

ANÁLISE DO PROBLEMA DA CONVECÇÃO TÉRMICA NO INTERIOR DE FORNOS DE REAQUECIMENTO ¹

Luciano Lellis Miranda ²
Márcio Ziviani ³
Benjamin Fullin Júnior ⁴

Resumo

Neste trabalho foi realizada uma análise das formulações usadas para cálculo da transferência de calor por convecção no interior de fornos de reaquecimento. Para isto, desenvolveu-se uma metodologia para determinação de equações para o cálculo do coeficiente de transferência de calor convectiva, através da simulação bidimensional do movimento e transferência de calor dos fluidos em regime permanente na seção de recuperação do forno. As equações obtidas e outras formulações baseadas na literatura foram usadas e comparadas. Para simulação do processo de reaquecimento com as diferentes equações utilizou-se um modelo tridimensional desenvolvido para o forno de soleira caminhante da Laminação de Tiras a Quente da ACESITA S.A., em Timóteo-MG. As análises das simulações demonstraram que a transferência de calor por radiação é predominante em praticamente toda a extensão do forno e a contribuição da convecção, no caso mais significativo, chegou a apenas 7,3% do total da energia transferida para a placa. O campo final de temperatura da placa na saída do forno se mostrou independente da abordagem usada para a convecção. Apenas nas primeiras seções do forno diferenças mais significativas foram obtidas nos perfis de temperatura das placas. A forma de abordagem da convecção tem relevância nos casos em que a evolução das temperaturas no início do forno precisa ser determinada com maior exatidão. Para isto, as melhores alternativas são utilizar as novas equações determinadas com a metodologia desenvolvida neste trabalho, ou a formulação desenvolvida por Trinks (1957).

Palavras-chave: Fornos de reaquecimento; Modelagem matemática; Convecção.

ANALYSIS OF THE THERMAL CONVECTION PROBLEM INSIDE REHEATING FURNACES

Abstract

In this paper it were analyzed different formulations for the convective heat transfer inside reheating furnaces. A methodology has been developed in order to find new equations for the convective heat transfer calculation. It involved a bi-dimensional simulation of the movement and of the heat transfer of fluids in steady state inside the recuperation section of the furnace. The found equations were used, together with other formulations based on the literature and its results were compared. The reheating process simulation, with the different equations, were carried on using a tri-dimensional model developed to the walking beam furnace of the ACESITA Hot Strip Mill, in Timóteo-MG. The simulations analysis has shown that the radiant heat transfer is predominant in almost all the furnace length, and the convective heat transfer contribution, even in the most significant case, has reached only 7,3% of the total energy transferred to the slab. The final temperature distribution in the slab was practically independent of approach used for convection. Only in the beginning furnace sections more significant differences has been found in the slabs temperature profiles. The approach used for convection calculation is relevant only if the temperature in the furnace beginning must be calculated with better accuracy. In this case, the best choices are to use the new equations determined with methodology developed in this study, or the formulation developed by Trinks (1957).

Key words: Reheating furnaces; Mathematical simulation; Convection.

¹ *Contribuição Técnica ao 43º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 17 a 20 de outubro de 2006, Curitiba – PR – Brasil.*

² *Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Mecânica (Calor e Fluidos) – Metalurgista de Processo na Gerência Técnica da Laminação de Tiras a Quente da ACESITA.*

³ *Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Mecânica – Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.*

⁴ *Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Mecânica (Calor e Fluidos) – Gerente na Gerência de Reaquecimento de Placas da Laminação de Tiras a Quente da ACESITA.*

1 INTRODUÇÃO

No processo de laminação a quente a matéria-prima (placas ou lingotes) é submetida a sucessivas etapas de conformação, onde a área de sua seção transversal é reduzida e seu comprimento aumentado. A laminação a quente é feita a temperaturas superiores à metade da temperatura de fusão do material trabalhado, em geral de 1100 a 1400 °C. Por isto, uma fase inicial deste processo é o reaquecimento das placas ou lingotes em fornos industriais.

Neste trabalho foi abordado o processo de aquecimento em um forno contínuo do tipo soleira caminhante, usando como base, um forno Walking Beam da laminação de tiras a quente da Acesita S.A., em Timóteo – MG. Neste forno são processados os mais variados tipos de aço, tais como inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos; baixo, médio e alto carbono; carbono ligado; siliciosos GNO e GO.

O reaquecimento do material para a laminação a quente é uma das etapas críticas da produção de chapas e bobinas a quente. Esta fase é de extrema importância para obtenção de boas condições de laminação e de uma qualidade superficial adequada no produto final. Tudo isto deve ser obtido com a maior produtividade e o menor consumo energético possíveis.

A modelagem matemática permite de forma mais rápida e consideravelmente mais barata, o estudo de vários aspectos do processo de reaquecimento. Modelos físicos ou em escala industrial são na maioria dos casos de custos proibitivos e não conduzem isoladamente ao adequado conhecimento dos fenômenos envolvidos no processo.

