

A influência simultânea do teor de alumina, da porosidade total e da temperatura na condutividade térmica de refratários sílico-aluminosos e aluminosos

(The simultaneous influence of alumina content, total porosity and temperature on the thermal conductivity of fireclay and alumina refractories)

M. M. Akiyoshi, M. G. da Silva, A. P. da Silva, V. C. Pandolfelli

Via Washington Luiz, km 235, C.P. 676, 13565-905, S. Carlos, SP.

Universidade Federal de São Carlos

pmmak@iris.ufscar.br ou vicpando@power.ufscar.br

Resumo

A condutividade térmica de materiais refratários sílico-aluminosos e aluminosos com $35,81\% \leq Al_2O_3 \leq 93,48\%$ e porosidade total entre 15% e 81% foi determinada através da técnica de fio quente paralelo. Além de avaliar as correlações entre a condutividade térmica, o teor de alumina (Al_2O_3) e a porosidade (PA e PT), neste trabalho, foi introduzida a razão R (teor de alumina / porosidade total) que permitiu correlacionar a condutividade térmica simultaneamente com a composição química e a microestrutura dos refratários. O método dos mínimos quadrados foi utilizado para generalizar a correlação entre k e R para uma faixa mais ampla de temperaturas. A boa qualidade do ajuste alcançado pelo modelo empírico obtido ($r^2 > 0,93$) permite concluir que a utilização da razão R pode ser mais significativa para a condutividade térmica de cerâmicas refratárias do que a utilização do teor de alumina ou quantidade de coríndon isoladamente. Estas relações são fundamentais no projeto de fornos e equipamentos que empreguem cerâmicas refratárias além de serem dados de entrada adequados para suprir programas de simulação computacional que visem à previsão do comportamento termomecânico destes materiais.

Palavras-chave: materiais refratários, condutividade térmica.

Abstract

Thermal conductivity of high alumina and fireclay refractories with $35.81 \text{ wt}\% \leq Al_2O_3 \leq 93.48 \text{ wt}\%$ and total porosity between 15% and 81% was evaluated by parallel hot-wire technique. The R ratio (alumina content / total porosity), applied in this work, allowed correlating the thermal conductivity (k) with chemical composition and the physical properties of the evaluated refractories. The least square method was used to generalize the correlation between k and R to larger temperature range. The high correlation obtained ($r^2 > 0.93$) allows concluding that the use of R ratio is more effective in the thermal conductivity of refractory ceramics than using only the alumina content or the amount of corundum. These relationships obtained in this work are important in the project of furnaces and equipments that uses refractories. They are also suitable data to input computer simulation programs aiming to evaluate the thermomechanical behavior of refractory ceramics.

Keywords: refractory materials, thermal conductivity.

INTRODUÇÃO

A crescente competitividade no setor siderúrgico tem impulsionado não só a melhoria dos revestimentos refratários existentes, como também o desenvolvimento de materiais que sejam adequados às mais diversas aplicações. Como a maioria dos materiais refratários é empregada em condições severas de temperatura, tornou-se fundamental o conhecimento de suas propriedades térmicas, dentre as quais destaca-se a condutividade térmica (k).

Vários trabalhos na literatura [1- 4] correlacionaram a

condutividade térmica com a massa específica geométrica (ρ_g) ou volumétrica (ρ_v), encontrando relações exponenciais como as expressas pela equação (A) na qual p_1 e p_2 são parâmetros a serem determinados.

$$k = p_1 + \exp(p_2 \cdot \rho_v) \quad (A)$$

Diferentemente, Akiyoshi e colaboradores [5] apresentaram uma função que correlacionava simultaneamente a condutividade térmica, a massa específica volumétrica e a temperatura, como apresentado pela equação (B).

$$k = \exp \left[\begin{array}{l} -2,8915 + 0,1543 \cdot 10^{-2} \cdot T - 0,4908 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + \\ + (1,5549 - 0,9277 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,4095 \cdot 10^{-6} \cdot T^2) \rho_v \end{array} \right] \quad (B)$$

(25 °C ≤ T ≤ 1200 °C e 0,55 g/cm³ ≤ ρ_v ≤ 3,14 g/cm³)

Na qual T é a temperatura (°C) e ρ_v é a massa específica volumétrica (g/cm³) e a condutividade térmica k expressa em (W/m·K).

Outros trabalhos buscaram correlações entre a condutividade térmica (k) e o teor de alumina (Al₂O₃) [6] ou entre a condutividade térmica e a quantidade de agregados grosseiros [7]. Chien e colaboradores [6] estudaram refratários com teor de alumina no intervalo 44,20%-p ≤ Al₂O₃ ≤ 92,77%-p e porosidade total entre 9,5% e 23,56%. Estes autores concluíram que a condutividade térmica não aumentava obrigatoriamente com o teor de Al₂O₃, mas sim, com a quantidade de alumina presente sob a forma de coríndon. Essa conclusão também foi obtida por Chan e Ko [7] que utilizaram refratários com 90%-p ≤ Al₂O₃ ≤ 96%-p e porosidade aparente entre 19,38% e 25,95%. Chan e Ko verificaram que a quantidade de coríndon e a presença de agregados de alumina de maior pureza eram mais importantes que a quantidade de agregados grosseiros. Todavia, nestes trabalhos não foi considerada a influência da porosidade sobre a condutividade térmica.

