

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DO GRADIENTE DE TEMPERATURA EM UM CILINDRO DE LAMINAÇÃO INSTRUMENTADO¹

Ediguer Enrique Franco²
Adriana Gómez³
Luiz Gustavo Lima⁴
Leonardo Villabón⁵
Cláudio Eduardo Rocha dos Santos⁶
Amilton Sinatora⁷

Resumo

Neste trabalho estudou-se o gradiente radial de temperatura de um cilindro de laminação em um laminador piloto nas condições, em funcionamento e simulando um acidente denominado “parada de chapa”. Este estudo objetivou validar a simulação feita por elementos finitos bem como um modelo analítico. Foi instrumentado um cilindro de laminação de 250 mm de diâmetro, com dois termopares de rápida resposta a 1.8 e 2.8 mm de profundidade a partir da superfície. Este arranjo experimental permitiu a determinação de temperaturas, em função do tempo na laminação, bem como em um experimento de parada de chapa por 34,5 s nas condições de laminação. O acidente de parada de chapa foi simulado usando um software comercial de elementos finitos e um modelo analítico de transferência de calor foi utilizado para estimar o gradiente de temperatura no interior do mesmo nesta condição. Foram obtidas curvas que mostram a evolução da temperatura do cilindro, em trabalho e com parada de chapa. Os modelos analítico e numérico ajustaram-se entre si bem como com os resultados experimentais da parada de chapa. O valor máximo de 370°C no teste da parada de chapa foi explicado pela presença da camada de carepa. Foi determinada a temperatura na superfície e nos demais pontos do raio do cilindro. Com os resultados experimentais foi possível ajustar o modelo por elementos finitos e com este modelo espera-se prever temperaturas ao longo do raio de outros cilindros em outras condições de laminação.

Palavras-chave: Laminação; Gradiente de temperatura; Modelação.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE TEMPERATURE GRADIENT IN AN INSTRUMENTED ROLLING ROLL

Abstract

The radial temperature gradient of a work roll was studied in an experimental rolling mill during hot rolling and in a “stopped slab” test. The main of this study was to validate both the finite elements simulation and an analytical model. A work roll with diameter 250 mm was instrumented with two thermocouples of fast response which were placed at 1.8 mm and 2.8 mm beneath the surface. This experimental arrangement made possible to determinate the temperature based on time, in the hot-rolling process and in the stopped slab test during 34.5 s in the hot-rolling conditions. The process of stopped slab was simulated by using a commercial finite elements software. An analytical model for heat transfer was used in order to estimate the temperature gradient within the roll in the stopped slab condition. Graphics showing the evolution of temperature within the roll during work and stopped slab conditions were obtained. A good fit was found between the numerical and the analytical model, as well as with the experimental results of the test with the stopped slab. The maximum value of 375°C in the stopped slab test was explained due to presence of surface oxide. The temperatures at the surface and through the radius roll were determined. The finite elements model was fitted by using the experimental results, it is hoped to use this model to predict radial temperatures of other rolls and when using others hot rolling conditions.

Keywords: Hot rolling; Temperature gradient; Modelation.

¹ Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.

² Doutorando em Engenharia Mecatrônica Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP)

³ Doutora em Engenharia de Materiais EP-USP

⁴ Estudante de Engenharia Mecânica, EP-USP

⁵ Mestre em Engenharia Mecânica, Aços Villares

⁶ Engenheiro Metalurgista, Aços Villares

⁷ Professor Titular, Engenharia Mecânica, EP-USP

1 INTRODUÇÃO

Atualmente se observa um aumento acelerado da produção de aço no mundo, justificado principalmente por um significativo aumento do consumo e produção de países como Brasil, Rússia, Índia e China, grupo que no ano de 2006 produziu aproximadamente 568 milhões de toneladas de aço bruto, representando 46% da produção mundial.

Com este aumento da produção de aço toda a cadeia siderúrgica é pressionada ao crescimento, desta forma, todo o ferramental utilizado na conformação dos produtos siderúrgicos também é fortemente pressionado a crescer para atender essa demanda. Um insumo de grande importância neste cenário atual são os cilindros de laminação, que são ferramentas indispensáveis no processo de produção de produtos planos e longos.

Na Figura 1 se apresenta de forma esquemática a evolução do crescimento da produção bruta de aço no mundo.