A simulação do aquecimento de placas e tarugos em fornos de reaquecimento é uma linha de pesquisa abordada a mais de 20 anos. Ao longo do tempo vários trabalhos já foram desenvolvidos sobre o tema. Muitos trabalhos abordam o problema calculando o aquecimento no interior das peças. Alguns autores tratam o problema de forma unidimensional, outros de forma bidimensional e alguns ainda, de forma tridimensional. Todos consideram as transferências de calor por radiação nas superfícies das peças e por condução no interior das mesmas. A transferência por convecção também é abordada por alguns autores.

Alguns autores simulam ainda o escoamento e transferência de calor dos fluidos no interior dos fornos. Vários pacotes de simulação da Dinâmica de Fluidos Computacional são empregados com este propósito. Os fenômenos da turbulência são considerados através de diferentes modelos. A combustão é, em alguns casos, também abordada, e vários modelos são usados para isto. Os trabalhos que consideram tanto a turbulência quanto a combustão mostram que, neste caso, resultados mais realísticos são encontrados.

O Grupo de Análise e Modelagem de Sistemas e Equipamentos Térmicos (GAMSET) da Escola de Engenharia da UFMG desenvolve pesquisas nesta área também a vários anos. Ao longo do tempo vários modelos de simulação de fornos industriais já foram desenvolvidos e, a cada um deles, novas características são agregadas. Nestes vários trabalhos o problema do aquecimento transiente de placas e tarugos foi inicialmente abordado de forma bidimensional, considerando as transferências de calor por radiação e convecção. Em um dos trabalhos mais recentes o modelo de aquecimento foi adaptado para simulação de paradas de produção. E no mais recente uma abordagem tridimensional do problema foi adotada. Também, neste último trabalho, o fenômeno da radiação foi mais bem investigado. Na maioria dos casos os modelos foram validados com dados da

literatura e em alguns casos com dados experimentais. Um ponto de melhoria ainda necessário era a investigação mais detalhada das transferências de calor por convecção, propósito deste trabalho.

2 AQUECIMENTO TRANSIENTE DE PLACAS

2.1 Forno de Soleira Caminhante (Walking Beam)

Os fornos de aquecimento são utilizados na preparação do material para um trabalho a quente. Sua função principal é elevar a temperatura dos produtos semi-acabados (placas) para sua deformação no processo de laminação.

No forno de soleira caminhante a carga é suportada pelos *skids*. Os *skids* são compostos de tubos revestidos de material refratário, por onde circula água para refrigeração de todo o conjunto. Alguns destes *skids* são fixos e outros móveis. É através do movimento dos *skids* móveis que a carga avança no forno.

O forno em questão divide-se em 4 seções: recuperação, pré-aquecimento, aquecimento e encharque (Figura 1). Na seção de recuperação não existem queimadores e parte da energia contida nos gases de exaustão, provenientes das demais seções, é transferida para a carga por radiação e por convecção. As zonas das demais seções são providas de queimadores, através dos quais entram no forno o combustível e o ar necessários à combustão.

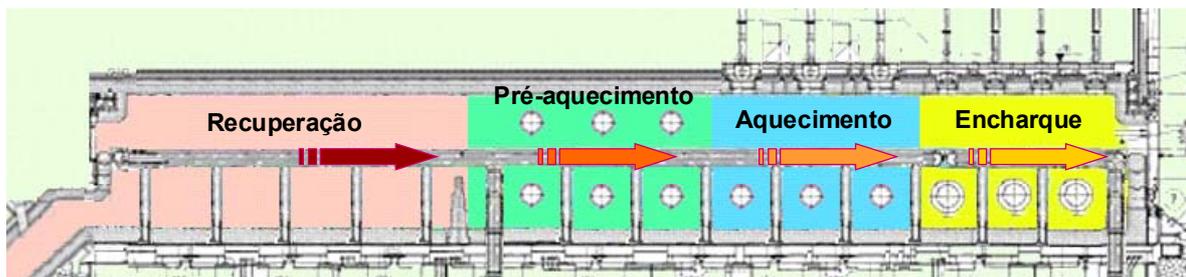


Figura 1. Corte longitudinal do Forno Walking Beam.

2.2 Modelo Matemático do Processo de Reaquecimento de Placas

No processo de reaquecimento as placas são submetidas a uma atmosfera extremamente agressiva, com altas temperaturas e ambiente oxidante. A transferência de calor no interior da placa se dá unicamente por condução. Nas superfícies das placas o processo é muito mais complexo, ocorrendo trocas de calor por radiação, convecção e condução. As trocas de calor por radiação ocorrem entre as superfícies das placas, os gases, a chama e as superfícies refratárias do forno (paredes, postes e *skids*). As trocas por convecção ocorrem entre as superfícies das placas e os gases do interior do forno. A condução ocorre entre as superfícies das placas e as “almofadas” (contatos) com os *skids*.

