

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E TEÓRICA DO TORQUE NO LAMINADOR DE CHAPAS GROSSAS DA USIMINAS¹

José Sérgio de Oliveira²
Tulio Magno Fuzessy de Melo³
Paulo Roberto Cetlin⁴

Resumo

Atualmente, os aços da qualidade API-X70 são utilizados na maioria das obras de tubos de grande diâmetro, por apresentarem alto limite de resistência, alta tenacidade e boa soldabilidade. Sua produção utiliza o processo de laminação controlada e exige torques de laminação elevados em função das severas condições de processamento. Como resultado das elevadas cargas presentes na laminação desses aços no Laminador de Chapas Grossas, as árvores de transmissão (*spindles*) dos motores principais para os cilindros de trabalho recebem torques cuja amplitude aproxima-se do limite de resistência dessas árvores. O presente trabalho se propõe a medir o torque durante a laminação através de extensometria (*strain gage*), e comparar os valores obtidos com os cálculos através de equações matemáticas implementadas em simulador matemático desenvolvido pelo Centro de Tecnologia da Usiminas. Essa comparação deverá contribuir, no futuro, para o ajuste das equações utilizadas no modelo de controle do Laminador de Chapas Grossas, melhorando a previsão dos valores de torque dos passes de laminação.

Palavras-chave: Laminação controlada; Chapas grossas; Árvores de transmissão; Extensometria.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE TORQUE AT THE PLATE MILL IN USIMINAS

Abstract

API-X70 grade steels are presently being used in most of the production of large diameter pipes since they present high tensile strength, high toughness and good weldability. These steels are produced by the controlled rolling process which demands high rolling torques as a result of the severe processing conditions. Due to the high rolling loads associated to the production of these steels, the transmission shafts (*spindles*) from the main motors to the work rolls receive torques which can get close to their strength. The present work aims to measure this torque during the rolling passes of a API steel, through strain gages, comparing the values obtained with calculations using mathematical equations implemented in the numerical simulator developed by the Usiminas Technology Center. The results are expected to help future adjustment of the equations used in the control model of the Plate Mill, improving the prevision of torque values of the rolling passes.

Key words: Controlled rolling; Plate mill; Transmission shafts; Spindles; Extensometry; Strain gages.

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

² Engenheiro Mecânico, Especialista de Laminação de Chapas Grossas, Usiminas, Ipatinga, MG.

³ Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, D.Sc., Centro de Tecnologia da Usiminas, Ipatinga, MG.

⁴ Membro da ABM, D.Sc., Mestre e Engenheiro Mecânico. Professor Titular da Universidade Federal de Minas Gerais.

1 INTRODUÇÃO

A Linha de Laminação de Chapas Grossas da Usiminas, Unidade de Ipatinga, conforme *layout* mostrado na Figura 1, recebe e enforna as placas produzidas pelas Aciarias, depois de conferir seu peso e dimensões. O tempo e a temperatura nos fornos são determinados pelo projeto de qualidade de cada material. Após o processo de reaquecimento, as placas são laminadas, com o objetivo de se obterem as dimensões e propriedades mecânicas requeridas pelos clientes.

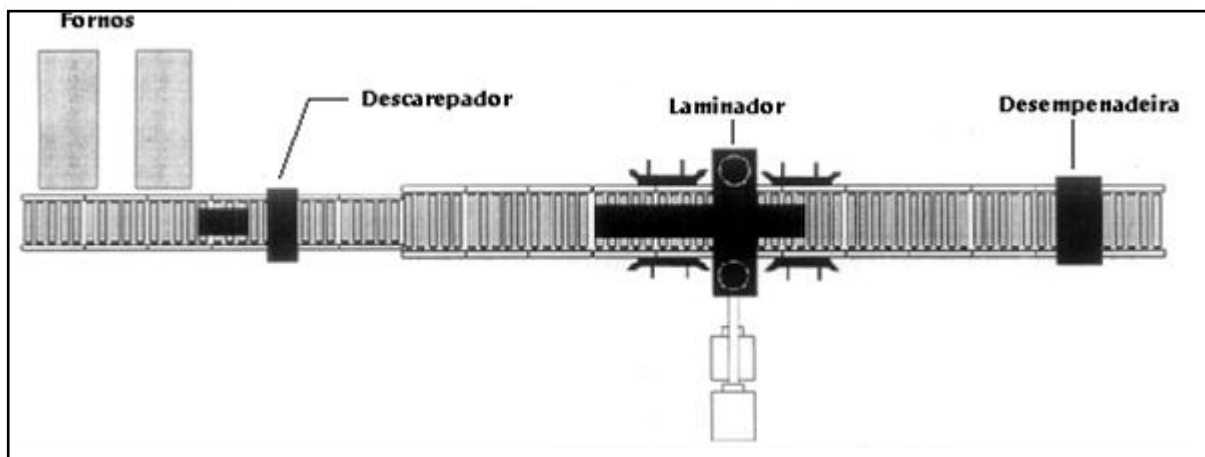


Figura 1 - *Layout* esquemático da Linha de Laminação de Chapas Grossas da Usiminas – Usina de Ipatinga.