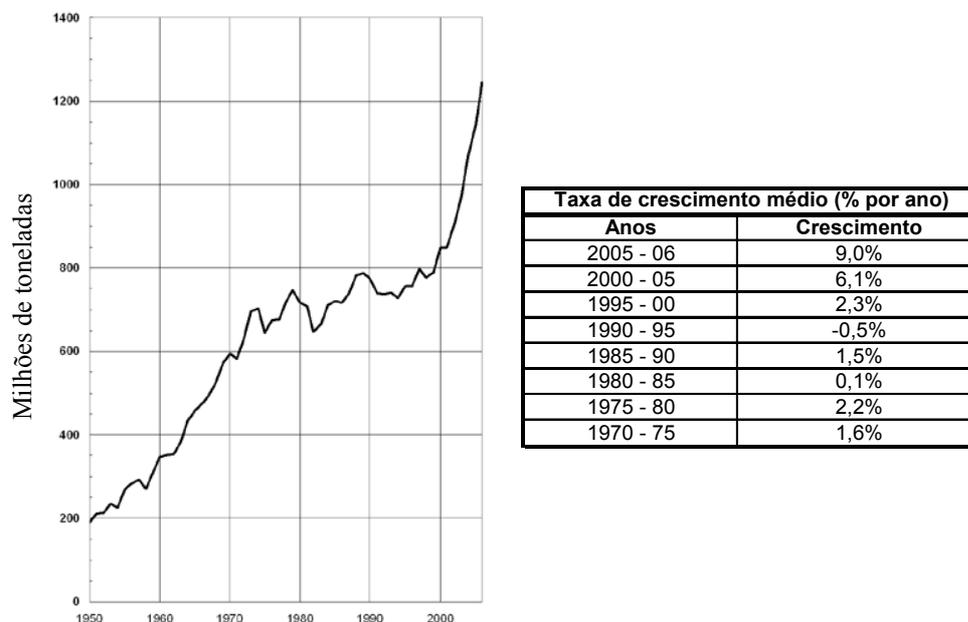


Figura 1. Crescimento da produção de aço bruto mundial entre os anos 1950 e 2006.⁽¹⁾

Neste ambiente extremamente competitivo os fabricantes de cilindros buscam continuamente desenvolver novos materiais que maximizem a produção dos laminadores, centrando seus esforços em aplicabilidade e manutenção da superfície de contato do cilindro durante operação, visando aumento do tempo em serviço.

A principal dificuldade no desenvolvimento de cilindros de laminação é conseguir reproduzir em laboratório todas as solicitações às quais os cilindros são submetidos em operação. Para simplificar o problema, na hora de definir o tribosistema, se faz necessário isolar os mecanismos de dano e estudar as variáveis de forma independente, buscando desenvolver materiais que de forma simultânea apresentem resistência necessária às diversas solicitações às quais são submetidas durante os processos de laminação, desta forma, melhorando o rendimento, qualidade e produtividade do laminador.

O objetivo do presente trabalho é a determinação dos gradientes de temperatura aos quais são submetidos os cilindros em operação, necessários no estudo das variações no estado de tensões do cilindro, tensões que são

responsáveis por formar na superfície do cilindro uma malha de trincas térmicas que podem comprometer a seqüência de laminação ou até mesmo a peça.

Espera-se que o trabalho contribua para futuras pesquisas que busquem otimizar as propriedades e características microestruturais dos cilindros, para alcançar a máxima resistência às solicitações durante operação.

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Um cilindro de laminação de 250 mm de diâmetro foi instrumentado com dois termopares de rápida resposta com o intuito de medir a temperatura no interior do mesmo. O cilindro foi fabricado especialmente para ser usado no laminador piloto do Laboratório de Processos e Produtos Metalúrgicos e Cerâmicos (LMMC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (IPT).

Com a finalidade de fazer a instrumentação do cilindro, o mesmo possui uma cavidade axial interconectada com um furo radial escalonado com saída à superfície no ponto central. Nesse furo é colocado um inserto de aço especialmente usado num dos seus extremos para reproduzir a curvatura exata da superfície do cilindro e no outro foram feitos dois buracos de 2 mm de diâmetro cujo fundo ficou a 1,8 mm e 2,8 mm (no ponto central) da superfície. Nesses pequenos furos foram instalados os termopares, usando nitreto de alumínio (AlN) em pó para preencher os espaços vazios e melhorar a condutividade térmica entre o inserto e o termopar.

