

Isolantes térmicos fibrosos: motivos para sua utilização como revestimentos de trabalho em equipamentos industriais que operam em altas temperaturas - revisão da literatura - parte II

(Fibrous thermal insulations: reasons of its use as a wear lining in industrial equipment which work at high temperatures - a review - part II)

D. G. M. Silva¹, W. L. Vasconcelos²

¹Vallourec Tubos do Brasil S.A., Av. Olinto Meireles 65, Belo Horizonte, MG, Brasil 30640-010

²Laboratório de Materiais Cerâmicos, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presid. Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte, MG, Brasil 31270-901
dgmsilva@yahoo.com.br, wlv@demet.ufmg.br

Resumo

Isolantes térmicos são uma das principais ferramentas para o alcance de metas de redução de consumo energético e de aumento de produtividade em equipamentos industriais que operam a altas temperaturas. Neste trabalho, três produtos pertencentes à classe das fibras inorgânicas refratárias foram avaliados: as fibras cerâmicas refratárias (FCR), as fibras de silicato de metais alcalino-terrosos (AES) e as fibras policristalinas (PCW). Para uma melhor compreensão de como estes produtos são eficazes, buscou-se expor justificativas divididas em três seções. Na primeira etapa foi desenvolvido um balanço de transferência de energia térmica em meios fibrosos. Na segunda seção são apresentadas justificativas físicas que explicam a interação de suas microestruturas com a radiação térmica. Na terceira e última parte são apresentados parâmetros e características físicas referentes a estes produtos, buscando comprovar as razões de suas utilizações.

Palavras-chave: fibras cerâmicas refratárias, isolantes térmicos, eficiência energética.

Abstract

Thermal insulations are one of the most important tools for achieving energy conservation and productivity increase in some industrial equipment which operate at high temperatures. In this paper, three inorganic wool-based products were evaluated: refractory ceramic fibers (RCF), alkaline-earth silicate fibers (AES) and polycrystalline fibers (PCW). To achieve the goals already mentioned, this document was divided into three sections. At the first step, one thermal heat balance was developed to fibrous medium. At the second part, physical reasons that explain microstructure interaction with thermal radiation were presented. At the last part, parameters and physical characteristics of the three products were presented, proving the reasons of their use.

Keywords: refractory ceramic fibers, thermal insulations, energy efficiency.

INTRODUÇÃO

Dependendo de sua aplicação, cada material refratário pode apresentar vantagens e desvantagens tecnológicas, ambientais e econômicas. Principalmente durante as etapas de investimento e/ou otimização de equipamentos industriais que trabalham a altas temperaturas, critérios econômicos e aspectos ambientais serão decisivos e colocados nas pautas de discussão, uma vez que leis, diretrizes e políticas exigem melhorias relacionadas a estes fatores [1]. Um exemplo que retrata bem as diretrizes e políticas demandadas pelo mercado, relacionadas diretamente aos critérios econômico e ambiental, é o plano da Comissão Europeia conhecido como Europa 2020. Este programa possui como uma de suas estratégias garantir que as seguintes metas sejam alcançadas até o ano de 2020: a) redução em 20% de emissões de gases de efeito de estufa relativas aos níveis

de 1990; b) incremento em 20% da quota de utilização de energias renováveis no consumo final energético; c) bem como gerar incremento de 20% em eficiência energética [2]. Dentro destas premissas básicas de sustentabilidade, grande parte dos usuários de materiais refratários tem desenvolvido indicadores particulares para avaliar o desempenho desses produtos, tais como: consumo específico e temperatura de face fria. De uma forma geral, as avaliações compreendem análises macroscópicas e a busca pelo entendimento da base de ciência dos materiais, que é a correlação entre a microestrutura, propriedades finais e processo de fabricação, na maioria das vezes, fica sob a responsabilidade do fornecedor de refratário, tornando as unidades fabris dependentes e vulneráveis.

Assim sendo, a busca por um melhor entendimento entre a microestrutura e propriedades destes produtos e por melhores tecnologias disponíveis no mercado, pode