Diferentemente, neste trabalho, além de se estudar as correlações entre a condutividade térmica, o teor de alumina e a porosidade, individualmente, buscou-se uma correlação que contemplasse simultaneamente os efeitos do teor de alumina e da porosidade total (PT) sobre a condutividade térmica. Para isso, foi utilizada a razão.

$R = \frac{\text{Teor de alumina}}{\text{Porosidade total}}$. Em seguida, determinou-se uma expressão para a condutividade térmica em função da razão R e da temperatura.

Tais relações são fundamentais no projeto de fornos e equipamentos que utilizem materiais refratários, além de gerarem dados de entrada adequados para suprir programas de simulação computacional que visam à previsão de seu comportamento termomecânico.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais utilizados. Todos os materiais deste trabalho foram tratados termicamente em temperaturas superiores àquelas utilizadas na avaliação da condutividade térmica. A Tabela I apresenta o teor de alumina (%-p), a porosidade total (%) e a razão R (-) dos refratários utilizados. As análises químicas completas e as características físicas dos refratários deste trabalho, bem como a metodologia utilizada em sua avaliação podem ser encontradas em Akiyoshi e colaboradores [5].

Avaliação da condutividade térmica. A condutividade térmica dos materiais refratários foi avaliada através da técnica de fio quente paralelo. Essa técnica tem natureza transiente e permite avaliar diretamente (sem a necessidade de padrões calibrados) condutividades térmicas entre 0,10 W/m·K e 25 W/m·K. Pelo fato de ser transiente, utiliza um pequeno gradiente térmico, permitindo a avaliação da condutividade térmica tanto em baixas temperaturas (como a ambiente) como em temperaturas elevadas (1250 °C). Emprega corpos-de-prova de dimensões realistas (230x114x64) mm³, o que é muito importante para materiais de microestrutura grosseira, como os refratários, possibilitando a obtenção de valores mais represen-

tativos. O modelo teórico no qual se baseia a técnica de fio quente paralelo bem como a descrição dos equipamentos e dos procedimentos utilizados para a caracterização dos materiais pode ser encontrada em trabalho anterior [5]. Neste trabalho foram empregadas as seguintes temperaturas de ensaio: 25, 200, 400, 600, 800, 1000 e 1200 °C. Como já citado anteriormente, todos os corpos-

Tabela I - Teor de alumina (Al₂O₃), porosidade total (PT), porosidade aparente (PA) e a razão R (Al₂O₃/PT) para os refratários estudados. [Table I – Alumina content (Al₂O₃), total porosity (PT), apparent porosity (PA) and ratio R (Al₂O₃/PT) for all refractories evaluated.]

Nomenclatura	Al ₂ O ₃ (%-peso)	PT (%)	PA (%)	R (-)
I01	35,81	71,14	60,78	0,50
I02-1000 °C*	36,24	78,36	72,45	0,46
I03	36,33	56,50	38,90	0,64
I04	40,10	57,88	55,66	0,69
I05-1000 °C	41,85	46,66	44,62	0,90
D01	42,58	37,64	24,03	1,13
D02	44,72	33,09	30,59	1,35
D03	51,89	20,50	18,15	2,53
I06	52,19	35,96	32,19	1,45
C01	52,86	20,28	16,21	2,61
D04	55,62	35,98	24,45	1,55
D05	60,86	22,45	20,19	2,71
D06	62,93	30,83	24,08	2,04
C02	64,54	24,62	18,82	2,62
D07-S	67,11	21,90	20,07	3,06
D08	68,58	33,31	30,94	2,06
D07-P	71,04	27,23	25,78	2,61
D09	71,06	29,38	25,92	2,42
D10	72,14	21,39	18,36	3,37
D11-P	72,37	17,59	15,31	4,11
D12	72,42	40,12	32,85	1,81
D11-S	73,31	17,49	15,75	4,19
D13	75,93	23,51	21,37	3,23
C03-1280 °C	76,44	19,60	14,82	3,90
C04	82,68	22,33	18,74	3,70
D14-P	84,31	22,19	20,23	3,80
D14-S	84,41	19,60	17,92	4,31
C05	89,59	17,50	15,44	5,12
D15	89,80	20,89	20,17	4,30
D16	90,34	33,74	33,24	2,68
D17	90,71	27,31	24,33	3,32
D18	91,39	24,23	21,62	3,77
D19	92,33	18,11	14,79	5,10
D20	92,38	16,91	15,78	5,46
D21	93,48	15,25	12,16	6,13

P: prensado S: socado * temperatura máxima de tratamento térmico

de-prova foram tratados termicamente em temperaturas superiores àquelas empregadas na avaliação da condutividade térmica.

