

# UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAS ADAPTATIVAS PARA DEFINIÇÃO DO PLANO DE PASSES EM UM LAMINADOR MKW<sup>1</sup>

Thiago Focosi<sup>2</sup>  
Fernando Kawata<sup>3</sup>  
Luis Fernando Maffeis Martins<sup>4</sup>

## Resumo

O trabalho mostra o levantamento de dados do material SAE 1006 processado em um laminador MKW e a simulação dos dados em Redes Neurais Adaptativas (RNA) através do software Neurosolutions5 para cálculo da força de laminação e mostra que é possível o modelamento matemático do processo através de RNA. O presente trabalho também descreve as características do processo de laminação ressaltando as variáveis e importância de cada uma na força de laminação e as vantagens e características do processamento em um laminador MKW, vantagens dos materiais laminados a frio.

**Palavras-chave:** Laminação a frio de chapas; Redes neurais adaptativas; MKW.

## USE OF ADAPTIVE NEURAL NETWORKS FOR DEFINITION OF PLAN ROLL PASSES IN A MKW ROLLING MILL

## Abstract

This paper shows the data collection material SAE 1006 processed in MKW rolling mills and simulation data on adaptive neural networks (ANN) using the software Neurosolutions5 for calculating the rolling force and shows that it is possible the mathematical modeling of the process by ANN. This work also describes the feature of process variables in cold rolling highlighting the importance of each of the rolling force and the advantages and characteristics of a MKW rolling mill, advantages of cold-rolled materials.

**Keywords:** Cold rolling of plates; Adaptive neural networks; MKW.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 47º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 26 a 29 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Processos da Mangels Divisão Aços.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Processos da Mangels Divisão Aços.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, Mestre em Eng. Materiais, Gerente de Engenharia, Qualidade e Tecnologia da Mangels Divisão Aços.

## 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 1.1 Redes Neurais Adaptativas - RNA

Segundo Tatibana e Kaetsu,<sup>(1)</sup> os modelos neurais procuram simular os padrões de processamento dos sistemas artificiais ao sistema neural biológico. As Redes Neurais Artificiais possuem grau de interconexão próxima ao do sistema cerebral e as informações são transferidas em um período de tempo específico dentro de um sinal de sincronização.

**Tabela 1** – Comparação de funcionamento entre cérebro e computador<sup>(1)</sup>

Parâmetro	Cérebro	Computador
Material	Orgânico	Metal e plástico
Velocidade	Milisegundos	Nanosegundos
Tipo de Processamento	Paralelo	Seqüencial
Armazenamento	Adaptativo	Estático
Controle de Processos	Distribuído	Centralizado
Número de elementos processados	10 e 11 a 10 e 14	10 e 5 a 10 e 6
Ligações entre elementos processados	10.000	<10

A mesma comparação pode ser feita entre um computador e um neurocomputador.

**Tabela 2** – Quadro comparativo entre computadores e neurocomputadores<sup>(1)</sup>

Computadores	Neurocomputadores
Executam programas	Aprendem
Executam operações lógicas	Executam operações não lógicas, transformações, comparações
Dependem do modelo ou do programador	Descobrem as relações ou regras dos dados e exemplos
Testam uma hipótese por vez	Testam todas as possibilidades em paralelo

De acordo com Tatibana e Kaetsu,<sup>(1)</sup> o modelo mais comum da rede neural é o *multilayer perceptron* (MLP). Este tipo de rede neural é conhecido como uma rede supervisionada porque requer uma saída desejada a fim de aprender. O objetivo desta rede é criar um modelo que ligue corretamente a entrada à saída usando dados históricos, de forma que o modelo pode então ser usado para produzir a saída quando a saída desejada é desconhecida.

