

CÁLCULO DO PERFIL DE TEMPERATURAS DE UMA FORNALHA POR UM MODELO PISTOM ¹

Paulo César da Costa Pinheiro
Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627 31270-901 Belo Horizonte, MG
email: pinheiro@dedalus.lcc.ufmg.br

Sumário

Este artigo apresenta a determinação do perfil de temperaturas e a transferência de calor de uma fornalha piloto cilíndrica, levando-se em consideração a cinética de combustão, através de um modelo pistom unidimensional. Os resultados obtidos pelo modelo matemático são comparados com os resultados experimentais.

1. INTRODUÇÃO

O cálculo da transmissão de calor em uma fornalha é de grande importância na tecnologia moderna. Diversos modelos matemáticos têm sido propostos para o cálculo de fornalhas (Field 1967, Golic 1981, Kuznetsov 1973, Lockwood 1980). Todos esses modelos baseiam-se nas leis de conservação de energia e de transmissão de calor, para um regime de combustão totalmente desenvolvido. Entretanto, o processo de combustão não é instantâneo, e como os fornos e fornalhas possuem um tempo de retenção muito pequeno, na comparação de diferentes combustíveis, é necessário levar em consideração a cinética da reação de combustão. A fornalha deve ser modelada como um reator químico, levando-se em consideração a influência da cinética de combustão.

2. O REATOR PISTOM

Um reator químico é chamado homogêneo se a reação química que ele desenvolve é realizada em uma única fase. Se ele possui alimentação e retirada contínua de todos os reativos e produtos, o reator é chamado aberto ou contínuo.

É possível caracterizar a hidrodinâmica de um escoamento pelo grau de intermistura (ou macromistura) do fluxo no reator. Uma macromistura mínima pode ser observada em um reator tubular aberto. Pode-se considerar como reator tubular aberto qualquer reator operando em regime permanente, com movimento contínuo do fluxo em uma direção espacial determinada (os reativos entram de um lado do reator e os produtos são evacuados na extremidade oposta), e onde não existe uma indução de mistura em diferentes pontos do fluxo. Assim, o fluxo se desloca em seções transversais sucessivas, paralelas e independentes, sem gradientes radiais e sem

¹PINHEIRO, Paulo César da Costa. Cálculo do Perfil de Temperaturas de uma Fornalha por um Modelo Pistom. In: XV CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO SOBRE MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA ENGENHARIA (CILANCE-94), 30 Novembro a 2 Dezembro 1994, Belo Horizonte, MG, *Anais...* Belo Horizonte: AMC, Associação Latino-Americana para Métodos Computacionais em Engenharia, 1994, v.1, p.111-120.

transferência de massa entre elas.

O escoamento do fluido dentro do reator é tal que uma seção normal ao escoamento, avança em bloco (bolsões), como um pistom dentro de um cilindro. Esse reator é chamado reator pistom. Em uma determinada seção do reator, as transformações químicas, a composição e a temperatura são constantes no tempo, mas variam continuamente na direção do fluxo, em cada ponto do reator.

Apesar de ideal, o conceito de macromistura mínima pode ser aplicado com precisão a escoamentos gasosos turbulentos em dutos de comprimento muito superior à seção transversal, onde as partículas em reação possuem dimensões insignificantes às do duto. Assim, a fornalha de combustão estudada pode ser considerada, com grande precisão, um reator pistom. Modelos pistom já foram utilizados por Field (1967), sem entretanto considerar a cinética de reação.

2. PERFIL DE TEMPERATURA DOS GASES NA FORNALHA

Considera-se que as partículas combustíveis são monomodais, percorrendo um escoamento pistom ao longo da fornalha, que a combustão de cada partícula é independente das outras e que a granulometria e a taxa de reação (taxa de combustão) das partícula são conhecidas.