Um problema importante neste tipo de medição é o fato do cilindro estar em constate rotação, impossibilitando assim a conexão direta dos fios elétricos. Neste trabalho, esse problema foi solucionado usando um conector rotativo (Mercotac 830) constituído por placas condutoras imersas em mercúrio. Esse dispositivo apresenta várias vantagens: baixo ruído elétrico e pequena resistência elétrica sendo especialmente desenvolvidos para solucionar o problema da transmissão de sinais, além disso, são compactos e de fácil montagem.

Por outro lado, os termopares podem ser descompensados pelo conector rotativo e os fios que levam o sinal desde o conector até o sistema aquisição de dados. Esse problema foi solucionado usando amplificadores ou *drivers* (AD595 da Analog Devices) especialmente desenvolvidos para captar o sinal dos termopares, possuem referência interna (*ice point compensation*) e geram uma saída analógica de 10 mV/°C.

Finalmente, a digitalização dos sinais é feita pelo sistema de aquisição de dados (CompaqDAQ da National Instrument) e levados na forma de arquivos de texto ao computador pela porta USB (*Universal Serial Bus*) para serem processados posteriormente.

Na Figura 2(a) é mostrado um esquema do arranjo experimental usado para a medição das temperaturas, na Figura 2(b) é mostrada uma foto do conector rotativo já instalado no laminador mostrando os terminais de saída dos sinais.

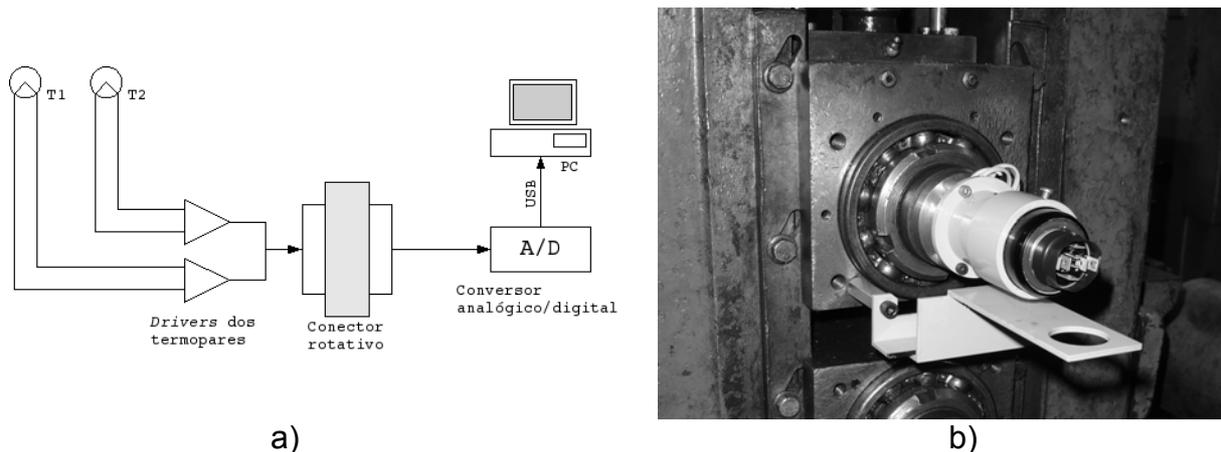


Figura 2. (a) Esquema do arranjo experimental usado e (b) imagem do sistema instalado no laminador mostrando os terminais de saída do conector rotativo.

Na Figura 3(a) pode ser observado o cilindro instrumentado junto com o inserto contendo os termopares e o furo radial escalonado onde o inserto é encaixado. Na Figura 3(b) é mostrado o extremo do cilindro, do lado do furo axial, por onde saem os fios de extensão dos termopares que são conectados aos *drivers* (amplificadores) e a saída dos *drivers* ao conector rotativo. Além de levar os sinais da temperatura fora da máquina, o conector rotativo também transmite a energia necessária para o funcionamento do circuito dos *drivers*.