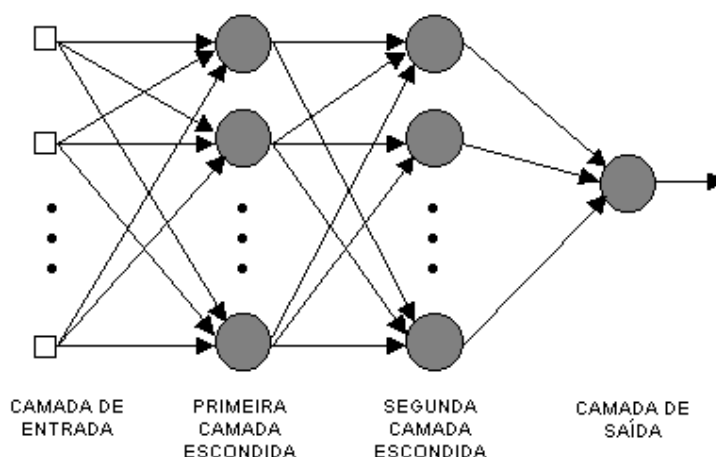


Figura 1 – Modelo de rede perceptron, mais utilizado atualmente.<sup>(2)</sup>

Os MLP e muitas outras redes neurais aprendem usando um algoritmo chamado *backpropagation*. Com ele, os dados de entrada são apresentados repetidamente à rede neural. Com cada apresentação a saída da rede neural é comparada à saída desejada e um erro é computado. Este erro é então realimentado (*backpropagated*) à rede neural e usado para ajustar os pesos tais que o erro diminui com cada iteração e o modelo neural começa mais próximo e mais perto de produzir a saída desejada. Este processo é conhecido como treinamento.

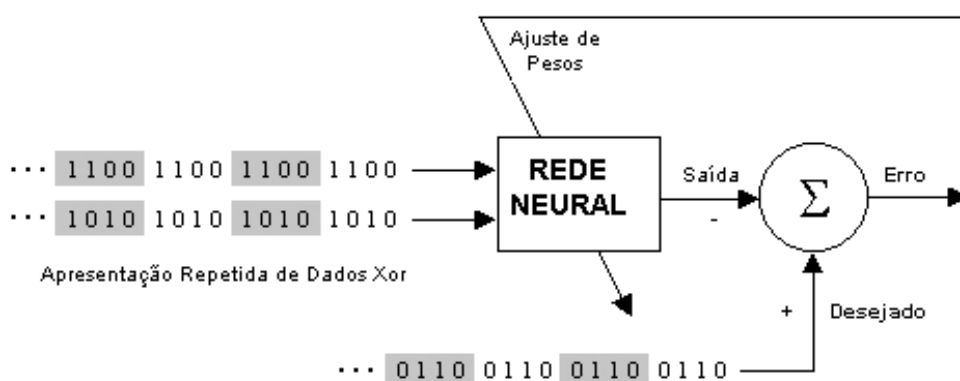


Figura 2 – Modelo de rede neural que aprende utilizando dados ou-exclusivo (Xor).<sup>(1)</sup>

## 1.2 Laminação a Frio de Chapas de Aço

Segundo Guthrie e Jonas,<sup>(3)</sup> muitos produtos requerem maior redução na espessura ou na seção transversal e qualidade superficial consideravelmente melhor do que pode ser produzida pela laminação a quente, isto é, o lugar onde a laminação a frio é mais bem empregada. Na laminação a frio de produtos lisos, numerosos avanços foram feitos nos equipamentos e nos processos que permitiram a uniformidade do calibre e a melhoria da qualidade superficial ao longo do comprimento de uma bobina.

Segundo Roberts,<sup>(4)</sup> a laminação a frio aumenta a dureza e o limite de escoamento, reduz a ductilidade e a formabilidade, e introduz também os componentes específicos da textura associados com a redução da espessura em largura constante, que possa mais tarde ser realçada pelo recozimento. Segundo Guthrie e Jonas,<sup>(3)</sup> existe grande dificuldade no processo de laminação em

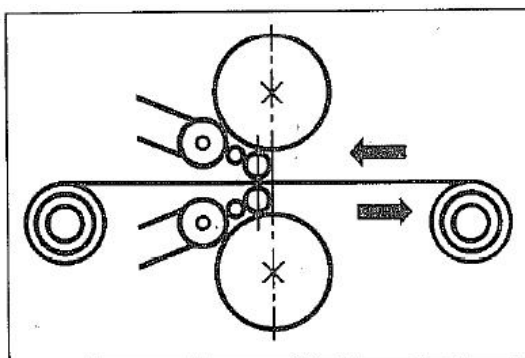
determinar com precisão as variáveis envolvidas no processo, como, por exemplo, o atrito, impedindo o desenvolvimento de modelos matemáticos com precisão. No processo de laminação há grande número de variáveis, tais como: força de laminação, atrito, velocidade, diâmetro dos cilindros, tração de entrada, tração de saída, redução, todas elas influenciando na qualidade final do produto.