As propriedades mecânicas finais dos aços laminados a quente são função da composição química do material e das condições de processamento. Essas variáveis determinam a evolução microestrutural do aço durante toda a laminação. A relação entre condições de processamento, microestrutura e propriedades mecânicas é estabelecida para cada tipo aço.

A produção destes aços, utilizando o processo de laminação controlada exige torques elevados em função das condições de processamento. Como resultado das elevadas cargas presentes na laminação de aços de alta resistência no Laminador de Chapas Grossas, as árvores de transmissão (*spindles*) dos motores principais para os cilindros de trabalho (Figura 2), recebem torques cuja amplitude aproxima-se do limite máximo de resistência dessas árvores.

Os *spindles* são componentes críticos no processo, pois sua falha provoca a parada do equipamento com conseqüente interrupção do processo de laminação. Por isso, em caso de falha, além do custo elevado de um novo componente, pode provocar paradas consideravelmente longas da linha.

Portanto, é de fundamental importância monitorar as solicitações desses *spindles* durante todo o processo de laminação, não permitindo atingir valores de seus limites de resistência. Para isso é necessário prever o torque aplicado em cada passe de laminação, além de outros parâmetros de controle importantes para o processo.

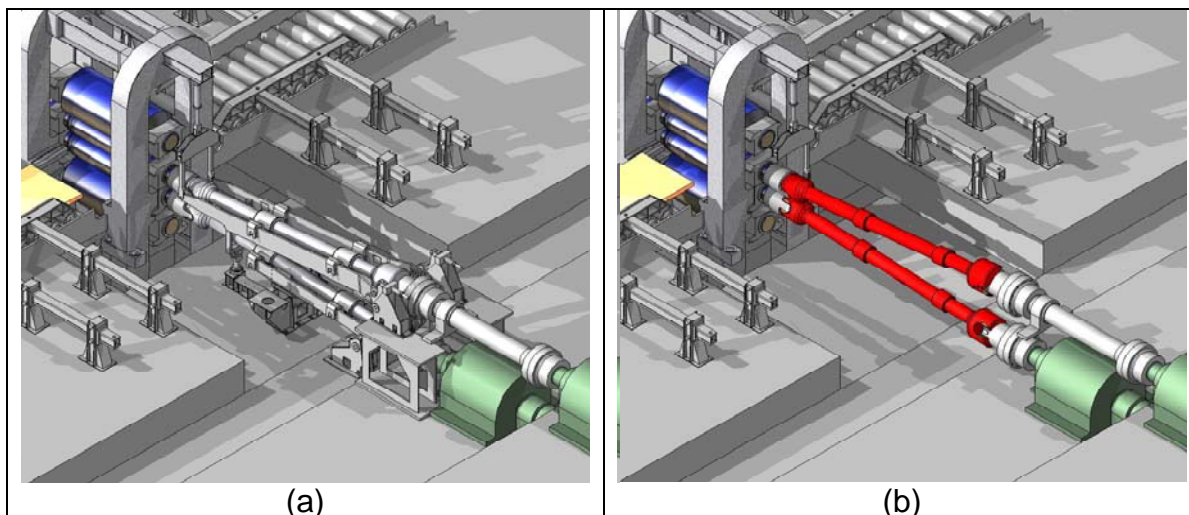


Figura 2 - Desenho da montagem do *spindle*: a) montagem completa e b) *spindle* em destaque sem os acessórios.

2 MATERIAIS E METODOS

2.1 Medições do Torque Utilizando *Strain Gage*

O Centro de Tecnologia Usiminas - Unidade de Ipatinga, juntamente com a Laminação a Quente, desenvolveu um sistema capaz de determinar o torque aplicado ao *spindle* durante o processo de Laminação de Chapas Grossas. Como resultado, foi preparado um sistema que se constitui na utilização de sensores de deformação, *strain gages*, em conjunto com equipamentos de aquisição e condicionamento de sinal, associados a um programa de processamento e apresentação de dados.⁽¹⁾

Nesse sistema, um *strain gage* é instalado na superfície de um dos *spindles* do Laminador de Chapas Grossas. A Figura 3 mostra a montagem do *strain gage*, alinhado ao eixo do cilindro, a fim de evitar falsas medições oriundas de componentes de flexão do eixo, e não valores puros de torque. Para se obter o melhor alinhamento possível, o ponto ideal de colagem do *strain gage* foi determinado através do levantamento topográfico do eixo do *spindle*.

