

ANÁLISE COMPARATIVA DA PERDA TÉRMICA DE PLACAS PARA *HOT CHARGING* QUANDO TRANSPORTADAS E ESTOCADAS COM E SEM PROTEÇÃO ISOLANTE¹

Bruno Alves Resende²
Alexandre Rodrigues Sirimarco³

Resumo

Dois modelos matemáticos foram desenvolvidos, utilizando a técnica de elementos finitos, para avaliar a perda de temperatura de placas a serem enfiadas a quente (*hot charging*) quando transportadas e estocadas com e sem um sistema de isolamento térmico. Essa avaliação visou dar subsídios para um estudo de viabilidade econômica da aplicação de isolamento térmico das placas com o intuito de aumentar a temperatura e a participação de *hot charging* na linha de Laminação de Tiras a Quente da Usiminas. A validação do modelo desenvolvido revelou um erro médio de 12°C quando comparados os valores calculados com os valores medidos na linha de produção. As simulações realizadas mostraram que o conjunto de placas empilhadas e isoladas termicamente, desde o pátio da Aciaria até o enfiamento na Laminação de Tiras a Quente, apresentou perda térmica 34% menor que na condição de resfriamento sem isolamento. Foi possível observar ainda que a face externa do sistema de isolamento apresentou temperatura da ordem de 50°C, valor que não compromete sua operacionalidade.

Palavras-chave: Modelagem matemática; Elementos finitos; *Hot charging*.

COMPARATIVE ANALYSIS OF HEAT LOSS OF SLABS FOR HOT CHARGING WHEN TRANSPORTED AND STORED WITH AND WITHOUT INSULATING PROTECTION

Abstract

Two mathematical models were developed using the finite element technique to evaluate the heat loss of slabs to be hot charging when transported and stored with or without a thermal insulation system. This assessment was intended to give subsidies for a study of economic viability of applying thermal insulation of slabs in order to increase the temperature and the participation of hot charging in the line of Usiminas' Hot Strip Mill. The validation of the developed model showed fairly consistent results with the values measured on the production line. The simulations showed that the number of slabs stored and insulated, from the slab yard at Steelmaking Shop to the heating furnace at Hot Strip Mill, had a heat loss 20% lower than in the condition of cooling without isolation. It was observed further that the external face of the insulation system showed temperature of 50°C, a value that does not compromise its usefulness.

Key words: Mathematical models; Finite element; Hot charging.

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, M.Sc.; Centro de Tecnologia Usiminas - Unidade Ipatinga, MG.

³ Engenheiro Mecânico; Gerência de Processos de Laminação e Acabamento – Usina 1, Usiminas

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas grandes progressos têm sido alcançados na área de laminação de produtos planos, guiados principalmente por quatro frentes: i) redução de custo operacional, ii) desenvolvimento de novos produtos para atender à demanda do mercado, iii) uso racional das fontes energéticas e iv) integração do processo de laminação com as demais áreas de produção.⁽¹⁾ Atualmente, a questão ambiental também tem sido outro fator propulsor para o desenvolvimento tecnológico.

Dentro desse contexto, na Laminação a Quente, mais precisamente na etapa de reaquecimento de placas, grandes esforços têm sido despendidos na tentativa de se aumentar a quantidade de material enforado a quente, processo denominado de *hot charging*.⁽²⁻⁹⁾ Tais esforços são justificados pelos inúmeros benefícios que esse processo traz, tais como: redução na perda metálica por formação de carepa, aumento de produtividade devido à redução do tempo do material dentro do forno, redução da área necessária para estocagem de material. No entanto, a principal vantagem se deve à redução do consumo de combustível nos fornos de reaquecimento de placas, por conseguinte, redução de custo e redução na emissão de NO_x, SO_x, CO, CO₂ e particulados para a atmosfera.^(2,3, 5-7,10-12)

Para exemplificar, na Figura 1(a) é mostrada a influência da temperatura de enforamento da placa no consumo de energia do forno de reaquecimento para várias capacidades de produção. Duas importantes conclusões podem ser retiradas desses dados. A primeira refere-se ao ganho gerado pela introdução de *hot charging* no forno. Considerando, por exemplo, como *hot charging* o enforamento de material com temperatura igual a 300°C, pode-se observar uma redução de 200 MJ/t se comparado a um material enforado por volta dos 20°C. A segunda conclusão refere-se ao ganho obtido quando se aumenta a temperatura de enforamento do material. Neste caso, um aumento de 300°C para 500°C gera uma redução no consumo de energia de quase 100%. É mostrado ainda que quanto maior a produção do forno maior é o ganho na redução do consumo de combustível com o aumento da temperatura do material *hot charging*. Já na Figura 1(b) pode-se observar o ganho de produção em função da temperatura de enforamento da placa. Nota-se um aumento bastante significativo de produtividade quando o material é enforado acima dos 600°C. Em relação à questão ambiental, Martin⁽⁵⁾ comenta que uma redução de 10% no consumo de energia dos fornos de reaquecimento de placas, na Inglaterra, geraria uma redução de 135.000 t/ano na emissão de CO₂.

Apesar dos benefícios que podem ser obtidos com a utilização de *hot charging*, a implantação dessa prática nas grandes indústrias siderúrgicas não é uma ação trivial. As dificuldades estão relacionadas à questão da sincronização de produção da área de Aciaria com a de Laminação a Quente, à produção de placas com boa qualidade superficial a fim de reduzir a perda térmica do material devido à necessidade de uma etapa intermediária para eliminação de defeitos, a escarragem por exemplo, à distância entre os processos de lingotamento contínuo e forno de reaquecimento de placas, à logística para entrega das placas para a Laminação a Quente, ao meio de transporte das placas entre as duas áreas e à presença ou não de um sistema para reter o calor entre o instante que o material sai do lingotamento contínuo até o momento do seu enforamento.

