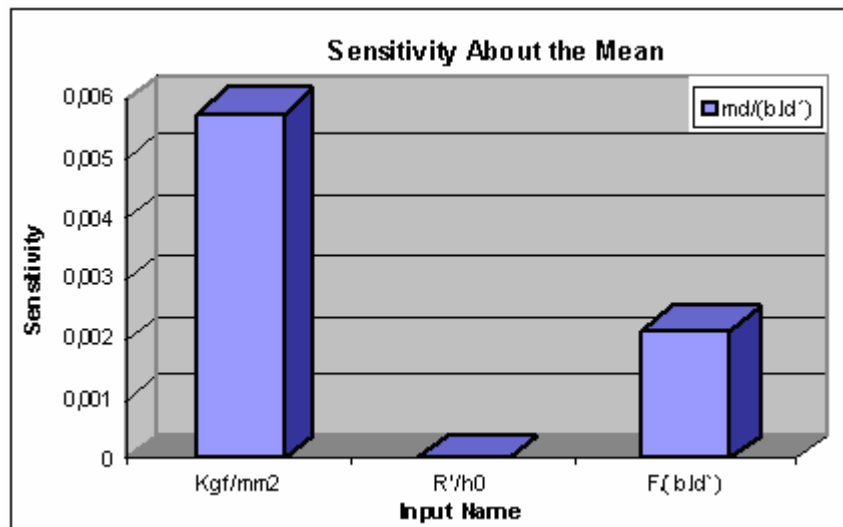


Figura A8 – Relevância dos dados de entrada em relação aos dados de saída

Kgf/mm2	R'/h0	F/(b.l.d')	md/(b.l.d')
1,239726	49,71193	52,48387	0,2653415
0,76431	101,5873	73,35196	0,3371778
1,099561	27,7129	38,28832	0,2120613
0,284325	29,07247	44,35906	0,2261727
1,107164	160,7898	97,30485	0,4283518
0,827631	69,15823	87,54512	0,3891336
0,325825	27,47853	35,15543	0,1930589
1,8155	36,18362	42,14436	0,233214
2,759812	80,68887	84,06816	0,3955616
0,282558	65,61067	89,84722	0,392127
1,491697	371,0637	117,5536	0,5080086
0,896045	22,89312	89,96193	0,3981261

Figura A9 – Exemplo de dados produzido pela RNA

APÊNDICE B – SEQÜÊNCIA DE CÁLCULO DA CURVA TEÓRICA TENSÃO x NÚMERO DE CICLOS DO PINO ROMPEDOR [7]

1- Cálculo da força atuante nos pinos:

$$F = \frac{\frac{M_d}{N}}{R} \quad (\text{B1})$$

Onde,

F = Força atuante nos pinos
 N = Quantidade de pinos por eixo
 R = Raio entre pinos (Fig. B1)

2- Cálculo do momento fletor:

$$M_f = \frac{F}{2} d \quad (\text{B2})$$

Onde,

M_f = Momento fletor
 D = Diâmetro do pino (Fig. B1)

3- Cálculo do número de ciclos

$$n_c = \left(\frac{\frac{3}{0,1.D^3} \cdot \frac{M_f}{F_s}}{S.T. \cdot \frac{1}{F_s} \cdot \sigma'_n} \right)^{\frac{1}{0,08}} \quad (\text{B3})$$

$$\sigma'_n = 0,5 \cdot \sigma_R \quad (\text{B4})$$

Onde,

n_c = Número de ciclos
 T = Fator relacionado ao diâmetro do pino, obtido no gráfico da Figura B2.
 S = Fator de superfície, determina a porcentagem do limite de resistência a fadiga do pino, obtido no gráfico da Figura B3.
 F_s = Fator de segurança
 σ_R = Tensão de ruptura
 σ'_n = Limite de resistência a fadiga