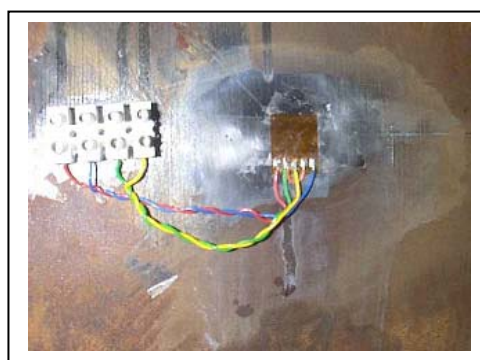


Figura 3 - *Strain gage* colado no eixo do *spindle* do laminador de chapas grossas.

O *strain gage* é conectado a um sistema de alimentação, por meio de uma bateria especial do tipo *Gell Cell*, e transmissão de sinais, instalado em uma caixa de proteção, adaptada ao eixo do *spindle* através de um suporte especialmente

desenvolvido para esse fim. Os equipamentos de transmissão instalados na caixa de proteção e a caixa acoplada ao eixo do *spindle* estão mostrados na Figura 4.



Figura 4 - Sistema de transmissão de dados para medição de torque usando *strain gages*. (a) Caixa de aquisição de dados e (b) montagem sobre o eixo do *spindle*.

Complementando o sistema de aquisição de dados, foi montado um conjunto de recepção, processamento e apresentação dos resultados, mostrado na Figura 5. Este sistema foi instalado na sala elétrica do Laminador de Chapas Grossas, a aproximadamente 25 metros do ponto de transmissão de dados.



Figura 5 - Conjunto de recepção, processamento e apresentação dos dados.

É importante destacar que os mesmos valores obtidos pelo sistema de aquisição de dados, a partir da porta serial do computador foram retransmitidos para um controle lógico programável, via uma placa com saída analógica de ± 5 volts. Dessa forma, foi possível armazenar esses valores em conjunto com as outras variáveis envolvidas na laminação. Tal procedimento se faz necessário para que a escala de tempo do sistema de medição de torque através do *strain gage* seja a mesma usada na medição da força de laminação e da corrente do motor elétrico acoplado ao *spindle*. Como os sensores *strain gage* são dispositivos elétricos (ponte de resistências), a deformação sofrida por eles gera um sinal variável de tensão (Volts). Contudo, o que se deseja obter é o valor instantâneo do torque aplicado ao *spindle* de laminação. Deste modo, o programa executa a conversão da tensão elétrica em torque, utilizando a seguinte equação:

$$T = \frac{V_0 \times \pi \times G \times R^3}{9800 \times (V \times K \times 500)} \quad (1)$$

Sendo:

T = Torque (tf x m);

G = Módulo de Rigidez à torção = $80,7 \times 10^9$ N/m²;

K = constante = 2,09;

V = Tensão (Volts);

V_0 = velocidade (m/s);

R = raio do spindle = 0,270 m.

2.2 Cálculo do Torque através do Simulador da Laminação de Chapas Grossas

Simuladores matemáticos *off line* são ferramentas de análise, controle e melhoria de processos, pois permitem prever os efeitos das variações de parâmetros operacionais no desempenho do equipamento e na qualidade dos produtos. Por isso, uma das ênfases da atividade de pesquisa e desenvolvimento de processos na Usiminas, na área de Laminação a Quente, tem sido o desenvolvimento destes *softwares*, dotando-os de interfaces amigáveis de fácil utilização pelo usuário.

A Figura 6 mostra um esquema da Laminação de Chapas Grossas da Usiminas, com as indicações das etapas do processo onde já foram desenvolvidos simuladores *off line*.⁽²⁾ Todos os simuladores dessa linha foram integralmente desenvolvidos com a base em conhecimento acumulado na própria Usiminas.