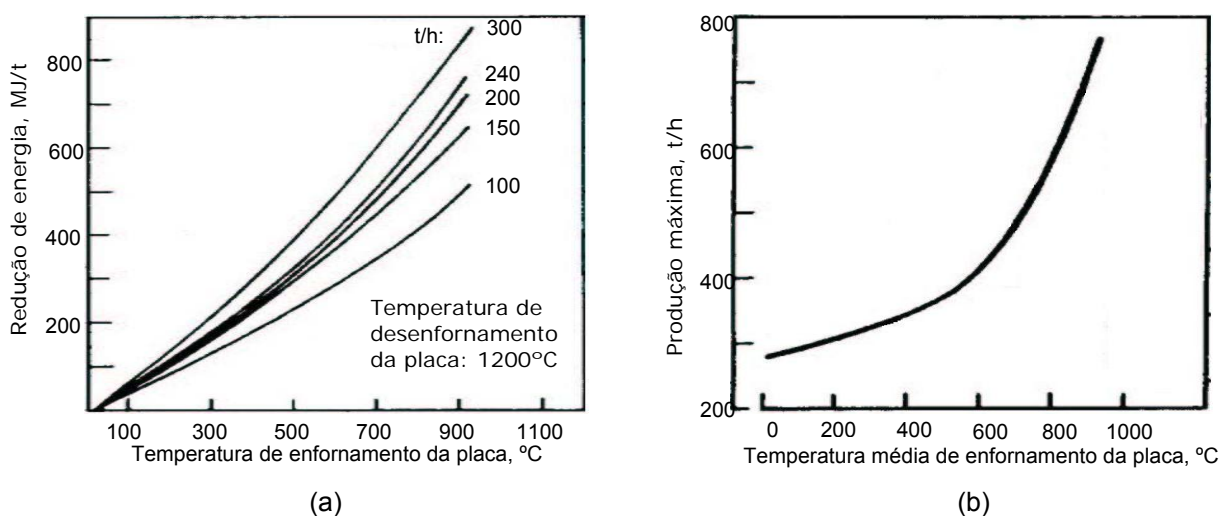


Figura 1. (a) redução do consumo de energia associada à temperatura de enformamento da placa e (b) aumento da produção do forno de reaquecimento em função da temperatura de enformamento da placa.⁽⁶⁾

Buscando os benefícios gerados pelo uso de *hot charging* e conhecendo as dificuldades de sua implantação, foi montada uma equipe na Usiminas, unidade de Ipatinga, para tentar aumentar a quantidade de placas enformadas a quente dos atuais 23% para 35% numa primeira etapa e, futuramente, para 50%. Dentre as várias possibilidades existentes para esse fim, foi estudada a viabilidade de se isolar termicamente as placas nos pátios de estocagem da Aciaria e da Laminação a Quente e durante o seu transporte entre essas duas áreas de produção. Atualmente, na Usiminas, as placas são transportadas por vagões e armazenadas sem nenhuma proteção térmica e o material *hot charging* leva, em média, treze horas para ser enformado após o lingotamento contínuo.

Para auxiliar no estudo de viabilidade econômica da instalação de isolamento térmico nos vagões e nos pátios de estocagem, foram desenvolvidos dois modelos matemáticos, em elementos finitos, para prever a evolução térmica das placas quando transportadas e armazenadas sem e com isolamento térmico. Os detalhes do desenvolvimento do modelo e os resultados encontrados são mostrados neste trabalho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Informações sobre o Processo e a Proposta de Isolamento

Na Usiminas, planta de Ipatinga, as placas produzidas no lingotamento contínuo, na área de Aciaria, são armazenadas em um pátio de estocagem até serem transportadas para a área de Laminação a Quente. Ao chegarem na Laminação, são novamente estocadas num pátio até serem direcionadas para o forno de reaquecimento de placas. Entre a saída da placa do lingotamento contínuo até os fornos de reaquecimento, o material perde calor para o ambiente uma vez que não existe sistema de isolamento térmico e o tempo é relativamente longo. Nesse estudo foi avaliada a perda térmica da placa nas seguintes etapas compreendidas entre o lingotamento e o forno de reaquecimento: pátio de estocagem da aciaria até o carregamento do vagão (etapa 1), transporte da Aciaria

até o pátio de estocagem do Tiras a Quente (etapa 2) e pátio de estocagem até o enfornamento (etapa 3). De acordo com dados históricos de processo, são gastas em média 3 horas na etapa 1, 2 horas na etapa 2 e mais 8 horas na etapa 3.

Em relação à temperatura das placas, o material sai do lingotamento, na região de corte, por volta de 800°C. No entanto, para a avaliação realizada nesse estudo, tomou-se como ponto de partida o momento no qual o material é colocado no pátio de placas da Aciaria, onde sua temperatura já está por volta de 600°C. Obviamente essa temperatura não é homogênea ao longo de todo o volume do material, entretanto, como esse perfil de temperatura é difícil de ser levantado, nesse trabalho a temperatura inicial do modelo foi considerada uniforme e igual a 600°C.

A proposta para isolamento do material no pátio da Aciaria, nos vagões e no pátio de estocagem do Tiras a Quente foi fornecida por uma empresa especializada. No caso, o isolamento seria feito através de campânulas e seria igual nas três etapas. Os valores das propriedades termofísicas do material isolante, informados por essa empresa, são mostrados na Tabela 1. A espessura do isolamento também foi fornecida pela empresa, já a altura e largura foram estipuladas baseadas nas dimensões da pilha, que é, normalmente, formada por oito placas de 200 a 250 mm de espessura. Esses valores também são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades termofísicas (fornecidas por uma empresa especializada em isolantes térmicos) e geometria propostas para o isolamento das placas

Propriedades Termofísicas		
Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Densidade (kg/m ³)
0,1	1130	224
Geometria (m)		
Espessura	Altura	Comprimento
0,0762	2,2	12,4

2.2. Modelo Matemático Desenvolvido

Para avaliar a vantagem de se usar um sistema de isolamento para diminuir as perdas térmicas das placas entre a Aciaria e o enfornamento no Tiras a Quente, foram desenvolvidos dois modelos matemáticos, em elementos finitos, utilizando o programa computacional Ansys[®]. Duas situações foram avaliadas nesse estudo. Na primeira, levantou-se o perfil térmico das placas durante o período de estocagem nos pátios da Aciaria e da Laminação a Quente e durante o trajeto Aciaria-Tiras a Quente sobre vagões sem isolamento térmico, como é realizado atualmente. Na segunda, considerou-se que o material é armazenado e transportado sobre vagões isolados termicamente por todos os lados.

