



## Análise térmica de um forno de resistência ao fogo

Paulo A. G. Piloto<sup>1</sup>, Luís M. R. Mesquita<sup>1</sup> e Alexandre Pereira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico de Bragança, Dep. Mec. Aplicada, Campus Santa Apolónia, 5301-857 Bragança, Portugal

email: [ppiloto@ipb.pt](mailto:ppiloto@ipb.pt) <http://www.ipb.pt/~ppiloto>

<sup>2</sup>Instituto Politécnico de Bragança, Campus Santa Apolónia, 5301-857 Bragança, Portugal

### Sumário

*A classificação de produtos de construção em relação ao comportamento ao fogo é determinada pelas normas vigentes, utilizando um forno com curvas de incêndio normalizadas, como são exemplo as curvas de padrão ISO 834, ASTM E119, hidrocarbonetos, etc. Neste trabalho pretende-se efectuar uma análise térmica do volume interno do forno de resistência ao fogo, efectuando a medição de temperaturas em 16 pontos geometricamente distribuídos, com a utilização de termopares de placas. Estas medições deverão ser comparadas com os resultados obtidos por simulação numérica, utilizando as equações de conservação da energia, de momento e de massa, associados a modelos de turbulência e de radiação.*

**Palavras-chave:** Temperatura; Medição experimental; Validação numérica; Forno de resistência ao fogo.

### 1 Introdução

Neste trabalho pretende-se analisar o comportamento térmico de um forno de resistência ao fogo (câmara de combustão). A geometria e a forma dos fornos utilizados para realização dos ensaios não estão definidas por qualquer norma, podendo ser considerados como instalações protótipo. Este facto foi por si motivador da investigação realizada neste artigo. Este forno cumpre os requisitos definidos na norma EN 1363-1, [1], em relação aos desvios máximos admissíveis para o valor da temperatura medida dentro do equipamento. O controlo de funcionamento é efectuado por comparação entre a curva de incêndio normalizada (teórica) e a curva medida por um termopar de placa do forno (valor de referência), no pressuposto de uma distribuição de temperatura quase uniforme. Neste artigo é verificada a distribuição de temperatura no interior da zona útil, em função da posição espacial das amostras a serem testadas. Para tal são utilizados 16 termopares de placa, representativos de 4 planos de medição (X150, X850, Z150 e Z850). Foram efectuados três ensaios de curvas normalizadas (dois com curva de incêndio padrão ISO 834 e um com curva de incêndio de hidrocarbonetos) e determinadas as diferenças entre a média dos valores medidos em cada plano e o valor de referência. Foi ainda efectuado um ensaio para medição da temperatura dos produtos de exaustão.

Para validar os resultados experimentais é feita uma comparação numérica dos valores das temperaturas medidas experimentalmente, utilizando um modelo de escoamento turbulento, com resolução da equação da conservação de energia, da conservação das espécies, associadas a modelos de combustão e radiação, utilizando o programa Fluent 3D. Os resultados numéricos confirmam as diferenças dos resultados experimentais, com desvios máximos inferiores a 10%, para os planos de referência.

### 2 Ensaio experimental

O forno de resistência possui um volume útil de 1 [m<sup>3</sup>], sendo constituído por 4 queimadores Kromschroder referência BIOA 65HM-100/35-72/8, de potência máxima igual a 90 [kW] cada. Na figura 1 estão representados os quatro queimadores, a zona de extracção dos produtos de combustão e a posição dos termopares de placa utilizados. Estes proporcionam uma medição mais representativa do calor recebido pela amostra a testar, especialmente nos instantes iniciais, sendo menos afectados pelo fluxo de convecção.