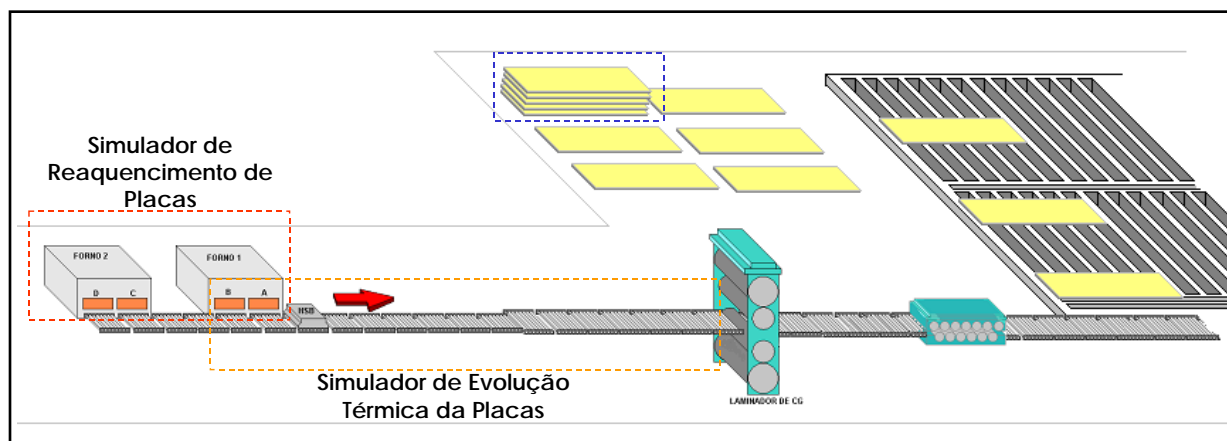


Figura 6 - Esquema da linha de chapas grossas e simuladores desenvolvidos.

O Simulador de Reaquecimento de Placas tem a função básica de calcular a curva de aquecimento da placa no interior do forno. Adicionalmente, ele permite a previsão da espessura da carepa formada e de parâmetros teóricos relativos à dissolução de elementos de microliga. Os resultados obtidos nessa simulação ajudam na otimização do processo em termos de consumo de combustível, produtividade e ajuste de propriedades mecânicas finais dos produtos.⁽³⁾ O Simulador da Evolução Térmica da Placa prevê a sua evolução térmica desde a saída dos Fornos de Reaquecimento até a entrada do laminador, representando um elo entre o simulador dos fornos e a laminação. Ele é baseado em um modelo bidimensional de cálculo de temperatura ao longo da espessura e da largura da placa. O perfil de temperatura inicial, usado como entrada de dados advém do simulador do processo de reaquecimento.

Além dos simuladores descritos, também foi desenvolvido um simulador do processo de Laminação de Chapas Grossas propriamente dito, baseado em modelos matemáticos de transferência de calor, de deformação e de força de laminação, ao longo de toda a escala de passes. Esse simulador é parametrizado, em função do *layout* da linha de laminação, de forma que possa ser aplicável às linhas de Laminação de Chapas Grossas de qualquer Usina. O módulo de cálculo de carga e torque desse simulador utiliza as seguintes equações, disponíveis na literatura:^(4,5)

$$T_{Def} = F_i \times R \quad (2)$$

Sendo:

T_{Def} = Torque de deformação calculado no passe (tf x m);

F_i = Força obtida no passe (tf);

R = Raio do cilindro de trabalho (mm).

$$T_{Atr} = F_i \times r_{Munhão} \times \frac{\mu}{1000} \quad (3)$$

Sendo:

T_{Atr} = Torque de atrito calculado no passe (tf x m);

$r_{Munhão}$ = Raio do munhão do cilindro de encosto (mm);

μ = Coeficiente de atrito.

$$T_{Cil} = T_{Def} + T_{Atr} \quad (4)$$

Sendo:

T_{Cil} = Torque calculado, aplicado ao cilindro no passe (tf x m).

2.3 Coleta de Dados

A parte experimental deste trabalho foi desenvolvida utilizando placas de aço API-X70 produzidas em escala industrial na Usiminas. Esse é um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) utilizado na fabricação de oleodutos e gasodutos.

O aço líquido foi produzido em convertedor de 160 t e lingotado continuamente em placas com dimensões da ordem de 250 mm de espessura, 1.900 mm de largura e 3.000 mm de comprimento. As placas foram reaquecidas a 1.523 K (1.250°C) por um período mínimo de 15.000 s (250 min) de encharque em forno contínuo do tipo *Walking Beam*. Posteriormente, as placas foram laminadas até a espessura de 25 mm, por processo de laminação controlada, em um laminador reversível de quatro cilindros.

Para a realização dos cálculos de torque, foi necessária a aquisição dos dados do processo, referentes às placas processadas no Laminador de Chapas Grossas para as quais foram coletados os sinais elétricos pelo sistema de aquisição do *strain gage*. Cada passe de laminação gerou um valor de torque calculado pelo simulador e outro medido através do sinal dos *strain gages*.

O trabalho foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa foram selecionadas vinte e uma placas e, durante sua laminação registraram-se os valores de velocidade de rotação dos spindles e de voltagem medida pelos *strain gages*, instalados no *spindle* do motor superior do laminador. A partir desses valores, calculou-se o torque medido, aplicando-se a equação (1). Na segunda etapa, utilizou-se o simulador da Laminação de Chapas Grossas para a determinação dos valores de torque calculados, através das equações (2) a (4). Nessas equações os valores de força de laminação foram aqueles registrados durante o processo. Um exemplo da interface do simulador, onde são colocados os dados para o cálculo dos parâmetros de

laminação, é mostrado na Figura 7. Finalmente, o torque calculado pelo simulador foi comparado com torque medido através dos *strain gages*. Para isso, foram tomados os valores de força e de voltagem em um mesmo instante dentro de cada passe de laminação.

