

# EFEITO DA TRAÇÃO A RÉ NO TORQUE INICIAL DURANTE A LAMINAÇÃO DE TIRAS A FRIO<sup>1</sup>

Celso Tadeu Bielskis<sup>2</sup>  
Agenor de Toledo Fleury<sup>3</sup>  
Ronald Lesley Plaut<sup>4</sup>

## 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 milissegundos, 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 [9], 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 [3] e Pawelski e Lindemann [8], 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.

## INFLUENCE OF THE BACK TENSION ON THE TORQUE DURING THE INTRODUCTION IN THE COLD ROLLING MILL

### 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 in relatively short time intervals, 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 [5], the neural network entry data were 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 [5], Pawelski and Lindemann [12], experiments were carried out in order to confirm that influence.

**Key words:** Cold rolling mill; Neural networks; Torque amplification factor.

<sup>1</sup> Contribuição Técnica ao 43º Seminário de Laminação – Processo e Produtos Laminados e Revestidos, Curitiba, PR, Outubro de 2006.

<sup>2</sup> Supervisor de Manutenção da Brasmetal Waelzholz S.A. Ind e Com – [cbielskis@brasmetal.com.br](mailto:cbielskis@brasmetal.com.br)

<sup>3</sup> Prof. Adjunto II – Centro Universitário da FEI – [agfleury@fei.edu.br](mailto:agfleury@fei.edu.br)

<sup>4</sup> Prof. Assoc. – Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – EPUSP- [rlplaut@usp.br](mailto:rlplaut@usp.br)

## LISTA DE SIMBOLOS

$h_0$	Espessura de entrada	M	Torque de laminação sem tração
$h_1$	Espessura de saída	P	Esforço de laminação sem tração
$h_n$	Espessura no ponto neutro	F	Esforço de laminação com tração
$\varepsilon$	Deformação verdadeira	a	Braço de alavanca
$\sigma$	Tensão no estado biaxial	$\sigma_r$	Tração de ré
$l_d$	Arco de contato achatado	$\sigma_a$	Tração avante
R	Raio do cilindro de laminação	$\lambda_1, \lambda_2$	Adimensionais de Hill
R'	Raio achatado do cilindro	b	Largura da tira de aço
$M_d$	Torque de laminação com tração		

### 1. INTRODUÇÃO.

Durante o processo de laminação da Brasmetal Waelzholz, executado em 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. 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*.

Em alguns casos, durante a introdução, observa-se a ocorrência de picos no torque dos cilindros de laminação (Fig. 1), e, normalmente, a amplitude desses picos é maior do que o torque médio de laminação. O resultado da divisão do torque de pico, em regime transitório, dividido pelo torque médio de laminação resulta em um fator de amplificação de torque, que é denominado *TAF* – “*Torque Amplification Factor*” [4,7].

$$TAF = \frac{T_{pico}}{T_{médio}} \quad (1)$$

H. Honjyo e H. Watanabe [4] 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, o *TAF* pode ser decorrente de dois aspectos: Impacto puro e/ou equipamento ou manutenção e operação.

Dependendo da amplitude e da frequência de ocorrência do *TAF*, no laminador estudado, a principal consequência é a quebra dos pinos de segurança que estão instalados no eixo de transmissão dos cilindros de trabalho. A quebra freqüente dos pinos resulta em perdas ao processo produtivo, por isso que, diante dos problemas decorrentes do *TAF*, fica evidente que, é de fundamental importância conhecer e eliminar os fatores que influenciam na sua ocorrência.

### 2. OJETIVOS

- 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.

### 3. UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS - RNA

As RNAs são programas de computador que podem reconhecer padrões em uma dada coleta de dados e produzir um modelo para estes dados. São ferramentas utilizáveis em diversas áreas de conhecimento, e as suas aplicações já podem ser encontradas em: Modelamento de processo, controle de qualidade, diagnósticos de máquinas, previsões de mercado financeiro, etc. [10,13]. No caso da laminação, encontram-se trabalhos publicados para a modelagem do esforço de laminação, tanto na laminação a frio como na laminação a quente [2].