Os ensaios seguem uma curva teórica normalizada, denominadas por curvas nominais de simulação de incêndio padrão ISO 834 e de hidrocarbonetos, ver equações 1 e 2, respectivamente, [1,2].

$$\theta_s = 20 + 345 \times \log_{10}(8 \times t + 1) \quad [\theta_s (^{\circ}\text{C}); t(\text{min})] \quad (1)$$

$$\theta_s = 20 + 1080 \times (1 - 0,325 \times e^{-0,167t} - 0,675 \times e^{-2,2t}) \quad [\theta_s (^{\circ}\text{C}); t(\text{min})] \quad (2)$$

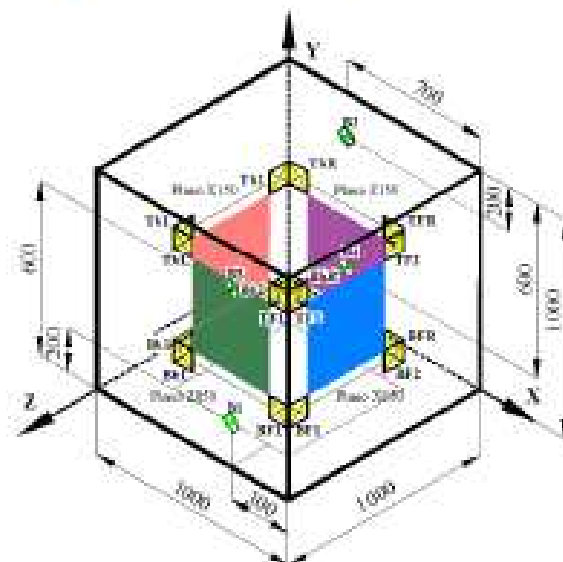
Nestas equações  $\theta_e$  representa o valor da temperatura de ensaio dentro do forno de resistência ao fogo, para o instante de tempo  $t$ . Para a primeira equação é assumido um coeficiente de transferência de calor por convecção de 25 [W/m<sup>2</sup>K], enquanto para a segunda é assumido um coeficiente de transferência de calor por convecção igual a 50 [W/m<sup>2</sup>K].



a) Posição relativa dos termopares de placa.



b) Termopar de placa, constituído por fio tipo K e chapa em aço inox A304.



c) Modelo e planos de referência. Bi representa a posição dos queimadores ( $i=1, 4$ ). Dimensões em [mm].



d) Final do ensaio realizado no Teste 3.

Fig.1. Instrumentação do forno de resistência ao fogo.

Os termopares estão suspensos numa estrutura articulada, devidamente isolada com fibra cerâmica de densidade igual a 128 [kg/m<sup>3</sup>] e com baixo valor de condutividade térmica.

Foram realizados 2 ensaios com curva de incêndio padrão ISO834 (testes 1 e 2, com duração de 45 minutos) e um ensaio com curva de hidrocarbonetos (teste 3, com duração de 30 minutos). O forno é controlado pela medição da temperatura de referência, fazendo aproximar o valor da temperatura medida no termopar de referência com o valor definido pelas curvas nominais. Este termopar também irradia calor, ajustando a sua condição térmica ao balanço entre o calor transferido por convecção e o calor efectivo de radiação.

## 2.1 Resultados experimentais

As medições foram efectuadas com um sistemas de aquisição multi – canal, MGCplus da HBM, com uma frequência de leitura de 0.1 [Hz]. Os resultados foram agrupados através quatro planos representativos do interior do forno, sendo que o plano X850 é definido pelo valor médio das leituras de TF1, TF2, BF1, BF2, o plano X150 é definido pelo valor médio das leituras de Tt1, Tt2, Bb1, Bb2, o plano Z850 é definido pelo valor

médio das leituras de TFL, BFL, TbL e BbL, enquanto que o plano Z150 é definido pelo valor médio de TbR, TFR, BbR e BFR.

Depois de determinada a temperatura média em cada plano de referência, foi calculado o valor da diferença de temperatura relativa, utilizando a medição do termopar de referência para funcionamento do forno. Em todos os ensaios se verificou que as diferenças de temperatura relativa são maiores no início, diminuindo para valores inferiores a 5%, para instantes posteriores a 500 [s], ver figura 2.