Nos dois casos, a equação matemática que governa a troca térmica da tira com o ambiente é mostrada na equação (1). Já a troca térmica entre a placa e o piso é baseada na equação (2). A definição das variáveis pode ser vista na Tabela 2.

$$q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT_p}{dt} \quad (1)$$

$$q_{\text{cond}} = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT_p}{dt} \quad (2)$$

Para:

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} \cdot A_s \cdot (T_{\text{amb}} - T_p) \quad (3)$$

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot A_s (T_{\text{amb}}^4 - T_p^4) \quad (4)$$

$$q_{\text{cond}} = \frac{k \cdot A_s \cdot (T_{\text{amb}} - T_p)}{l} \quad (5)$$

Tabela 2. Definição das variáveis utilizadas nas equações de 1 a 4

q_{conv} - fluxo de calor por convecção (W)	T_p - temperatura da placa (K);
q_{rad} - fluxo de calor por radiação (W)	T_{amb} - temperatura ambiente (K);
q_{cond} - fluxo de calor por condução (W)	h_{conv} - coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
ρ - massa específica da chapa ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ε - emissividade
A_s - área superficial da chapa (m^2)	F - fator de forma
V - volume da chapa (m^3)	σ - constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)
c_p - calor específico da chapa ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	k - condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
t - tempo (s)	l - comprimento (m)

Para a condição sem isolamento, a placa troca calor tanto por radiação quanto por convecção para o ambiente. Já na condição com isolamento, essa troca é feita com a superfície da parede do isolamento. Além disso, devido à alta temperatura inicial do material e do seu confinamento entre as paredes do isolante térmico, a troca de calor por radiação é muito maior que por convecção. Sendo assim, no modelo com isolamento a troca por convecção foi desprezada. Nos dois modelos, a emissividade da placa (ε) foi considerada igual a 0,85 e o fator de forma (F) igual a 1. No caso do modelo sem isolamento, o coeficiente de transferência de calor por convecção foi baseado em dados de literatura⁽¹³⁾ e considerado igual a 30 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). Em nenhum dos dois modelos desenvolvidos foi considerada a influência da troca de calor entre as pilhas no pátio de estocagem.

Uma vez que as placas são transportadas empilhadas no vagão, ocorre uma queda de temperatura através da interface entre elas. Essa mudança de temperatura é atribuída ao que é conhecido como resistência de contato. O efeito é mostrado na Figura 2.

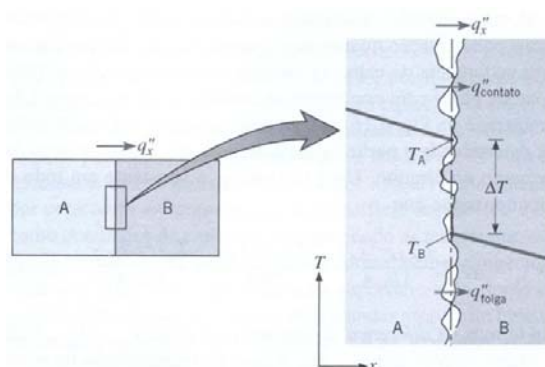


Figura 2. Queda de temperatura devido à resistência térmica de contato.⁽¹³⁾

A existência de uma resistência de contato finita é devida, principalmente, aos efeitos da rugosidade da superfície. Os pontos de contato são intercalados com espaçamentos que são, na maioria dos casos, preenchidos por ar. Portanto, a transferência de calor ocorre por condução através da área de contato real e por condução e/ou radiação através dos espaçamentos. A área de contato é tipicamente

pequena, e, especialmente para superfícies rugosas, a principal contribuição à resistência é devida aos espaçamentos. Embora existam teorias para prever o valor da resistência de contato, os resultados mais confiáveis são aqueles que têm sido obtidos experimentalmente.⁽¹³⁾ Dessa forma, para esse trabalho, foi utilizado um valor de resistência de contato de $0,008 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ entre placas e $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ entre a placa e o piso, obtidos experimentalmente em um outro estudo realizado na Usiminas.⁽¹⁴⁾ Cabe lembrar que esses valores podem divergir um pouco para o problema avaliado nesse estudo, uma vez que as condições de empilhamento são diferentes das condições de empilhamento avaliadas no estudo anterior.

Para a previsão da evolução térmica, foi considerada uma seção de cada placa da pilha ao longo da largura e aplicadas as condições de transferência de calor em suas superfícies, como mostra o esquema da Figura 3.