Tratamento dos Dados: A fim de avaliar as correlações existentes entre a condutividade térmica (k) e o teor de alumina (Al_2O_3) utilizou-se regressão linear. Um procedimento análogo foi empregado no ajuste da condutividade térmica em função da porosidade total (PT) e de k em função da porosidade aparente (PA).

A obtenção de uma equação que correlacionasse simultaneamente k , R e T pode ser dividida em duas etapas. Na primeira, utilizou-se um procedimento numérico para a determinação da forma da equação de ajuste. Foram avaliados os parâmetros de ajuste através de linhas de tendência para k em função de R para cada uma das temperaturas de ensaio. Na segunda etapa, determinou-se o comportamento desses parâmetros em função da temperatura. Como o modelo obtido foi linear, utilizou-se um procedimento analítico para confirmar os resultados obtidos pelo método numérico sem a interferência de convergência.

A qualidade do ajuste foi avaliada através de quadros de análise de variância (ANOVA), como no modelo apresentado na Tabela II, e do coeficiente de correlação linear ao quadrado (r^2) cujas definições são apresentados a seguir.

Tabela II - Quadro de análise de variância.

[Table II – Variance analysis.]

Fonte de Variação	graus de liberdade	soma dos quadrados
Regressão		
(modelo ajustado)	p-1	SQR
Resíduos	n-p	SQE
Total	n-1	SQT

Nas quais:

$$SQR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 : \text{soma dos quadrados devida à regressão;}$$

$$SQE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 : \text{soma dos quadrados dos resíduos;}$$

$$SQT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 : \text{soma dos quadrados total; } y_i: \text{i-ésimo valor}$$

avaliado experimentalmente; \hat{y}_i : i-ésimo valor predito pelo modelo;

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} : \text{média dos dados observados e n: número total de dados experimentais.}$$

A proporção da variância dos valores em torno da média explicada pelo modelo ajustado pode ser expressa pelo coeficiente de correlação linear ao quadrado (r^2) através da equação (C):

$$r^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad (C)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos teores de alumina e das características físicas apresentadas na Tabela I buscaram-se correlações entre a condutividade térmica, o teor de alumina, a porosidade e a temperatura.

Correlação com o Teor de Alumina. Todos os ajustes de parâmetros das equações obtidas neste trabalho foram realizados através do método dos mínimos quadrados. Nesta etapa, foram avaliados refratários com teor de alumina entre 35,81 %-p e 93,48%-p;

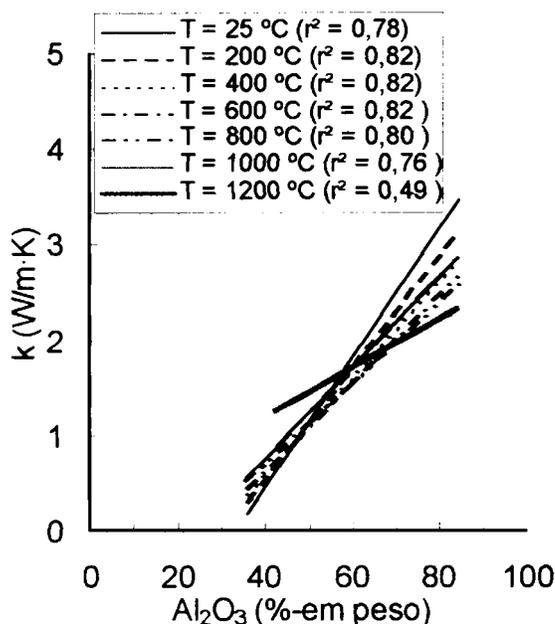
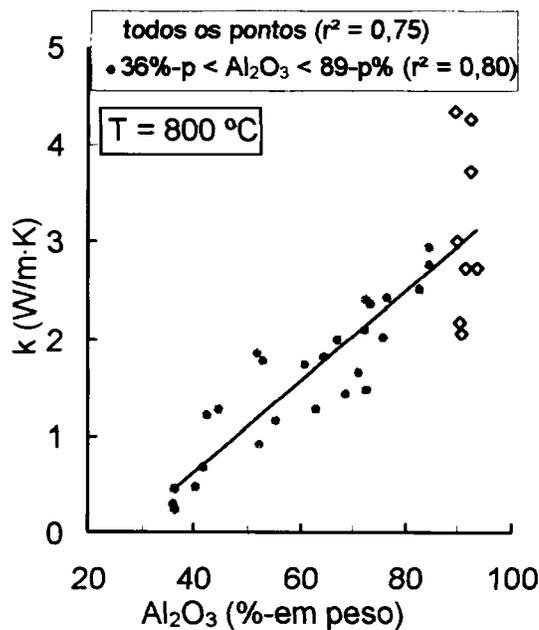


Figura 1: Condutividade térmica (k) em função do teor de alumina: (a) $T = 800 \text{ } ^\circ\text{C}$ e (b) linhas de tendência para a condutividade térmica em função do teor de alumina para as demais temperaturas de ensaio e $36\% \text{-p} < Al_2O_3 < 89\% \text{-p}$.