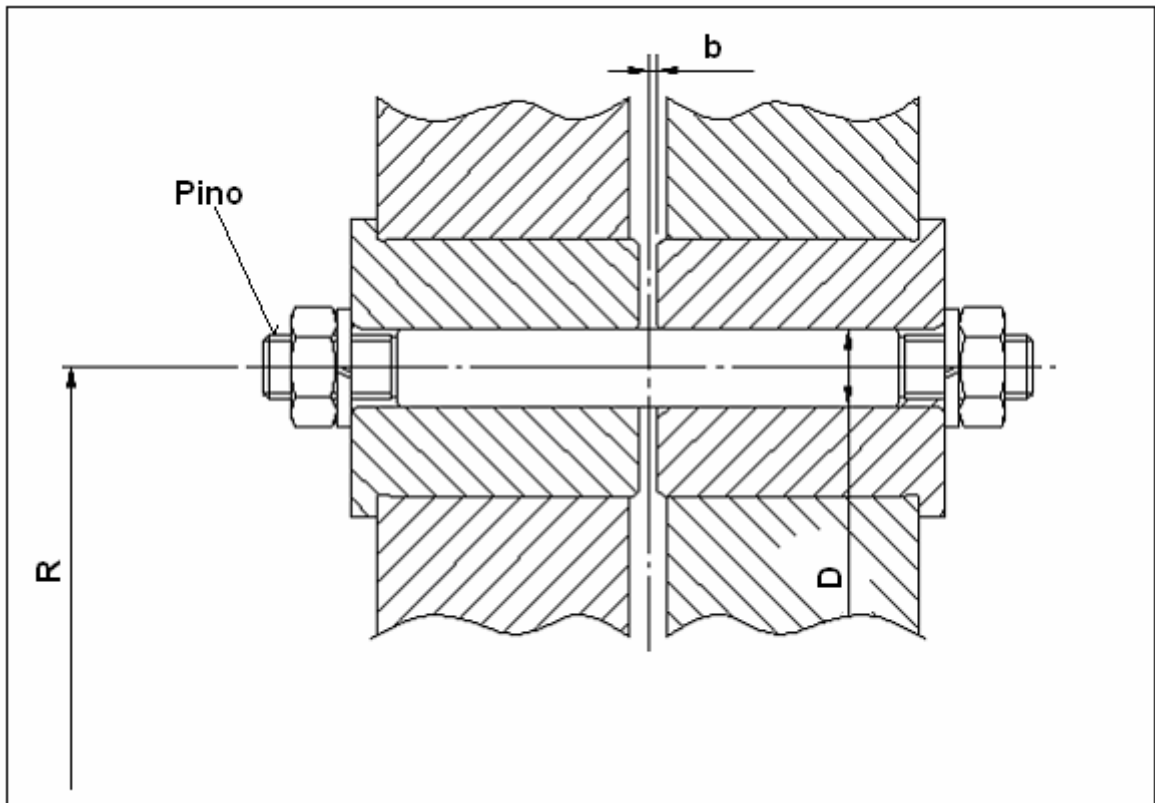


Figura B1- Esquema de montagem do pino de cisalhamento

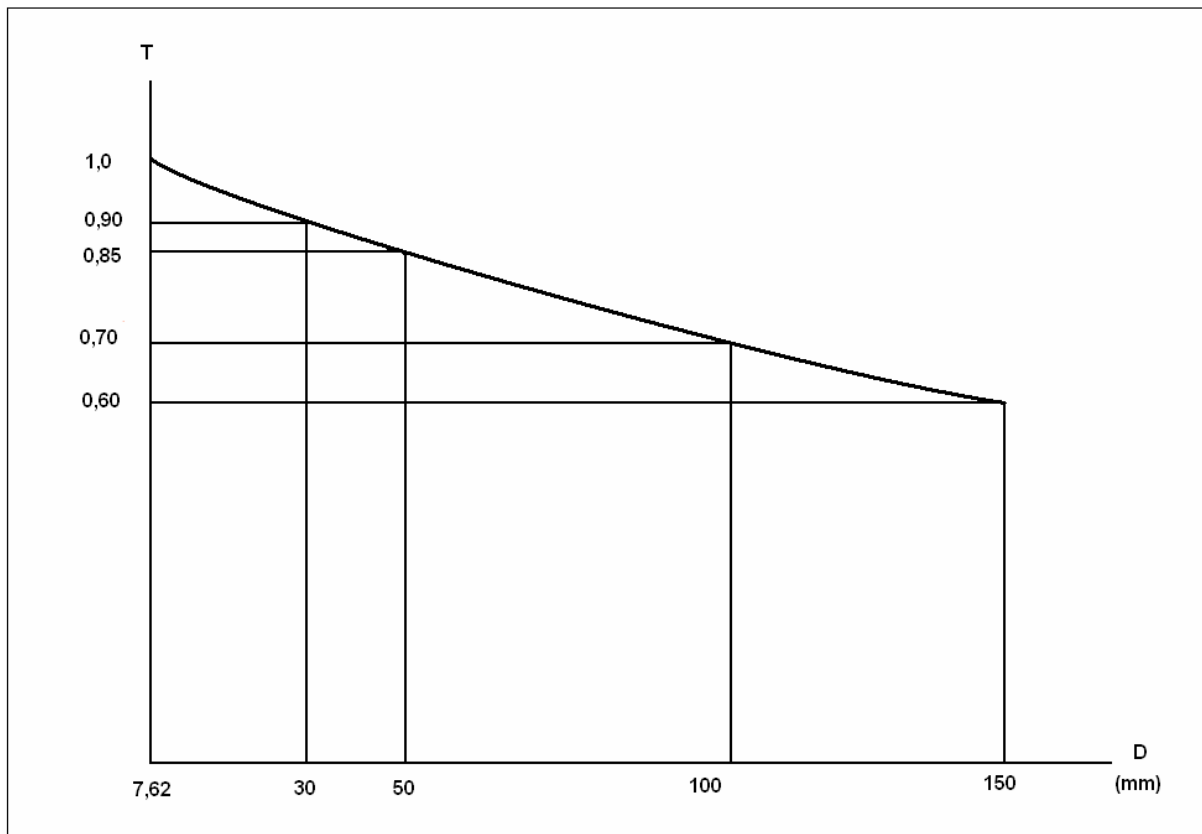