Segundo Roberts,<sup>(4)</sup> a mudança de todas as variáveis influencia no atrito, um dos fatores mais importantes para que ocorra a laminação.

### 1.3 Laminador MKW

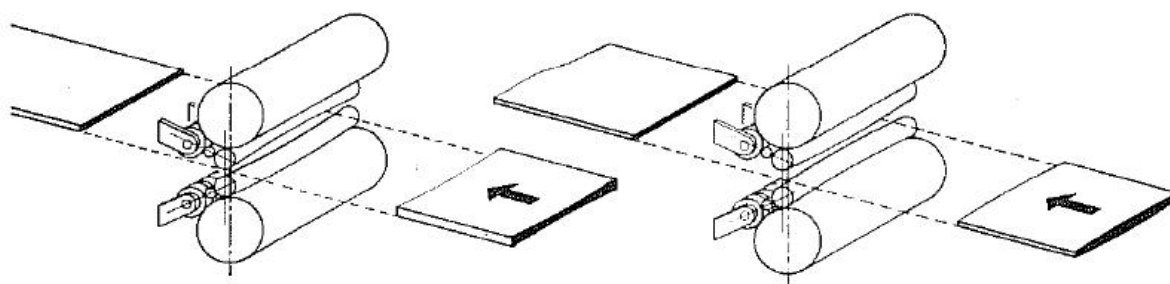
É um dos melhores sistemas de laminação existente, pois a cadeia se mantém rígida o suficiente para não gerar oscilações que possam influenciar na variação de redução e conseqüentemente na espessura.

A característica desse laminador é que os cilindros de trabalho ficam mais recuados para dar apoio aos cilindros intermediários e pelos rolamentos favorecendo a rigidez da cadeia.<sup>(4)</sup>



**Figura 3** - Desenho esquemático dos cilindros de apoio e de trabalho.<sup>(4)</sup>

Essa característica proporciona que a espessura não sofra variações ao longo do rolo devido aos apoios mostrada na figura abaixo e ao cilindro maior de apoio que não deixa que o cilindro de trabalho não flexione.



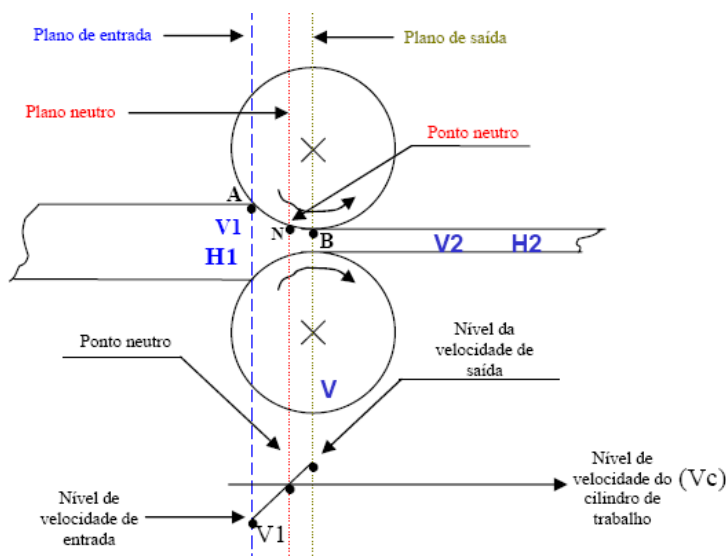
**Figura 4** - Situação de trabalho dos cilindros e a flexão sofrida.<sup>(4)</sup>

### 1.4 Forças Aplicadas no Processo de Laminação

As seguintes variáveis devem ser estudadas para se entender o processo de laminação:

- arco de contato;
- atrito;

- deformação e coroamento dos cilindros;
- módulo de rigidez;
- pressão no ponto neutro;
- tração avante e a ré;
- tensão de deformação;
- velocidade de laminação.



