

O MÉTODO DAS ZONAS PARA ANÁLISE DA RADIAÇÃO NA MODELAÇÃO MATEMÁTICA DE FORNOS INDUSTRIAIS: APLICAÇÕES E DESENVOLVIMENTOS RECENTES

João Alves e Sousa

Centro de Ciências Matemáticas, Campus da Penteadá, 9000-390 Funchal, Portugal

jasousa@lrec.pt

Sara A.C. Correia

UNL-FCT, Departamento de Engenharia Mecânica, Monte da Caparica, Portugal

Sacc@fct.unl.pt

Resumo. O presente artigo examina, de forma sucinta, os avanços ocorridos nos últimos dez anos no que respeita à aplicação do método das zonas à modelação matemática de equipamento industrial de alta temperatura. Este método para análise da radiação, trata a radiação térmica no interior do sistema de uma forma global, permitindo assim obter estimativas correctas deste modo de transmissão de calor em sistemas de alta temperatura como por exemplo nos fornos a gás. Por esta razão o método tem sido bastante aplicado na simulação de uma variedade de processos industriais funcionando quer em regime permanente quer em regime transitório. Este trabalho descreve particularmente as aplicações em que o carácter transitório dos processos foi tomado em consideração, passando em revista os estudos mais recentes elaborados nesta área, desde as relativamente simples representações dos fornos com sistemas unidimensionais até arranjos zonais mais sofisticados e multidimensionais da geometria do sistema. O uso de rotinas computacionais externas como, por exemplo, a técnica de Monte Carlo e os modelos da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), são também revistos, bem como a aplicação de redes neuronais aos modelos das zonas. Uma nova aplicação tecnológica, chamada combustão sem chama, é igualmente alvo de breve referência.

Palavras chave: modelos matemáticos avançados, radiação, método das zonas, regime transitório, eficiência térmica.

1. Introdução

Nas últimas décadas grande ênfase tem sido dada à necessidade de otimizar a utilização dos recursos energéticos em sistemas de altas temperaturas funcionando com combustíveis fósseis, tais como fornos e caldeiras, devido à crescente preocupação com os efeitos das mudanças climáticas do globo. Como consequência, o consumo energético de sistemas de altas temperaturas, nomeadamente fornos e as caldeiras industriais, tem sido substancialmente reduzido nas últimas décadas através de desenvolvimentos tecnológicos tais como o uso de queimadores recuperativos e regenerativos de alta eficiência. Ainda assim, continua a existir um vasto campo de oportunidades para melhoramentos particularmente através de um melhor projecto e de um controlo mais eficaz do forno. Para tal é necessário desenvolver modelos matemáticos mais precisos, mas com tempos computacionais relativamente curtos, de forma a permitir a sua utilização como uma importante ferramenta industrial para o controlo do forno em tempo real, ou para investigar uma variedade de opções ao nível da concepção do forno num curto espaço de tempo.

O método das zonas para análise da radiação tem sido exhaustivamente aplicado ao estudo térmico e de concepção de fornos e é considerada uma técnica robusta e fiável. Neste tipo de aplicação o interior do sistema é subdividido em volumes e superfícies isotérmicas (zonas). Um balanço total de energia é formulado para cada zona i , que inclui a radiação emitida por i , a radiação incidente em i a partir de todas as outras zonas j envolventes, a transmissão de calor por convecção e os fluxos de entalpia de e para zonas adjacentes, bem como qualquer energia libertada por combustão nessa zona i . Isto resulta num sistema simultâneo de equações (uma para cada zona) não-lineares que pode ser resolvido para a temperatura e fluxos de calor. O enfoque integral adoptado por este método trata a radiação no sistema de uma forma global o que permite obter resultados fiáveis mesmo quando a subdivisão do interior do forno em zonas não é particularmente fina.

A radiação térmica é o modo de transmissão de calor dominante na maioria dos fornos de altas temperaturas pelo que a simulação do seu desempenho térmico normalmente requer um cálculo preciso da complexa troca radiativa no sistema, o que pode ser conseguido por métodos como a transferência discreta, ordenadas discretas ou técnicas de volumes finitos que podem ser incorporadas em modelos da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) de escoamentos turbulentos. Embora estas técnicas tenham sido empregues com sucesso para simular sistemas de combustão, a componente numérica é pesada e os tempos computacionais são em geral muito longos para poderem ser usados como uma ferramenta de apoio à optimização da concepção e controlo dos fornos. Consequentemente, modelos de alguma forma menos complexos, baseados no método das zonas para análise da radiação, têm sido empregues como alternativa para esses tipos de aplicação.

O cálculo preciso da troca radiativa é fundamental na aplicação do método das zonas que formula o problema em termos de factores de permuta conhecidos por *áreas directas* e *áreas totais de permuta*. Este cálculo tem em

consideração a geometria forno/carga assim como as propriedades radiativas dos produtos de combustão e das superfícies, uma vez que estes parâmetros influenciam as magnitudes relativas da radiação proveniente directamente da chama e da troca de radiação indirecta das superfícies refractárias e da carga no interior do forno. Ora uma das tarefas mais complexas e “pesadas” do método das zonas reside, precisamente, no cálculo das áreas de permuta para uma dada configuração. Logo, quando estão envolvidas formas complexas, tanto do forno como da carga, a geometria a considerar no modelo matemático tem que ser, muitas vezes, simplificada. A grande vantagem do método das zonas, em relação a métodos alternativos, reside no facto de o cálculo dos factores geométricos ser separado do cálculo numérico para determinar a solução das equações dos balanços de energia, o que é particularmente vantajoso em modelos não-estacionários (transitórios).

2. Desenvolvimentos recentes em aplicações do método das zonas na modelação matemática de fornos industriais

2.1 Estudos sobre a convecção em fornos

Há uma reconhecida carência de dados publicados sobre a transferência de calor por convecção em fornos, talvez porque a radiação térmica é dominante em muitas das aplicações a altas temperaturas. Nestes casos o uso de uma estimativa aproximada da transferência de calor por convecção é o suficiente na maioria dos casos, razão pela qual é comum utilizar simples estimativas derivadas de escoamentos em tubagens. No entanto, em certos fornos a gás a emissividade da chama é relativamente baixa e a convecção pode ser significativamente mais elevada, pelo que a inclusão de dados mais exactos sobre a convecção pode ser importante, Beltagui et al (1988). Um exemplo prático desta situação aplica-se quando os componentes (carga) num forno a gás são mantidos a uma temperatura especificada por períodos de tempo relativamente longos por razões metalúrgicas. Durante estes períodos de “estágio” ou “igualização” é necessário reduzir a entrada de combustível nos queimadores, e assegurar uma circulação adequada dos produtos da combustão no interior do forno, o que se consegue operando com elevados níveis de excesso de ar. Nestas circunstâncias tanto a temperatura como a emissividade da chama baixam, aumentando assim substancialmente a contribuição da convecção no total da quantidade de calor transferida. Alguns estudos sobre a convecção em fornos têm sido publicados, mas referem-se regra geral a geometrias relativamente simples, Beltagui and Ralston (1991), ou são específicas para um determinado sistema, Dugwell and Oakley (1988).