[Figure 1: Thermal conductivity (k) as function of alumina content: (a) $T = 800 \text{ } ^\circ\text{C}$ and (b) trend lines of thermal conductivity as function of alumina content to all measured temperatures and $36 \text{ wt}\% \leq Al_2O_3 \leq 89 \text{ wt}\%$.]

totalizando 209 pontos experimentais. As curvas para a temperatura de 1200 °C apresentam um número menor de pontos, uma vez que os materiais caracterizados como isolantes (nomenclatura I na Tabela I), foram tratados termicamente em temperaturas inferiores a 1200 °C.

A Fig. 1a apresenta a condutividade térmica (k) em função do teor de alumina (Al₂O₃, em porcentagem em peso) para a temperatura de 800 °C enquanto a Fig. 1b apresenta as linhas de tendência para todas as temperaturas de tratamento térmico.

A Fig. 1a mostra que, embora exista uma correlação linear entre a condutividade térmica e o teor de alumina, os pontos experimentais se encontram dispersos em torno da curva ajustada, principalmente para teores de alumina superiores a 89%-p. Mesmo desconsiderando-se os materiais com teor de alumina superior a 89%-p nota-se pela Fig. 1b que o valor do coeficiente de correlação linear ao quadrado foi inferior a 0,90 para todas as temperaturas de ensaio. Essa dispersão também foi encontrada por Chien e colaboradores [6] para refratários comerciais sílico-aluminosos e aluminosos com teor de alumina entre 44%-p e 93%-p.

Segundo Chien e colaboradores [6], uma possível explicação para estes baixos valores de r² pode ser a utilização do teor de alumina obtido através da análise química dos refratários sem se considerar as fases cristalinas presentes. Outra possibilidade é a necessidade de se considerar, além do teor de alumina, a influência da porosidade sobre a condutividade térmica.

Correlação com a Porosidade. Utilizando-se os valores de porosidade total (PT) e porosidade aparente (PA) apresentados na Tabela I, buscaram-se correlações entre a condutividade térmica e a porosidade. A condutividade térmica exibiu um comportamento aproximadamente exponencial tanto com a porosidade total quanto com a porosidade aparente como apresentado nas Figs. 2 e 3.

De modo semelhante ao teor de alumina, verifica-se pelas Figs. 2a e 3a que os maiores espalhamentos ocorreram para teores de alumina superiores a 89%-p. Nota-se que desconsiderando-se os materiais com Al₂O₃ > 89%-p houve um aumento nos valores de r². Chan e colaboradores [7] também não encontraram correlação entre a condutividade térmica e a porosidade aparente para refratários monolíticos com 90%-p < Al₂O₃ < 96%-p e 19,38% < PA < 25,95%.

Considerando que, neste trabalho, foram utilizadas faixas de porosidade (17,50% < PT < 78,36%) e teor de alumina (35,81%-p < Al₂O₃ < 93,48%-p) mais abrangentes, optou-se por desconsiderar os materiais com teor de alumina acima de 89% para não sacrificar a qualidade dos ajustes. Doravante serão analisados somente os materiais com teor de alumina menor que 89%-p, reduzindo o número de pontos experimentais para 181.

As Figs. 2b e 3b apresentam as linhas de tendência e os valores do coeficiente de correlação linear ao quadrado para o ajuste de k em função de PT e k em função de PA, respectivamente, em cada uma das temperaturas de ensaio. Comparando as Fig. 2 e Fig. 3, observa-se que o coeficiente de correlação linear ao quadrado para k em função de PT foi maior que o apresentado pela correlação entre a k em função de PA para todas as temperaturas de ensaio. Esse resultado já era esperado, uma vez que PT considera tanto o volume dos poros abertos quanto dos poros fechados enquanto PA considera somente aquele dos poros abertos.

Correlação com entre a condutividade térmica e a razão R. É importante lembrar que a condutividade térmica é função tanto da composição química quanto da porosidade do material. Deste modo,