**Figura 5** – Planos e velocidades importantes para o estudo da laminação.<sup>(5)</sup>

Segundo Gomes,<sup>(5)</sup> o material permanece em contato com os cilindros de trabalho do ponto A até o ponto B, conforme a figura anterior. O ponto A definimos como plano de entrada e o ponto B, onde o material perde o contato com o cilindro, chamamos de plano de saída. A velocidade no ponto aumenta gradativamente até o ponto N, onde as velocidades do material e do cilindro são as mesmas, portanto esse ponto é chamado de ponto neutro. Do ponto N até o ponto B a velocidade do material é maior que a velocidade da tira e a redução do material provocada pelos cilindros atinge um máximo no ponto neutro e a partir do ponto neutro diminui até chegar a zero no plano de saída. Segundo Dieter,<sup>(6)</sup> a posição do ponto neutro é principalmente afetada pela aplicação das tensões avante e a ré e pelo coeficiente de atrito.

## 1.5 Influência das Variáveis de Laminação

### 1.5.1 Redução

Pode ser expressa de várias formas, como redução percentual, redução real e redução média, levando-se em conta passes anteriores.

- Redução percentual: mostra a redução no passe em porcentagem, como podemos ver na equação 1;
- Redução acumulada: pode ser comparada entre passes do mesmo material, é calculada pela equação 2;
- Redução média: considera a bitola de partida do material, ou seja, considera a redução em todos os passes que foram dados no material. É calculada pela equação 3.

$$\%R = \frac{e2}{e1} \cdot 100 \quad (1)$$

$$Ra = \ln \cdot \left( \frac{ei}{e2} \right) \quad (2)$$

$$Rm = 0,4 \cdot \left( \frac{ei}{e1} \right) + 0,6 \cdot \ln \left( \frac{ei}{e2} \right) \quad (3)$$

Onde:

*%R* : Porcentagem de redução (%)

*Ra* : Redução acumulativa

*Rm* : Redução média

*Ei* : Bitola de partida (mm)

*e1* : espessura antes do passe (mm)

*e2* : espessura após o passe (mm)

### 1.5.2 Tração

A tensão de entrada e de saída ( $\text{kgf/mm}^2$ ) do material pode ser calculada pelas equações 4 e 5, respectivamente.

$$Tr = \frac{Ftr}{e1 \cdot l} \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad (4)$$

$$Ta = \frac{Fta}{e2 \cdot l} \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad (5)$$

Onde:

*Tr* : Tensão a ré ( $\text{kgf/mm}^2$ )

*Ta* : Tensão avante ( $\text{kgf/mm}^2$ )

*Ftr* : Força de tração a ré (kgf)

*Fta* : Força de tração avante (kgf)

*e1* : Espessura antes do passe (mm)

*e2* : Espessura após o passe (mm)

*l* : Largura do material (mm)

A tensão de entrada desloca o ponto neutro para a saída, ou seja, aumentando o período em que o material sofre redução na passagem pelos cilindros, diminuindo a pressão necessária para a laminação porém, quando o ponto neutro é deslocado para saída dos cilindros, aumenta a probabilidade de acontecer escorregamento, em que os cilindros patinam sobre o material devido ao aumento do ângulo entre os planos de entrada e saída ( $\alpha$ ).

Segundo Dieter<sup>(6)</sup> e Roberts,<sup>(4)</sup> a tração de saída também diminui a força necessária para a laminação, porém tem menor influência e desloca o ponto neutro para a entrada dos cilindros, ou seja, próximo ao plano de entrada, diminuindo o tempo em que o material sofre a redução, mas dificulta a ocorrência de deslizamento.

De acordo com Roberts,<sup>(4)</sup> a pressão exercida na tira pela carga reduz no *gap* a tração necessária para deformar plasticamente o material. Deste modo a tração tem efeito considerável na redução final.