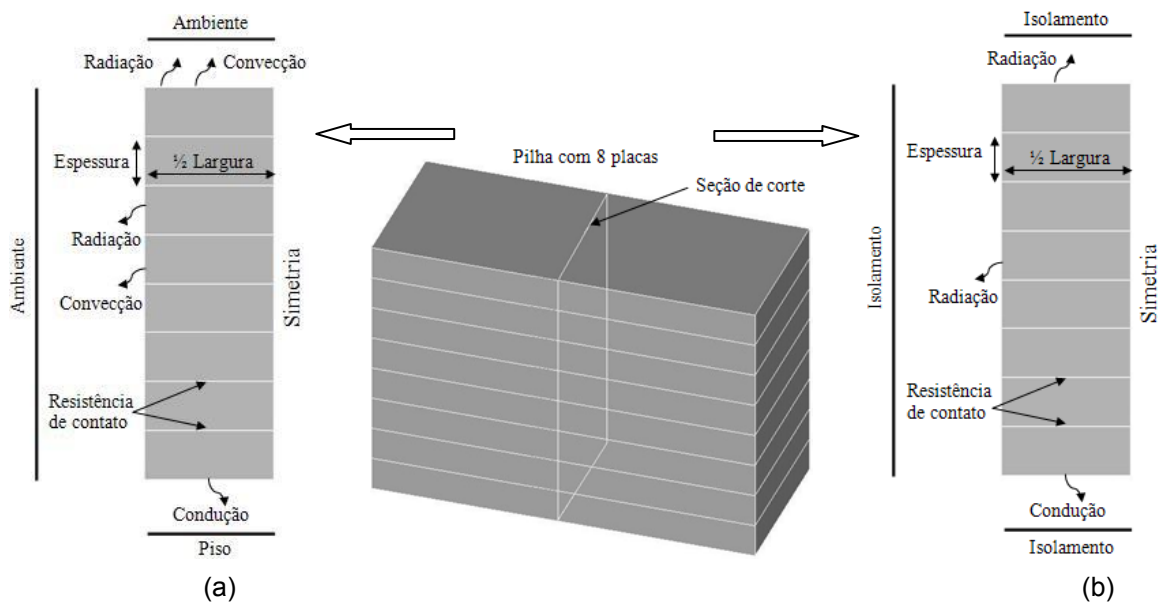


Figura 3. Desenho esquemático da transferência de calor nas placas para o caso (a), sem isolamento, e caso (b), com isolamento.

A geração da malha dos modelos foi realizada utilizando o elemento *Plane55*. Este elemento é aplicado em problemas envolvendo condução de calor em geometrias 2-D, tanto para análises em regime permanente como transiente. A malha foi gerada contendo 25 elementos ao longo da espessura e 10 elementos ao longo da largura. Uma vez que as condições de troca de calor são semelhantes nos dois lados da placa, foi utilizada simetria no modelo em relação à sua largura. A troca de calor ao longo do comprimento não foi considerada uma vez que ela é desprezível quando comparada à troca ao longo da espessura.

A aplicação da transferência de calor por convecção e radiação nas superfícies superior, inferior e lateral da pilha e da resistência de contato entre as chapas, foi realizada utilizando o elemento *Surf151*. O *Surf151* é um elemento de superfície para aplicações em problemas térmicos e de geometria 2-D. A grande vantagem da utilização desse elemento é a possibilidade de se aplicar várias condições de transferência de calor (carregamentos) e, através da presença de um nó extra, visualizar melhor toda a carga térmica (q) envolvida no processo. No modelo com isolamento foi utilizado ainda o elemento *Link32* para simular a condição do isolamento térmico. Esse elemento é uniaxial com a capacidade de conduzir calor entre seus nós.

O cálculo da transferência de calor por radiação, em ambos os modelos, foi feito utilizando um coeficiente de transferência por radiação, h_r , dado pela equação (6). Para o primeiro modelo, situação atual da Usiminas, o valor de T_{amb} foi baseado na temperatura ambiente, sendo fixo e igual a 30°C. Já para o segundo modelo, T_{amb} representou a temperatura da superfície do isolamento. Uma vez que, com o passar do tempo, a temperatura da superfície do isolamento aumenta devido à troca térmica com a placa, evitou-se utilizar um valor fixo para essa componente. Por esse motivo foi utilizado o elemento *Link32* para simular a condição do isolamento dos vagões.

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{amb} + T_P) \cdot (T_{amb}^2 + T_P^2) \quad (6)$$

Com a finalidade de criar uma simulação mais próxima possível do real, no segundo modelo ainda foi utilizado um elemento de convecção, *Link34*, para a troca por convecção entre a superfície externa do isolamento e o ambiente. Esse elemento tem as mesmas características do elemento *Link32*, com apenas a diferença que, entre seus nós, ocorre transferência de calor por convecção. A figura 4 apresenta um pequeno esquema do modelo desenvolvido para o segundo caso (condição com isolamento).

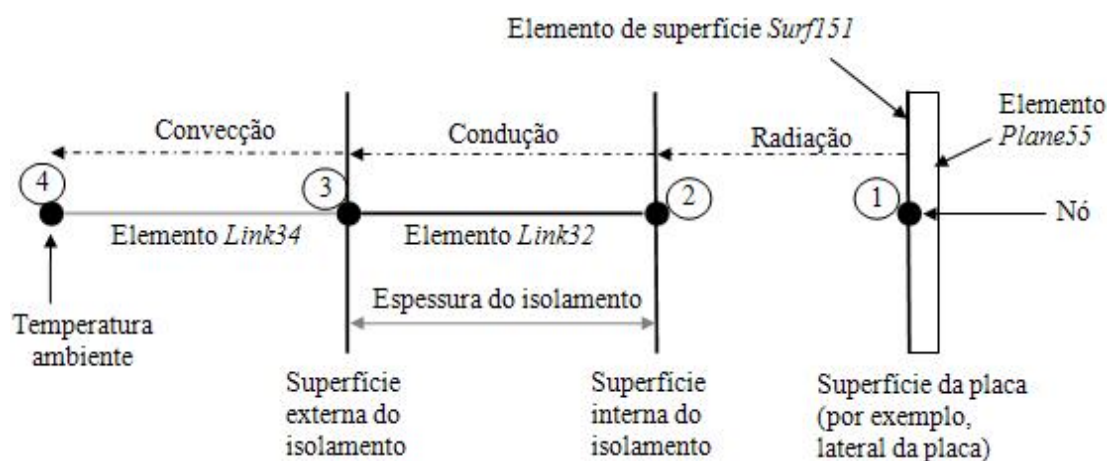


Figura 4. Esquema do modelo de transferência de calor utilizado para o caso do armazenamento e transporte de placas com isolamento térmico.