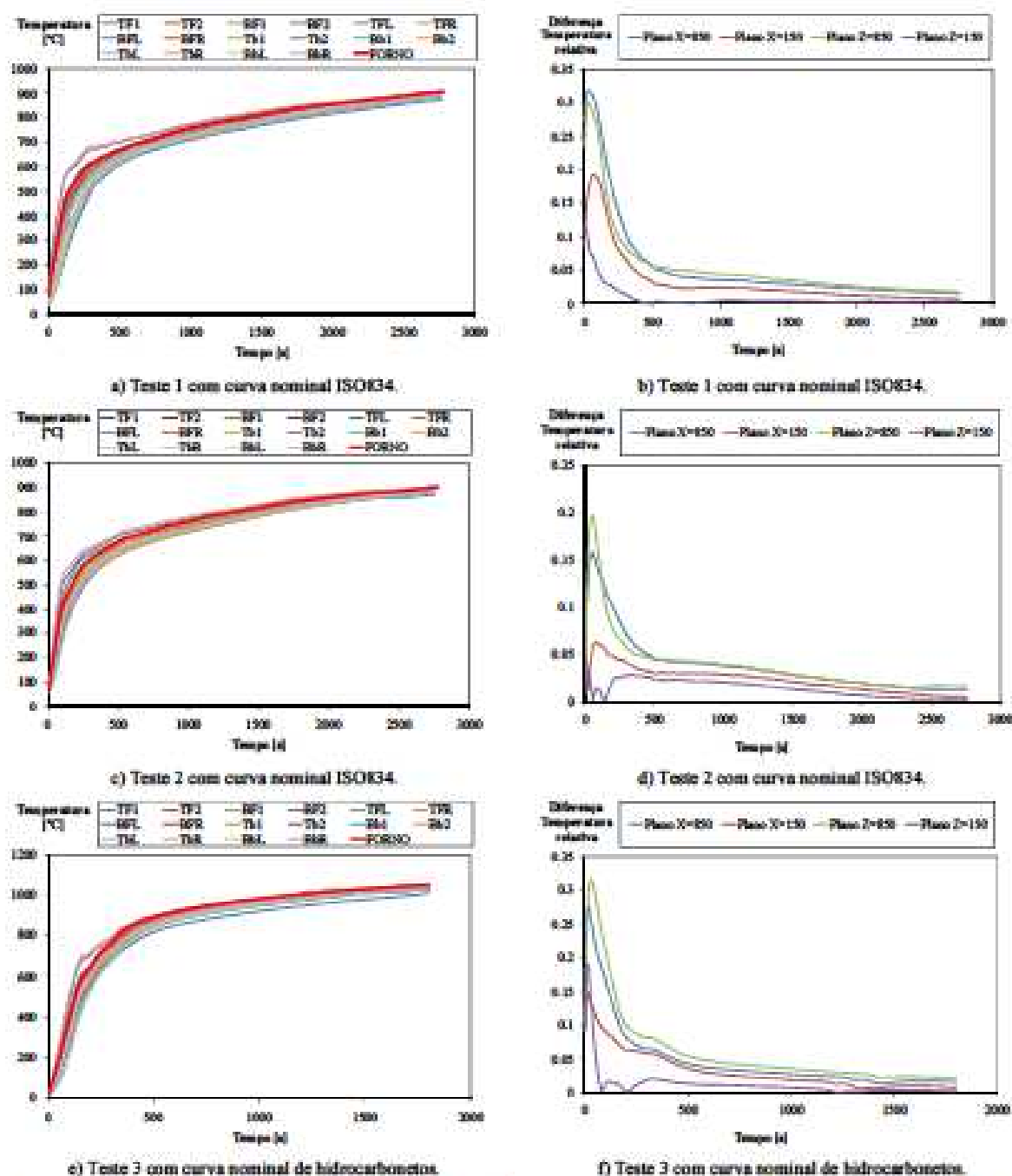


Fig.2. Resultados experimentais absolutos de 16 medições com valor de referência (FORNO) e desvios relativos agrupados em 4 planos (X150, X850, Z150 e Z850).

A temperatura dos produtos de exaustão foi medida na saída do volume de controlo, sendo registado um diferencial, aproximadamente constante, entre a temperatura de referência e o valor medido, durante grande parte do tempo do ensaio, ver figura 3.

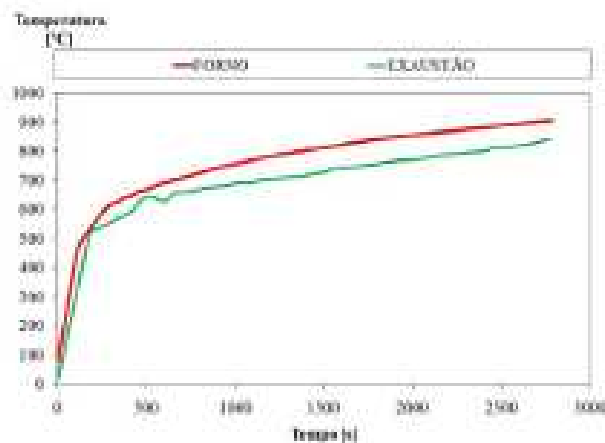


Fig.3. Resultados da medição da temperatura dos gases de exaustão.