Alguns fornos de tratamento térmico operam com níveis muito altos de excesso de ar nos produtos da combustão (> 500%) durante o chamado período de “igualização”, que é uma parte do ciclo térmico destinada a promover a distribuição uniforme de temperatura na carga ou quando a carga é mantida a temperatura constante como parte do processo de aquecimento. Como vimos, nestas condições a temperatura da chama e dos produtos da combustão baixa, bem como a sua emissividade, levando a um aumento da transferência de calor por convecção. Para mais, a uniformidade de aquecimento da carga é crítica na maioria das operações de tratamentos térmicos e isso pode ser influenciado pela distribuição de calor transferido por convecção no interior do forno. Logo, o uso de estimativas mais correctas para a convecção em sistema de altas temperaturas é importante neste tipo de situações.

Nem sempre é possível usar as correlações existentes para a transmissão de calor relativa a escoamento em tubagens em fornos industriais, visto que a geometria deste tipo de equipamento é complexa e os padrões de escoamento encontrados podem ser significativamente diferentes daqueles. Além disso, é difícil medir a transferência de calor por convecção directamente em sistemas de altas temperaturas pelo que as estimativas são por vezes obtidas através da modelação física. Foi assim que Dugwell and Oakley (1988) conseguiram estimar com exactidão o desempenho de um forno cerâmico tipo “túnel” usando dados da convecção, derivados de um pequeno modelo piloto isotérmico, como dados de entrada para um modelo matemático. Sousa et al (1995) usaram igualmente coeficientes de transmissão de calor por convecção derivados de um modelo físico isotérmico de um forno a gás para tratamento térmico de ligas metálicas usadas na indústria aeronáutica. Neste modelo os componentes individuais do forno foram reproduzidos num molde à escala, em naftalina, e foi usada a analogia de Chilton-Colburn (1934) para derivar os coeficientes de transmissão de calor por convecção através de medições de transferência de massa. As medições foram efectuadas para números de Reynolds relativos ao queimador do modelo (baseados no diâmetro d do injectador e na respectiva velocidade de saída média) entre $4,2 \times 10^{-3}$ e $6,5 \times 10^4$. Os dados de convecção obtidos, médios e quasi-locais, foram apresentados para diferentes cargas térmicas do queimador, várias dimensões e disposição dos queimadores, e ainda para diferentes geometrias dos componentes. Os coeficientes medidos são significativamente mais elevados do que aqueles sugeridos pelo uso de correlações empíricas do escoamento em tubagens, pelo que o uso desses valores grosseiros pode conduzir a uma clara subestimação no cálculo da transferência de calor no interior do forno. Os resultados mostram que o número de Nusselt é uma função aproximada de $Re^{0,67}$ e este expoente é comparável com a ordem de grandeza dos valores usados na correlação da transmissão de calor para escoamentos turbulentos. A Figura 1 mostra que a velocidade do caudal mássico à saída do queimador (burner momentum flow rate) proporciona uma representação adequada dos dados, onde os coeficientes de transmissão de calor medidos, para os discos e para os cilindros, podem razoavelmente ser representados por uma única correlação.

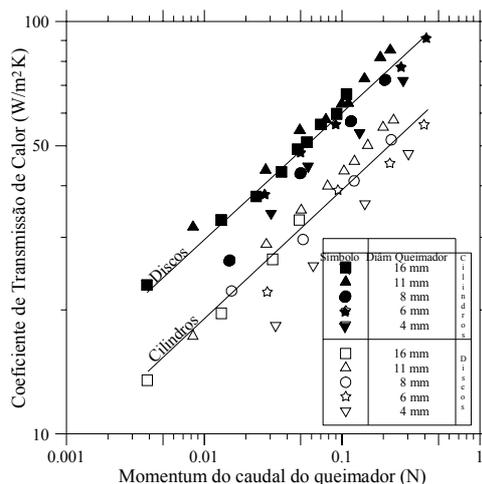


Figura 1 Variação do Coeficiente de Transmissão de Calor com o Momentum do Caudal do Queimador

O efeito da convecção na simulação do desempenho do forno foi então testado num modelo matemático não-estacionário de um forno para tratamento térmico, assumindo coeficientes de transmissão de calor por convecção de 5, 25 e 45 W/m²K em cada uma das simulações, resultando claro que estes diferentes valores da convecção afectam o resultado das simulações numéricas, especialmente no caso do tratamento térmico dos materiais de maior espessura. Pode ser concluído que o uso de um valor pouco rigoroso (e.g. 5 W/m²K) como é muitas vezes o caso, pode em certas circunstâncias conduzir a uma subestimação da temperatura superficial da carga em fornos de tratamento térmico quando se submete a aquecimento material relativamente espesso, como é o caso dos veios cilíndricos usados na indústria aeronáutica. Noutros tipos de fornos, com geometria mais simples, o tipo de escoamento induzido pelos queimadores é similar ao encontrado na expansão súbita em condutas e, nestes casos, as correlações existentes podem ser aplicadas (Beltagui e Ralston (1991), Ward et al (2001), Guile et al (1999)).