Da Figura 4, observa-se que o nó 1, representando a placa, troca calor por radiação com o nó 2, representando a superfície interna do isolamento. Esse, por sua vez, simulando a parede do isolamento, conduz calor para o nó 3, que perde calor para o nó 4, ou seja, o ambiente, por convecção. Através desse balanço térmico foi possível determinar o perfil térmico da parede do isolamento ao longo do tempo, de maneira que o nó 2, representando a variável T_{amb} da equação 6, não ficasse constante no decorrer da simulação. Dessa forma, como citado anteriormente, evitou-se utilizar um valor constante para a superfície interna da parede, o que resultaria em uma fonte de erro nos cálculos da troca por radiação placa/isolamento do modelo matemático.

3 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Primeiramente é mostrada a validação do modelo desenvolvido para a situação atual da Usiminas, planta de Ipatinga, ou seja, a condição sem isolamento. Pode-se observar, na Tabela 3, uma comparação entre os valores medidos e calculados pelo modelo para a lateral de uma placa da pilha e temperatura inicial de

460°C. Nota-se que o modelo gerou resultados bastante próximos dos valores reais de temperatura para um período de medição de 13 horas. Já para o segundo modelo, condição com isolamento, não foi possível validar com dados reais. No entanto, como os dois modelos são baseados na mesma estrutura de cálculo, diferenciando apenas a fonte de troca de calor (ambiente e isolamento), infere-se que os valores calculados pelo segundo modelo sejam representativos para uma possível situação de armazenamento e transporte das placas protegidas por um sistema de isolamento térmico.

Tabela 3. Comparação dos valores medidos e calculados pelo modelo para condição sem isolamento

Tempo (h)	Temperatura medida (°C)	Temperatura calculada (°C)	Tempo (h)	Temperatura medida (°C)	Temperatura calculada (°C)
1	430	420	8	320	335
3	380	395	11	300	310
5	350	370	13	290	290

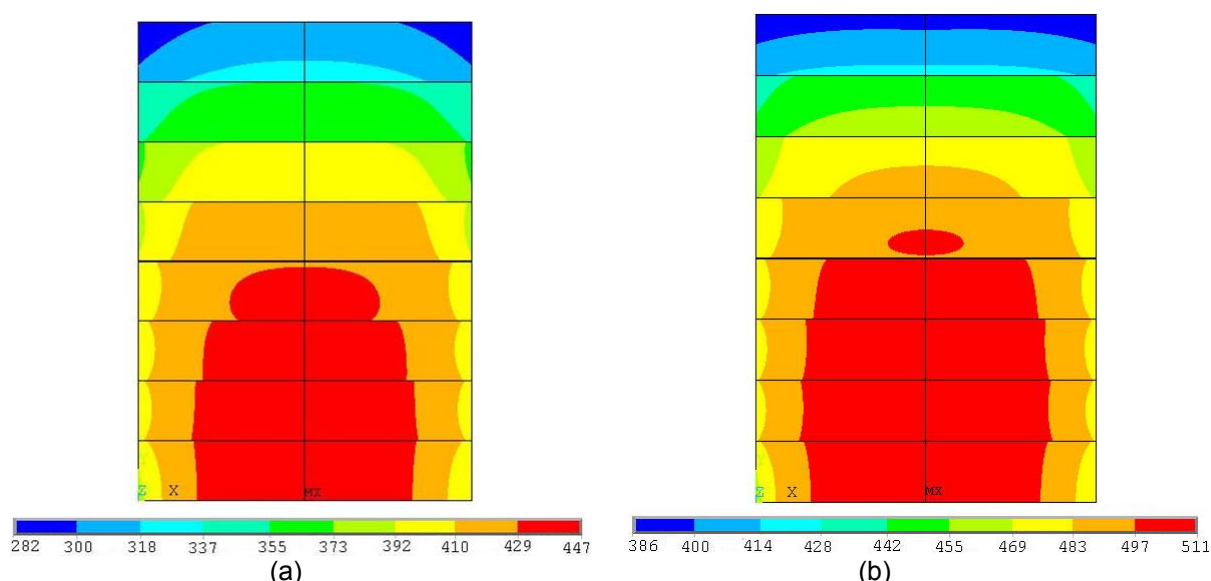


Figura 5. Resultado final da simulação da perda de temperatura de oito placas empilhadas para a condição (a) sem isolamento e (b) com isolamento.

Os resultados do perfil térmico da pilha, após passadas 13 horas, são mostrados nas Figuras 5 (a) e (b) para a situação sem isolamento e com isolamento, respectivamente. Pode-se observar que, para as duas condições de resfriamento, a placa superior perde bastante calor, ficando com a temperatura bem abaixo das demais. Já numa grande região na parte central das placas inferiores a perda de calor é bem menor, chegando, na condição com isolamento, a uma perda de temperatura de apenas 80°C no final do processo. Outra observação importante de se destacar é a falta de homogeneidade da temperatura entre as placas na pilha. Esse fato se deve à existência da resistência térmica de contato entre as placas que funciona como uma barreira para a condução de calor. Se esse fator não tivesse sido abordado no desenvolvimento do modelo, ou seja, a pilha tivesse sido considerada como um bloco maciço de aço, as curvas isotérmicas ao longo do bloco teriam um aspecto bem mais homogêneo.

Na Figura 6 é mostrado o resultado da média de temperatura da lateral das oito placas nas três etapas existentes entre a saída do material do pátio de placas da Aciaria até o seu enforamento no Tiras a Quente. Pode-se observar, como era

de se esperar, que a diferença da temperatura média entre a condição com e sem isolamento aumenta ao longo do tempo.