Entrada de dados para simulação

Principal Tabelas Simular

Dados operacionais

Usina: Mestrado José Sérgio

Simulação por escala de passes | Simulação por qualidade

Tipo de laminação: Convenc. Controlada

Qualidade: APISLX70FSL2

Espessura da placa a frio: 239 mm

Largura da placa a frio: 1.895 mm

Comprimento da placa a frio: 2.400 mm

Espessura laminado: 25,60 mm

Largura do laminado: 3.906 mm

LC0001

Temperatura de patamar obt.: 0 °C

Temperatura acabamento Obt.: 0 °C

Desejada 0 N° passes: 32

Perda por carepa: 1,00 %

Tempo entre placas: 10 min

Tamanho de grão inicial: 100 μm

Temp. desenfornamento média: 1.213 °C

Temp. início laminação média: 1.203 °C

Composição da escala de passes

Passe	Gap (mm)	Red. (%)	Tempo no passe (s)	Tempo entre passe (s)	Direção do passe	Rotação cilindro (rpm)	Carga (t)	Tipo do passe	Descarep.	AGC
1	227,00	5,02	1,3	15,1	L	47	1447	D	1	1
2	207,00	8,81	0,9	5,9	T	42	3229	D	0	1
3	187,10	9,61	1,1	6,9	T	38	3358	D	0	1
4	167,10	10,69	1,1	6,7	T	40	3252	D	0	1
5	146,70	12,21	1,3	5,5	T	40	3345	D	0	1
6	127,10	13,36	1,5	6,3	T	40	3307	D	0	1
7	107,10	15,74	1,7	14,7	T	38	3521	D	0	1
8	110,20	0	1,3	1001,2	L	49	893	D	1	1
9	94,00	14,7	1,6	7,8	L	44	4769	A	0	1
10	89,10	5,21	1,8	6,1	L	42	5219	A	0	1
11	83,90	5,84	1,9	4,9	L	40	5548	A	0	1
12	78,90	5,96	2,1	11,9	L	38	5647	A	0	1
13	74,10	6,08	2,1	26,9	L	40	5668	A	0	1
14	69,90	5,67	2,1	9	L	41	5500	A	0	1

Perfil técnico | Equação de TME | Outras opções | Deformação

NNº	Centro	Medida
1	1122	1119
2	1182	1179
3	1203	1200
4	1209	1206

Manual Calculado por mod. anteriores

Composição química

	(%)		(%)
C	0,08	Cu	0,00
Min	14,40	Mo	0,00
Si	0,27	N	0,0000
P	0,000	Nb	0,041
S	0,0000	Ni	0,00
Al	0,000	Ti	0,013
Cr	0,02	V	0,051
B	0,0000		

Acabador

Diâm. médio cil. trabalho: 1.084 mm

Tipo cilindro trabalho: Ferro fundido micro ligado centrifugado - Af

Simular

Projeto de Linha: USINA 1 IPATINGA - situação ATUAL - 1 laminador - 11/2008

Ponto de referência da placa no 1º passe: 7.875 mm

Figura 7 - Interface principal de entrada de dados do módulo de simulação da laminação de chapas grossas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um exemplo típico dos resultados obtidos neste trabalho é apresentado na figura 8. Nessa figura são mostrados os valores de torque medidos, com o auxílio do *strain gage*, e calculados através do simulador do processo de laminação, para todos os passes de uma das placas laminadas. Observa-se que as evoluções dos valores de torque obtidas pelos dois métodos aqui comparados são bastante similares. Os valores de torque para os primeiros passes, conhecidos como passes de desbaste, estão entre os mais elevados, pois envolvem grandes deformações, embora o material encontre-se ainda em temperaturas mais altas. Após o último passe de desbaste, no qual o torque é o menor de toda a escala, começa o chamado acabamento, caracterizado por valores decrescentes de torque.