2.2.1 Transferência de calor por convecção dos gases para as placas

O fluxo de calor por convecção para a placa é expresso pela lei de Newton do resfriamento:

$$q_c = h (T_g - T_s) \quad (1)$$

onde T_s e T_g são, respectivamente, as temperaturas da superfície da placa e do gás circunvizinho, e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Três abordagens com formulações baseadas na literatura foram escolhidas para representar o mecanismo de transferência de calor por convecção no interior de fornos de reaquecimento. Uma quarta abordagem foi usada com uma formulação desenvolvida neste trabalho.

2.2.1.1 Primeira abordagem

A primeira alternativa considera uma fórmula sugerida por Trink⁽¹⁾ para o coeficiente de convecção h no escoamento externo sobre placas no interior de fornos de reaquecimento.

$$h = 5,68 + 3,14 \rho_g V_g \quad (2)$$

onde h representa o coeficiente médio de transferência de calor por convecção, ρ_g e V_g são, respectivamente, a massa específica e a velocidade dos gases na direção longitudinal do forno.

Trata-se de uma abordagem semi-empírica, que considera o escoamento dos gases no interior de fornos de reaquecimento em regime turbulento. Este fato, juntamente com a teoria de mecânica dos fluidos, foi usado para desenvolver a equação.

Esta formulação foi usada por Paula,⁽²⁾ ao simular o aquecimento de placas em fornos de reaquecimento do tipo soleira caminhante.

2.2.1.2 Segunda abordagem

Na segunda alternativa é usada uma expressão para o escoamento laminar sobre placa plana em convecção forçada, que segundo Incropera e DeWitt,⁽³⁾ é expressa por:

$$\overline{Nu}_x = \frac{\overline{h}_x x}{k} = 0,664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}, \text{ onde } Re_x = \frac{\rho v x}{\mu} \text{ e } Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{v}{\alpha} \quad (3)$$

válida para $0,6 \leq Pr \leq 50$, onde \overline{Nu}_x é o número de Nusselt, Re_x é o número de Reynolds, v é a velocidade longitudinal, ρ é a massa específica, μ é a viscosidade, k é a condutividade e c_p é o calor específico do fluido. Nessa abordagem o comprimento característico x , para cálculo de Re_x e de \overline{Nu}_x é a largura da placa. A principal consideração para utilização desta abordagem é a de que os gases fluem em regime laminar (com Re_x da ordem de 10^3) ao longo do comprimento do forno. Os valores de massa específica, viscosidade e condutividade do fluido são avaliados de acordo com a temperatura do mesmo próxima à placa considerada. Além desta, são feitas as seguintes considerações sobre o desenvolvimento do fluxo de gases:

- a temperatura superficial da placa é constante ao longo de sua largura;
- a velocidade do fluxo livre é constante ao longo do trecho que compreende a largura da placa;
- desprezam-se as condições do fluxo a montante, ou seja, o desenvolvimento da camada limite recomeça ao atingir cada placa sem influência das condições do fluxo que chegam em sua borda.

Esta abordagem foi utilizada por Silva⁽⁴⁾ ao simular o aquecimento de placas em fornos de reaquecimento do tipo soleira caminhante. Silva⁽⁴⁾ também simulou o aquecimento de tarugos, para os quais uma expressão correspondente foi usada, considerando o escoamento transversal externo sobre cilindro circular em regime laminar, sugerida por Zhukauskas.⁽³⁾ Este último caso já havia sido anteriormente usado por Ziviani e Andrade⁽⁵⁾ e Magalhães,⁽⁶⁾ ao simular o aquecimento de

tarugos em um forno de reaquecimento do tipo soleira caminhante, e por Silva⁽⁷⁾ ao simular o aquecimento de tarugos em um forno de reaquecimento de soleira rotativa.

2.2.1.3 Terceira abordagem

Na terceira alternativa considera-se convecção forçada com escoamento externo sobre placa plana em regime misto, inicialmente laminar e depois turbulento. São usadas expressões apresentadas em Incropera e DeWitt,⁽³⁾ e neste caso, o coeficiente médio de transferência convectiva de calor \bar{h}_x é dado por:

$$\begin{aligned} \bar{h}_x &= 0,664 k Pr^{1/3} \frac{Re_{x_2}^{1/2} - Re_{x_1}^{1/2}}{x_2 - x_1} \quad (\text{Se } Re_{x_2} \leq Re_{x,c}) \\ \bar{h}_x &= 0,037 k Pr^{1/3} \frac{Re_{x_2}^{4/5} - Re_{x_1}^{4/5}}{x_2 - x_1} \quad (\text{Se } Re_{x_1} > Re_{x,c}) \\ \bar{h}_x &= 0,664 k Pr^{1/3} \frac{Re_{x_2}^{1/2} - Re_{x,c}^{1/2}}{x_2 - x_c} + 0,037 k Pr^{1/3} \frac{Re_{x,c}^{4/5} - Re_{x_1}^{4/5}}{x_c - x_1} \\ &\quad (\text{Se } Re_{x_1} \leq Re_{x,c} < Re_{x_2}) \end{aligned} \quad (4)$$

onde, $Re_{x,c}$ corresponde ao valor do número de Reynolds para o qual o fluxo entra em transição entre os regimes laminar e turbulento, e x_c é a posição em que esta transição ocorre. O valor típico no número de Reynolds na transição é $Re_{x,c} = 5 \times 10^5$.