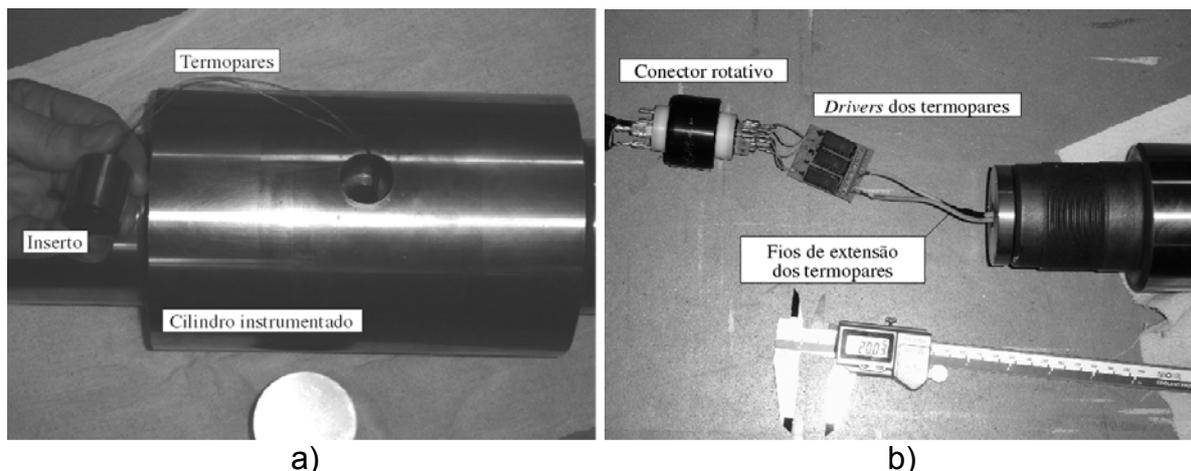


Figura 3. Imagem do cilindro instrumentado mostrando (a) o inserto com os termopares instalados e (b) os fios de extensão dos termopares, os driver e o conector rotativo.

Os termopares usados foram de isolamento mineral de 1,5 mm de diâmetro tipo K (chromel-alumel), com uma faixa de medição de 0 a 1260°C e um erro limite de $\pm 2,2^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$ segundo o fornecedor (Exacta Indústria e Comércio de Sensores Ltda.).

Os testes realizados consistiram na medição da temperatura em regime de trabalho. Devido à impossibilidade de alimentar o laminador piloto de forma contínua, testes com alimentação manual foram realizados. Foram laminadas chapas de aço AISI 1020 aquecidas até 1.000°C e reduzida sua espessura até 30% do valor inicial.

Também foi realizado um teste de parada de chapa que consistiu em encostar o inserto, por um tempo de 34,5 s na chapa quente, depois retirá-lo e deixar resfriar. A idéia desse teste foi obter dados do fenômeno de aquecimento / resfriamento sob condições conhecidas, já que o teste de laminação é muito complexo, devido à alimentação manual, e não é possível conhecer com precisão os tempos em que o

inserto encosta-se à chapa. Por outro lado, o teste controlado de parada de chapa fornece informação que permite calibrar o modelo analítico e assim extrapolar a temperatura a outros pontos do raio do cilindro, incluída a superfície. Esses resultados também servem para calibrar o modelo por elementos finitos que permite reproduzir em boa medida o processo de laminação.

2.1 Modelo Analítico

A transferência de calor entre a chapa e o cilindro de laminação é um problema tridimensional, embora, analisando uma seção pequena do cilindro e supondo que o perfil de contato é simétrico com respeito ao eixo radial do cilindro, o problema pode ser abordado unidimensionalmente. O modelo analítico utilizado por Stevens, Ivens e Harper,⁽²⁾ faz a abordagem do problema supondo que o cilindro e a chapa são dois corpos planos que estão a diferentes temperaturas, e são unidos repentinamente no tempo $t=0$, além disso, considera que estão separados por uma camada isolante. Essa camada isolante modela a carepa ou camada de óxidos formada pela reação do ar (oxigênio) com a superfície quente do aço, este fenômeno possui um papel importante na evolução da temperatura no cilindro, como será mostrado posteriormente.

A temperatura no interior do cilindro a uma distancia x a partir da superfície e em função do tempo (t) é dada por:

$$T_R(x,t) = T_0 + (T_S - T_0) \left[\frac{H\sqrt{\alpha_R}}{Ak_R} \right] \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_R t}} \right) - \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha_R t}} + A\sqrt{t} \right] e^{\left(\frac{Ax}{\sqrt{\alpha_R}} + tA^2 \right)} \right\}, \quad (1)$$

onde T_0 e T_S são a temperatura inicial do cilindro e a temperatura da chapa, respectivamente, a é a difusividade térmica, H é a condutância térmica da camada isolante, k é a condutividade térmica e os subscritos R e S fazem referência ao cilindro e a chapa, respectivamente. O fator A é:

$$A = \frac{H}{k_R k_S} \left[k_R \sqrt{\alpha_S} + k_S \sqrt{\alpha_R} \right] \quad (2)$$

e erfc é o complemento da função erro dada por:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt. \quad (3)$$