A temperatura foi medida através um termopar tipo K soldado na extremidade, sem recurso ao termopar de placa, pelo que se registam maiores oscilações na medição efectuada.

### 3 Simulação Numérica

Foi utilizado um modelo de dissipação de vórtices, EDM, para a combustão da mistura de propano com ar. Este modelo é baseado no pressuposto de que a reacção química é rápida, quando comparada com o transporte de espécies químicas pelo escoamento. Quando os reagentes se misturam, na escala molecular, são transformados instantaneamente em produtos da combustão, [3], ver equação 3.



Esta reacção foi definida em função de coeficientes estequiométricos, entalpia de formação e parâmetros que controlam a taxa de reacção. Foi utilizado um modelo viscoso "K-Epsilon" com duas equações e um modelo de radiação de superfícies, assumindo uma emissividade constante para as paredes internas do forno (0.7) e determinados os valores dos factores de forma.

O calor específico dos produtos e reagentes da combustão foram considerados dependente da temperatura, ver figura 4. Todas as restantes propriedades dos materiais foram consideradas como constantes, assumindo que se trata de um escoamento totalmente turbulento, [4], ver tabelas 1 e 2. O calor específico da mistura será baseado no valor médio pesado (fracção em massa) de todas as espécies.

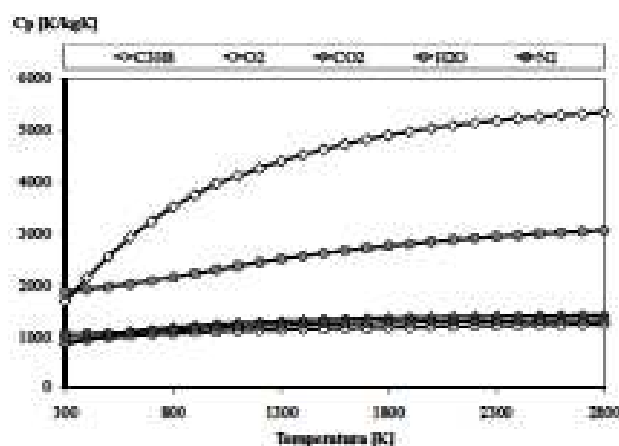


Fig.4. Variação do calor específico dos produtos e reagentes.

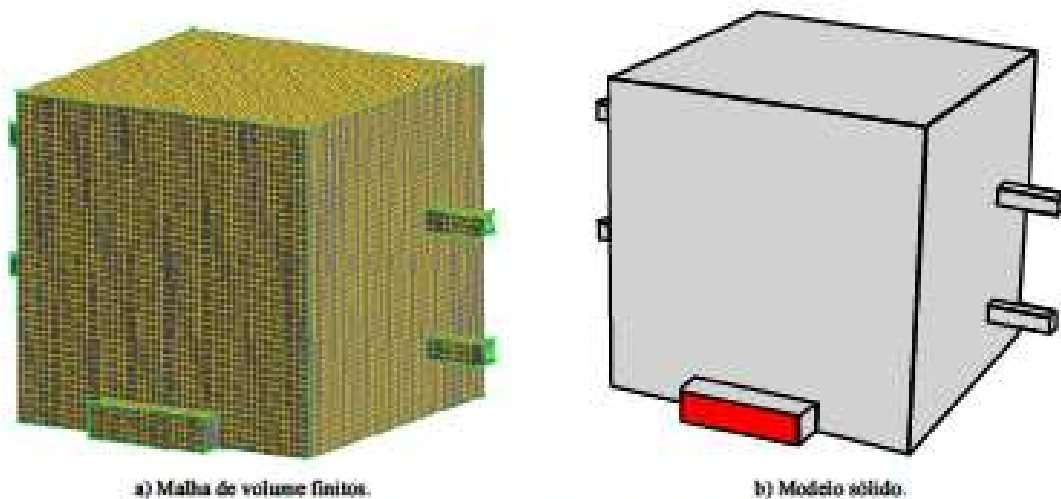
**Tabela 1. Propriedades da mistura propano – ar.**