São mantidas algumas considerações da abordagem anterior: o escoamento é predominante na direção longitudinal do forno; a temperatura superficial e a velocidade do fluxo livre são constantes ao longo da largura da placa. Nesta abordagem, entretanto, é feita uma suposição de que a camada limite se desenvolve de forma intermediária entre o caso da abordagem anterior e o caso supostamente encontrado em um forno “empurrador”, onde a camada limite cresce continuamente. Assim, considera-se que as características da camada limite permanecem constantes entre a borda de saída de uma placa e a borda de ataque da placa seguinte no sentido do escoamento e, portanto, as condições do fluxo a montante são consideradas iguais às condições à jusante da placa que se encontra a montante no escoamento.

Além destas, são feitas ainda outras considerações sobre o desenvolvimento do fluxo de gases:

- o fluxo se inicia no final do forno em regime laminar e à medida que caminha para a entrada se torna turbulento em um determinado ponto;
- a transição do regime laminar para o regime turbulento ocorre bruscamente, sem a região de transição, a partir de $Re_x > 5 \times 10^5$.
- a dimensão característica para cálculo do número de Reynolds e do coeficiente médio de transferência convectiva de calor é soma da largura da placa considerada com as larguras de todas as placas que se encontram a montante dela no escoamento.

2.2.1.4 Quarta abordagem

Nesta abordagem uma nova formulação foi desenvolvida para cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção. Para isto, foi necessário resolver os problemas do escoamento de gases em regime permanente no

interior da seção de recuperação do forno de reaquecimento e da transferência de calor destes para os demais elementos do forno (placas e paredes refratárias). Quando se comparam as transferências de calor por convecção e radiação verifica-se que a contribuição da radiação é tanto maior quanto maior for a diferença de temperatura entre a superfície considerada e o ambiente. Como na seção de recuperação as temperaturas são comparativamente mais baixas do que no restante do forno, espera-se uma maior contribuição da convecção e, por esta razão, esta seção foi escolhida. A principal característica desta é a inexistência de queimadores, e dessa forma, a única fonte de energia é o gás gerado nas demais seções.

A resolução do problema consistiu basicamente em encontrar a distribuição das linhas de corrente do escoamento, valores de velocidade dos gases e fluxos de calor para as placas nesta região. Com estas informações uma correlação para cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção h foi pesquisada.

Simulação do escoamento no interior da seção de recuperação do forno

Considera-se um domínio de solução bidimensional nas direções do comprimento (x) e altura (y) do forno (Figura 2).

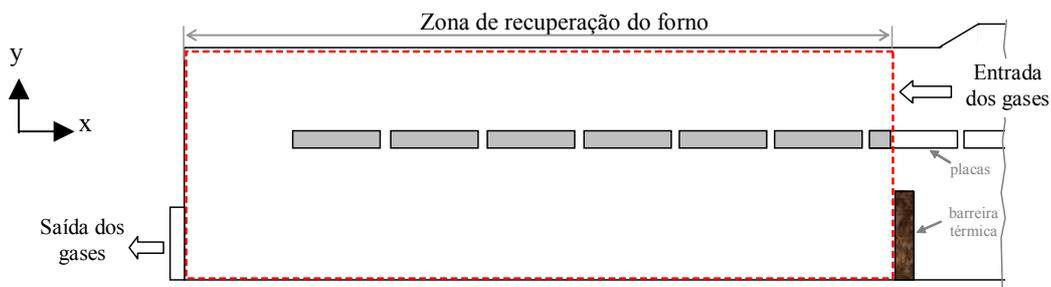


Figura 2. Domínio de solução para o problema do escoamento de gases e transferência de calor no interior da seção de recuperação do forno.

Este problema é governado pelas equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia, as quais são submetidas a condições de contorno de velocidades e temperaturas.

Observa-se na Figura 2 que os gases entram na direção longitudinal do forno na região superior à *barreira térmica* a velocidades conhecidas, determinadas com base na vazão de gases nestas regiões. A saída se dá na entrada no forno na região inferior, e sua velocidade é determinada por um balanço global de massa no sistema. Nas paredes todas as componentes da velocidade são nulas, devido à condição de não deslizamento. Na região das placas é definido um material sólido através da atribuição de um valor infinito de viscosidade.