trazer grandes benefícios para as demandas industriais por diminuição no consumo de energia (gás e elétrico) e, conseqüentemente, redução equivalente na emissão de CO₂ no caso da utilização de combustíveis fósseis. Dentro deste contexto, um tipo de isolamento térmico merece destaque: as fibras minerais artificiais ou fibras artificiais inorgânicas. Dentre estes materiais pode-se destacar as fibras de vidro, as fibras de lã de rocha, as fibras de escória, as fibras cerâmicas refratárias (FCR), as fibras de silicato de metais alcalino-terrosos (AES) e as fibras policristalinas (PCW). O foco deste artigo é direcionado para as três últimas fibras isolantes refratárias mencionadas. Estas foram escolhidas por apresentarem características físicas e químicas únicas, tornando-as vantajosas nos aspectos ambiental e econômico, frente às composições de revestimentos térmicos comercialmente empregados nas indústrias [3-6]. As fibras isolantes refratárias são utilizadas como revestimento térmico, objetivando isolar equipamentos que operam a temperaturas elevadas (>600 °C). Características como baixa condutividade térmica, baixa capacidade calorífica, alta resistência ao dano por choque térmico, baixa densidade, alta resiliência e flexibilidade fazem com que estes materiais sejam utilizados não só como revestimento permanente, mas também como camada de trabalho. Um exemplo desta última utilização são os fornos de tratamento térmico das indústrias siderúrgicas, que utilizam essas fibras no teto, paredes e como blocos queimadores.

Este artigo é dividido em três seções: na primeira parte buscou-se equacionar analiticamente as contribuições dos modos de transferência de calor em meios fibrosos; na segunda etapa são apresentadas explanações físicas da interação da microestrutura e a radiação térmica e, na última seção, são listados parâmetros que justificam a sua importância nos cenários anteriormente mencionados.

CONTRIBUIÇÃO DOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NAS FIBRAS ISOLANTES TÉRMICAS

A transferência de calor global na matriz de materiais fibrosos pode ser descrita como o somatório das contribuições térmicas através da fibra e do meio. Tais contribuições envolvem mecanismos combinados de transporte de energia por condução na parte sólida das fibras, condução gasosa ou convecção natural nos espaços entre as fibras e troca de radiação térmica com o meio participante. Para reduzir a transferência de calor global em materiais fibrosos, é necessário encontrar o equilíbrio entre a diminuição da fração sólida, com o intuito de se reduzir a condução, enquanto se deve prover fibra suficiente para prevenir a convecção e reduzir o efeito da radiação. Adicionalmente, outras propriedades, como a resistência mecânica, também devem ser levadas em consideração [7].

No desenvolvimento matemático da conservação de energia para um problema de transferência térmica nas fibras, as seguintes premissas foram adotadas: convecção natural ínfima, dado o reduzido tamanho dos poros entre as fibras [8]; fluxo de calor unidimensional e entre duas

superfícies planas e paralelas; radiação-condução acopladas em meio participante; regime estacionário e geração de energia interna nula. Este modelo está representado pela Eq. A, a qual descreve o fluxo de calor trocado entre as fibras e o meio através dos processos de difusão molecular e radiativo:

$$\frac{d}{dx} \left(\bar{k}_c \frac{dT}{dx} - q_r \right) = 0 \quad (A)$$

onde \bar{k}_c refere-se ao coeficiente de condutividade térmica relacionado à condução na parte sólida das fibras (k_s) e no gás (k_g) aprisionado entre as fibras [W/(m.K)]. Uma formulação analítica para explicar a condução térmica na parte sólida pode ser aproximada através da Eq. B [9, 10]. Este modelo correlaciona a condutividade térmica da fibra isolante (k_s) com a condutividade térmica do material constituinte da fibra (k_s^*). Além disso, é definido que k_s é independente do diâmetro das fibras e varia com a fração volumétrica de material sólido (f_v , %) elevada a uma potência (b), tipicamente entre 1 e 3 [11]. F_s é uma propriedade adimensional global que relaciona efeitos microestruturais, tais como o entrelaçamento das fibras e o contato entre elas. Este parâmetro é considerado independente da variação da temperatura. Geralmente, os parâmetros b e F_s são determinados em condições extremas (vácuo e ambiente criogênico).

$$k_s(T) = F_s f_v^b k_s^*(T) \quad (B)$$

Em relação à condução térmica do gás aprisionado entre as fibras, esta pode ser considerada dependente apenas da temperatura e independente da pressão de acordo com a termodinâmica clássica. Contudo, a troca de calor entre as moléculas do gás e as superfícies das fibras pode ser influenciada pela pressão do ambiente, em atmosferas rarefeitas e regimes de transporte de transição de movimento [10]. Estes regimes estão diretamente ligados ao efeito Knudsen, que explica o porquê da redução da condutividade do gás através da diminuição do tamanho do poro do material [12]. Desta forma, o modelo matemático que descreve a contribuição da condução gasosa em meios fibrosos é representado pelas seguintes equações:

$$k_g(T, P) = \frac{k_{g0}(T)}{\Phi + 2 * \Psi * \left(\frac{2 - \alpha}{\alpha} \right) * \left(\frac{2 * \gamma}{\gamma + 1} \right) * \frac{1}{Pr} * Kn} \quad (C)$$