2.2 Modelos transitórios

A grande maioria dos estudos já publicados relativamente à aplicação do método das zonas a modelos multi-dimensionais de fornos tem sido confinada à situação de estacionaridade, que não permitem a simulação de fornos que funcionam com sistemas de aquecimento intermitente. Por exemplo, os modelos estacionários não conseguem simular o desempenho do forno e o seu consumo de combustível durante o período de arranque a frio dos fornos com carregamentos descontínuos. O desempenho térmico não-estacionário de um sistema pode, no entanto, ser simulado pela resolução sucessiva do modelo zonal em pequenos incrementos de tempo cobrindo todo o período de aquecimento, de forma a poder usar os fluxos de calor calculados para actualizar as temperaturas da carga e restantes superfícies do interior do forno, tal como Saimbi e Tucker (1983), que foram os primeiros investigadores a desenvolver um modelo zonal não-estacionário multi-dimensional. No entanto, a simulação de uma operação não-estacionária tem, aparentemente, sido limitada ou a estruturas simplificadas do método das zonas, onde se considera que as zonas de volume adjacentes estão ligadas por planos imaginários e, como resultado, a direccionalidade e a natureza global da permuta radiativa no interior do sistema não são correctamente representadas, Charette e tal (1990), ou a geometrias simplificadas do forno como a geometria tipo “túnel”, onde os chamados *long-furnace models* (LFM), que subdividem o forno apenas em zonas ao longo do seu comprimento, podem ser empregues, Tucker e Ward (1990). Em muitos casos a geometria é simplificada devido às dificuldades inerentes ao cálculo das áreas apropriadas de permuta de radiação, o que pode conduzir a graves erros no cálculo da distribuição local dos fluxos de calor e resultante evolução da temperatura da carga do forno, como foi demonstrado por Tucker e Ward (1986).

Esta restrição foi no essencial eliminada nos estudos referidos neste artigo devido ao uso de um código computacional, RADEX, para determinar as áreas de permuta. Este software incorpora um método de Monte-Carlo para calcular as áreas totais de permuta requeridas pelo método das zonas, ver Lawson e tal (1994). Sousa et al (1996) usaram o código baseado no método de Monte-Carlo na modelação matemática de um forno a gás, com uma configuração múltipla de queimadores, para tratamento térmico de componentes de “super alloys” à base de Níquel para aplicações em turbinas a gás. Eles desenvolveram e validaram um modelo multi-dimensional transitório do forno, através da combinação de um modelo *long-furnace* com uma representação de zona única para uma parte do forno. Estes investigadores conseguiram determinar a distribuição da temperatura da carga durante um ciclo térmico constituído por um período de aquecimento, seguido por dois períodos de “igualização” de 8 horas cada um numa gama de temperaturas de 600-750 °C, dependendo do tipo de aço.

Num modelo transitório as temperaturas superficiais iniciais são especificadas no início da simulação e o modelo zonal calcula primeiro as temperaturas das zonas volúmicas (ou zonas de gás) resolvendo um sistema de equações não-lineares, e subsequentemente, os fluxos de calor em cada zona de superfície, isto é paredes de refractário e carga. As temperaturas destas superfícies são depois actualizadas usando os fluxos de calor como condições de fronteira em modelos unidimensionais de condução baseados na técnica das diferenças finitas, e todo o processo é repetido sequencialmente para cada incremento de tempo ao longo de todo o ciclo de aquecimento, ver Figura 2.

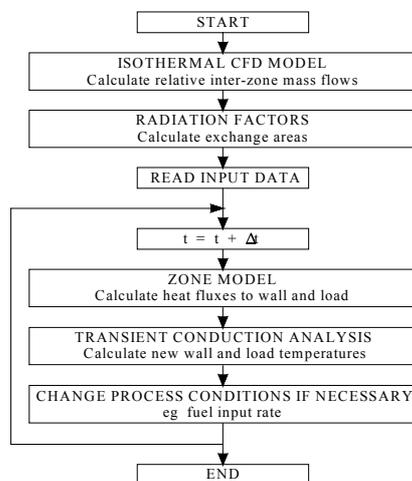


Figura 2 Fluxograma Simplificado de um Modelo das Zonas Transitório

Neste caso específico a carga é colocada num tabuleiro perfurado que se apoia, por sua vez, em blocos de refractário existentes no chão do forno, ver Figura 3. Um total de 28 queimadores a gás, do tipo nozzle-mix, estão dispostos de forma a trabalharem acima e abaixo da carga, enquanto que os gases de exaustão são removidos via 8 chaminés situadas próximo (acima) do nível da carga. Os blocos de refractário funcionam como canais que direccionam os produtos da combustão provenientes dos queimadores inferiores localizados abaixo da carga. Durante o período de “igualização” a recirculação dos produtos de combustão dentro do interior do forno, ou seja a uniformidade de aquecimento, é mantida graças a níveis de excesso de ar que chegam a atingir 550 %, o que é conseguido pela redução do caudal de combustível mantendo porém constante o caudal do ar de combustão.

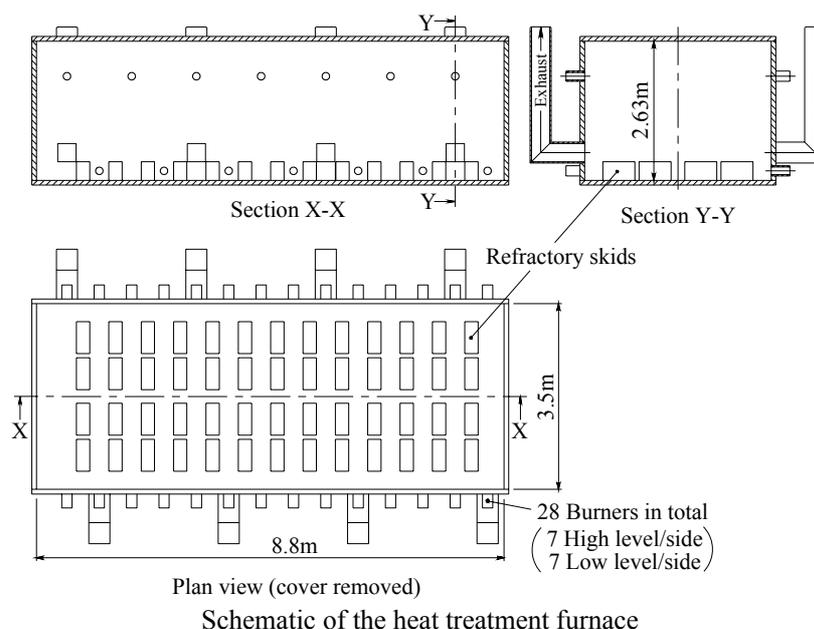


Figura 3 Forno para Tratamento Térmico de Aços Especiais Utilizados na Indústria Aeronáutica

Esta complexa natureza da configuração interna do forno e correspondente campo de escoamento, requer uma abordagem cuidada ao zoneamento do forno, de forma a manter os tempos e os recursos computacionais dentro de limites considerados razoáveis. A abordagem foi assim, primeiro, representar a parte superior do forno de tratamento térmico, acima da carga, por um modelo tridimensional incorporando 24 zonas volúmicas, enquanto que a parte inferior do forno, abaixo dos componentes a tratar, foi representada por uma série de modelos de *long-furnace* cada um dos quais constituído por 5 zonas volúmicas rodeadas pelas correspondentes superfícies refractárias e da carga.