Segundo Dieter,<sup>(6)</sup> na laminação geralmente são aplicados valores de até 20% do limite de resistência do material.

### 1.5.3 Velocidade

Segundo Medeiros,<sup>(7)</sup> com o aumento da velocidade de laminação (m/min) a camada de emulsão (mistura de 97% água e 3% óleo) entre o material e os cilindros de laminação tende a aumentar, tornando o coeficiente de fricção menor, causando a diminuição do atrito na região e por conseqüência diminuindo a força necessária para se alcançar a mesma espessura final.

### 1.5.4 Arco de contato

Segundo Rizzo,<sup>(8)</sup> define-se arco de contato ( $ld$ ) como o segmento AC (Figura 12) do cilindro que é determinado pelo plano de entrada CD até o plano de saída AB. Quando o diâmetro do cilindro é muito maior que a espessura da chapa que está sendo laminada o arco de contato pode ser determinado pela equação 6:

$$ld = \sqrt{\frac{D}{2} \cdot (ei - ef)} \text{ (mm)} \quad (6)$$

Onde:

$Ld$ : Arco de contato (mm)

$D$ : Diâmetro do cilindro de trabalho (mm)

$ei$ : Espessura de entrada (mm)

$ef$ : Espessura de saída (mm)

A carga de laminação é distribuída no arco de contato, a distribuição da pressão ( $\text{kgf/mm}^2$ ) durante a laminação ao longo do arco de contato (Figura 7)<sup>(9)</sup> tem início no plano de entrada (B), tendo um máximo até o ponto neutro (C) e decresce até o ponto de saída (D), podendo ser calculada pela equação 7.

$$Pr = \frac{F \cdot 1000}{ld \cdot L} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad (7)$$

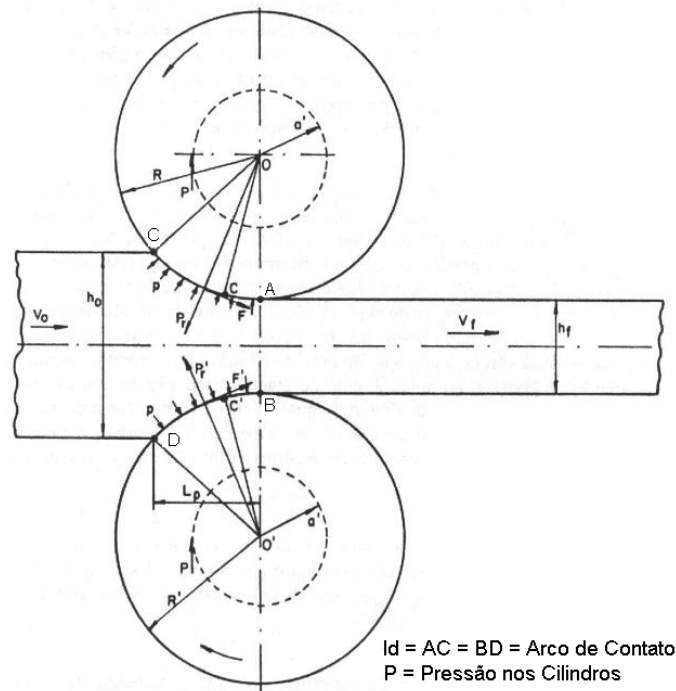
Onde:

$Pr$ : Pressão no arco de contato ( $\text{kgf/mm}^2$ )