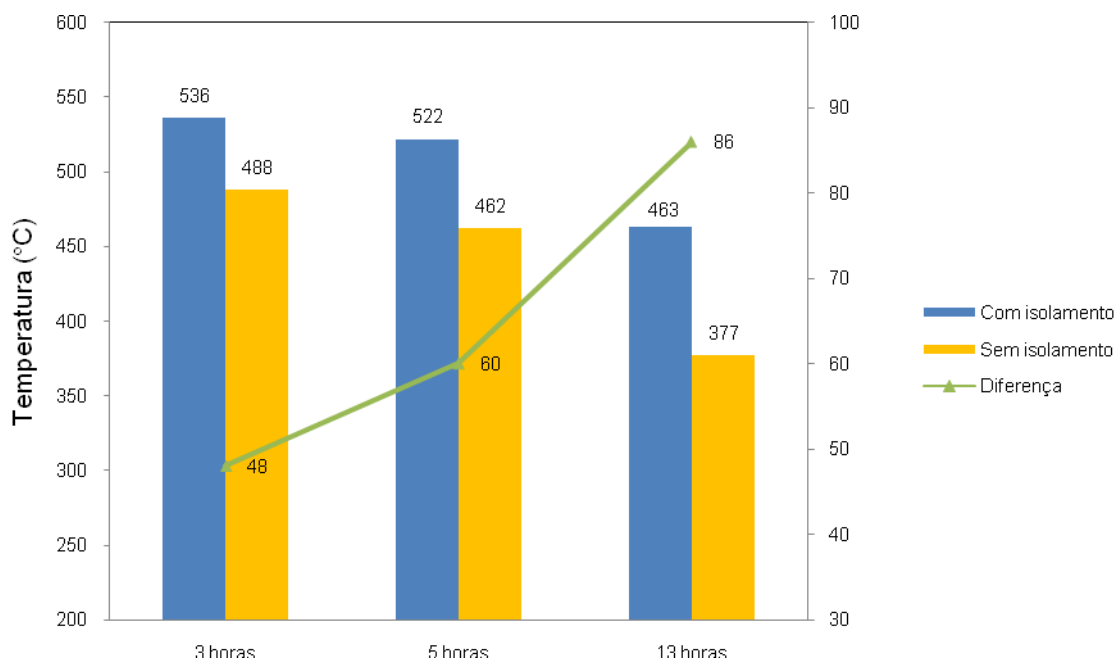


Figura 6. Temperatura média da borda das oito placas empilhadas, nas condições com e sem isolamento, nas etapas pátio de placas – vagão (3 horas); vagão-pátio de estocagem do Tiras a Quente (5 horas) e pátio de estocagem do Tiras a Quente – enformamento (13 horas).

Já na Figura 7 é mostrada a evolução da temperatura média das placas na pilha, desde o momento inicial até o final, em três pontos ao longo da largura (borda, 1/4 da borda e centro) e para as duas condições de resfriamento. Observa-se que a temperatura a 1/4 da borda e no centro são bem próximas quando comparadas em relação à mesma condição de resfriamento. Um fato bastante interessante acontece com a temperatura da borda do material resfriado na condição com isolamento. O comportamento térmico desse ponto segue a mesma tendência para o mesmo ponto da condição sem isolamento até, aproximadamente, uma hora de resfriamento. Esse fato pode ser explicado analisando-se a evolução térmica da parede interna do isolante (face quente) ao longo do processo (Figura 8). No modelo desenvolvido, a temperatura inicial da face quente do isolamento foi considerada igual à do ambiente, ou seja, 30°C, mesmo valor adotado para a temperatura ambiente da condição sem isolamento. Dessa forma, no início do processo a troca térmica entre a placa e o isolamento se equivale à troca de calor entre a placa e o ambiente. No entanto, devido à intensa troca térmica que ocorre nesse momento inicial entre as placas e o isolamento, aliada à baixa condutividade térmica do isolante, faz com que a temperatura da parte interna do isolante aumente bruscamente na primeira hora. Sendo assim, passado esse curto período de tempo, a temperatura da face quente aumenta, fazendo com que a troca térmica chapa-isolante diminua bruscamente, tornando-se bastante inferior à troca térmica chapa-ambiente (condição sem isolamento). Outro fato importante, nesse caso em relação à operacionalidade da campânula de isolamento, é a temperatura final da face externa do isolante (face fria). Pode-se observar na figura 8 que a temperatura fica em torno dos 50°C, ou

seja, um valor que não traz muito risco em relação à segurança das pessoas que, por ventura, tenham contato com essa parede.