No entanto, testes de sensibilidade efectuados ao modelo 3D (parte superior do forno) com três padrões de escoamento diferentes, simulação esta que foi determinada pela incerteza associada à informação disponível quanto a este parâmetro, mostrou que os resultados da evolução da temperatura da carga, ao longo do tempo de aquecimento, eram insensíveis a esta variável. Foi assim possível concluir que o sistema múltiplo de queimadores juntamente com o excesso de ar usado em partes do ciclo térmico resultava, de facto, em temperaturas relativamente uniformes dos produtos da combustão. Consequentemente, foi decidido representar a parte superior do interior do forno pelo chamado modelo de zona única (WSM) onde os componentes de carga (discos) eram, de toda a forma, tratados como sendo zonas de superfície individuais. O modelo multidimensional zonal final resultou então num modelo híbrido, no qual a secção superior era simulada por uma zona de gás única e a secção inferior, abaixo dos queimadores, por uma série de modelos de *long-furnace* (LFM). Estes dois componentes do mesmo modelo global estavam separados pelos discos (carga) cujas condições de fronteira no modelo de condução unidimensional transitório eram os fluxos de calor resultantes da radiação em cada uma das partes em que o forno foi dividido para efeitos de modelação matemática. Para além disso, os produtos da combustão saindo do LFM entram no WSM o que foi representado como um fluxo de entalpia a entrar na secção superior.

Os resultados e as medições da temperatura da carga ao longo do tempo, podem ser comparadas nas Figuras 4, para os discos com maior espessura, para ambas as situações possíveis de arranque, a quente e a frio. É notório que as variações de temperatura nos discos são relativamente pequenas e que globalmente existe uma boa concordância entre valores medidos e simulados. Nas simulações de arranque a frio o modelo parece subestimar ligeiramente as temperaturas da carga após o arranque inicial, embora a concordância seja suficientemente boa para este efeito de estudos de concepção e projecto. Esta diferença de comportamento quando comparada com a ligeira sobrestimação genérica aparente nas simulações com arranque a quente, pode estar possivelmente associada com um maior efeito de “sombra” na parte inferior dos discos provocado pela presença dos inicialmente frios blocos de refractário. Nas comparações entre as curvas de consumo energético acumulado também é visível uma boa concordância ao longo das simulações, com uma maior divergência durante o segundo período de “igualização”, onde uma significativa proporção do calor transferido no interior do forno é depois perdido através das paredes e do tecto. Mesmo assim, o consumo global de gás é estimado com erro inferior a 10%

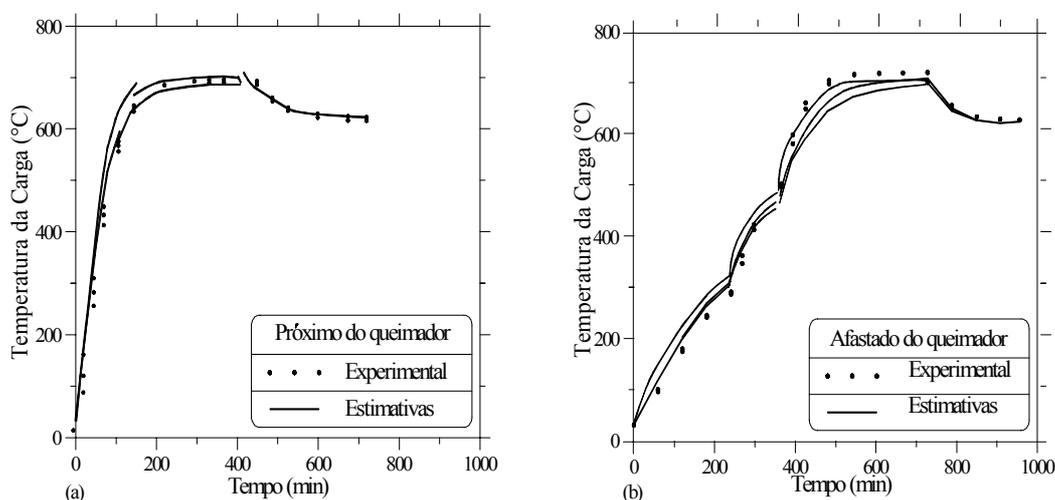


Figura 4 Histórico da Temperatura-Tempo durante Arranques a Quente e a Frio

Há aplicações, no entanto, onde o padrão de escoamento pode ser consideravelmente mais complicado com, por exemplo, recirculação substancial a ter lugar em regiões perto dos queimadores. Consequentemente, Ward e tal (1999) empregaram um modelo bidimensional mais sofisticado, onde a subdivisão zonal do forno teve lugar tanto na altura como no comprimento do forno, para estimar as taxas de aquecimento, os consumos de combustível e as temperaturas da carga durante o arranque a frio num forno a gás para aquecimento de barras metálicas. O modelo requeria dados do campo de escoamento dos produtos de combustão, para permitir o cálculo adequado dos fluxos de entalpia de e para as zonas volúmicas, e estes foram baseados em informação anterior produzida por Fitzgerald and Sheridan (1973) para uma versão à escala reduzida deste mesmo forno, ver Figura 5. O padrão global de escoamento mostrou ser claramente

bidimensional com uma recirculação significativa perto do queimador na zona de descarga do forno (deslocamento da carga em contracorrente).