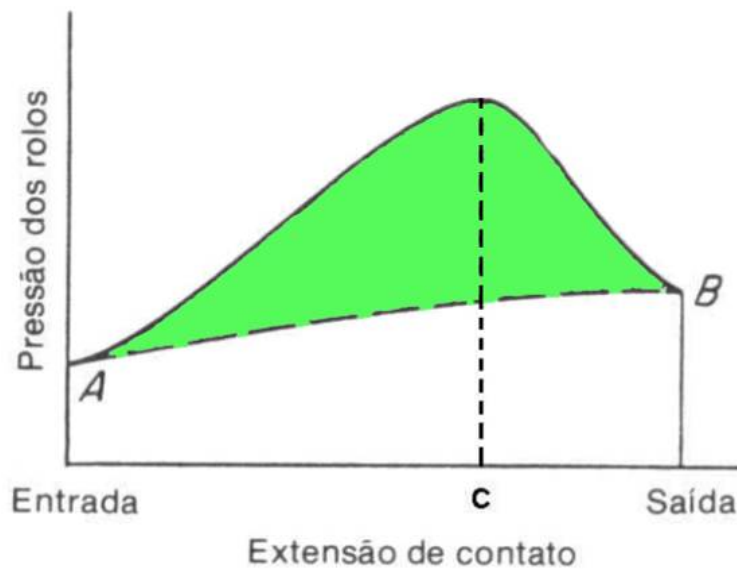
$F$ : Força de laminação (ton)

$ld$ : Arco de contato (mm)

$L$ : Largura (mm)



**Figura 6** – Relações geométricas durante a laminação.<sup>(9)</sup>



**Figura 7** - Distribuição da pressão no Arco de contato durante a laminação.<sup>(9)</sup>

De acordo com Loiola,<sup>(9)</sup> (2009), a área em verde na Figura 7 representa a força necessária para vencer a força de atrito que é exercida pelos cilindros enquanto que a área abaixo de AB é a força para a deformação do material.

Segundo Dieter<sup>(6)</sup> e Rizzo,<sup>(8)</sup> a determinação da distribuição da pressão no arco de contato é importante, pois ela determina a redução (%) em cada passe e o acabamento do material, ou seja, todos os parâmetros do processo de laminação são para obter uma pressão no arco de contato que permita que a redução aconteça com o menor número de passes possível e com o acabamento desejável.



## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Definição das Variáveis de Processo

Para o desenvolvimento da RNA foram selecionadas as seguintes variáveis:

- Força de tração a ré (kgf)
- Força de tração avante (kgf)
- Velocidade (m/min)
- Espessura de entrada (mm)
- Espessura de saída (mm)
- Força de laminação (ton)
- Largura do material processado (mm)

Foram selecionados as variáveis mensuráveis no processo de laminação da empresa Mangels e que têm alguma influência sobre a força de laminação. Os valores foram coletados a partir da tela de operação do equipamento durante o processamento do material.

### 2.2 Levantamento dos Dados

Para a elaboração da RNA foram coletados 100 dados de velocidade (m/min), força de tração a ré (kgf), força de tração avante (kgf), espessura de entrada (mm) e saída (mm), força (ton), largura da tira (mm), durante o processo de tiras a frio do material SAE 1006 no laminador da empresa Mangels (Figura 8). Todos estes dados foram levantados a partir do painel de controle do equipamento durante o processamento do material.



**Figura 8** – Cadeira do Laminador MKW da Empresa Mangels.

### 2.3 Pré-Processamento dos Dados

A partir dos valores de espessura de entrada e saída foram feitos os cálculos da porcentagem de redução e redução acumulada através das equações 1 e 2, respectivamente, e a partir dos dados de força de tração de entrada (kgf) e força de tração de saída (kgf) foram calculados os valores de tensão a ré ( $\text{kgf/mm}^2$ ) e tensão avante ( $\text{kgf/mm}^2$ ), através das equações 4 e 5. Com o diâmetro do cilindro (mm), espessura de entrada (mm) e espessura de saída (mm), foi calculado o arco de contato, utilizando-se a equação 6.

Após o cálculo do arco de contato (mm) foi calculada a pressão ( $\text{kgf/mm}^2$ ) no arco de contato, utilizando o valor da força (t) de laminação e largura (mm) da tira laminada, pela equação 7.

Foram definidos como dados de entrada a velocidade (m/min), tensão a ré (kgf/mm<sup>2</sup>), tensão avante (kgf/mm<sup>2</sup>), porcentagem (%) de redução e redução acumulada. A pressão no arco de contato (kgf/mm<sup>2</sup>) foi estabelecida com resultado da rede.