Figura 1– Ocorrência do *TAF* durante a introdução

A opção da utilização de RNAs para relacionar os parâmetros operacionais do processo de laminação com o *TAF* se deu 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.

A fase de aprendizagem é feita através de um processo iterativo de ajustes aplicados aos 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 [1,13].

### 4. INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE TRAÇÃO NO DURANTE A LAMINAÇÃO

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). Supondo que a tração de ré,  $\sigma_r$ , é igual à tração avante,  $\sigma_a$ , verifica-se que a resultante  $P$  é vertical e paralela ao eixo central que une os cilindros de laminação. 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. [11,12]

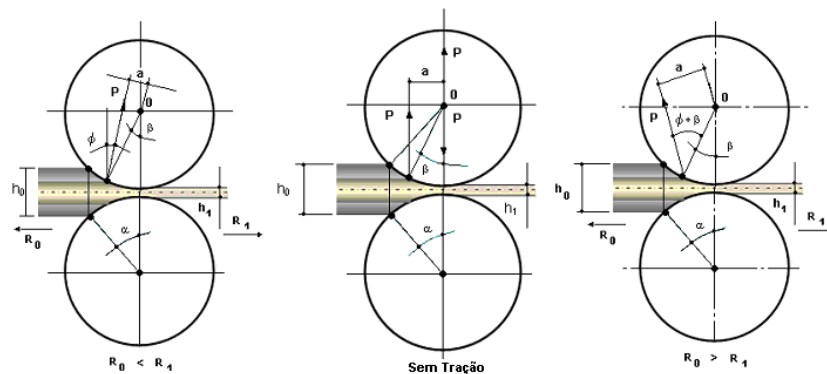


Figura 2 – Variação do braço de alavanca com a aplicação da tração [12]

## 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 5.1 COLETA E ANÁLISE DOS 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 (com variações médias de 3,4 vezes). O objetivo deste ensaio foi verificar a influência da tração de ré no torque de laminação.

Na segunda etapa, os parâmetros operacionais (força, velocidade, tração e torque) foram monitorados durante 200 horas a fim de se identificar os parâmetros durante a ocorrência do *TAF* na introdução.

Na terceira etapa, a amplitude do *TAF* foi comparada em duas situações. 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 metodologias de cálculo disponíveis na teoria de laminação a frio.

Nas três etapas, a coleta e análise de dados, como espessura, velocidade, torque, força e tração, foi feita através de um pacote de supervisão composto de dois módulos um para a aquisição de dados -*ibaPDA Lite* - e outro para a análise dos dados -*ibaAnalyser* [5].

### 5.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TRAÇÃO

A análise da influência da tração no torque inicial de partida foi feita com base em dois trabalhos. Um elaborado por Pawelski e Lindemann [8], onde através de experimentos, foram verificadas a influência da tração no torque de laminação e a relação entre o braço de alavanca e o torque de laminação sob essa influência.

O outro trabalho utilizado como referência, foi elaborado por Ford, Bland e Ellis [3]. Nesse trabalho métodos de cálculo do esforço de laminação foram comparados com base em um diagrama elaborado por Hill.

No diagrama  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  representam adimensionais definidos por Hill (Tabela 1), para a elaboração do gráfico da Figura 6.

$\lambda_1 = \frac{M_d / b}{(F / b)R}$	$\lambda_2 = \frac{\sigma_a h_1 - \sigma_r h_0}{F / b}$
--	---

Tabela 1 – Adimensionais propostos por Hill [5]

### 5.3 CONFIGURAÇÃO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As variáveis de entrada e saída, utilizadas na elaboração das duas RNAs, apresentadas neste trabalho, foram determinadas com base na equação de Ford para o cálculo do torque :

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

Na equação (2),  $P$  representa o esforço de laminação sem a influência da tração. Porém, como o esforço de laminação obtido na coletada de dados estava sob a influência da tração, tornava-se necessário efetuar a correção correspondente. Para ser verificada a magnitude desta influência no esforço de laminação, foi feita a avaliação de um grupo de dados através da relação de Hessenberg e Sims (equação 3) [9].