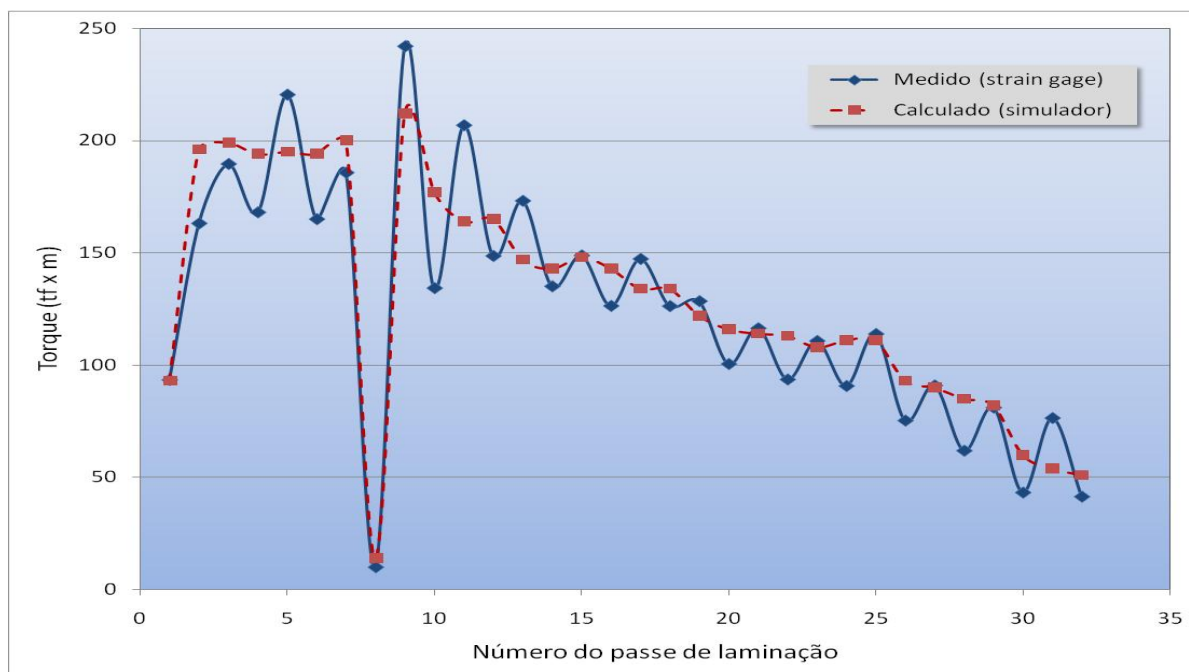


Figura 8 - Exemplo da evolução dos valores de torque calculados e medidos ao longo dos passes, para uma das placas laminadas neste trabalho.

Embora a tendência da evolução do torque medido e do calculado seja semelhante, ao longo da escala de passes, algumas tendências podem ser observadas quando se analisa a figura 8 com mais cuidado. Em primeiro lugar, os valores medidos com ajuda do *strain gage* apresentam uma oscilação, que não aparece nos valores calculados pelo simulador. Esse efeito pode estar ligado à sensibilidade do *strain gage*, capaz de acusar variações muito pequenas de deformação, que são convertidas, pelo sistema de processamento, em variações de torque. Uma forma de diminuir essas oscilações seria introduzir um filtro eletrônico no sistema de aquisição do sinal do *strain gage*. Outra opção é usar os valores originais, medidos diretamente pelo *strain gage*, e aplicar um filtro numérico nos dados já convertidos em valores digitais pela interface do sistema de aquisição.

Um exemplo do resultado da aplicação desse segundo procedimento, para o caso dos dados da figura 8, é apresentado na figura 9. Nesse exemplo, os dados originais sofreram suavização numérica através do cálculo de uma média móvel ao longo dos passes de desbaste e de acabamento. Verifica-se que a aplicação do método reduziu a oscilação dos valores de torque, sem afetar a tendência geral de evolução ao longo da escala de passes.