Calor específico	Lei da mistura	[J/kgK]
Condutividade	0.0454	[W/mK]
Viscosidade	$1.72 \times 10^{-5}$	[Kg/ms]

**Tabela 2. Propriedades do ar, à temperatura de referência de 298 [K].**

Massa específica	1.225	[kg/m <sup>3</sup> ]
Calor específico	1006.43	[J/kgK]
Condutividade	0.0242	[W/mK]
Viscosidade	$1.7894 \times 10^{-5}$	[Kg/ms]

No modelo numérico foi utilizada uma malha estruturada, utilizando 125840 elementos de fluido hexaedros, de dimensão igual 0.02 [m], ver figura 5. Os quatro queimadores foram simplificados, utilizando como referência geométrica o valor dos diâmetros hidráulicos. Foram definidas 4 zonas de entrada de gás concêntricas com 4 zonas de entrada de ar, com dimensões correspondentes a 20 [mm] por 20 [mm] e 60 [mm] por 60 [mm], respectivamente. A saída dos produtos de combustão é efectuada pela zona identificada na figura 5b), de dimensões correspondentes a 100 [mm] por 400 [mm].

**Fig. 5. Modelo de volumes para simulação do forno.**

No modelo matemático proposto pelo programa Fluent, as equações diferenciais de conservação da massa, momento e energia são definidas pelas equações 4-6.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i \quad (4)$$

Na equação da conservação da massa,  $\rho$  representa a massa específica,  $\vec{v}$  representa o vector velocidade,  $Y_i$  representa a fracção da massa correspondente à espécie  $i$ ,  $J_i$  representa a difusão da massa,  $R_i$  representa a taxa de criação de cada espécie por reacção química.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (5)$$

Na equação de conservação do momento,  $p$  representa o valor da pressão estática enquanto que  $\vec{\tau}$  representa o tensor de tensão.

Na equação da energia,  $E$  representa o valor da energia,  $k_{eff}$  representa o valor da condutividade efectiva,  $T$  representa o valor da temperatura,  $h_j$  representa o valor sensível da entalpia e  $S_h$  representa o valor da energia da reacção química.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (6)$$

Para resolução da equação da energia, foi assumido uma condição adiabática nas paredes internas do forno e os fluidos (gás e ar) são introduzidos a uma temperatura constante de 300 [K]. Os produtos de combustão são expelidos a uma temperatura prescrita por medição experimental.

Os caudais de combustível e de comburente foram mantidos na proporção devida, variando em função do tempo de realização de cada ensaio. Os valores foram definidos em função dos valores limites fornecidos pelo fabricante dos queimadores, não tendo sido efectuadas quaisquer medições.

Para obtenção da solução transiente são definidas as condições iniciais, é definido um ciclo de incremento temporal onde se desenvolve um processo iterativo para resolução das equações.

### 3.1 Resultados numéricos

A temperatura da chama atingida pela mistura ar combustível depende de diversos factores da combustão e influencia de maneira significativa os processos de transferência de calor. A taxa de transferência de calor aumenta com a temperatura da chama. Na figura 6 estão representados diferentes perfis de temperatura, correspondentes a diferentes instantes do processo de aquecimento do ensaio realizado com a curva de incêndio nominal ISO834. O fluxo das espécies é descendente, com pequenas zonas de recirculação na zona superior do forno.