Todas as condições de contorno de temperatura são de valor prescrito. Nas paredes refratárias horizontal inferior e superior são considerados perfis lineares de temperatura, enquanto nas superfícies verticais (paredes e gases) são atribuídos valores constantes.

Os valores de velocidades e temperaturas necessários são obtidos através um modelo tridimensional de simulação do processo de reaquecimento de placas em fornos de reaquecimento.⁽⁸⁾

O problema é resolvido numericamente pelo método de Diferenças Finitas com formulação em Volumes de Controle desenvolvido por Patankar.⁽⁹⁾ Um sistema de equações algébricas lineares é obtido e este é resolvido através do algoritmo

SIMPLE (Semi-Implicity Method for Pressure Linked Equations), seguindo uma estrutura semelhante ao programa CONDUCT.⁽⁹⁾

A determinação do número de Nusselt é realizada de forma iterativa, de acordo com o fluxograma da Figura 3. Nesta Figura o MODELO referenciado corresponde ao modelo tridimensional de simulação do processo de reaquecimento do forno.⁽⁸⁾

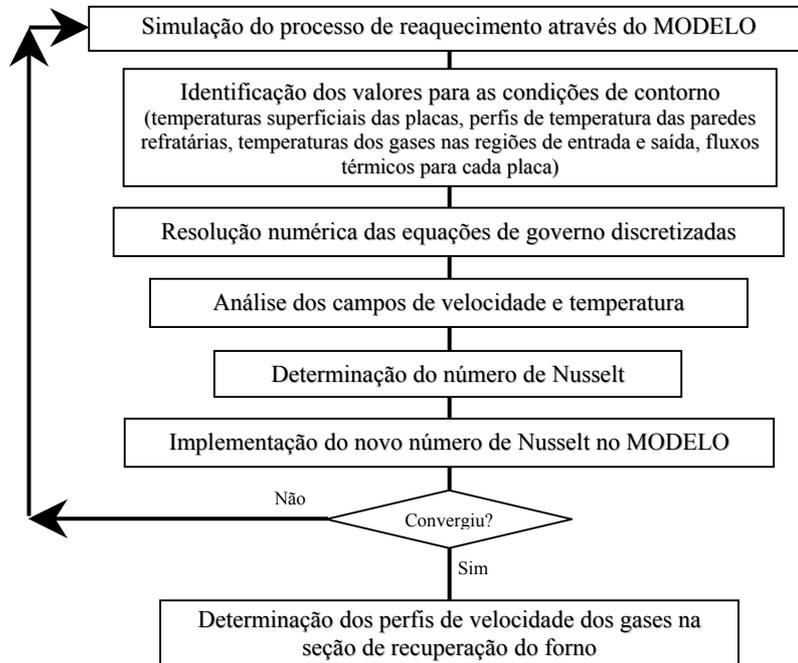


Figura 3. Fluxograma do processo de determinação do Número de Nusselt para o escoamento no interior da seção de recuperação do forno de reaquecimento.

As Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, a distribuição das linhas de corrente do escoamento e o campo de temperaturas no domínio de solução obtidos.

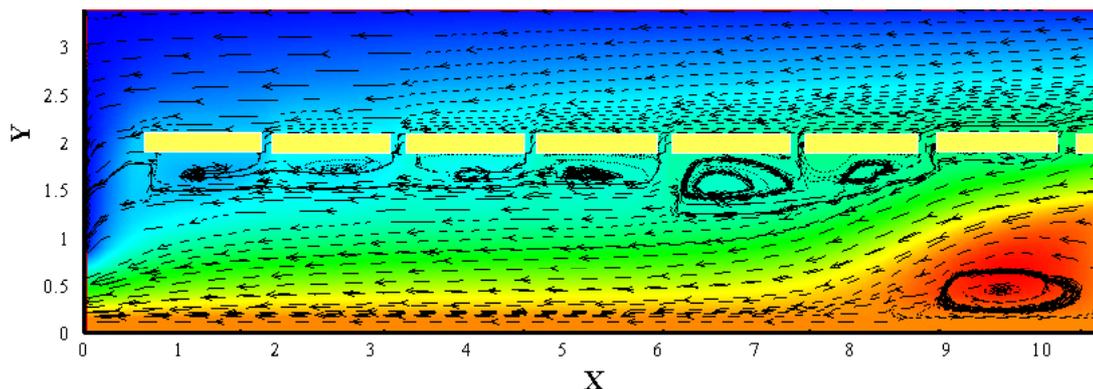


Figura 4. Distribuição das linhas de corrente do escoamento.