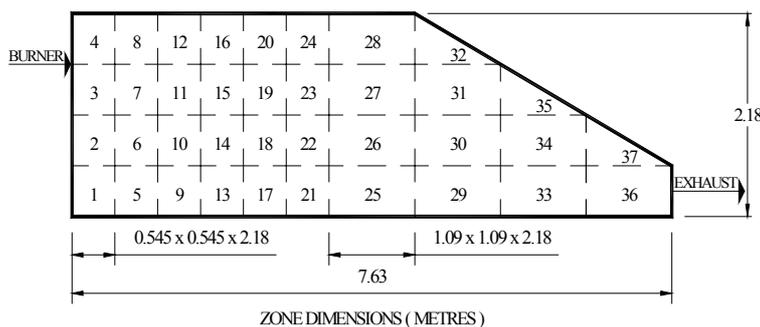


Figura 5 Representação e subdivisão esquemática do forno

A distribuição de temperaturas e a respectiva taxa de transmissão de calor foi assumida como sendo uniforme na largura do forno, de forma que o forno não foi subdividido nesta direcção. As barras metálicas de aço macio tinham uma espessura de 64 mm e formavam uma placa contínua posicionada simetricamente sobre o refractário denso que constitui o chão do forno. O revestimento das paredes do forno consistia de 30 cm de refractário denso nas paredes laterais e chão enquanto o tecto estava revestido por 35 cm de uma fibra cerâmica leve para altas temperaturas, com uma baixa massa térmica. O modelo foi constituído por 13 zonas volúmicas e 50 zonas de superfície, das quais 7 são superfícies da carga. A carga térmica máxima fornecida aos queimadores foi de 5,4 MW (baseada no valor calorífico bruto para o gás natural) e foi assumido que a combustão estava completa à saída dos queimadores do tipo nozzle-mix, assistidos por ar frio, e a operar com um excesso de ar de 5 %. As variações no caudal de gás natural foram controladas através de um termopar de referência (set point) colocado na face do tecto exposta aos produtos da combustão no lado da descarga do forno, e a modulação efectuada numa proporção de 5:1 (turndown ratio) em resposta a desvios em relação ao set point. Os produtos de combustão são extraídos através de um sistema de exaustão colocado no lado da entrada da carga. As estimativas foram comparadas com aquelas resultantes da aplicação de um LFM pelo agrupamento de pares de zonas volúmicas na vertical, que assim formaram uma série de zonas volúmicas apenas ao longo do comprimento do forno. Ward et al mostraram que um modelo transitório 2D pode de facto proporcionar estimativas melhoradas e demonstraram a importância de incluir a recirculação nestes modelos visto que o modelo simplificado de escoamento *plug flow* típico dos LFM subestima seriamente o tempo de aquecimento quando comparado com outros modelos mais complexos. A recirculação de produtos de combustão “mais frios” a jusante arrefece a temperatura nas zonas perto do queimador pelo que a taxa de calor transferido para a carga é reduzida nestes modelos que incluem a recirculação.

Outra comparação efectuada foi entre o modelo 2D (13 zonas volúmicas) e o LFM (7 zonas) com recirculação. Os tempos de aquecimento estimados diminuem à medida que o grau de recirculação junto aos queimadores diminui, ver Tabela 1. Este efeito deve-se ao efeito de “diluição de temperatura” nas zonas de volume perto do queimador devido ao fluxo de produtos de combustão mais frios de zonas mais a jusante no interior do forno. Em todos os casos o modelo 2D multidimensional estima períodos de aquecimento mais longos, logo consumos de energia mais elevados e gradientes de temperatura na carga mais baixos. Estes resultados estão de acordo com Tucker e Ward (1990) que compararam as temperaturas medidas ao longo de um ciclo de aquecimento para barras de aço macio colocadas junto aos queimadores, durante o arranque a frio de um forno a gás, com as estimativas de um LFM, e concluíram que o LFM subestimava o tempo necessário para que a barra metálica atingisse a temperatura especificada de descarga. Logo, um modelo bidimensional pode fornecer estimativas mais exactas do período de aquecimento e dos consumos energéticos durante o arranque a frio de um forno.

Tabela 1 Comparação entre o modelo 2D e o LFM (TD = 1250 °C, SPT = 1380 °C)

Padrão de escoamento	Tempo de aquecimento (h)		Gradiente de temperatura (°C)		Consumo de combustível (GJ)	
	2D	LFM	2D	LFM	2D	LFM
1	1,82	1,59	93,9	99,6	35,2	30,7
2	1,66	1,50	99,1	103,9	32,2	29,0
3	1,63	1,46	100,1	105,5	31,6	28,3

Os dois modelos foram também usados para investigar os efeitos produzidos por alterações na temperatura de set point. A temperaturas de set point mais baixas o sistema de controlo faz uma modulação à carga térmica fornecida aos queimadores, através da variação do correspondente caudal de gás natural, durante uma proporção significativa do

tempo de aquecimento. A diferença na estimativa dos tempos de aquecimento entre os dois modelos também aumenta à medida que se reduz a temperatura de set point, com o LFM sempre a subestimar o tempo de arranque, como se pode ver na Figura 6. A carga térmica fornecida aos queimadores é modulada durante uma proporção maior do tempo de aquecimento no modelo bidimensional devido ao zoneamento mais fino adoptado por este modelo, visto que permite detectar altas temperaturas nas zonas de gás adjacentes ao termopar de referência situado no tecto na zona de descarga do forno. Nestes estudos foi demonstrado que o número de zonas adoptadas no modelo zonal é importante e pode afectar significativamente as estimativas obtidas, especialmente para o caso de simulações de fornos com arranque a frio.

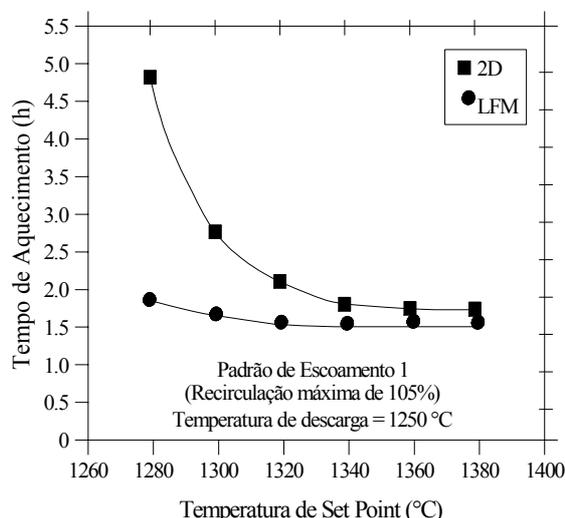


Figura 6 Variação do Tempo de Aquecimento com a Temperatura de Set Point

Correia et al (2000a) prolongaram este estudo e mostraram que o número de zonas num modelo 2D pode influenciar significativamente as estimativas do desempenho não-estacionário de um forno, pelo que uma subdivisão mais fina pode ser imperativa, particularmente em zonas próximas dos queimadores onde as variações de temperatura dos produtos de combustão são mais severas. Assim sendo, neste estudo refinou-se o modelo 2D passando-se a um zoneamento com 37 zonas volúmicas para permitir estabelecer a importância desta variável para o mesmo tipo de forno. A informação respeitante aos campos de escoamento foi estimada de forma independente (off-line) através de um CFD isotérmico, a temperatura ambiente usando um código comercial (CFX) baseado no método dos volumes finitos. O domínio a estudar foi dividido num máximo de 70x36x20 volumes de controlo produzindo um total de 36000 células que correspondem a apenas metade do forno devido à simetria do sistema. Esta abordagem simplificada foi considerada adequada para produzir estimativas credíveis do campo de escoamento, tendo em conta que o uso de modelos piloto isotérmicos, a temperatura ambiente têm no passado sido empregues com sucesso na investigação das características dos escoamentos de um conjunto de sistemas de combustão, ver Rhine e Tucker (1991), usando uma geometria corrigida do queimador nas simulações isotérmicas de modo a contabilizar adequadamente as variações de densidade em escoamentos não-isotérmicos de fornos reais. Isto foi conseguido através da redução do diâmetro de saída dos injectores dos queimadores segundo o critério de Thring-Newby (1953).