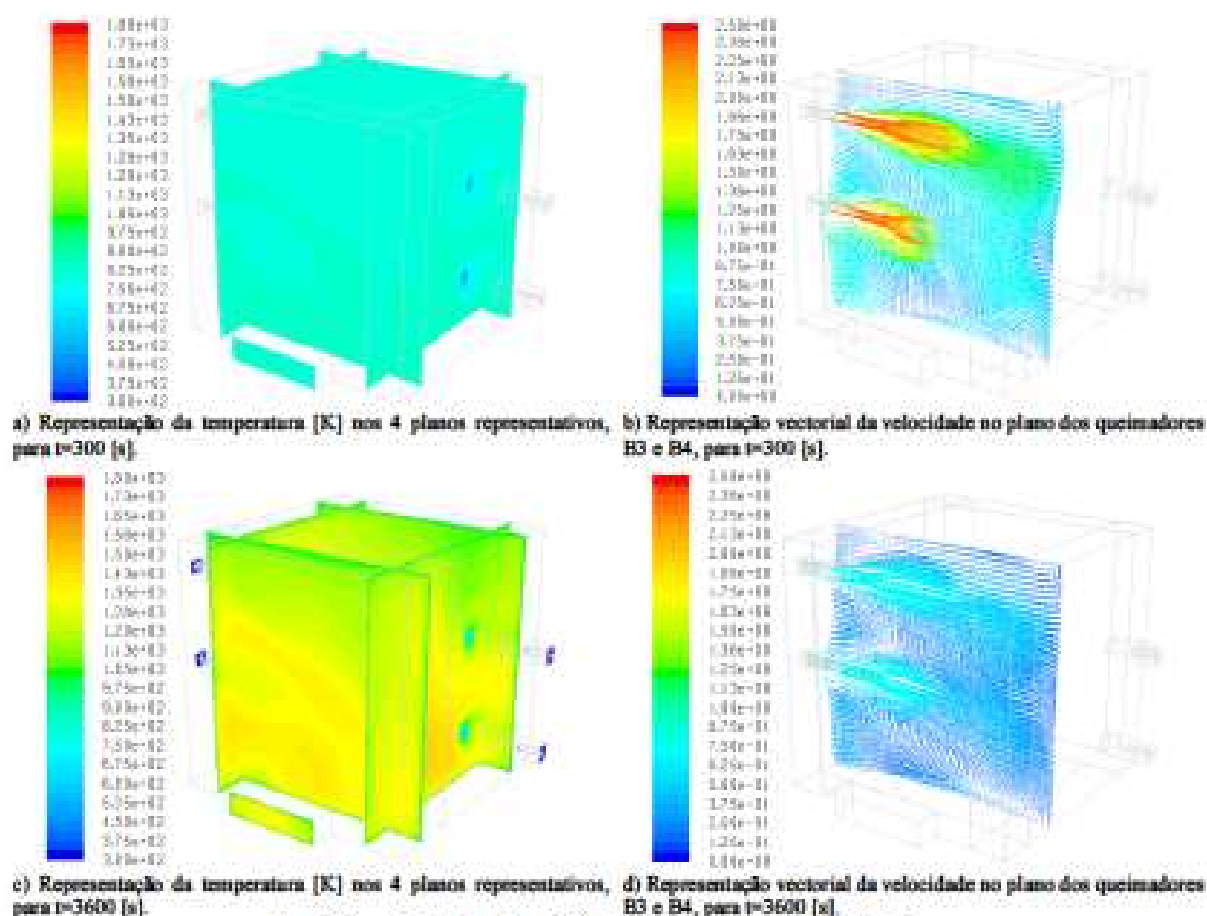


Fig. 6. Resultados da simulação transiente para ensaio Teste 1.

Os resultados da simulação permitiram identificar o efeito localizado dos queimadores. As medições experimentais confirmaram esta variação. Foram consideradas as medições efectuadas em cada um dos quatro planos representativos, determinado o seu valor médio e comparado com o valor de referência, utilizado para funcionamento do forno. O resultado numérico da temperatura média dos planos representativos utilizados para medição, é determinado através da média ponderada (massa), determinada pela equação 7 e representada na figura 7.

$$\bar{T} = \frac{\int_A T \rho \bar{v} d\bar{A}}{\int_A \rho \bar{v} d\bar{A}} \quad (7)$$