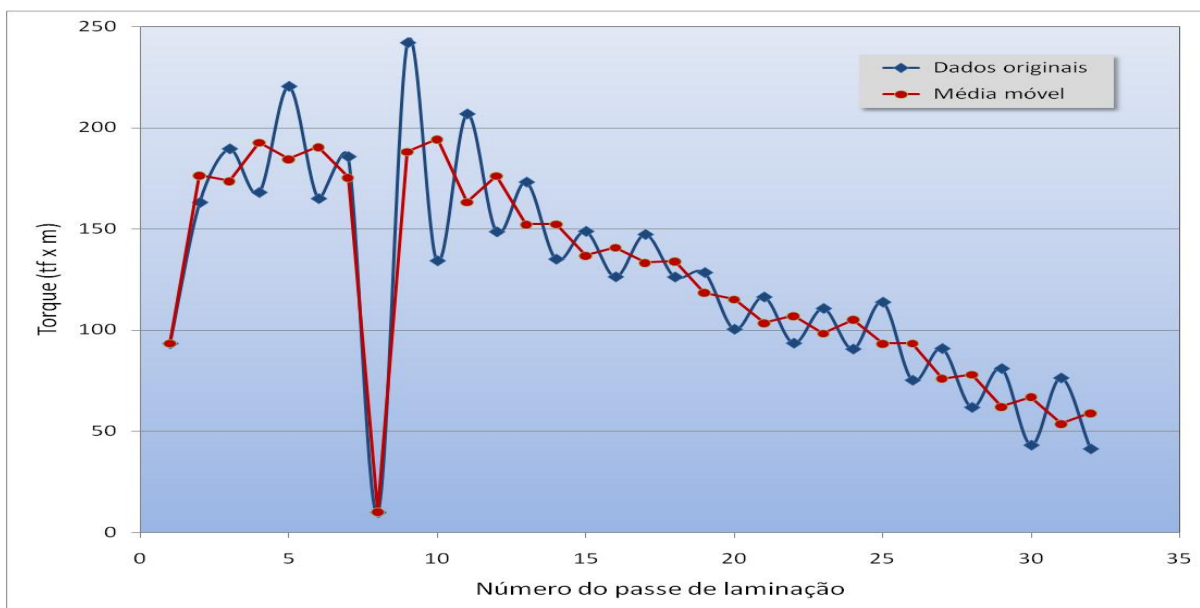


Figura 9 - Valores originais de torque medidos com auxílio do *strain gage* e corrigidos pela aplicação de média móvel.

O procedimento de suavização descrito acima, usando o cálculo de média móvel dos valores medidos por *strain gage* ao longo da escala de passes, foi aplicado para todas as placas laminadas neste trabalho. Os resultados assim obtidos, comparados aos valores calculados pelo simulador, são apresentados na Figura 10. Observa-se que os valores medidos e calculados seguem uma tendência linear, como indica o valor de R^2 igual a 0,92 para o ajuste à reta contínua mostrada na Figura 10. Contudo, essa reta possui inclinação maior do que seria esperado, caso os valores de torque obtidos pelos dois métodos fossem iguais. Na Figura 10, essa relação esperada é mostrada como uma reta tracejada.

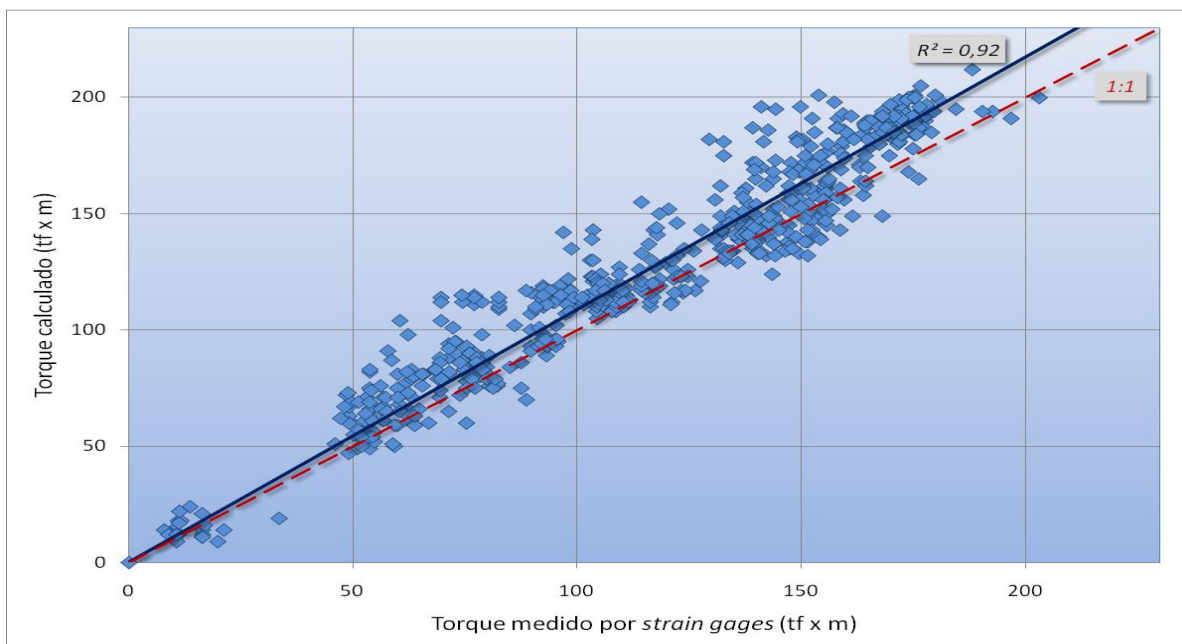


Figura 10 - Comparação entre os valores de torque calculados pelo simulador e medidos com auxílio do *strain gage*, para todas as placas utilizadas neste trabalho. Os valores medidos pelo *strain gage* foram numericamente suavizados, através da técnica de média móvel.