Em um reator pistom as variáveis dependem somente de uma coordenada espacial (na direção do escoamento). Para os reatores cilíndricos, de seção constante W , pode-se tomar como variável espacial o volume $V=W.Z$ percorrido pela mistura reacional. A escolha de variável espacial V permite generalizar os resultados para o caso de uma seção reta variável, na condição de serem mantidas as características de escoamento pistom (Zulalian, 1986).

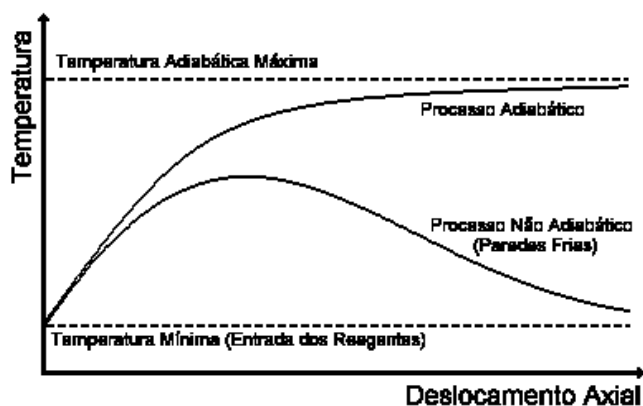


Figura 1. Perfil de temperaturas num reator pistom.

Assim, para um reator pistom ideal em regime permanente, pode-se escrever o balanço de entalpia de um elemento de volume dV , limitado pelos volumes V e $V+dV$ (Levenspiel, 1972):

$$F_a^0 dX_a \Delta H_r + G_p dT = U S (T_{ext} - T) dV \quad (1)$$

onde F_a^0 é a vazão molar inicial do reagente "a", X_a a taxa de conversão do reagente considerado, ΔH_r a variação da entalpia da reação, G_p a vazão da capacidade calorífica do meio reacional no ponto considerado, U o coeficiente global de transmissão de calor (definido em

função da superfície S), S superfície por unidade de volume do reator [$S = S_i/V_i$], T_{ex} temperatura externa do reator (K), T temperatura do elemento de volume dV (K).

Aplicando esta equação geral do balanço de entalpia elementar do reator pistom ao caso particular de uma fornalha de combustão, tem-se:

1) O primeiro termo ($F_a dX_a \Delta H_r$) representa a fração de combustível em reação no instante "t", dentro do volume de controle dV . A taxa de conversão X_a é a fração do combustível inicial, transformada à medida do desenvolvimento da reação. Assim:

$$F_a dX_a \Delta H_r = B Pci dX_c \quad (2)$$

onde B é o consumo de combustível (kg/s), Pci o poder calorífico inferior (kJ/kg) e X_c a taxa de conversão do combustível.

2) O segundo termo ($G_p \cdot dT$) representa a variação da entalpia do meio reacional no ponto considerado. G_p é função do desenvolvimento de X_c , mas, sendo a capacidade calorífica massica da maioria dos constituintes (gases, líquidos e sólidos) praticamente constante (à exceção de um número limitado: água, hidrogênio etc), pode-se considerar G_p independente de X_c (Zulalian, 1986). Assim:

$$G_p dT = B V_g C_{p_g} dT_g \quad (3)$$

onde V_g é o volume dos produtos da combustão (m^3/kg comb), C_{p_g} o calor específico médio destes produtos (kJ/ $m^3 \cdot K$), T_g a temperatura dos produtos dentro do volume reacional (K).

3) O terceiro termo ($U S (T_{ext} - T) dV$) representa a transferência de calor do meio reacional para as paredes da fornalha. O coeficiente U representa um valor médio para toda a fornalha. Desprezando-se a convecção, a transferência de calor é realizada por radiação entre os produtos da combustão (meio semitransparente, considerado cinza e isotérmico dentro do volume dV) e a superfície interna S_i (considerada cinza):

$$U (T_{ext} - T) \left(\frac{S_i}{V_i} \right) dV = \sigma \epsilon_f dS_i (T_g^4 - T_i^4) dS_i \quad (4)$$

$$dS_i = \pi d_i dZ \quad (5)$$

onde Z é a distância percorrida pela mistura desde a entrada (m), e d_i o diâmetro interno (m).