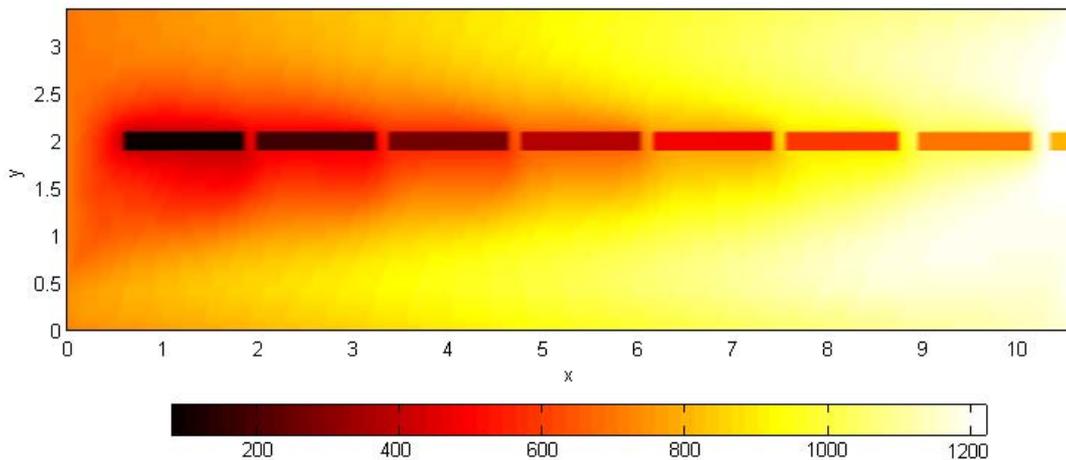


Figura 5. Distribuição da temperatura.

Analisando os resultados obtidos nesta simulação equações para cálculo do número de Nusselt foram determinadas. Em função do comportamento bem diferenciado do escoamento em várias regiões, foi necessário pesquisar diferentes equações para cada uma delas. A Tabela 1 resume as correlações obtidas.

Tabela 1. Equações usadas para cálculo do coeficiente de transferência de calor convectivo.

REGIÃO	EQUAÇÃO
Seção de recuperação superior (extrapolada para as demais seções superiores)	$Nu_x = (2 \times 10^{-7} Re_x^2 + 0,0097 Re_x) * Pr^{1/3}$
Seção de recuperação inferior (primeiras 6 placas)	$Nu_x = \frac{(-2 \times 10^{-8} Re_x^2 + 0,0045 Re_x) * Pr^{1/3}}{X^3}$
Seção de recuperação inferior (7ª placa, extrapolada para as duas seguintes)	$Nu_x = \frac{(1 \times 10^{-7} Re_x^2 + 0,0009 Re_x) * Pr^{1/3}}{X^3}$
Demais seções inferiores	-

A região onde se espera a maior contribuição da convecção é na recuperação, para a qual as equações foram obtidas e apresentam maior representatividade.

Comparação das abordagens usadas no cálculo da transferência de calor por convecção

As diferentes abordagens para a convecção foram implementadas no modelo de simulação tridimensional do forno de aquecimento. Para cada abordagem o processo de aquecimento foi então simulado. O gráfico da Figura 6 apresenta as temperaturas médias na placa obtidas considerando as quatro abordagens usadas para o cálculo do fluxo de calor convectivo.

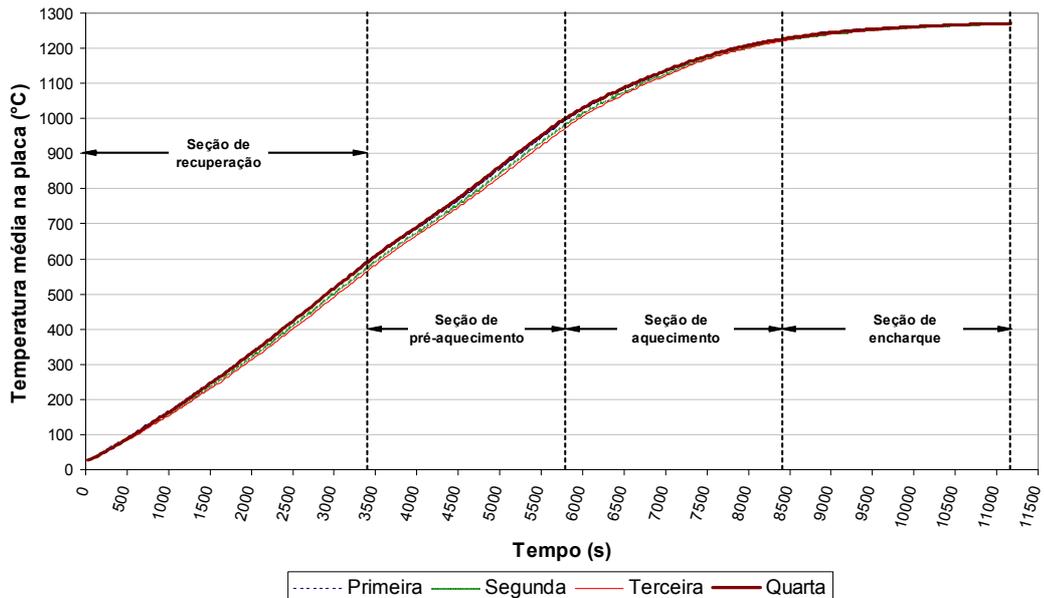


Figura 6. Evolução das temperaturas médias na placa com as diferentes abordagens usadas para o cálculo da convecção.