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

Obtido o esforço de laminação sem a influência da tração, foi avaliado o raio achatado do cilindro de laminação sob a influência das duas condições de esforço de laminação, com tração e sem tração. A avaliação foi feita com base no critério [9]:

$$\frac{R'_n}{R'_{n-1}} \cong 1,05 \quad (4)$$

Desta forma foi verificado que os valores de tração utilizados (nesse processo específico) exercem pequena influência sobre o esforço de laminação. Então, o esforço de laminação sem a influência da tração,  $P$ , foi substituído pelo esforço de laminação,  $F$ , coletado em condição normal de operação.

Na tabela 2 são apresentadas as variáveis de entrada e de saída que compuseram as duas redes apresentadas. Na RNA 1 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.

Na RNA 2 a composição da variável descrita na primeira coluna da tabela 1, 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:

$$a = w.l'_d = \frac{M_d}{2F} \Rightarrow w.l'_d = \frac{M_d}{2F} \quad (5)$$

RNA 1			RNA 2				
Dados de entrada			Dados de saída	Dados de entrada			Dados de saída
1	2	3		1	2	3	
F	$\frac{\sigma_r h_0 - \sigma_a h_1}{2}$	a	$M_d$	2.F.l <sub>d</sub>	$\frac{\sigma_r h_0 - \sigma_a h_1}{2}$	R.b	$M_d$

Tabela 2 – Variáveis de entrada e saída utilizadas na elaboração das RNA

As duas redes foram desenvolvidas no software *Neurosolutions for Excel* [6]. O tipo de rede adotado foi a do tipo *Multilayer Perceptron* e a melhor configuração, utilizada neste trabalho, foi aquela empregando 3 camadas e a função de transferência *BiasAxon*. A proporção definida para treinamento foi de 75% dos dados, 12,5% para validação e 12,5% para teste.

## 6. RESULTADOS OBTIDOS: DISCUSSÃO

### 6.1. ATRAVÉS DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As duas redes neurais, RNA 1 e RNA 2, apresentaram boa aderência entre os dados inseridos e os dados gerados, conforme é apresentado na Figura 7. Observando-se a Figura 7, gráfico 1, verifica-se que a linha que representa (linha cheia) os dados inseridos, em ambos os casos, praticamente se sobrepõe à linha com os dados gerados (tracejada).

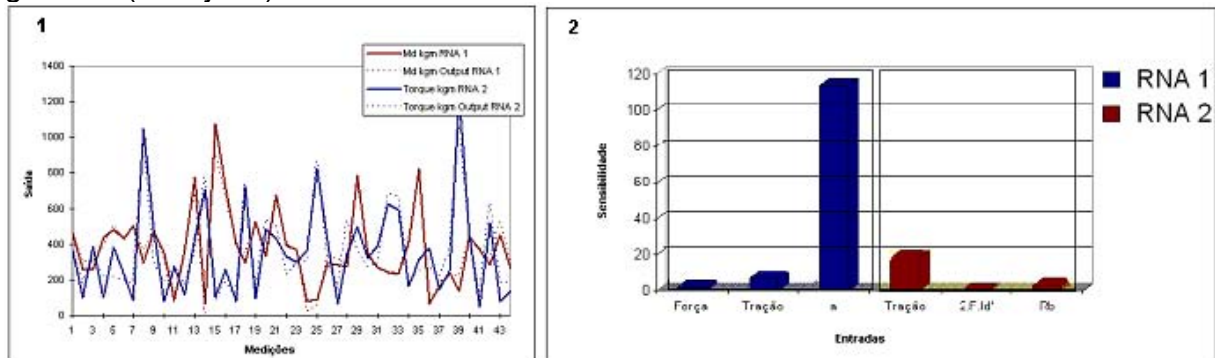


Figura 7 – Resultados obtidos com a aplicação de redes neurais artificiais [10]

Ainda na Figura 7, gráfico 2, verifica-se que, na RNA 1, o dado de maior relevância foi o braço de alavanca, e na RNA 2 a aplicação de tração.