Como é bem sabido, a inércia térmica apresentada pelos termopares induz a erro quando são feitas medições dinâmicas de temperatura. Esse erro consiste em um atraso temporal entre a temperatura real monitorada e a saída elétrica do termopar. Existem vários modelos que levam em consideração esse atraso, dependendo principalmente do tipo de termopar utilizado, sendo que para os termopares de baixa inércia usados neste trabalho um modelo de primeira ordem é adequado.⁽³⁾

2.2 Modelo por Elementos Finitos

Para a simulação numérica do processo de parada de chapa, foi utilizado o software comercial ABAQUS. Inicialmente, foram definidas as geometrias de cada

um dos corpos em contato (chapa coberta pela camada de óxido de ferro e cilindro), conforme as medidas das peças utilizadas no arranjo experimental (raio do cilindro igual a 250 mm, espessura da chapa igual a 10 mm). Foi definido um contato térmico entre as peças, e foram inseridos no programa os valores de: condutância térmica, condições do meio (coeficiente de convecção e temperatura ambiente), assim como as propriedades de cada um dos materiais utilizados. Os valores numéricos dos parâmetros acima citados são fornecidos nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Dados dos materiais utilizados. ⁽⁴⁾

	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (W/kg.K)	Emissividade
Aço AISI H13 (Cilindro)	28,6	600	0,83
Aço AISI 1005 (Chapa)	51,0	1400	-
Óxido de ferro	3,2	775	0,73

Tabela 2. Parâmetros de simulação. ⁽⁵⁾

Coeficiente de convecção (W/m ² K)	20
Condutância térmica (W/m ² .K)	2500
Temperatura Ambiente	298 K (25°C)

A última etapa foi à geração da malha. Para facilitar essa tarefa, supôs-se a placa plana, diminuindo a superfície de contato em relação à que seria observável no processo real. Essa diminuição foi contornada por um parâmetro do programa, o qual permite supor em contato pontos que estejam a uma determinada distância, de modo que a área de contato no modelo é igual à que seria, no caso de uma placa deformada pela ação do cilindro. A malha utilizada, mais refinada na região de contato, é mostrada na Figura 4.

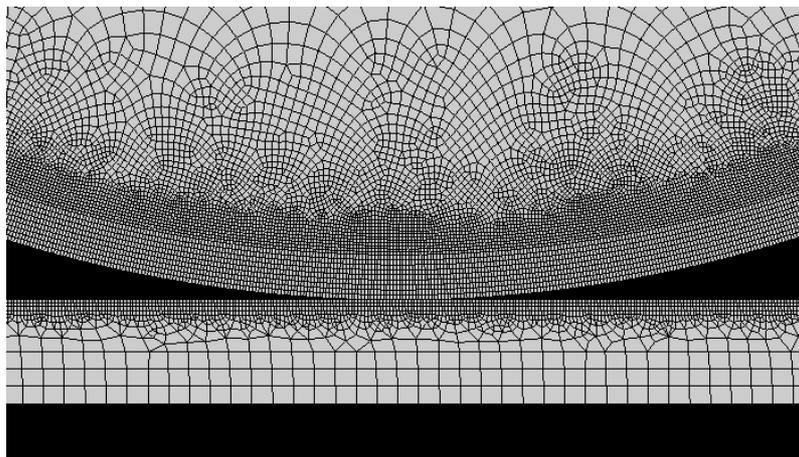


Figura 4. Malha usada na análise por elemento finitos.

Foram assumidas algumas hipóteses simplificadoras: a modelagem do processo foi bidimensional, sendo consideradas desprezíveis as trocas de calor na direção do eixo do cilindro. Além disso, a temperatura inicial do cilindro foi considerada uniforme, ou seja, sem gradientes internos de temperatura, e a camada de óxido foi suposta uniforme sobre a chapa, com espessura de 1 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 são mostrados os resultados das temperaturas medidas para os dois termopares (linha sólida), e as temperaturas calculadas com o modelo analítico (linha tracejada), assim como o modelo analítico levando em conta o atraso nos termopares (linha traço-ponto). Com o modelo analítico foi calculado somente o ciclo de aquecimento com o intuito de ter uma idéia da temperatura final alcançada. Pode-se observar que a correção do atraso dos termopares permitiu um melhor ajuste entre os dados experimentais e o modelo analítico.