ϵ_f é a emissividade efetiva da combustão (adm). No caso da combustão de sólidos pulverizados e de combustíveis gasosos, ϵ_f é praticamente constante ao longo da fornalha (Kuznetsov et al, 1973):

$$\epsilon_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\epsilon_s} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1\right)} \quad (6)$$

onde ϵ_s é a emissividade das paredes ($\epsilon_s \approx 0,8$) e ϵ_g emissividade da chama:

$$\epsilon_g = 1 - \exp(-k P_g L) \quad (7)$$

onde k é o coeficiente de atenuação da radiação devido ao meio semitransparente (1/m.MPa), P_g a pressão dentro da fornalha (MPa) ($P_g = 0,1$ MPa), L o comprimento efetivo do meio semitransparente (m) (para fornalhas cilíndricas $L = d_i$, para fornalhas usuais $L = 3,6 * (V_i/S_i)$ (Kuznetsov et al, 1973)).

$$k = k_g + k_{vl} + k_c \quad (8)$$

k_g é o coeficiente de atenuação devido aos gases triatômicos (1/m.MPa) (Kuznetsov et al, 1973):

$$k_g = \left(\frac{7,8 + 16 R_{H_2O}}{3,19 \sqrt{L P_g (R_{H_2O} + R_{CO_2})}} - 1 \right) (1 - 0,00037 T_g) (R_{H_2O} + R_{CO_2}) \quad (9)$$

onde R_{H_2O} e R_{CO_2} são respectivamente os teores (%) de vapor-d'água e de $CO_2 + SO_2$ nos produtos da combustão.

k_{vl} é o coeficiente de atenuação devido às cinzas volantes (1/m.MPa) (Kuznetsov et al, 1973):

$$k_{vl} = \frac{K_3}{\sqrt[3]{T_g^3 d_p^2}} \frac{R_{vl}}{V_g} \frac{A}{100} \quad (10)$$

onde d_p é o diâmetro das partículas de combustível pulverizado (μm), K_3 uma constante empírica (50 para carvões betuminosos e lignitos, e 37 para carvões magros e outros combustíveis), R_{vl} a fração das cinzas carregadas pelos gases, A o teor massico de cinzas do combustível (%).

k_c é o coeficiente de atenuação devido às partículas de coque em combustão ($k_c = 1$ para carvões de baixo teor de voláteis, e 0,5 para os lignitos (Kuznetsov et al, 1973)).

Baseando-se nas considerações precedentes, escreve-se a equação geral do balanço elementar de entalpia dentro do reator pistom (1), aplicada ao caso particular de uma fornalha de combustão:

$$B PCI dX_c + B V_c C_{p_g} dT_g = -\sigma \epsilon_f (T_g^4 - T_i^4) \pi d_i dz \quad (11)$$

Como o escoamento é do tipo pistom, pode-se, também, escrever a equação (11) em

função do tempo:

$$B PCI \frac{dX_c}{dt} dt + B V_g C_{p_g} dT_g = -\sigma \epsilon_f (T_g^A - T_i^A) \pi d_i \frac{dZ}{dt} dt \quad (12)$$