Alguns fatores que poderiam estar relacionados ao comportamento mostrado na Figura 10 serão discutidos a seguir. Em primeiro lugar, a equação aplicada para o cálculo do torque a partir do sinal emitido pelo *strain gage* (equação 1) utiliza um valor de módulo de rigidez obtido na literatura (80,7 GPa).⁽¹⁾ Um aço com esse valor do Módulo à torção teria um Módulo à tração da ordem de 160 GPa, que é um valor menor que aquele geralmente observado em aços para a construção mecânica, como o usado no *spindle* do Laminador de Chapas Grossas da Usiminas.⁽²⁾ O valor real desse Módulo poderia ser levantado através de ensaios de tração em corpos de prova retirados do *spindle*, mas isso teria que ser feito com peças fora de uso, já que o ensaio é destrutivo. De qualquer forma, se o valor real for realmente maior que o que foi usado neste trabalho, os valores de torque medidos pelo *strain gage* seriam mais elevados e, provavelmente, mais próximos daqueles calculados pelo simulador. Já no cálculo do torque realizado pelo simulador da Laminação de Chapas Grossas,^(2,3) são usadas duas equações, uma para o torque de deformação (equação 2) e outra para o torque de atrito nos munhões (equação 3). Nessas duas equações foram usados os valores reais de força registrados durante a laminação das placas aqui analisadas. Porém, a equação do torque de atrito usa um coeficiente de atrito obtido na literatura,^(2,3) que pode ser diferente do valor real. Esse valor, contudo, é muito difícil de ser medido experimentalmente para as condições de laminação real, motivo pelo qual se prefere usar um valor de referência.

Finalmente, deve-se fazer um último comentário sobre a utilização das equações propostas para avaliação de torque em condições reais de laminação. Para que se possa comparar os valores obtidos pelos dois métodos, é necessário que todos os dados operacionais sejam levantados no mesmo instante ou na mesma posição dentro da escala de passes avaliada. Esse fator pode ser crítico, uma vez que alguns valores, principalmente a força de laminação e velocidade, sofrem variações significativas ao longo de cada passe de laminação.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram comparados os valores de torque, obtidos por dois métodos distintos, para a laminação de placas de um aço de alta resistência e baixa liga. Os métodos usados para a determinação do torque foram a extensometria (*strain gages*) e cálculos teóricos a partir dos valores de força de laminação. Essa comparação permitiu as seguintes conclusões:

- É possível medir o torque de forma indireta, através de *strain gages* instalados na superfície dos eixos de transmissão (*spindles*) entre os motores e os cilindros de trabalho do Laminador de Chapas Grossas.
- Os valores medidos por *strain gages* e aqueles calculados pelo modelo usado no Laminador da Usiminas seguem a mesma tendência ao longo das escalas de passes analisadas. A relação entre esses valores pode ser descrita de forma satisfatória por uma reta, com um bom coeficiente de correlação.
- Oscilações nos valores obtidos através do *strain gage*, inerentes à sua alta sensibilidade, podem ser corrigidas através de métodos numéricos de suavização de dados, sem alterações na tendência geral ao longo dos passes de laminação.
- Os valores calculados pelas equações usadas neste trabalho tenderam a ficar acima dos valores medidos. Contudo, o ajuste de constantes nas equações usadas, tanto pelo modelo do Laminador quanto para a conversão do sinal

elétrico do *strain gage* em torque, pode ser suficiente para corrigir as diferenças observadas.

REFERÊNCIAS

- 1 Diniz, G. G, Goncalves, M. M. F - Modelo para Controle de Torque na Árvore de Transmissão do Laminador de Chapas Grossas - Contribuição Técnica ao VI Seminário de Automação de Processos da ABM; Curitiba, PR, outubro de 2005.
- 2 GIACOMIN, C. N., SANTOS, A. A., SOUZA, A. L. – Uso de Simuladores Computacionais como Ferramenta de Análise de Processo na Laminação a Quente da Usiminas - IX Seminário de Automação de Processos; Vitória, ES, 01 a 03 de outubro de 2008.
- 3 SANTOS, A. A., SCHIAVO, C. P., GIACOMIN, C. N. - Aplicativo de Simulação do Processo de Reaquecimento de Placas em Fornos de Viga Móvel - 44º SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS DA ABM, 10, 2007, Campos de Jordão. São Paulo: ABM, 2005. 1 CD.
- 4 SIMS, R.B. – Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills – Pproc. Instn. Mech. Engrs., 1954, 168, 191-219.
- 5 SAITO, Y – Analysis of “Peening Effect” on Mean Roll Pressure Torque – Journal of the Japan Society for Tech. and Plast. Vol. 11 nº 117, 1970.