A diminuição (refinamento) da malha zonal também permite a simulação do posicionamento do termopar de controlo. Como consequência, foram feitas simulações com o termopar de controlo em diferentes zonas adjacentes próximas do queimador. Os resultados mostram que as estimativas dos tempos de aquecimento no arranque inicial do forno dependem consideravelmente do posicionamento do sensor, ver Figura 7. À medida que o termopar de controlo era posicionado em zonas mais distantes do queimador o tempo de aquecimento requerido para atingir a condição final de descarga é sensivelmente reduzido, em particular para temperaturas de set point mais baixas. Isto deve-se às temperaturas mais elevadas registadas pelo termopar de controlo o que causa modulação da carga térmica nos queimadores por um período de tempo mais longo, durante o processo de aquecimento. A modulação no queimador é ainda ampliada quando o sensor é deslocado para mais próximo do queimador, isto é em zonas de gás mais quentes.

A simulação indica que a temperatura de set point adequada para uma determinada especificação depende então do posicionamento do sensor de controlo. Mais importante ainda, os resultados indicam claramente que uma representação suficientemente fina em zonas próximas do queimador tem que ser adoptada, se queremos simular de forma rigorosa o efeito do posicionamento do sensor que controla o set point, visto que os gradientes de temperatura perto do tecto do forno, próximos do queimador, são significativos

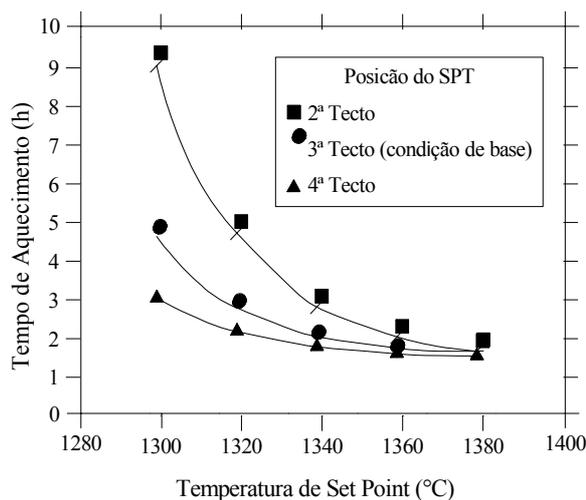


Figura 7 Efeito da Posição do Set Point no tempo de Aquecimento

Num artigo posterior, os mesmos autores (2000b) usaram o seu modelo “otimizado” com a configuração de 37 zonas de gás, para estudar a concepção e controlo de um forno de aquecimento de barras metálicas durante o arranque a frio. Neste estudo foi considerado o efeito de alterações na inclinação dos queimadores, simulando duas condições distintas, uma em que os queimadores injectam horizontalmente para o interior do forno, e uma segunda em que os queimadores injectam com uma inclinação de 20° direccionada para a carga. O campo de escoamentos resultante está ilustrado na Figura 8, que apresenta detalhes das velocidades no plano vertical que passa no centro de um dos queimadores mais internos e para duas geometria distintas. Os queimadores que injectam horizontalmente produzem uma forte recirculação imediatamente abaixo das suas posições e isto pode resultar numa região de produtos da combustão relativamente arrefecidos junto às barras perto da zona da descarga do forno. Em contraste os queimadores quando inclinados revelam uma zona de recirculação muito mais fraca abaixo das suas posições pelo que para uma determinada carga térmica as temperaturas do gás e consequentemente as taxas de transmissão de calor para as barras serão maiores do que aquelas associadas à configuração horizontal. Além disso uma forte recirculação dos produtos de combustão surge nas zonas junto do tecto, no caso dos queimadores inclinados, e isto poderá ter o efeito de arrefecer a superfície do refractário e assim contribuir para a diminuição das temperaturas de referência do sistema de controlo.

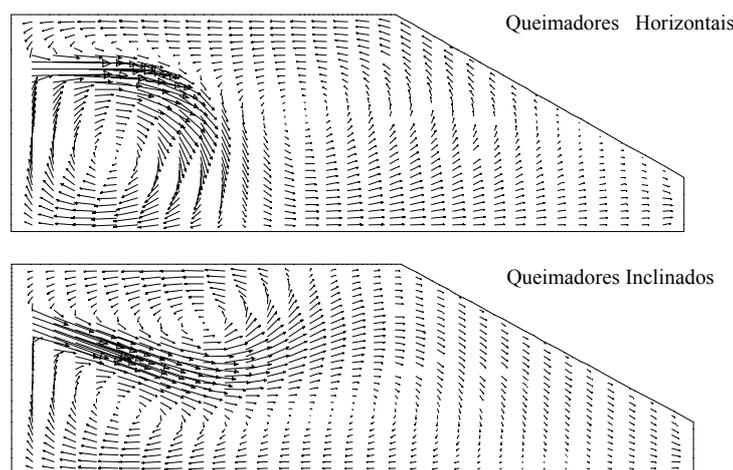


Figura 8 Escoamento resultante na secção central do queimador para injeção horizontal e inclinada

Conclui-se que as alterações na orientação do queimador podiam afectar significativamente o desempenho térmico do sistema tanto no arranque inicial a frio como durante um período de funcionamento prolongado, devido no essencial a alterações induzidas no campo de escoamento do forno. O comportamento térmico foi também influenciado pelo valor da temperatura de set point e pela posição do termopar no tecto do forno que funciona como sensor de controlo.

Os efeitos de alterações no tipo de construção do tecto do forno, mostraram que o uso de fibras cerâmicas de baixa massa térmica no tecto do forno pode trazer benefícios durante uma operação não-estacionária.