A diferença entre elas é maior no início do forno, onde a convecção possui maior parcela de contribuição, mas é praticamente eliminada à medida que se caminha em direção à saída do forno. Em praticamente toda a extensão do forno a diferença é inferior a 25 °C.

Um resultado importante em cada abordagem é o conhecimento dos fluxos de calor convectivo e radiante para a placa, e a proporção entre eles. A Tabela 2 apresenta, para cada seção do forno, os fluxos de calor convectivos usando as diferentes abordagens.

Tabela 2. Fluxos de calor convectivos (MW/m^2) em cada seção do forno nas abordagens usadas.

SEÇÃO DO FORNO	ABORDAGEM			
	PRIMEIRA	SEGUNDA	TERCEIRA	QUARTA
Recuperação	122,9	68,7	18,7	176,3
Pré-aquecimento	140,3	84,3	11,6	194,7
Aquecimento	118,7	56,9	9,9	100,6
Encharque	106,0	28,8	10,7	61,6

Nesta tabela verifica-se que existem grandes diferenças entre as abordagens, mesmo apesar da pouca influência na saída do forno, conforme gráfico 1.

A segunda abordagem considera apenas escoamento laminar e, portanto, é menos representativa da condição real no interior de um forno de reaquecimento. Todos os autores que estudaram o escoamento dos gases no interior de fornos de reaquecimento foram unânimes ao afirmar que o regime é turbulento.

A terceira abordagem, embora considere escoamento laminar e turbulento, se baseia em uma hipótese que não foi sustentada: a da continuidade das camadas limite. Pelos resultados da simulação do escoamento no interior da seção de recuperação do forno é possível perceber que existe uma tendência da camada limite se reiniciar a cada placa.

Um resultado fisicamente mais realístico é obtido na primeira abordagem. Neste caso, a correlação foi desenvolvida para o caso de fornos de reaquecimento, e considera o escoamento turbulento. Portanto, a primeira abordagem é uma

referência melhor para comparação em relação à segunda e à terceira. Observa-se que os fluxos de calor encontrados neste caso são bem maiores que os das duas abordagens anteriores.

A quarta abordagem agrega mais algumas características da física do problema, pois se baseia em perfis mais corretos de velocidade, obtidos pela simulação do escoamento dos gases na seção de recuperação do forno. Quando se compara esta abordagem com a primeira verifica-se uma maior proximidade dos resultados. Na quarta abordagem, porém, os fluxos são ainda maiores que na primeira. Observa-se ainda que os resultados da primeira e quarta abordagens são bem diferentes das demais.

Em síntese, apesar dos resultados no campo final de temperaturas ter sido praticamente independente da abordagem usada, duas delas apresentaram resultados mais próximos entre si e com valores de fluxos de calor mais expressivos em comparação com as demais. Acredita-se que estas duas abordagens, a primeira e a quarta, sejam mais representativas do processo do forno. A primeira, desenvolvida para o caso específico de fornos de reaquecimento, leva em consideração a natureza turbulenta do escoamento dos gases, enquanto as demais não tratam adequadamente este aspecto. A quarta trata melhor a região da “barreira térmica”, mostrando o seu grande efeito na convecção, e determina perfis mais adequados de velocidade dos gases na seção de recuperação.

Se o objetivo principal do modelo é a obtenção do campo de temperatura no final do forno, a escolha de qual abordagem adotar para a convecção é irrelevante. Se, porém, deseja-se certo grau de previsão do comportamento da curva de aquecimento nas regiões de entrada do forno, as diferentes abordagens devem ser consideradas. Neste caso, a metodologia usada neste trabalho pode ser usada para determinação de correlações mais representativas para cálculo da convecção. Ou ainda, de forma mais simples e rápida, a equação sugerida por Trinks ⁽¹⁾ pode ser usada com boa representatividade do processo.

Distribuição das formas de transferência de calor

A Tabela 3 resume as contribuições de cada mecanismo de transferência de calor, por seção do forno, nas diversas abordagens utilizadas. Nesta tabela cada percentual se refere à quantidade de energia transferida para a placa em relação ao total de energia transferida ao longo de todo o forno.

A maior contribuição da convecção foi obtida na quarta abordagem, sendo pouco maior que aquela obtida na primeira e mais que o dobro da segunda. Já na terceira, para fins práticos a convecção se mostrou desprezível.