Nos sistemas heterogêneos, a variação da taxa de desenvolvimento da reação no tempo (dX_c/dt) é igual à variação da concentração do reagente sólido no tempo (dC/dt). Admitindo-se constante a velocidade média de deslocamento do volume elementar de gás ($v = dZ/dt$):

$$B PCI \frac{dC}{dt} dt + B V_g C_{p_g} dT_g = -\sigma \epsilon_f (T_g^A - T_i^A) \pi d_i v dt \quad (13)$$

$$\frac{B V_g C_{p_g} dT_g}{\sigma \epsilon_f (T_g^A - T_i^A) \pi d_i v} = - \left[\frac{B PCI \frac{dC}{dt}}{\sigma \epsilon_f (T_g^A - T_i^A) \pi d_i v} + 1 \right] dt \quad (14)$$

$$PCI = V_g C_{p_g} (T_{ad} - T_o) = V_g C_{p_g} T_{ad} \left(1 - \frac{T_o}{T_{ad}} \right) \quad (15)$$

onde T_{ad} é a temperatura adiabática de combustão (K), e T_o a temperatura inicial da mistura ar/combustível (aproximadamente a temperatura do ar de combustão).

Em um reator pistom, o tempo de residência t_o é igual ao tempo de passagem: $t_o = V_f/B \cdot V_g = Z/v$, onde Z é o comprimento total da fornalha (m) (Levenspiel, 1972):

$$\frac{B V_g C_{p_g} dT_g}{\sigma \epsilon_f T_g^A \left[1 - \left(\frac{T_i}{T_g} \right)^4 \right] \pi d_i \frac{Z}{t_o}} = - \left[\frac{B V_g C_{p_g} T_{ad} \left(1 - \frac{T_o}{T_{ad}} \right) \frac{dC}{dt}}{\sigma \epsilon_f T_g^A \left[1 - \left(\frac{T_i}{T_g} \right)^4 \right] \pi d_i \frac{Z}{t_o}} + 1 \right] dt \quad (16)$$

Adimensionalizando-se a temperatura dos gases ($\Theta = T_g/T_{ad}$) e a transmissão de calor por radiação (número de Boltzmann "Bo" (Kuznetsov et al, 1973)):

$$Bo = \frac{B C_{p_g} V_g}{\sigma \pi Z T_{ad}^3 \left(1 - \frac{T_i}{T_g} \right)} \quad (17)$$

obtem-se finalmente:

$$- dt = \frac{t_o Bo d\Theta}{\epsilon_f \Theta^4 + Bo t_o \left(1 - \frac{T_o}{T_{ad}} \right) \frac{dC}{dt}} \quad (18)$$

A cinética global de combustão de uma partícula de combustível sólido pode ser

assemelhada à de combustão do carbono fixo, tendo em vista a rápida combustão das matérias voláteis. Considerando-se a reação de combustão completa e a taxa de variação de $C(t)$ definida pela lei de Arrhenius: $C(t) = \exp(-r t)$, a equação (18) torna-se (para $t = 0$, $C(0) = 1$):

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\frac{Bo}{\epsilon_f} \left(1 - \frac{T_a}{T_{ad}}\right) t \exp^{-rt} - \Theta^t}{t \left(\frac{Bo}{\epsilon_f}\right)} \quad (19)$$

3. MODELO MATEMÁTICO

A partir da dedução da equação de evolução da temperatura dos gases na fornalha (equação 19), foi estabelecido o modelo matemático, codificado na forma de um programa em Fortran, para computadores compatíveis com o IBM-PC.

O programa é composto de 2 módulos principais:

- (1) Estequiometria e energética da combustão.
- (2) Cálculo do perfil de temperatura dos gases dentro do reator pistom e da transmissão de calor.

A estequiometria da combustão é efetuada a partir da análise imediata do combustível e do excesso de ar de combustão utilizado. A combustão é considerada completa e oxidante, os produtos da combustão estão em equilíbrio químico e as reações secundárias de dissociação foram desprezadas.

A temperatura adiabática da chama é calculada a partir do balanço térmico dos produtos da combustão (equação 15).

Todo o teor de H, N, O, S e umidade presente no combustível é considerado volátil, formando instantaneamente H_2O , N_2 , SO_2 , CO_2 . Assim, o resíduo da combustão na saída da fornalha é composto, exclusivamente, de carbono não consumido e cinzas inertes.