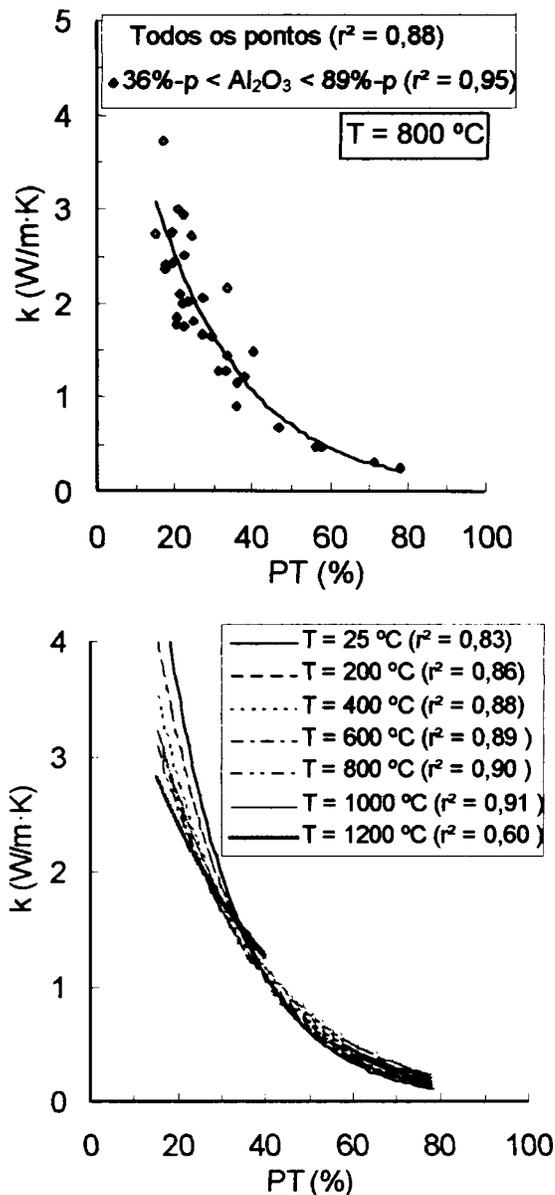


Figura 2: Condutividade térmica (k) em função da porosidade total (PT): (a) para T = 800 °C e (b) para as demais temperaturas de ensaio e 36%-p ≤ Al₂O₃ ≤ 89 %-p.

[Figure 2: Thermal conductivity (k) as function of total porosity (PT): (a) T = 800 °C and (b) trend lines to all measured temperatures and 36 wt% ≤ Al₂O₃ ≤ 89 wt%.]

buscou-se um parâmetro que correlacionasse simultaneamente ambas as variáveis. Para tanto, utilizou-se a razão R, dada por:

$$R = \frac{\text{Teor de alumina}}{\text{Porosidade total}} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{PT}} \quad (\text{D})$$

A Fig. 4a apresenta a condutividade térmica em função da razão R para a temperatura T = 800 °C e a Fig. 4b apresenta as linhas de tendência para o ajuste de k em função de R em cada uma das temperaturas de ensaio.

A qualidade dos ajustes pode ser verificada através da Fig. 4b onde os valores do coeficiente de correlação linear ao quadrado (r²) foram sempre superiores a 0,89.

Uma das principais vantagens advindas da utilização da razão R é correlacionar a condutividade térmica através de uma reta como

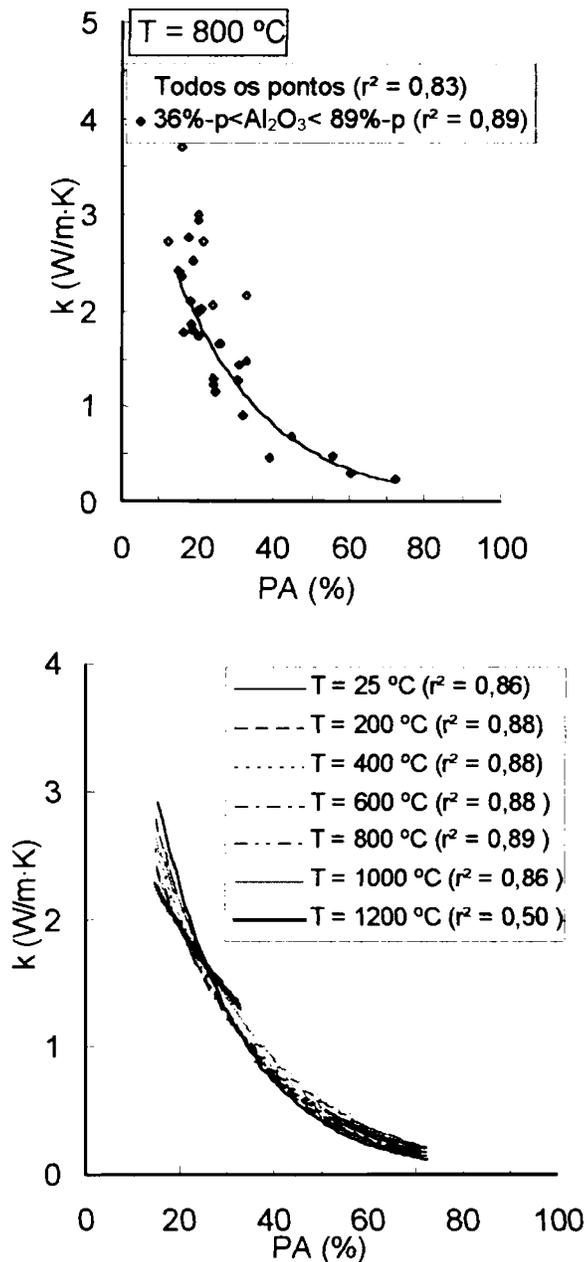


Figura 3: Condutividade térmica em função da porosidade aparente (PA): (a) para $T = 800\text{ °C}$ e (b) para todas as temperaturas de ensaio e $36\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 89\% \text{-p}$.