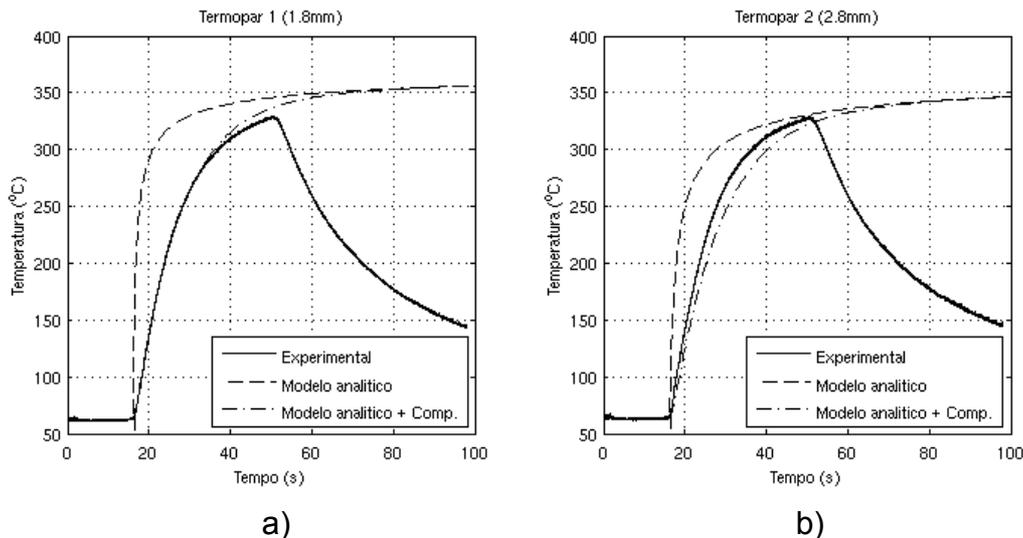


Figura 5. Temperatura experimental e teórica obtidas nos pontos (a) 1.8 mm e (b) 2.8 mm a partir da superfície.

A Figura 6 mostra a evolução da temperatura para oito pontos no interior do cilindro, calculados a partir do modelo analítico. É reproduzido o mesmo ensaio mostrado na Figura 6 para valores fora do ponto medido com o termopar. Foram usados os resultados do termopar 1 (1.8 mm) para ajustar o modelo. Como é esperado, a temperatura aumenta rapidamente nos pontos perto da superfície e mais lentamente no interior. Foi obtido um valor máximo de 375°C, esse valor é alcançado mais rapidamente pelos pontos próximos à superfície. O modelo analítico prediz que todos os valores aproximam-se assintoticamente a esse valor máximo, embora, na prática isso é válido somente numa pequena região perto da superfície do cilindro.

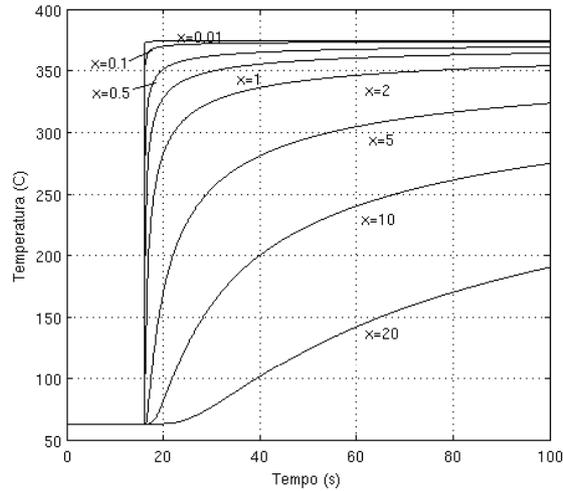


Figura 6. Evolução da temperatura em função da profundidade calculada com o modelo analítico.

Esse valor máximo atingido, baixo se comparado com a temperatura da chapa, pode-se explicar a partir da camada de óxidos (carepa) formados na superfície da chapa pelo contato com o ar. Essa camada funciona como isolante térmico, devido a sua condutividade térmica ser de uma ordem de grandeza menor que a condutividade térmica do aço e seu calor específico aproximadamente à metade.