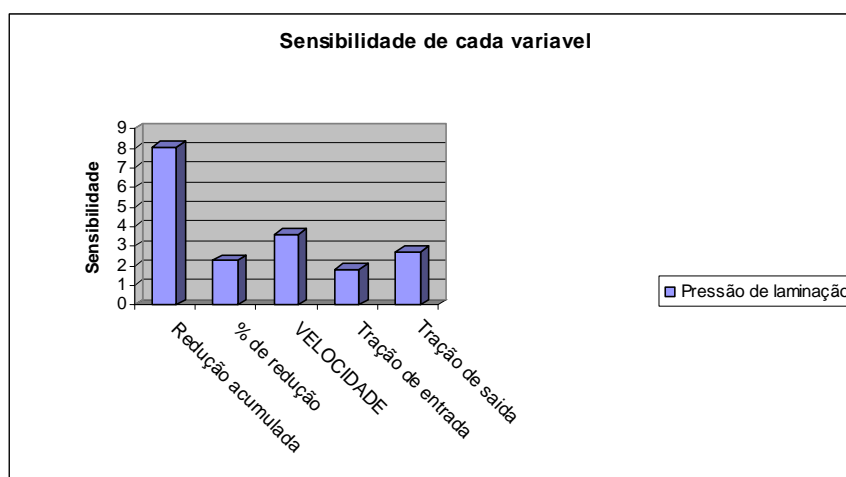
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O valor encontrado de r foi de 0,93, o mínimo erro encontrado na pressão de laminação foi de 0,020 e o erro máximo encontrado foi de 17,17 com demonstrado na tabela abaixo:

**Tabela 3:** Valor de R<sup>(2)</sup>

<b>Performance</b>	<b>Pressão de laminação</b>
Min Abs Error	0,019600244
Max Abs Error	17,16887729
r	0,927417843

Esse valor de R significa que a escolha das variáveis foi correlacionada de forma correta, chegando a 93% de correlação.



**Figura 9 -** Gráfico de Sensibilidade das Variáveis.<sup>(2)</sup>

### 4 CONCLUSÃO

Podemos concluir que as redes neurais adaptativas conseguiram simular de forma satisfatória o processo de laminação a frio de trias de aço do material SAE 1006.

O desenvolvimento de novos parametros para o processo de laminação, com o objetivo de redução de custos se torna possível com o modelamento através de RNA.

Em proximos trabalhos se torna possível a inclusão de parametros de propriedade mecanica e forma do material para a proporção der melhorias na qualidade.

## Agradecimentos

Agradecemos primeiramente a Fundação Salvador e ao Prof. Dr. Ronald L. Plaut prestou toda a orientação necessária para elaboração do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 TATIBANA, C. Y; KAETSU, D. Y. Uma introdução às redes neurais. Disponível em [www.din.uem.br/ia/neurais/](http://www.din.uem.br/ia/neurais/). Acesso em mar. 2009.
- 2 NEUROSOLUTIONS. What is a neural network? Disponível em [www.neurosolutions.com](http://www.neurosolutions.com). Acesso em mar. 2009.
- 3 GUTHRIE, R.I.L; JONAS, J.J. McGill Metals Processing Center, McGill University, 2009.
- 4 ROBERTS, W.L. Cold Rolling of Steel. New York, Marcel Dekker, 1978. Cap. 2 – Various Types of Cold Mills, p 32-33.
- 5 GOMES, U. R. Otimização do processo de laminação a frio através de planejamentos de experimentos. Obtido título de mestrado. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.
- 6 DIETER, G.E. Metalurgia mecânica. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1981.
- 7 MEDEIROS, A. C. C. de M. Manutenção elétrica de chapas: aquisição de dados e análise espectral de espessura de chapa. Recife: Escola Politécnica de Pernambuco, 2005.
- 8 RIZZO, E. M. da S. Processos de laminação dos aços: uma introdução. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.
- 9 LOIOLA, J. Conformação plástica: laminação. Disponível em <http://www.scribd.com/doc/12073092/Laminacao>. Acesso em jun. 2009.
- 10 CALLISTER JR., W. D. Ciência de engenharia de materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2002.