O ar de combustão entra preaquecido e é distribuído de modo homogêneo na seção de entrada da fornalha. As partículas em combustão são introduzidas neste fluxo, atingindo imediatamente a temperatura do ar quente (T_a), graças a uma mistura perfeita e a uma intensa transferência de calor: $t = 0 \rightarrow T_g(0) = T_a$.

As partículas são consideradas esféricas, monomodais, de diâmetro igual ao diâmetro médio de Rosin-Rammeler. Despreza-se o inchamento da partícula de carvão durante a combustão.

O valor da taxa de reação do carvão inclui tanto a taxa de combustão dos voláteis quanto do carbono fixo (Ledinegg, 1966, Lockwood, 1980). A temperatura no interior da partícula é considerada homogênea.

A ignição da partícula é iniciada pela radiação emitida pela chama e paredes. Uma vez iniciada, a partícula continua a sua combustão até à saída da fornalha, liberando continuamente

energia.

O cálculo do perfil da evolução da temperatura dos gases, ao longo da fornalha, é realizado pela integração da equação (19) pelo método Runge-Kutta de 2ª ordem. O volume do reator pistom foi dividido em 500 elementos discretos de volume. Cada partícula combustível, o ar de combustão e os produtos desta combustão, percorre sucessivamente todos estes elementos até à saída da fornalha.

Nas condições reais de uma fornalha, o tempo de residência $t_0 = V_i/B V_g$ é dado por (Ledinegg, 1966):

$$t_0 = \frac{V_F 273 M K_2 P_g 9,869}{1,03 B V_g T_g} \quad (s) \quad (20)$$

onde k_2 é um coeficiente empírico que leva em consideração a velocidade relativa entre a partícula combustível e a chama (0,96 para fluxo ascendente e 1,04 para fluxo descendente).

A emissividade da chama (equação 7) é função da sua temperatura (que não é conhecida a priori). Como primeira aproximação, a temperatura média dos produtos da combustão ao longo da fornalha é considerada igual à temperatura adiabática da chama. O valor calculado é comparado com o valor inicial. São realizadas iterações até obter-se uma variação da temperatura de saída dos produtos da combustão inferior a 1°C.

A taxa de conversão do carbono à saída da fornalha é calculada a partir da taxa de combustão média (Thomas, 1978).

Os resultados dos cálculos estequiométricos e da modelização da fornalha são representados em forma de tabela e gráfico da evolução da temperatura dos gases.

4. RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM A EXPERIÊNCIA

A fim de validar este modelo, foram recalculados os parâmetros de duas caldeiras industriais, cujos dados operacionais eram conhecidos: a primeira produz 50 ton/h de vapor, consumindo 1,064 kg/s de óleo combustível. A energia absorvida na fornalha é 21.420 kW. A segunda produz 220 ton/h de vapor, consumindo 3,694 kg/s de óleo combustível. A energia absorvida na fornalha é 82.000 kW. Os resultados obtidos pelo modelamento pistom foram comparados com o método CKTI (Kuznetsov et al, 1973). Existe uma boa concordância entre os resultados obtidos pelos dois métodos (tabela 1).

Tabela 1. Energia Absorvida na Fornalha (kW).

	Experim	Pistom	CKTI
Caldeira 50 ton/h	21.420	22.370	20.967
Caldeira 220 ton/h	82.000	75.792	63.189