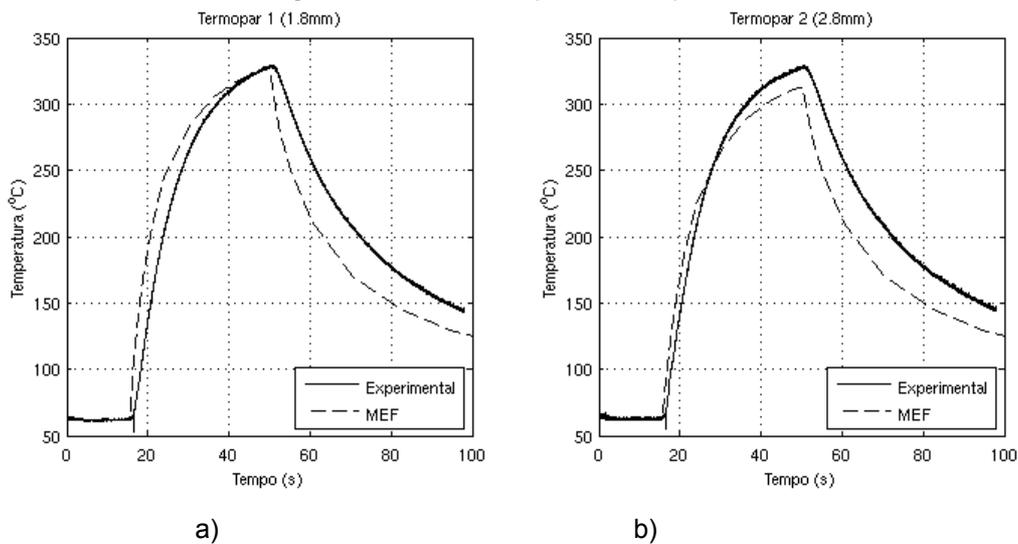


Figura 7. Simulação por elementos finitos do ensaio de parada de chapa.

A Figura 7 mostra os resultados da simulação por elementos finitos do ensaio de parada de chapa, comparados com os resultados experimentais. Obteve-se um ajuste aceitável entre os dois casos, mostrando diferenças máximas de aproximadamente 10°C no ciclo de aquecimento, já no ciclo de resfriamento a diferença foi maior.

Na simulação por elementos finitos do ciclo de resfriamento existe maior dificuldade na reprodução das condições reais. No modelo implementado para parte do cilindro correspondente à região de estudo, onde estão localizados os termopares, e a chapa ficam em contato um determinado tempo e depois supõe-se que a totalidade do cilindro se resfria ao ar. Na realidade, a natureza do processo de laminação faz que quando o inserto com os termopares não esteja encostado na

chapa, uma outra parte do cilindro pode estar em contato e, portanto, sendo aquecida. Além disso, a temperatura do ambiente aumenta devido ao processo de laminação.

Na Figura 8 são mostrados os resultados experimentais obtidos num teste de laminação, onde duas chapas foram laminadas consecutivamente. É possível ver os sucessivos picos de aquecimento, correspondentes a cada vez que o inserto fica em contato com a chapa quente. O cilindro tinha uma temperatura inicial de 25°C, que no começo da segunda laminação subiu a perto de 60°C. Desta maneira, a temperatura no interior do cilindro aumenta paulatinamente com o tempo de trabalho até atingir um valor máximo, onde a quantidade de calor entrando e saindo por unidade de tempo é igual. Esse valor máximo, que também depende da profundidade sendo maior na superfície, é importante para determinar o estado micro-estrutural do cilindro em condições de trabalho e, portanto, o mecanismo de refrigeração necessário.