[Figure 3: Thermal conductivity (k) as function of apparent porosity (PA): (a) $T = 800\text{ °C}$ and (b) trend lines to all measured temperatures and $36\text{ wt}\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 89\text{ wt}\%$.]

a equação (E), ao invés de correlações exponenciais como nos casos das correlações de k em função de PT.

$$k = q_1 + q_2 \cdot R \quad (E)$$

Conforme descrito anteriormente, o procedimento numérico foi utilizado para obter a forma das correlações desejadas, tendo-se concluído que a equação (E) é a forma mais simples e representativa para a correlação entre a condutividade térmica e a razão R para cada temperatura.

A Tabela III apresenta o número de pontos experimentais, os valores dos parâmetros ajustados (q_1 e q_2) e do coeficiente de

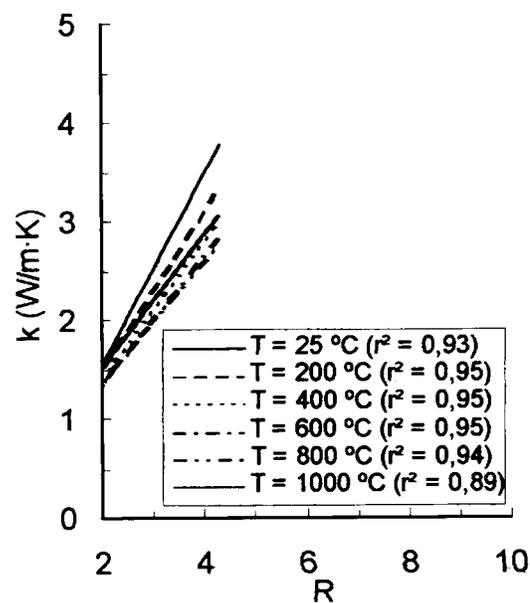
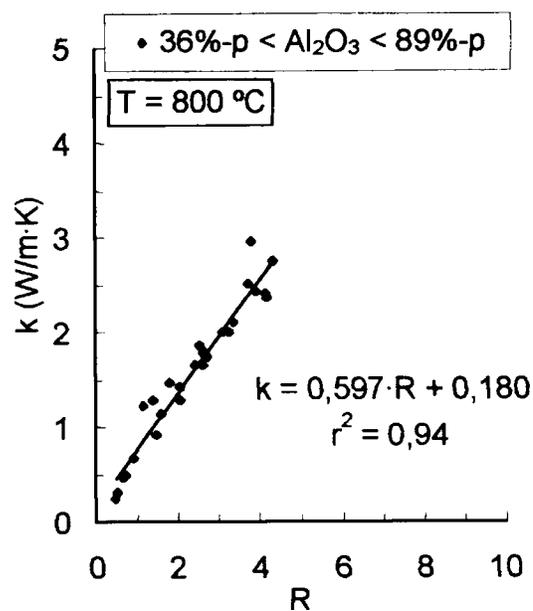


Figura 4: Condutividade térmica em função da razão R ($36\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 89\% \text{-p}$; $16\% \leq \text{PT} \leq 72\%$): (a) para $T = 800\text{ °C}$ e (b) para todas as temperaturas de ensaio e $36\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 89\% \text{-p}$.

[Figure 4: Thermal conductivity (k) as function ratio R ($36\text{ wt}\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 89\text{ wt}\%$; $16\% \leq \text{PT} \leq 72\%$): (a) $T = 800\text{ °C}$ and (b) trend lines to all measured temperatures and $36\text{ wt}\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 89\text{ wt}\%$.]

correlação linear ao quadrado para o ajuste da condutividade térmica em função da razão R para cada uma das temperaturas de ensaio.

Na segunda etapa, utilizaram-se os dados da Tabela III para ajustar os parâmetros q_1 e q_2 em função da temperatura. As equações de ajuste obtidas são apresentadas abaixo:

$$q_1 = -0,370 + 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot T - 6,82 \cdot 10^{-7} \cdot T^2; r^2 = 0,98 \quad (F)$$

$$q_2 = 0,984 - 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot T + 7,03 \cdot 10^{-7} \cdot T^2; r^2 = 1,00 \quad (G)$$

($25\text{ °C} \leq T \leq 1000\text{ °C}$)

Tabela III - Número de pontos experimentais por temperatura, parâmetros q_1 , q_2 e o coeficiente de correlação ao quadrado (r^2) obtidos pelo ajuste numérico em duas etapas para os refratários avaliados.

[Table III - Number of experimental data, parameters q_1 and q_2 and square linear correlation coefficient (r^2) obtained by the two-steps numerical procedure for the evaluated refractories.]