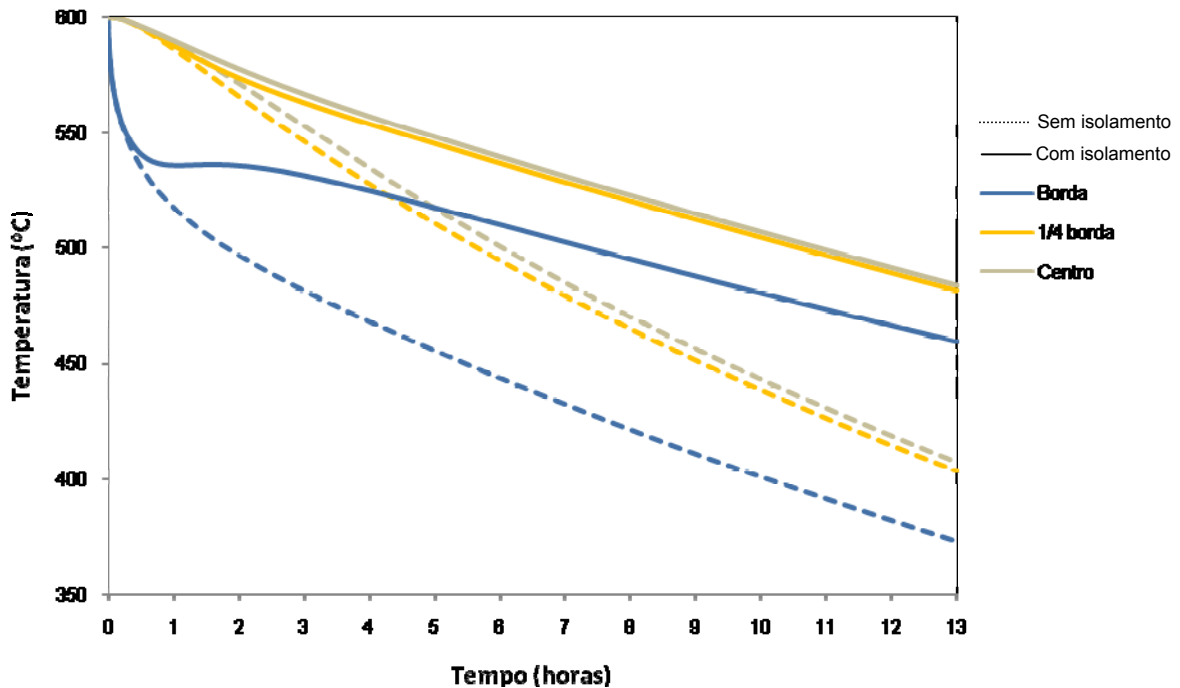


Figura 7. Evolução da temperatura média das placas na pilha, desde o tempo inicial até o final, em três pontos ao longo da largura (borda, 1/4 da borda e centro) para as condições com e sem isolamento.

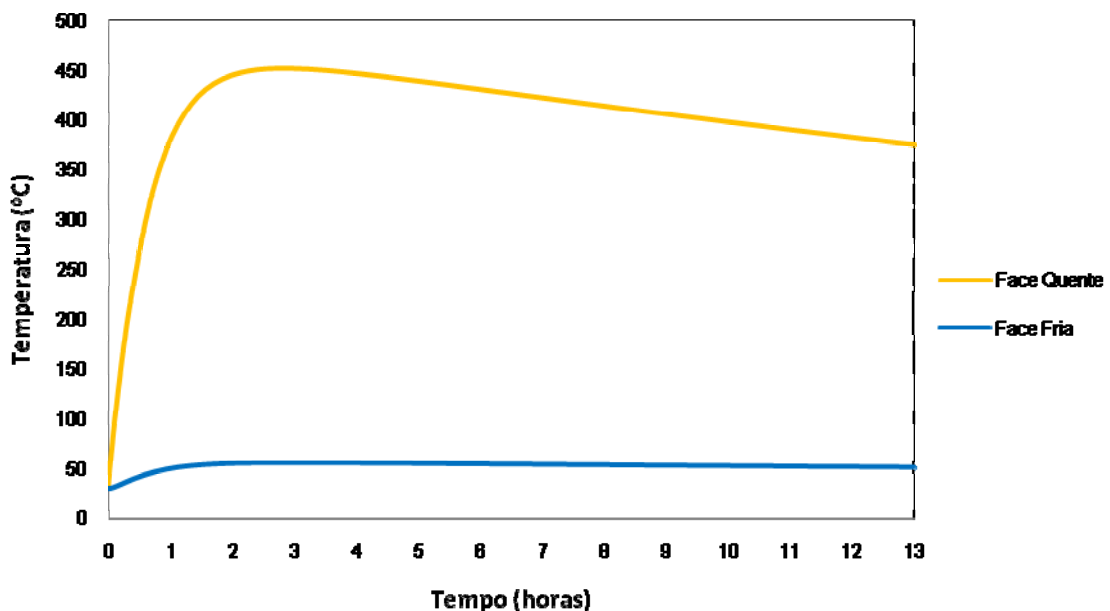


Figura 8. Evolução da temperatura da parede interna (face quente) e externa (face fria) do isolamento térmico das placas.

Finalmente, na Figura 9 é mostrado um comparativo da perda de energia das placas da pilha nas três etapas do processo para as duas condições de resfriamento. Pode-se observar que a melhor eficiência do uso de isolamento para diminuir as perdas térmicas se dá até o processo de entrega das placas no pátio de

estocagem do Tiras a Quente (primeiras 5 horas). No pátio, devido ao longo tempo que o material leva para ser enfiado, a vantagem do uso do isolamento diminui. Mesmo assim, a perda de calor (energia) das oito placas isoladas termicamente é 34% menor quando comparado com as placas resfriadas sem isolamento.