2.3 Redes neuronais na modelação da transmissão de calor

Embora tudo indique que os modelos zonais providenciam estimativas satisfatórias do desempenho térmico de fornos operados intermitentemente, os tempos computacionais correspondentes podem ser demasiado altos para utilização on-line pelo que o uso de redes neuronais artificiais (RNA) tem sido sugerido como alternativa. As RNA são representações simplistas do “cérebro” biológico e têm sido usadas para representar funções e sistemas complexos não lineares, ver Chong et al (2000). Para controlar um forno é necessário estimar o comportamento térmico da instalação. Isto pode ser conseguido treinando as RNA com dados tirados da própria instalação industrial, de forma a que o modelo neuronal actue como uma ferramenta do tipo caixa negra. No entanto, as dificuldades técnicas e os custos associados à obtenção de dados provenientes de medições experimentais em instalações industriais limitam este procedimento e, como alternativa, podem-se treinar as RNA com dados de um modelo matemático (como o modelo zonal) que seja capaz de representar adequadamente o comportamento de um forno. Estes modelos podem simular, entre outros, o tempo de aquecimento, o consumo e a temperatura da carga à saída. Como parâmetros de entrada podem ser utilizados o excesso de ar, a potência térmica do queimador e os valores de temperatura definidos para o *set point*.

Em 2001 Ward et al desenvolveram um modelo RNA para simular as características não-estacionárias de um simples modelo de zona única de um forno batch a gás, usado para aquecimento de barras metálicas até uma determinada temperatura de descarga. O modelo neuronal conseguiu estimar o calor transferido, o consumo de combustível e os gradientes de temperatura na carga. Foram testadas uma gama de redes, com as estimativas dos modelos de zona e dos modelos neuronais a mostrarem uma boa concordância, sugerindo que os modelos neuronais podem ser um meio promissor para estimar o desempenho térmico de fornos com o propósito de o controlar.

2.4 Combustão sem chama

A eficiência de sistemas de alta temperatura pode ser melhorada através do uso de queimadores do tipo recuperativo/regenerativo para o pré-aquecimento do ar de combustão. No entanto, é sempre preferível optar por aumentar a transferência de calor na câmara relativamente à adopção de uma tecnologia de recuperação de calor. Neste sentido, vários grupos internacionais têm vindo a desenvolver e implementar tecnologias, como por exemplo, a combustão sem chama e o uso de membranas cerâmicas porosas, que visam aumentar a taxa de calor transferido para a carga.

Na década de 90 um processo descrito como “combustão sem chama” foi desenvolvido e implementado no Japão para uso em queimadores do tipo regenerativo. Nesta nova tecnologia o combustível é injectado nos fornos de alta temperatura em zonas ricas em produtos de combustão e sem (ou quase) a presença de oxigénio. Desta forma, a reacção entre o combustível e o oxigénio não ocorre a não ser na presença de grandes quantidades de produtos da combustão, que actuam como estabilizadores térmicos. Ao eliminar os picos de temperatura normalmente encontrados em sistemas de queima convencional, a criação de *thermal NOx* é inibida. O processo de combustão torna-se invisível (daí o termo combustão sem chama). Os picos de temperatura no refractário e os fluxos de calor podem ser eliminados, ou concebidos de tal forma que forneçam a necessária tiragem mas sempre respeitando as limitações dos materiais.

Quando aplicado a fornos de alta temperatura usando ar de combustão pré-aquecido, as técnicas de combustão sem chama têm providenciado benefícios económicos em termos de energia e combustível utilizado (~ 10 %) para além da redução das emissões de NOx. Estas poupanças advêm da criação de uma maior uniformidade das temperaturas na zona de aquecimento do forno. Estudos em fornos piloto de 1 MW no International Flame Research Foundation (Weber, 1999 e 2001) corroboram estes dados. Algumas configurações para combustão sem chama podem resultar em reduções tais que não seja necessário recorrer a processos de *post NOx clean up*.

3. Conclusões

O modelo das zonas é capaz de prover estimativas fiáveis do calor radiativo transferido em fornos industriais e tem sido aplicado tanto em situações estacionárias como não-estacionárias. Foi demonstrada a importância de uma representação e de um zoneamento cuidados do interior do forno, assim como da transmissão de calor por convecção nesse espaço. Em conformidade, concluiu-se que o número de zonas afecta significativamente o desempenho térmico estimado de fornos a gás operados tanto de forma contínua como intermitente. Os modelos mais simples, como os MLF, têm menos probabilidade de estimar correctamente a influência de quaisquer modificações na concepção e projecto de queimadores ou no controlo de fornos, devido às representações simplificadas do sistema de controlo e do campo de escoamento. Em particular, parece que os MLF tendem a sobrestimar a eficiência do forno, ou em contraponto subestimar a quantidade de combustível utilizada, o que conduziria a desenhar o forno com menores dimensões.

Desenvolvimentos recentes incluem a extensão do método para incorporar as superfícies não-cinzentas e a natureza de banda da radiação térmica dos produtos de combustão do gás natural. Um modelo de redes neuronais mostrou poder fornecer uma representação adequada de um simples modelo zonal de um forno de aquecimento de metais durante um arranque a frio, pelo que os modelos neuronais, como tempos computacionais relativamente curtos, podem ser apropriados para o controlo de fornos. Outras áreas a melhorar na modelação zonal incluem a validação dos modelos zonais e dos modelos CFD, logo um programa experimental completo deve ser levado a cabo, num forno de produção, para uma gama alargada de condições de funcionamento. Em muitos dos estudos, as simulações baseadas em CFD, isotérmicas e não combustíveis, mostraram dar informação adequada quanto ao campo de escoamento no interior de fornos. No entanto, existe a necessidade de estabelecer comparações entre as estimativas isotérmicas e não isotérmicas e, em particular, de avaliar o impacto de eventuais diferenças nos resultados de modelos zonais. Uma melhor representação do sistema de controlo do forno e possivelmente as emissões de NOx poderão ser estimadas quando a ligação entre Zona/CFD se tornar mais efectiva, de forma a criar uma base de dados realista, com características de escoamento válidas para uma gama de geometrias e de condições operativas de fornos.