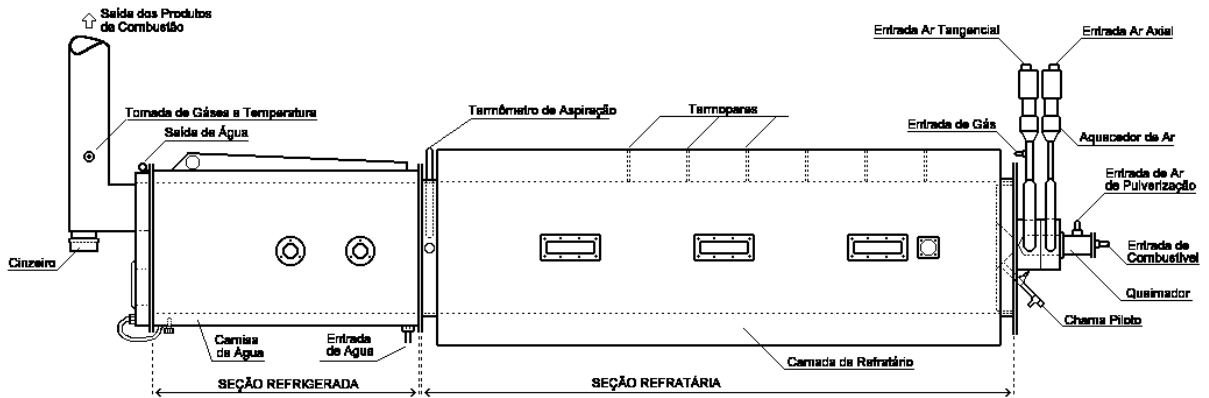


Figura 2. Fornalha Piloto de 100 kW.

Este modelo foi utilizado para estudar os resultados experimentais obtidos em uma fornalha piloto cilíndrica de 100 kW (Pinheiro, 1987), queimando carvão pulverizado e misturas-carvão-água (figura 2). A figura 3 mostra os resultados experimental e teórico do perfil de temperatura dos gases ao longo da fornalha, de alguns ensaios típicos. A figura 4 compara a temperatura calculada de saída dos produtos, com a temperatura medida em diversos ensaios. Pode-se observar que os resultados obtidos apresentam uma boa concordância.

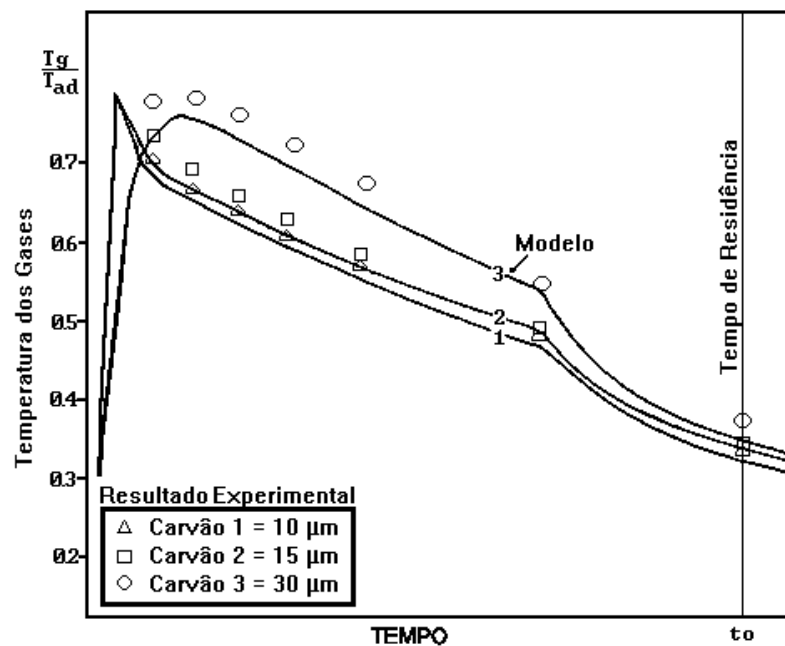


Figura 3. Perfil de Temperaturas ao Longo da Fornalha.

Para as partículas de dimensões inferiores a 300 µm, a taxa de conversão (burnout) calculada na fornalha piloto é aproximadamente 100% (combustão completa), o que não foi confirmado na experiência. As principais razões são o fato das partículas não serem monomodais e a fornalha, devido as suas características aerodinâmicas reais, não se comportar como um reator pistom ideal.