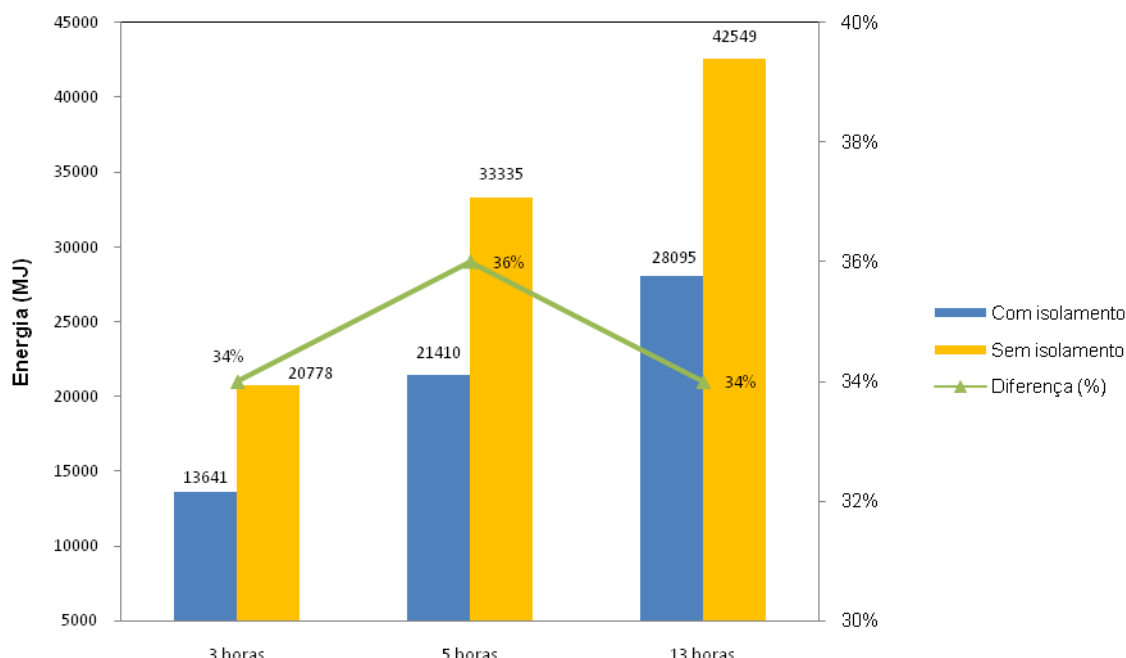


Figura 9. Perda de energia das placas empilhadas nas condições com e sem isolamento, nas etapas pátio de placas – vagão (3 horas); vagão-pátio de estocagem do Tiras a Quente (5 horas) e pátio de estocagem do Tiras a Quente – enfiamento (13 horas).

4 CONCLUSÕES

Os resultados do modelo matemático desenvolvido para a previsão da evolução térmica da placa entre a Aciaria e o forno de reaquecimento na Laminação a Quente revelaram um erro médio de 12°C quando comparados com os valores de temperatura medidos para a condição sem isolamento, situação atual na Usiminas, planta de Ipatinga. Uma vez que foi usada a mesma estrutura de desenvolvimento para os dois modelos, considerou-se também válido os resultados gerados para a condição com isolamento.

As simulações realizadas mostraram que o conjunto de placas empilhadas e isoladas termicamente desde o pátio da Aciaria até o enfiamento no Tiras a Quente apresentou uma perda de energia (calor) 34% menor que na condição de resfriamento sem isolamento. O maior aproveitamento do uso do isolamento acontece logo após o transporte das placas sobre os vagões, ou seja, assim que o material é colocado no pátio de estocagem do Tiras a Quente. Nesse ponto, aproximadamente 5 horas após o material ter sido disponibilizado no pátio de placas da Aciaria, a diferença de energia perdida entre as duas condições de resfriamento (com e sem isolamento) é da ordem de 36%.

Foi possível também avaliar a evolução térmica do isolamento. As simulações mostraram que a temperatura da face fria (face externa do isolamento) ficou na ordem dos 50°C. Esse valor de temperatura não compromete a operacionalidade da câmara no que diz respeito à segurança contra possíveis queimaduras.

O resultado do estudo de viabilidade econômica da implantação das campânulas, acrescido ainda de outras opções avaliadas para aumentar o número de enformamento de placas *hot charging*, será apresentado em um próximo trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 LAMBERTERIE, B. Recent evolutions and trends in the steel rolling industry. La Revue de Métallurgie, julho, 2006.
- 2 ROMENETS, V. A.; GUROV, A. S.; TROST'YANSKII, S.N.; DMITRIEVA, L.G. Hot Charging of continuously cast slabs for wide strip rolling. Steel in the USSR, v.16, n.2, p.100-102, Feb.1986.
- 3 HOLLANDER, F.; ZUURBIER, S. P. A. Accurate temperature control of the reheating process at mixed cold and hot charging. International conference on process control and energy savings in reheating furnaces, p. 1-36, 1985.
- 4 ZHAO, J.; WANG, W.; LIU, Q.; WANG, Z.; SHI, P. A two stage scheduling method for hot rolling and its application. Control Engineering Practice, v.17, p.629-641, 2009.
- 5 MARTIN, G. Energy savings from hot charging. Steel Times, v.220, n.2, p.86, Feb. 1992.
- 6 ETIENNE, A.; HOVE, C.; BAUMAL, J. P. Effects of hot charging on the energy consumption in the slab reheating furnace. MPT - Metallurgical Plant and Technology, v.11, n.4, p.39-43, 1988.
- 7 CARR, R.A.; HEWITT, E. C.; WATTERS, J. H. Process and plant design technologies for successful hot connection. Ironmaking and Steelmaking, v.17, n.1, p.53-64, 1990.
- 8 PICHLER, R.; SCHOSTER, H.; TICHY, S.; SEILINGER, A.; DJUMLIJA, G. Advanced solution for charging and optimized work roll shifting in hot strip mills. MPT - Metallurgical Plant and Technology International, n.5, p.84-89, Oct. 1999.
- 9 KÖLBL, K.; LEIXNERING, J.; SCHOSTER, H. E.; GRUBBAUER, K. Application of GPS and temperature tracking for optimized hot charging at Voest-Alpine Stahl Linz. In: Continuous Casting Conference Voest Alpine Industrieanlagenbau, n.57, p.1-10, 2000.
- 10 RITT, A. The benefits of hot-charging slabs. New Steel, v.12, n.7, p.34-37, July. 1996.
- 11 KNOOP, P.; Van Nerom, L. Scheduling requirements for hot charge optimization in an integrated steel plant. IEEE, v.1, p.74-78, Oct. 2003.
- 12 SHAMANIAN, M.; Najafizadeh, A. Hot charge of continuously cast slabs in reheating furnaces. International Journal of ISSI, v.1, n.1, p. 35-37, 2004.
- 13 INCROPERA, F. P., DE WITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. Editora LTC, 2003.
- 14 GIACOMIN, C.N.; SANTOS, A.A.dos; SOUZA, A.L.de. Uso de simuladores computacionais como ferramenta de análise de processo na laminação a quente da Usiminas. Seminario de Automação de Processos – ABM, 12, 2008, Vitoria, p.254-265. São Paulo: ABM, 2008.