T (°C)	Número de pontos	q_1	q_2	r^2
25	26	-0,3656	0,9644	0,9346
200	27	-0,1046	0,7918	0,9456
400	27	0,0305	0,6858	0,9466
600	27	0,1110	0,6264	0,9473
800	27	0,1804	0,5970	0,9386
1000	27	0,2142	0,6537	0,8850
1200	20	0,7086	0,4245	0,8785
Numero total de pontos = 181				

Como já citado, devido ao menor número de pontos experimentais, as curvas para a temperatura de 1200 °C apresentaram comportamento distinto das demais temperaturas de ensaio, sendo por isso, excluídas dos ajustes dos parâmetros q_1 e q_2 em função da temperatura.

A equação final obtida pelo método numérico para a correlação entre a condutividade térmica, a razão R e a temperatura pode ser obtida substituindo-se $q_1(T)$ e $q_2(T)$ na equação (E), resultando em:

$$k = -0,3696 + 0,001251 \cdot T - 6,8237 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + (0,9837 - 0,001035 \cdot T + 7,0289 \cdot 10^{-7} \cdot T^2) \cdot R \quad (H)$$

$$[25 \text{ °C} \leq T \leq 1000 \text{ °C}, 35,81\% \text{-p} \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 89\% \text{-p}; 17,49\% \leq \text{PT} \leq 78,36\% \text{ para } k \text{ em } \text{W/m}\cdot\text{K}]$$

O ajuste dos parâmetros da equação acima pelo método dos mínimos quadrados também foi realizado analiticamente, uma vez que o procedimento numérico fornece apenas uma das possíveis soluções para os parâmetros da função de ajuste, enquanto que se utilizando procedimento analítico a solução é absoluta. Como no procedimento analítico foram avaliadas matrizes de grandes dimensões, utilizou-se o programa Mapple V (Release 4.0 – Waterloo Mapple Inc.) para a obtenção dos parâmetros da função de ajuste.

A Tabela IV apresenta os valores dos parâmetros e a tabela de análise de variância (neste caso, são apresentadas somente as somas dos quadrados) obtidos através dos métodos dos mínimos quadrados pelo processo numérico e pelo processo analítico.

Comparando-se os parâmetros obtidos pelo método dos mínimos quadrados através dos procedimentos numérico e analítico, nota-se que os valores são muito próximos, diferindo somente após a terceira casa decimal, indicando que além de ser útil na determi-

Tabela IV - Coeficientes estimados para a equação (H).
[Table IV - Estimated parameters for equation (H).]

Parâmetro	Método Numérico	Método Analítico
γ_1	-0,3696	-0,3697
γ_2	0,001251	0,001252
γ_3	$-6,8237 \cdot 10^{-7}$	$-6,8274 \cdot 10^{-7}$
γ_4	0,9837	0,9838
γ_5	0,001035	-0,00103516
γ_6	$7,0289 \cdot 10^{-7}$	$7,0318 \cdot 10^{-7}$
Análise de Variância		
SQT	131,3263	131,3263
SQR	122,4307	122,6114
SQE	8,7149	8,7148
r^2	0,932	0,934

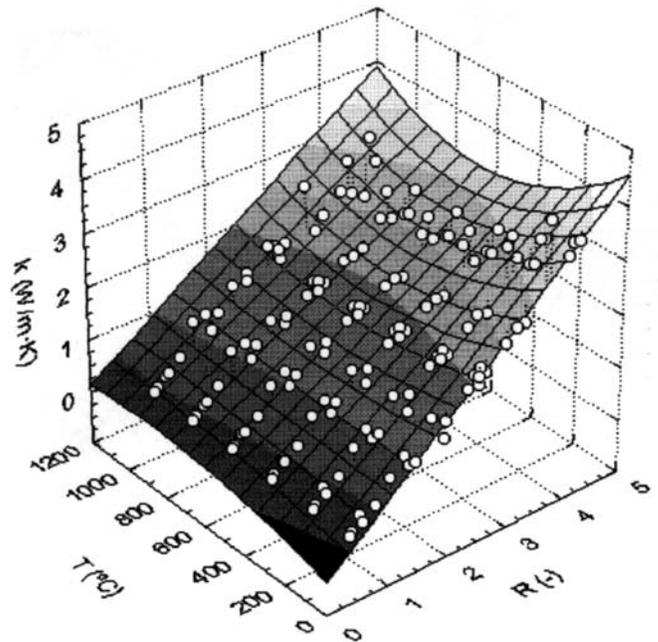


Figura 5: Representação tridimensional da correlação entre a condutividade térmica, a razão R e a temperatura.

[Figure 5: Three dimensional plot for the correlation between the thermal conductivity (k) as function ratio R and temperature.]

nação da forma da função de ajuste, o método numérico pôde (nesse caso) ser utilizado para determinar os parâmetros da função de ajuste. É importante lembrar que quando são utilizadas funções mais complexas, o procedimento numérico e o analítico podem levar a valores bastante distintos, sendo que os últimos são mais estáveis.