Tabela 3. Percentuais da energia transferida por radiação e convecção para as placas em um forno de reaquecimento.

ABORDAGEM DA CONVECÇÃO	SEÇÃO	CONVECÇÃO	RADIAÇÃO	TOTAL
Primeira	Recuperação	2,20	41,37	43,57
	Pré-aquecimento	1,44	32,76	34,20
	Aquecimento	1,52	16,22	17,74
	Encharque	1,36	3,14	4,49
	Total no forno	6,52	93,48	100,00
Segunda	Recuperação	1,25	42,37	43,62
	Pré-aquecimento	0,88	33,90	34,78
	Aquecimento	0,74	17,14	17,88
	Encharque	0,37	3,35	3,72
	Total no forno	3,24	96,76	100,00
Terceira	Recuperação	0,34	42,99	43,34
	Pré-aquecimento	0,12	34,80	34,92
	Aquecimento	0,13	17,95	18,08
	Encharque	0,14	3,52	3,66
	Total no forno	0,74	99,26	100,00
Quarta	Recuperação	3,17	41,39	44,56
	Pré-aquecimento	2,00	32,40	34,40
	Aquecimento	1,29	15,86	17,16
	Encharque	0,79	3,08	3,88
	Total no forno	7,26	92,74	100,00

Pela Tabela 3 verifica-se que, mesmo no caso mais significativo, a contribuição da transferência de calor por convecção não é superior a 7,3 % de toda a energia transferida para as placas. Este resultado é equivalente ao encontrado por Kim e Huh⁽¹⁰⁾ em uma simulação tridimensional (utilizando o programa FLUENT) de um forno semelhante ao considerado neste trabalho. Na simulação Kim e Huh consideram também o cálculo tridimensional do escoamento dos gases no interior do forno.

Por estes resultados verifica-se que a radiação permanece predominante em praticamente toda a extensão do forno.

3 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para determinação de equações para a transferência de calor convectiva na seção de recuperação do forno. Esta metodologia envolveu a simulação bidimensional do fluxo de gases e da transferência de calor em regime permanente nesta região.

As comparações entre as diferentes abordagens de cálculo das trocas convectivas e destas com as trocas radiantes demonstrou que o mecanismo de radiação é predominante em praticamente toda a extensão do forno. No caso mais significativo a contribuição da convecção chegou a apenas 7,3% do total da energia transferida para a placa. O campo final de temperatura da placa na saída do forno se mostrou independente da abordagem usada para a convecção. Apenas nas seções de entrada do forno diferenças razoáveis foram observadas nos perfis de temperatura das placas. A abordagem da convecção tem relevância, portanto, nos casos em que a evolução das temperaturas no início do forno precisa ser determinada com uma exatidão maior. Entre as 4 abordagens

testadas decidiu-se pela primeira, com a equação de Trinks,⁽¹⁾ e pela quarta, desenvolvida neste trabalho, por apresentarem resultados mais realísticos. A primeira considera a turbulência no interior do forno e é de fácil e rápida implementação, enquanto a quarta trata melhor a região da “barreira térmica” e a determinação dos perfis de temperatura dos gases na seção de recuperação.

REFERÊNCIAS

- 1 TRINKS, W. **Les Fours Industriels**. Paris: John Wiley and Sons, Inc., 1957.
- 2 PAULA, M. R. **Modelamento matemático de uma placa de aço em forno de reaquecimento**. Belo Horizonte, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica: Calor e Fluidos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- 3 INCROPERA, F. P.; DeWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. New York: Guanabara Koogan, 1990.
- 4 SILVA, R. J. **Simulação Numérica do Aquecimento Tridimensional de Cilindros e Placas em Fornos de Soleira Caminhante**. Belo Horizonte, 2001. 116f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica: Calor e Fluidos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- 5 ZIVIANI, M.; ANDRADE, R. M. **Simulação do processo de reaquecimento de cilindros no forno Italmimpianti**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, 1995. (Relatório interno).
- 6 MAGALHÃES, C. V. **Modelagem matemática do aquecimento de carga em fornos siderúrgicos**. Belo Horizonte, 2000. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica: Calor e Fluidos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- 7 SILVA, L. B. **Modelamento matemático do aquecimento de barras cilíndricas de aço em um forno de soleira rotativa**. Belo Horizonte, 1996. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica: Calor e Fluidos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- 8 MIRANDA, L. L. **Análise do problema da convecção térmica no interior de fornos de reaquecimento**. Belo Horizonte, 2006. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica: Calor e Fluidos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- 9 PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Washington: Hemisphere Publishing Corp., 1980. 197p.
- 10 KIM, J. G.; HUH, K. Y. Prediction of transient slab temperature distribution in the re-heating furnace of a walking-beam type for rolling of steel slabs. **ISIJ International**, v.40, n.11, p.1115-1123, 2000.