### 6.2. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TRAÇÃO

Os gráficos das Figuras 8 foram elaborados com base no experimento de Pawelski e Lindemann [8]. Na Figura 8, gráfico 1, constata-se que, durante a introdução, 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 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 para os valores obtidos experimentalmente pelos pesquisadores mencionados.

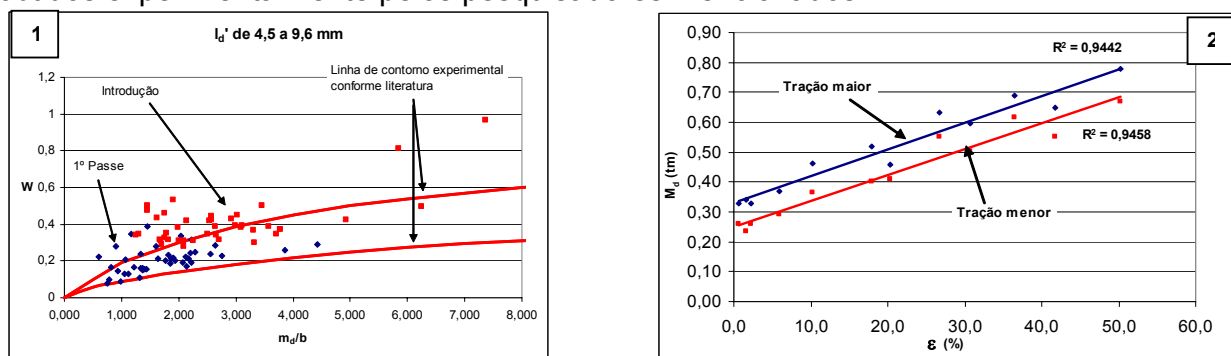


Figura 8 - Verificação da influência da tração

Ainda na figura 8, gráfico 2, 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 [8], 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.

Com base no gráfico proposto por Hill [3]; foi elaborado o gráfico da Figura 9. Analisando, a inclinação da reta média do gráfico de Hill em relação aos adimensionais  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , verifica-se que, mantendo-se constantes as variáveis força de laminação, espessuras de entrada e saída e tração avante; incrementando a tração de ré, o resultado atribuído ao adimensional  $\lambda_1$  será aumentado. Isto ocorre como consequência do aumento no torque de laminação.

### 6.3. OTIMIZAÇÃO DO ESQUEMA DE PASSES

O objetivo da otimização do esquema de passes foi à obtenção de um esquema de passes que proporcionasse uma distribuição mais homogênea da força e do torque de laminação em todos os passes de laminação, visando à minimização do torque de partida.

Os gráficos da Figura 10 apresentam os resultados obtidos com a otimização dos passes. Se o método de passes proposto for avaliado exclusivamente com relação à amplitude do TAF (gráfico 4 da Figura 10) 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 às condições de operação são muito mais favoráveis, ou seja:

- O torque de laminação durante a introdução é menor (gráfico 4 da Figura 10).
- Houve uma distribuição mais homogênea do torque durante todos os passes de laminação (gráfico 4 da Figura 10), sendo que no primeiro e segundo passes o torque foi menor, fato que irá melhorar a vida dos pinos se for levado em consideração à fadiga.
- Ocorreu uma distribuição mais homogênea do esforço de laminação durante os passes (gráfico 1 da Figura 10)

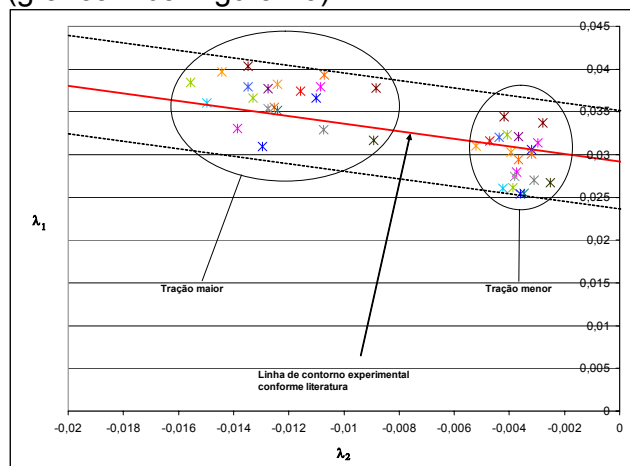


Figura 9–Verificação da influência da tração baseado no método de Hill.