Figura B2 – Diagrama para obtenção de T [7]

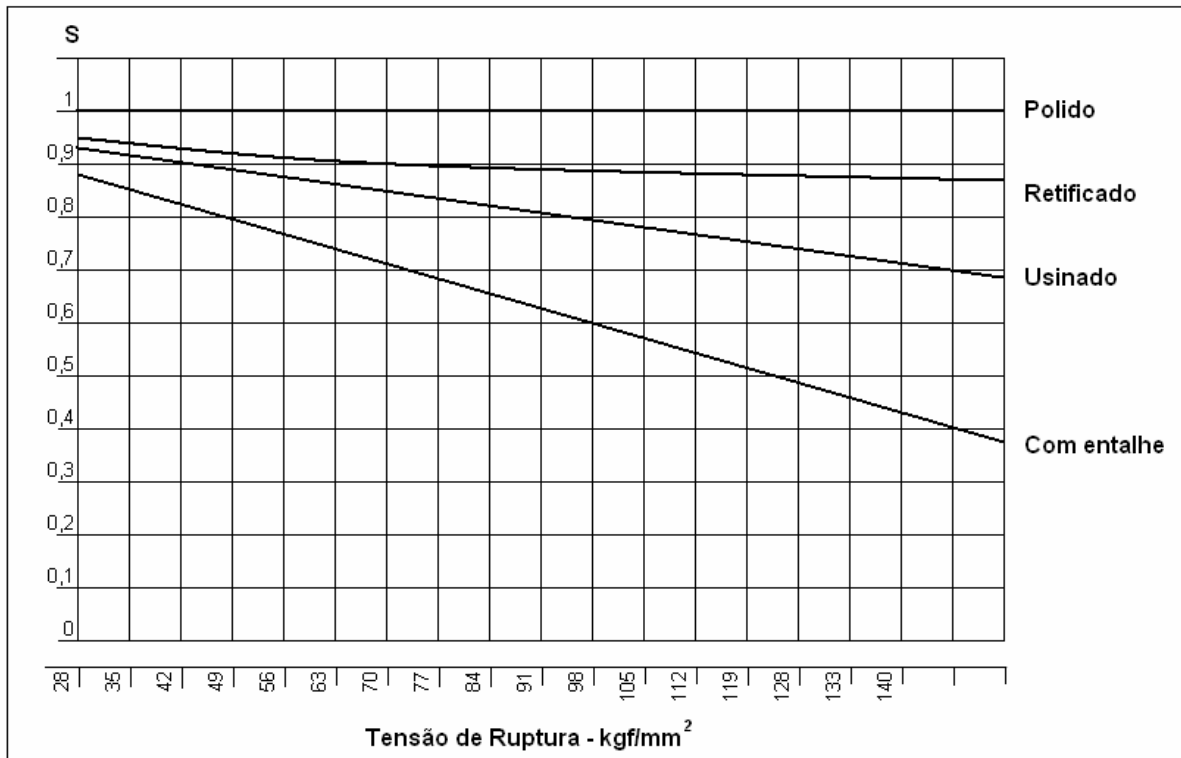


Figura B3 – Diagrama para obtenção de S [7]