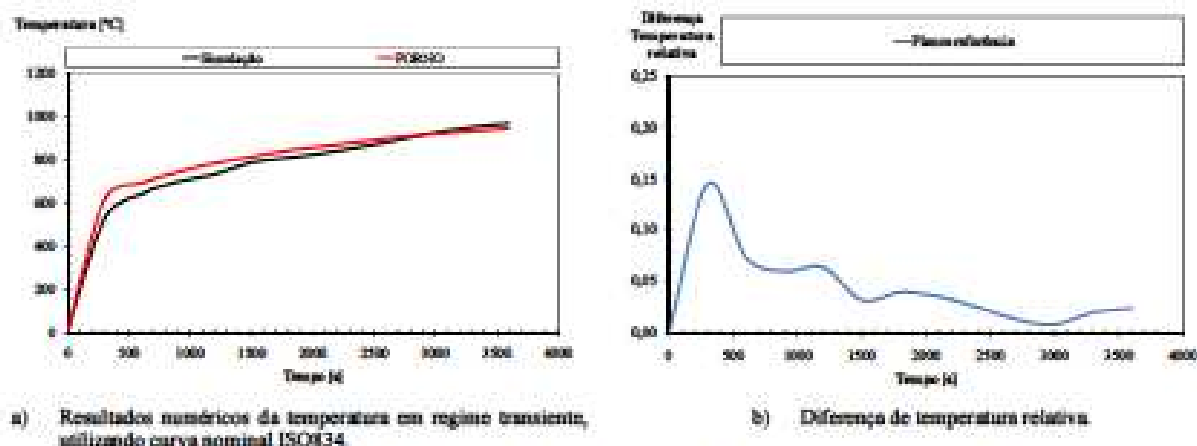


Fig.7. Resultados da evolução da média da temperatura nos planos de referência.

Os resultados numéricos da temperatura média aproximam-se do valor de referência durante o processo de aquecimento, sendo de realçar que a diferença relativa entre este valor e a medição de referência é inferior a 10%, para instantes posteriores a 500 [s].

Para além das perdas existentes no processo de combustão, uma perda importante ocorre na etapa de exaustão dos produtos da combustão. Estas perdas são função do volume de cada produto e da sua temperatura. As perdas podem ocorrer por calor sensível (o calor contido nos produtos que são extraídos a temperatura superior à temperatura ambiente) e também por calor latente contido no vapor de água.

#### 4 Conclusões e trabalhos futuros

Foram realizados três ensaios experimentais e efectuadas medições em quatro planos representativos para verificação do campo de temperatura no interior do forno de resistência ao fogo. Foi efectuada uma comparação do valor médio das medições com o valor de referência. O desvio médio da temperatura, nos quatro planos, é inferior a 5 %, para instantes de tempo superiores a 500 [s]. O desvio máximo de 30 % é determinado para instantes iniciais, correspondentes a 60 [s]. Em qualquer dos casos, o desvio da temperatura é inferior a 50 [°C]. Estes resultados validam o regime de funcionamento do forno de resistência ao fogo, podendo assumir uma distribuição quase uniforme da temperatura, para cada instante de tempo, durante a realização de cada ensaio, para as duas curvas de incêndio nominal analisadas.

Os resultados numéricos sobrestimam o valor da temperatura média dos quatro planos de referência. Esta diferença poderá estar relacionada com o regime de funcionamento. Para validar numericamente o processo deverá ser efectuada a medição instantânea dos caudais de entrada, para o combustível e para o comburente e a medição da concentração das espécies na exaustão do forno. Estas medições estão previstas para trabalho futuro.

#### Referências

1. AENOR, Norma UNE 1363: Fire resistance test. Part 1: General requirements, 2000.
2. AENOR, Norma UNE 1363: Fire resistance test. Part 2: Alternative and additional procedures, October 2000.



3. Grialano Gardolinski Vanson, Gilberto Augusto Amado Moreira, José Eduardo Mantone Barros, Ramón Molina Valle. "Modelagem do Perfil de Temperatura em Câmara de Combustão Tubular Utilizando o Modelo de Combustão Eddy Dissipation", *X Encontro de Modelagem Computacional*, Instituto Politécnico/UERJ - Nova Friburgo/RJ, 21 a 23 de Novembro 2007.
4. FLUENT 6.3 Documentation, users manual, 2006.
5. Coelho, P. J. "Numerical simulation of a mild combustion burner", *Combustion and flame*, 124: 503-518, Elsevier, 2001.
6. Welch, S; Rubini, P.; "Three dimensional simulation of a fire-resistance furnace", *Proceedings of 5th International Symposium on Fire Safety Science*, Melbourne, Australia, March 1997, International Association for Fire Safety Science, pp. 1009-1020, ISBN 4-9900625-5-5.