Quanto à posição do ponto neutro ao longo do arco de contato, no gráfico 2 da Figura 10, verifica-se que durante a introdução, com a aplicação do método proposto, o qual alia uma baixa tração de ré com uma nova distribuição dos passes, 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 avante utilizada, o ponto neutro irá retornar a região do arco de contato como demonstra o gráfico 3 da Figura 10.

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 um dos fatores que leva ao rompimento dos pinos é um processo de fadiga ocasionado pelas altas cargas cíclicas a que o pino é submetido.

Nos gráficos da Figura 11, verifica-se a evolução do número de ciclos que o pino irá atingir sob a aplicação de cargas cíclicas. No gráfico 1, onde são apresentados resultados obtidos durante a introdução, observa-se uma tendência no aumento da vida dos pinos quando a introdução é feita com nível de tração menor, que resulta em um torque de laminação menor. No gráfico 2, onde são comparados os esquemas de passes usual e proposto, observa-se, no caso do método proposto, uma concentração do número de ciclos que o pino irá atingir uma condição melhor do que a faixa crítica de trabalho do método usual. Na ocorrência do *TAF*, com a redução do torque inicial, também se verifica uma tendência no crescimento da vida do pino.



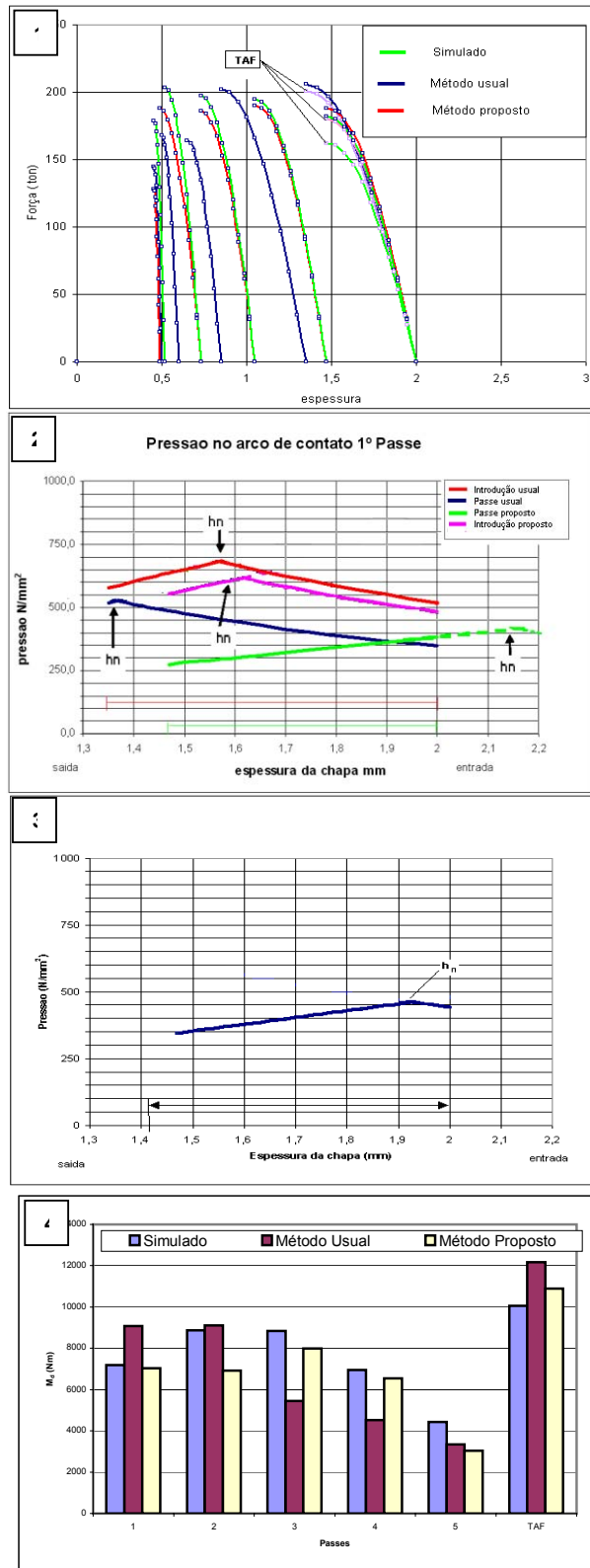


Figura 10 – Resultados obtidos com a otimização de passes

## 7. CONCLUSÃO

A utilização de RNAs, mostrou-se eficiente no levantamento dos parâmetros relevantes do processo

A tração de ré, durante a introdução, influencia na amplitude do torque inicial, e o seu controle mostra-se como sendo um método eficiente na redução desse torque.