APÊNDICE C – SEQÜÊNCIA DE CÁLCULO PARA SIMULAÇÃO DOS PASSES DE LAMINAÇÃO.

1- Redução na espessura

$$\Delta h = h_0 - h_1 \quad (C1)$$

2- Deformação média no passe [25]

$$\bar{\varepsilon} = 0,4 \ln \frac{h_i}{h_0} + 0,6 \ln \frac{h_i}{h_1} \quad (C2)$$

3- Raio achatado do cilindro de laminação

$$R' = R \cdot \left(1 + \frac{cP}{b \Delta h} \right) \quad (C3)$$

4- Arco de contato

$$l_d' = \sqrt{R'(\Delta h)} \quad (C4)$$

5- Pressão média

$$\frac{pm}{\sigma_{bi}} = \frac{1}{\Delta h} \left\{ \varepsilon_0 \frac{h_0}{\delta - 2} \left[\left(\frac{h_0}{h_n} \right)^{\delta - 2} - 1 \right] + \varepsilon_1 \frac{h_1}{\delta + 2} \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^{\delta + 2} - 1 \right] \right\} \quad (C5)$$

Com:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\sigma_{br}}{\sigma_{Bi}}$$

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{\sigma_{ba}}{\sigma_{Bi}}$$

$$\delta = 2\mu \sqrt{\frac{R'}{\Delta h}}$$

$$\sigma_{bi} = 1,15 \cdot k \cdot \bar{\varepsilon}^n$$

$$h_n = \sqrt[2\delta]{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} h_0^{\delta - 1} h_1^{\delta + 1}}$$

6- Esforço de laminação

$$F = p_m \cdot F_d \quad (C6)$$

Onde,

$$F_d = l'_d \cdot b$$

7- Torque de laminação

$$M_d = 2 \cdot F \cdot a \quad (C7)$$

Onde,

$$a = w \cdot l'_d$$

APÊNDICE D – ELABORAÇÃO DO DIAGRAMA “PRESSÃO NO ARCO DE CONTATO” [26]

1- Determinação dos pontos que serão plotados no gráfico

$$h_4 = h_3 + R \left[1 - \cos \left(5 \cdot \frac{\alpha_n}{180} \cdot \pi \right) \right] \quad D1$$

$$h_3 = h_2 + R \left[1 - \cos \left(4 \cdot \frac{\alpha_n}{180} \cdot \pi \right) \right] \quad D2$$

$$h_2 = h_1 + R \left[1 - \cos \left(3 \cdot \frac{\alpha_n}{180} \cdot \pi \right) \right] \quad D3$$

$$h_1 = h_s + R \left[1 - \cos \left(5 \cdot \frac{\alpha_n}{180} \cdot \pi \right) \right] \quad D4$$

2- Cálculo das pressões de entrada e saída para os respectivos pontos:

Ponto	Pressão entrada	Pressão saída	Equação
h_e	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \cdot \exp[\mu(h_i - h_e)]$	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \frac{h_e}{h_s} \cdot \exp(\mu \cdot h_e)$	D5
h_4	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \cdot \frac{h_e}{h_4} \exp[\mu(h_e - h_4)]$	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \frac{h_4}{h_s} \cdot \exp(\mu \cdot h_4)$	D6
h_3	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \cdot \frac{h_e}{h_3} \exp[\mu(h_e - h_3)]$	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \frac{h_3}{h_s} \cdot \exp(\mu \cdot h_3)$	D7
h_2	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \cdot \frac{h_e}{h_2} \exp[\mu(h_e - h_2)]$	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \frac{h_2}{h_s} \cdot \exp(\mu \cdot h_2)$	D8
h_1	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \cdot \frac{h_e}{h_1} \exp[\mu(h_e - h_1)]$	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \frac{h_1}{h_s} \cdot \exp(\mu \cdot h_1)$	D9
h_s	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \cdot \frac{h_e}{h_s} \exp[\mu(h_e - h_s)]$	$\frac{1 - \sigma_r}{\sigma_e} \cdot \sigma_s \cdot \exp(\mu \cdot h_s)$	D10