Foi verificada na fornalha, uma ascensão da chama, provocada pela diferença de densidade entre os gases em combustão e os gases existentes na fornalha. A magnitude desta ascensão é inversamente proporcional à velocidade do jato gasoso. A chama roçava o céu da fornalha, originando uma corrente de orientação distinta da prevista no modelo (seções isotérmicas). Horn

e Thring (1957) elaboraram uma teoria simplificada da trajetória do jato combustível em função desta diferença de densidade, aplicada com relativo sucesso à chama de carvão pulverizado.

A divergência existente deve-se ao desconhecimento da distribuição real do tempo de residência nas fornalhas comparadas. O escoamento dos gases somente pode ser caracterizado como pistom ideal para determinadas características geométricas e aerodinâmicas internas da fornalha. A dinâmica real do fluxo de gases pode ser obtida pela determinação experimental da distribuição dos tempos de residência (RTD). Ela é normalmente medida em maquetes (Danckwerts, 1953).

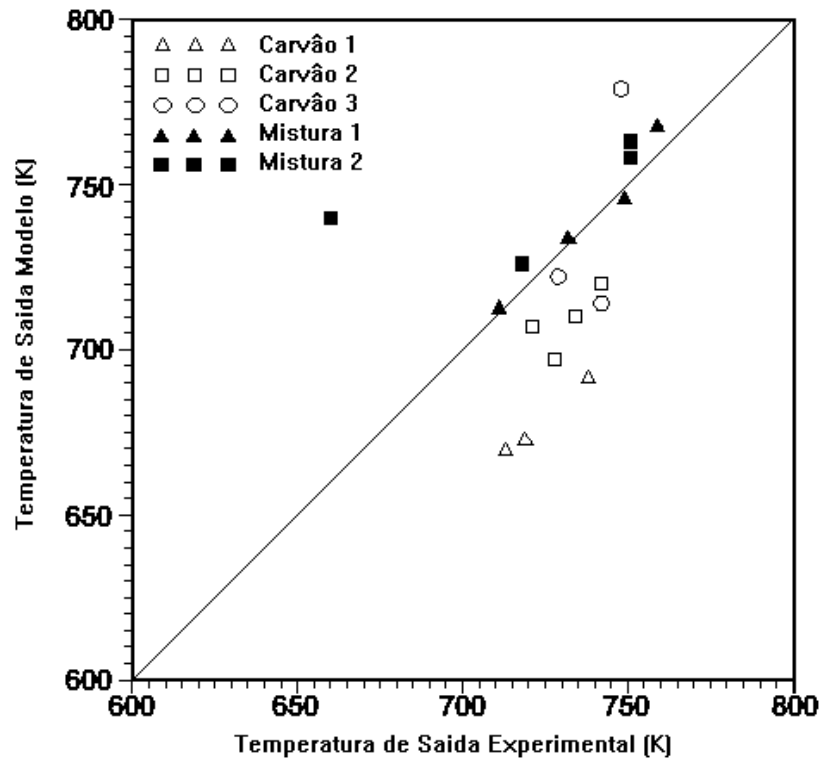


Figura 4. Temperatura de Saída da Fornalha.

5. CONCLUSÕES

O modelo matemático do reator pistom permitiu a determinação da composição dos produtos da combustão, a taxa de conversão do combustível e o perfil de temperaturas ao longo da fornalha. A utilização desse modelo encontra-se limitada pelo conhecimento da cinética da combustão do combustível analisado.

São vantagens deste modelo:

- Simplicidade.
- Tempo de cálculo reduzido.
- Portabilidade: facilidade de adaptação deste modelo a outros tipos de fornalhas, independente de sua geometria e de sua capacidade térmica, a partir da medida da RTD.

É difícil obter-se uma expressão precisa para a taxa de reação, devido ao grande número de parâmetros que influenciam (Meyers 1981). Ledinegg (1966) propôs uma equação simplificada para partículas esféricas de carvão, entretanto, a avaliação da taxa de combustão em laboratório

é mais representativa.