A otimização dos passes de laminação, aliado ao controle da tração durante a introdução, mostrou-se eficiente na minimização da amplitude do torque inicial e no aumento da vida do pino de cisalhamento.

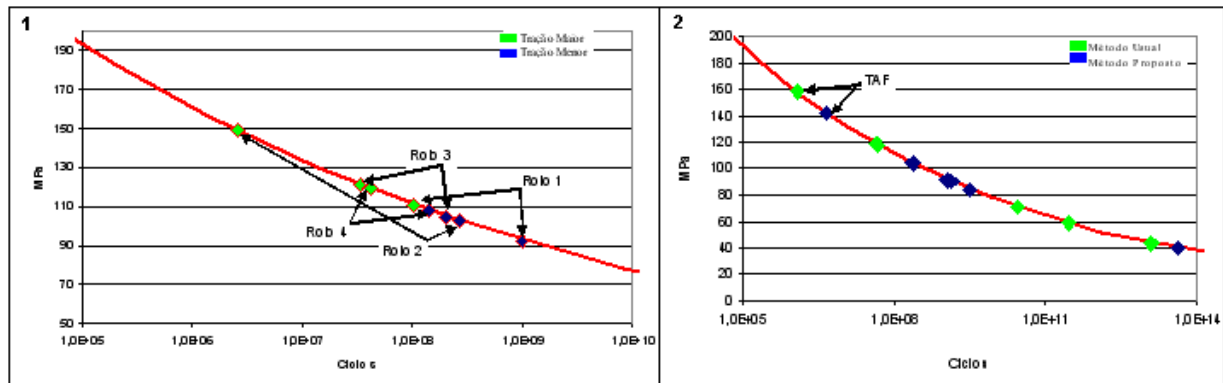


Figura 11 – Curva Tensão x Número de ciclos

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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
- [5] HONJYO, H; WATANABE, H. Impact loading and vibration of the slabbing mill. **Iron and Steel Engineer**. Mai 1975
- [6] IBA AG. **IbaPDA V6**. Alemanha, 10 out. 2005. Disponível em [www.iba-ag.com](http://www.iba-ag.com). Acesso em: 10 out. 2005
- [7] NEUROSOLUTIONS. **What is a Neural Network?** Disponível em [www.neurosolutions.com/products/ns/whatisNN.html](http://www.neurosolutions.com/products/ns/whatisNN.html) Acesso em 1 fev 2006
- [8] 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
- [9] PAWELSKI, O; LINDEMANN, F. Theoretische Betrachtungen zum Kaltwalzen von Breitband im Zusammenhang mit Betriebsmessungen an einem Vierwalzen-Umkehrgerüst. **Archiv für das Eisenhüttenwesen**, Düsseldorf, 1964.
- [10] PLAUT, R.L. **Laminação dos aços: tópicos avançados**. 3ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1984.
- [11] PLAUT, R.L. **Redes Neurais Artificiais aplicadas à laminação a frio**. Notas do treinamento realizado na Brasmetal Waelzholz. Diadema. 2006
- [12] TSELIKOV, A. I; NIKITIN, G.S; ROKOTYSN, S.E. **The theory of lengthwise rolling**. Tradução de V. Afanaseyev. 1.ed. Moscow: Mir Publishers, 1980.
- [13] 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: 13 fev 2006.