4. Referências

- Beltagui S.A., Fuggle R.N. and Ralston T., 1988, Measurement and Prediction of Heat Transfer in the NEL Furnace, *Proc. 2nd UK Nat. Conf. On Heat Transfer*, Glasgow, vol. 2, pp 1219-1232.
- Beltagui S.A. and Ralston T., 1991, The prediction of Heat Transfer from swirling Flames, *Proc. 2nd European Conf. On Industrial Furnaces and Boilers*, Vilamoura, Portugal.
- Charette A., Larouche A, Bui R.T. and Kocaefer Y.S., 1990, The Imaginary Planes Method Applied to the 3D Simulation of the Transient Behaviour of Metal Processing Furnaces, *Proc. 9th Intl. Heat Transfer Conf.*, Jerusalem, Israel, vol. 4, pp 425-430.
- Chilton, T.H. and Colburn, A.P., 1934, Mass transfer (absorption) coefficients, *Ind. and Eng. Chem.*, vol. 26, n° 11, pp 1183-1187.
- Chong, A.Z.S., Wilcox, S.J. and Ward, J., 2000, Application of a neural-network-based controller on an industrial chain-grate, stoker-fired boiler, *Journal Institute Energy*, vol. 73, pp 208-214.
- Correia S.A.C., Ward J. and Sousa, J.L.V.A., 2000a, Application of Multi-Zone, Two-Dimensional, Thermal Radiation Models for Control of a Metal Reheating Furnace under Transient Conditions, *Proc. 3rd European Thermal Sciences Conf.*, vol 1, pp. 599-604.
- Correia S A C, Ward J, and Sousa J L V A, 2000b, Numerical Prediction of the Transient Operation of a Gas-Fired Reheating Furnace, *Proc. ASME Heat Transfer Division*, HTD-vol. 367, pp 87-94.
- Dugwell D.R. and Oakley D.E., 1988, Correlation of Convective Heat Transfer for Tunnel Kilns, *Journal of Inst. Energy*, vol. 61, pp 165-171.
- Fitzgerald F, and Sheridan A T, 1974, Prediction of the Temperature and Heat Transfer Distributions in Gas-Fired Pusher Reheating Furnaces, *J. Inst. Fuel*, vol. 47, pp 21-27.
- Guile, A.W., Garwood, D.R. and Ward, J, 1999, The application of a hue-based liquid crystal technique to determine convective heat transfer downstream of non-axisymmetric circular to square expansions, *Proc. ASME Heat Transfer Division*, HTD-vol 364-1, pp 101-108.
- Hottel H.C. and Sarofim A.F., 1967, *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- Lawson D.A., Tucker R.J., Sousa J.L.V.A. and Ward J., 1994, Advances in the Zone Method for Furnace Design, Paper 1.3, *British Flame Research Committee Annual Flame Days*, Leeds, U.K.
- Rhine J M, and Tucker R J, 1991, *Modelling of Gas-Fired Furnaces and Boilers*, McGraw-Hill, London, U K.
- Saimbi, M.S. and Tucker, R.J., 1983, Mathematical modelling of the thermal performance of furnaces operating under non-steady state conditions, *Proc. Intl. Gas Research Conf.*, London.
- Sousa J.L.V.A., Ward J. and Wallis R.A., 1995, An Experimental Study of Convection in an Industrial, gas-Fired, Heat Treatment Furnace, *Proc. ASME Heat Transfer Division*, HTD – vol. 317-2, pp 541-548.
- Sousa J.L.V.A., Ward J., Wallis R.A. and Lawson D.A., 1996, Simulation and Measurement of the Transient Performance of a Gas-Fired Heat Treatment Furnace, *Proc. 2nd European Thermal Sciences Conf.*, Rome, Italy, vol.3, pp.1449-1454.
- Thring M.W. and Newby M.P., 1953, Combustion Length of Enclosed Turbulent Jet Flames, *Proc. 4th Symp. (Intl) on Combustion*, pp 789-796, Baltimore, USA.
- Tucker R.J. and Ward J., 1986, Use of a Monte-Carlo Technique for Determination of Radiation Exchange Areas in long-Furnace Models, *Proc. 8th Intl. Heat Transfer Conf.*, vol. 2, pp 391-396, San Francisco, USA.
- Tucker R.J. and Ward J., 1990, Mathematical Modelling of Heat Transfer in a Gas-Fired Reheating Furnace Operating under Non Steady-State Conditions, *Proc. 9th Intl. Heat Transfer Conf.*, vol 6, pp. 221-226.
- Ward J., Correia S.A.C. and Sousa J.L.V.A., 1999, The Application of Multi-Zone Thermal Radiation Models to Investigate the Energy Efficiency of a Metal Reheating Furnace under Start Up Conditions, *Proc. ASME*, AES-vol 39, pp. 621-626.
- Ward, J., Wilcox, S.J., Tan, O.H., Tan, C.K., Payne, R.J. and Garwood, D.R., 2001, Simulation of a range of thermal systems by artificial neural networks, *Proc. ASME Heat Transfer Division*, Paper HTD-24824, 7pp.

- Ward, J., Bertelmann, A. and Garwood, D.R., 2001, The effect of swirl on convective heat transfer downstream of sudden axisymmetric expansions in a circular duct, *Proc. 5th World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, vol. 1, pp. 561-566, Thessaloniki, Greece.
- Weber, R., Verlaan, A.L., Orsino, S. and Lallement, N., 1999, On emerging furnace design methodology that provides substantial energy savings and reductions in CO₂, CO and NO_x emissions, *Journal of the Institute of Energy*, vol. 74, pp. 77-83.
- Weber, R., Verlaan, A.L., Orsino, S. and Lallement, N., 2001, Combustion of light and heavy oils in high temperature air, *Journal of the Institute of Energy*, vol. 499, pp. 38-47.

THE ZONE METHOD OF RADIATION ANALYSIS FOR THE MATHEMATICAL MODELLING OF INDUSTRIAL FURNACES: RECENT ADVANCES AND APPLICATIONS

João Alves e Sousa

Regional Laboratory of Civil Engineering, Rua Agostinho Pereira de Oliveira, 9000-264, Funchal, Portugal
jasousa@lrec.pt

Sara A.C. Correia

UNL-FCT, Department of Mechanical Engineering, Monte da Caparica, Portugal
sacc@fct.unl.pt

Abstract

This paper reviews, in a condensed form, the advances that have occurred during the past decade in relation to the application of the zone method of radiation analysis for the mathematical modelling of industrial high temperature systems. This method for radiation analysis treats the thermal radiation in the enclosed system using an integral global approach, leading to correct estimates of heat transfer in high temperature systems such as gas-fired furnaces. The method has therefore been widely used to the simulation of different industrial processes in both transient and steady-state conditions. The present work describes in particular applications where transient conditions prevailed, reviewing the more recent studies in this area, from relatively simple furnace one-dimensional configurations to more complex multi-dimensional furnace zonings.

The use of computational external routines, such as the Monte Carlo technique and the computational fluid dynamics (CFD) models are also reviewed, as well as the application of neural networks to zone models. A new technological application, the so called flameless combustion, is also briefly referred.

Keywords: advanced mathematical modelling, radiation, zone models, transient conditions, thermal efficiency.