$$Kn = \frac{1}{\delta} \quad (D)$$

$$1 = \frac{R * T}{\sqrt{2} * \pi * d_m^2 * N_A * P} \quad (E)$$

$$\delta = \xi \frac{d_p}{f_v} \quad (F)$$

onde, em relação às Eqs. C e D, k_{g0} é o coeficiente de

condução térmica do gás medido à pressão atmosférica e movendo-se livremente [W/(m.K)], α é o coeficiente adimensional de acomodação térmica, que mensura a efetividade de transferência térmica entre as moléculas do gás e superfície das fibras, γ é a razão entre os calores específicos (c_p/c_v), Pr é o número de Prandtl (adimensional) e Kn é o número de Knudsen (adimensional). Os parâmetros Φ e ψ dependem do número de Knudsen e são iguais a: $\Phi=1$, $\psi=0$ para $Kn < 0,01$ (regime contínuo); $\Phi=1$, $\psi=1$ para $0,01 < Kn < 10$ (regime de transição); $\Phi=0$, $\psi=1$ para $Kn > 10$ (regime livre molecular). Em relação à Eq. E, l é o livre caminho médio entre duas colisões sucessivas das moléculas do gás [m], T é a temperatura absoluta [K], P é a pressão [Pa], R é constante universal dos gases ideais igual a $8,31 \text{ J}/(\text{mol.K})$, N_A é a constante de Avogadro igual a $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ e d_m é o diâmetro molecular do gás [m]. Na Eq. F, δ é a dimensão característica das fibras [m], ξ é igual a 0,524 para fibras aleatoriamente orientadas no espaço ou 0,785 para fibras aleatoriamente orientadas entre planos, d_p é igual à distância entre as paredes das fibras, tratada como se fosse o diâmetro dos poros [m] e f_v é a fração volumétrica de material sólido (%).

Cabe ressaltar que esta abordagem foi desenvolvida para os regimes de transporte de transição de movimento descritos. Para este artigo, direcionado para equipamentos industriais, tendo como exemplo fornos de tratamento térmico, a pressão de trabalho é aproximadamente igual à atmosférica. Sendo assim, o comportamento da condução do gás segue as premissas da termodinâmica clássica, ou seja, este depende da temperatura e pode ser estimado através da teoria cinética dos gases. Esta abordagem é discutida na próxima seção. Em relação à troca de radiação térmica entre o meio participante, a condutividade térmica radiativa pode ser descrita pela aproximação de Rosseland [9], a qual possui uma abordagem similar à lei de Fourier (difusão de calor) e à lei de Fick (difusão de massa), dada por:

$$k_r = \frac{16n^2\sigma T^3}{3\beta_r} \quad (\text{G})$$

sendo, n o índice de refração do material, σ a constante de Stefan-Boltzmann [W/(m².K⁴)], T a temperatura absoluta (K) e β_r é o coeficiente de extinção médio de Rosseland, o qual inclui tanto o efeito de absorção quanto de dispersão (espalhamento) da radiação através da microestrutura do produto. A aproximação da difusão pode ser definida como uma forma de condução radiativa, descrita por:

$$q_r = -k_r \frac{dT}{dx} \quad (\text{H})$$

Juntando as Eqs. A e H, obtêm-se:

$$\frac{d}{dx} \left(k_t \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (\text{I})$$

onde, k_t é uma superposição dos coeficientes de condutividade térmica relativos à condução na parte sólida, condução no gás aprisionado entre as fibras e troca de radiação térmica entre o

meio participante (microestrutura das fibras) [W/(m.K)]. Para a Eq. I, considerou-se a mudança de variáveis, $\varnothing = dT/dx$, e k_t constante. Logo, substituindo \varnothing na Eq. I e integrando-a por separação de variáveis, conclui-se que $\varnothing = c_1$ e que $dT/dx = c_1$. Integrando-a mais uma vez, obtêm-se a equação da reta:

$$T(x) = c_1 \cdot x + c_2 \quad (\text{J})$$

Para se obter as constantes, devem-se aplicar as condições de contorno, que são fornecidas pelas temperaturas superficiais das faces das fibras. Adotando-se esses valores iguais a T_1 (maior temperatura na espessura inicial, $x=0$) e T_2 (menor temperatura na espessura final, $x=L$) e substituindo-os na Eq. J tem-se:

$$T(x) = (T_2 - T_1) \cdot \frac{x}{L} + T_1 \quad (\text{K})$$

Através da distribuição de temperaturas descrita pela Eq. K, é possível calcular o coeficiente global de condutividade térmica, aplicando-se a lei de Fourier. Grande parte dos métodos desenvolvidos para a determinação desta propriedade física utiliza esta lei e considera as seguintes premissas para o cálculo do k_t : processo de condução unidimensional, regime permanente, sem geração de energia e entre superfícies planas [13]. Desta forma, o fluxo de energia térmica por unidade de área pode ser descrito por (o sinal negativo é consequência do fato da energia ser transferida na direção de decréscimo da temperatura):