Onde,

S= Número de pontos plotados

h_e = Espessura na entrada do passe

h_s = Espessura na saída do passe

h_1, h_2, h_3, h_4 = Espessura nos pontos intermediários.

$$\sigma_e = k \left(\ln \frac{h_i}{h_e} \right)^n \quad \text{e} \quad \sigma_s = k \left(\ln \frac{h_i}{h_s} \right)^n$$

$$\alpha_n = \frac{\alpha}{S}$$

APÊNDICE E – ELABORAÇÃO DO DIAGRAMA “DISTRIBUIÇÃO DA FORÇA NOS PASSES DE LAMINAÇÃO”. [26]

Ponto	Fator	Espessura	Força
0	$Y_0 = 1 - \frac{1 - \cos\left(70 \cdot \frac{0}{572,9}\right)}{1 - \cos\left(\frac{70}{57,29}\right)}$	$h_0 = h_s$	Força calculada ou medida, F.
1	$Y_1 = 1 - \frac{1 - \cos\left(70 \cdot \frac{1}{572,9}\right)}{1 - \cos\left(\frac{70}{57,29}\right)}$	$h_1 = h_i + (h_s - h_i) \cdot 0,9$	$F_1 = Y_1 \cdot F$
2	$Y_2 = 1 - \frac{1 - \cos\left(70 \cdot \frac{2}{572,9}\right)}{1 - \cos\left(\frac{70}{57,29}\right)}$	$h_2 = h_i + (h_s - h_i) \cdot 0,8$	$F_2 = Y_2 \cdot F$
3	$Y_3 = 1 - \frac{1 - \cos\left(70 \cdot \frac{3}{572,9}\right)}{1 - \cos\left(\frac{70}{57,29}\right)}$	$h_3 = h_i + (h_s - h_i) \cdot 0,7$	$F_3 = Y_3 \cdot F$
4	$Y_4 = 1 - \frac{1 - \cos\left(70 \cdot \frac{4}{572,9}\right)}{1 - \cos\left(\frac{70}{57,29}\right)}$	$h_4 = h_i + (h_s - h_i) \cdot 0,6$	$F_4 = Y_4 \cdot F$
5	$Y_5 = 1 - \frac{1 - \cos\left(70 \cdot \frac{5}{572,9}\right)}{1 - \cos\left(\frac{70}{57,29}\right)}$	$h_5 = h_i + (h_s - h_i) \cdot 0,5$	$F_5 = Y_5 \cdot F$
6	$Y_6 = 1 - \frac{1 - \cos\left(70 \cdot \frac{6}{572,9}\right)}{1 - \cos\left(\frac{70}{57,29}\right)}$	$h_6 = h_i + (h_s - h_i) \cdot 0,4$	$F_6 = Y_6 \cdot F$
7	$Y_7 = 1 - \frac{1 - \cos\left(70 \cdot \frac{7}{572,9}\right)}{1 - \cos\left(\frac{70}{57,29}\right)}$	$h_7 = h_i + (h_s - h_i) \cdot 0,3$	$F_7 = Y_7 \cdot F$

Ponto	Fator	Espessura	Força
8	$Y_8 = 1 - \frac{1 - \cos\left(70 \cdot \frac{8}{572,9}\right)}{1 - \cos\left(\frac{70}{57,29}\right)}$	$h_8 = h_i + (h_s - h_i) \cdot 0,2$	$F_8 = Y_8 \cdot F$
9	$Y_9 = 1 - \frac{1 - \cos\left(70 \cdot \frac{9}{572,9}\right)}{1 - \cos\left(\frac{70}{57,29}\right)}$	$h_9 = h_i + (h_s - h_i) \cdot 0,1$	$F_9 = Y_9 \cdot F$
10	$Y_{10} = 1 - \frac{1 - \cos\left(70 \cdot \frac{10}{572,9}\right)}{1 - \cos\left(\frac{70}{57,29}\right)}$	$h_{10} = h_i$	$F_{10} = Y_{10} \cdot F$

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)