Assim, recomenda-se, sempre que possível, a utilização do método analítico na avaliação do método dos mínimos quadrados.

Na Fig. 5 tem-se uma representação tridimensional da correlação entre a condutividade térmica, a razão R e a temperatura. A curva de ajuste foi obtida a partir dos dados da Tabela IV para o método analítico.

O ajuste foi realizado para temperaturas entre 25 °C e 1000 °C e o coeficiente de correlação linear ao quadrado (r^2) igual a 0,93. Não foi possível incluir os pontos para a temperatura de 1200 °C, uma vez que a inclusão destes pontos experimentais acarretava grandes desvios em relação a curva de ajuste.

CONCLUSÕES

Foram avaliadas as correlações entre a condutividade térmica, o teor de alumina (Al_2O_3) e a porosidade (PA e PT) em refratários silico-aluminosos e aluminosos com $35,81\% \leq Al_2O_3 \leq 93,48\%$ e porosidade total entre 15% e 81%. Para avaliar simultaneamente a influência do teor de alumina e da porosidade total sobre a

condutividade térmica foi utilizada a razão $R = \frac{\text{Teor de alumina}}{\text{Porosidade total}}$.

Escolheu-se a razão R porque o ajuste da condutividade térmica em função de R foi linear e apresentou valores de coeficiente de correlação linear ao quadrado (r^2) superiores aos encontrados para os ajustes individuais entre a condutividade térmica e a porosidade (PT e PA). Embora o ajuste da condutividade térmica em função do teor de alumina também tenha sido linear, observou-se uma grande dispersão nos dados experimentais. Por outro lado, os ajustes de k em função de PT e k em função de PA apresentaram coeficiente de correlação linear ao quadrado (r^2) superior a 0,90, mas eram desvantajosos por serem relações exponenciais.

Os resultados permitiram ajustar uma equação que correlacionou a condutividade térmica simultaneamente como função da razão R e da temperatura. Foram comparados os procedimentos numérico e o analítico para a obtenção dos parâmetros da função de ajuste. Embora, neste caso ambos os procedimentos tenham levado a parâmetros próximos, foi lembrado que o procedimento analítico fornece valores mais estáveis.

O coeficiente de correlação linear ao quadrado avaliado para a equação obtida com o ajuste dos 161 pontos experimentais utilizados foi de $r^2 = 0,93$, e o erro médio percentual foi de 14%, indicando a boa qualidade do ajuste. As principais vantagens desta equação foram abordar simultaneamente a influência do teor de alumina

(Al_2O_3) e da porosidade total (PT) sobre a condutividade térmica (k), além de permitir generalizar a correlação entre k e a razão R para uma maior faixa de temperaturas e não somente para temperaturas específicas.

A boa qualidade do ajuste obtido através do modelo empírico desenvolvido neste trabalho permite concluir que a utilização da razão R que considera os efeitos tanto do teor de alumina quanto da porosidade total pode ser mais significativa para a condutividade térmica de cerâmicas refratárias do que a utilização do teor de alumina ou quantidade de corindon isoladamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, à CAPES e à Cerâmica SAFFRAN S.A. pelo apoio neste trabalho

REFERÊNCIAS

- [1] K. W. Cowling, A. Elliott, W. T. Hale. "Note on the relationship between bulk density and thermal conductivity in refractory insulating bricks". Transactions of British Ceramic Society, **53** (1954) 461-73.
- [2] R. W. Wallace, G. H. Criss, "Thermal conductivity of castable refractories in relation to bulk density". Am. Ceram. Soc. Bull. **47**, 2 (1968) 176-9.
- [3] G. Routschka et al., "Thermal conductivity of refractory castables". Interceram **37**, 3 (1988) 24-33.
- [4] M. M. Akiyoshi, M. G. da Silva, M. D. M. Innocentini, C. Pagliosa Neto, V. C. Pandolfelli, "Variáveis envolvidas na avaliação da condutividade térmica de materiais refratários através da técnica de fio quente paralelo". Anais do 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, S. Pedro, S.P., I CD-ROM (2000).
- [5] M. M. Akiyoshi, M. G. da Silva, A. P. da Silva, V. C. Pandolfelli, "Condutividade térmica e sua correlação com a temperatura e a massa específica volumétrica de materiais refratários silico-aluminosos e aluminosos". Cerâmica **47**, 301 (2001) 19-17
- [6] Y-T Chien, T-F Lee, Y-C Ko, "Thermal conductivity of fireclay and high-alumina refractory brick". Am. Ceram. Soc. Bull. **61**, 7 (1982) 718-24.
- [7] C-F Chan, Y-C Ko, "Influence of coarse aggregate content on thermal conductivity of alumina-spinel castables". J. Am. Ceram. Soc. **79**, 11 (1996) 2961-4.

(Rec.16/02/01, Ac. 22/06/01)