Devido à complexidade dos processos existentes nas fornalhas, torna-se difícil determinar, com precisão, as influências específicas do ambiente térmico e aerodinâmico sobre a cinética química. A fim de aperfeiçoar o modelo e dar-lhe uma aplicação mais geral, são recomendadas as seguintes considerações:

(1) Utilizar a distribuição granulométrica de Rosin-Rammeler para o cálculo da distribuição modal das partículas combustíveis.

(2) Incluir os efeitos da aglomeração e do crescimento dos grãos sobre a distribuição granulométrica das partículas.

(3) Utilizar equações mais precisas do cálculo da taxa de reação, das propriedades reológicas do combustível e da distribuição granulométrica das partículas (ou gotas) em combustão.

(4) Calcular a evolução da composição dos produtos da combustão e da taxa de conversão de carbono ao longo da fornalha.

(5) Medir a combustibilidade do combustível utilizado.

(6) Medir a RTD real dos produtos da combustão dentro da fornalha.

6. REFERÊNCIAS

- DANCKWERTS P.V. Continuous Flow Systems: Distribution of Residence Times. Chem. Eng. Sci. v.2, p.1-13, 1953.
- FIELD M.A et alii. Combustion of Pulverized Coal. The British Coal Utilisation Research Association. Leatherhead, 1967, p.186-209.
- GULIC M.G. GVORZDENAC D.D. A Mathematical Model for Heat Transfert in Combustion Chambers of Steam Generators. J. Eng. Power, v.103, n.7, p.545-51, 1981.
- HORN G. THRING M.W. Efectos de las Fuerzas Ascensionales en los Hogares y Calderas. Revista Calor e Combustion, Maio 1957.
- KUZNETSOV N.V, MITOR V.V, et alii. Teplovoy Raschet Kateknykh Agregatov. Normativni Metod. Moscou, Energia, 1973, 295p.
- LEDINEGG M. Factor for Determination of the Heat Release in Pulverised Coal and Oil Fired Furnaces, Combustion, v.37, p.16-36, março 1966.
- LEVENSPIEL O. Chemical Reaction Engineering. 2º ed, John Wiley, New York, 1972.
- LOCKWOOD F.C. SALOOJA A.P. SYED S.A. A Prediction Model for Coal Fired Furnaces. Combustion and Flames, v.38, p.1-15, 1980.
- MEYERS R.A. et alii. Coal Handbook, Marcel Dekker Inc; New York, 854p, 1981.
- PINHEIRO P.C.C. CKTI - Um Novo (?) Método para o Cálculo da Transmissão de Calor em Fornalhas. IN: 5º CONGRESSO DE UTILIDADES, 20-24 Novembro 1989, São Paulo, Anais..., IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo, 1989, p.157-165.
- PINHEIRO, Paulo César da Costa. Étude de la Combustion des Mélanges Charbon-Eau et du Charbon Pulvérulent Sec Dans un Foyer Pilote de 100 kW. Compiègne, França: UTC, 12 de Fevereiro de 1987. 179p. Tese (Doutoramento em Génie des Procédés Industrielles). Division de Génie des Transferts et Energétique, Université de Technologie de Compiègne, 1987.
- THOMAS J.F.M.S. Development of an Atmospheric Pulverized Coal Cyclone Combustor: Mathematical Modeling and Preliminary Experimental Results. Thesis (MSME), School of Mechanical Engineering, Purdue University, EUA, 1978, 122p.
- ZOULALIAN A. Génie de la Réaction Chimique Homogène. Apostila, UTC, França, 1986.

Abstracts

This paper describes the determination of the heat transfer and temperature profile inside a cylindrical furnace. The method considers the combustion kinetics of a unidimensional piston model. The theoretical results are compared with actual experimental results.