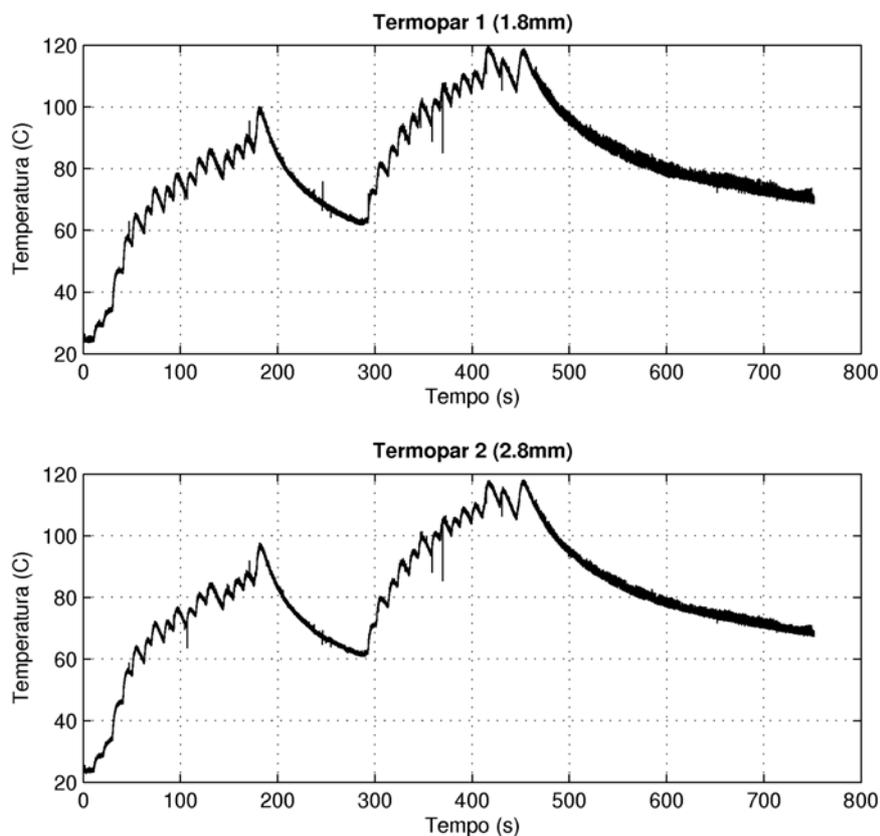


Figura 8. Resultados experimentais obtidos num ensaio de laminação.

A simulação dos resultados da laminação requer uma modelagem mais completa do fenômeno, levando em conta as rotações do cilindro e uma completa análise de todas as perdas de calor, principalmente pelo modelamento do resfriamento, onde já não é a condução térmica o principal mecanismo de troca de calor.

4 CONCLUSÕES

O sistema de medição desenvolvido permite o monitoramento da temperatura no interior do cilindro de laminação.

O ensaio de parada de chapa permitiu calibrar o modelo analítico, sendo possível obter as temperaturas em outros pontos. O modelo permitiu estimar a temperatura máxima alcançada na superfície.

Foi evidenciado que a camada de óxidos que se forma sobre a chapa tem grande influência na evolução da temperatura no cilindro.

Os resultados experimentais permitiram validar o modelo por elementos finitos, melhorando sua confiabilidade ao ser aplicado em outros casos.

Este modelo servirá de base para simulações da evolução da temperatura nos cilindros em condições reais de trabalho.

Com o modelamento das temperaturas será possível estabelecer as variações no estado de tensões, aos quais são submetidos os cilindros em operação, e assim, projetar novos materiais e processos (ex. refrigeração) que possam minimizar os danos e melhorar a produtividade do laminador através da diminuição dos tempos de troca de cilindros.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Processos e Produtos Metalúrgicos e Cerâmicos (LMMC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (IPT), e principalmente ao Dr. Mário Boccalini Júnior por permitir a utilização do laminador piloto, e à Sandra Munarim pela operação do laminador durante os ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS

- 1 INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE (IISI). Disponível em: <http://www.worldsteel.org>. Acesso em: 29 jun. 2007.
- 2 STEVENS, P. G.; IVENS, K. P.; HARPER P. Increasing work-roll life by improved roll-cooling practice. *Journal of the Iron and Steel Institute*, vol. 209, p. 1-11, 1971.
- 3 MICHALSKI, L.; ECKERSDORF, K.; MCGHEE, J. *Temperature Measurement*, England: John Wiley & Sons, 1991. 514 p.
- 4 MATWEB material property data. Site designed and maintained by Automation Creations, Inc. Disponível em: <http://www.matweb.com>. Acesso em: 11 jun. 2007.
- 5 PHANIRAJ, M.P.; BEHERA, B.B.; LAHIRI, A.K. Thermo-mechanical modeling of two phase rolling and microstructure evolution in the hot strip mill Part I. Prediction of rolling loads and finish rolling temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 170, p. 323–335, 2005.
- 6 ECKERSDORF, K.; MICHALSKI, L. Dynamics of the low inertia temperature sensors under the condition of the radiant heat exchange. In: SYMPOSIUM ON TEMPERATURE MEASUREMENT IN INDUSTRY AND SCIENCE, TEMPMEKO-84, 1984. Proceedings of 2nd Symposium IMEKO TC-12, Kammer der Technik, Suhl, p. 305-314, 1984.