$$\ddot{q} = -k_t \frac{\Delta T}{L} \quad (\text{L})$$

onde, k_t representa o coeficiente global de condutividade térmica [W/(m.K)], ΔT é a diferença entre as temperaturas, $T_2 - T_1$ [K], e L é a dimensão característica pela qual a energia se propaga de forma majoritária [m]. Por fim, pode-se representar o coeficiente global de condutividade térmica, através do somatório de suas contribuições individuais. Esta propriedade física é descrita por:

$$k_t = k_s + k_g + k_r \quad (\text{M})$$

Desta forma, demonstra-se que através da resolução do modelo matemático proposto os coeficientes de condutividade térmica podem ser determinados. Estes valores estão representados na Fig. 1. Observa-se que, para menores valores de densidade aparente e maiores temperaturas, tanto a radiação quanto a condução através do gás são consideradas modos dominantes de transferência de calor. A última é incrementada com o aumento da temperatura e da pressão estática no meio. Já a primeira torna-se dominante com o aumento da temperatura, uma vez que a radiação pode ser emitida em uma taxa proporcional à terceira potência da temperatura absoluta da superfície ou meio. Os outros dois modos de transferência de energia, condução e convecção são proporcionais, em grande parte dos casos, à primeira potência da temperatura. A componente da radiação pode ser reduzida com o acréscimo no valor da densidade aparente

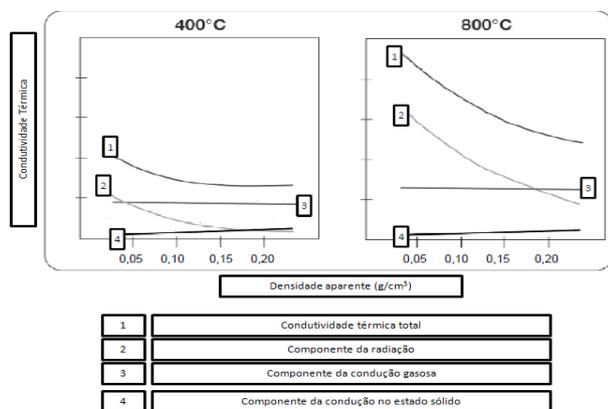


Figura 1: Separação dos valores de condutividade térmica [6].
[Figure 1: Breakdown of thermal conductivity values [6].]

do material fibroso. Esta afirmação parece ser contraditória, uma vez que para materiais isolantes porosos o aumento do valor da condutividade térmica é proporcional ao aumento da densidade aparente.

No caso específico das fibras isolantes térmicas, com valor limítrofe de densidade aparente de até 250 kg/m³, massa específica da fibra próxima a 2500 kg/m³ e porosidade superior a 90%, as fases gasosa e sólida podem ser consideradas contínua e descontínua, respectivamente. Tendo como base esta configuração, a condutividade térmica da fase majoritária é dominante, até que a fração volumétrica da fase sólida ultrapasse o valor aproximado de 10%, podendo assim ser considerada uma fase contínua e, conseqüentemente, contribuir para o aumento do valor da condutividade térmica global [14]. Cabe ressaltar que outros parâmetros microestruturais, tais como distribuição do diâmetro das fibras, quantidade de material não fibralizado, composição química, orientação das fibras e grau de cristalinidade, também devem ser levados em consideração, quando comparações referentes à condutividade térmica global destes materiais forem efetuadas. Desta forma, é importante discutir fisicamente como os mecanismos combinados de transporte de energia térmica interagem com a microestrutura de materiais fibrosos.

Condução

A condução térmica é a transferência de calor de uma parte de um corpo com uma temperatura mais elevada para outra parte do mesmo corpo a uma menor temperatura ou para outro corpo com uma menor temperatura e que possuam contato físico. A lei empírica da condução de calor é conhecida como lei de Fourier, a qual enuncia que a taxa de fluxo de energia por condução é dada por (o sinal negativo é consequência do fato da energia ser transferida na direção de decréscimo da temperatura):

$$q_k = -k\nabla T \quad (N)$$

onde, q_k é o fluxo de calor por condução por unidade de área [W/m²], k é a condutividade térmica [W/(m.K)], T é

a temperatura [K] e ∇ operador del ou nabla. A condução térmica em meios fibrosos pode ocorrer pela parte sólida (fibra) e pelo ar aprisionado nos espaços vazios entre as fibras. O processo de condução na parte sólida das fibras pode ser explicado através da interação entre os fônons que são vibrações atômicas ordenadas envolvendo o transporte de energia de moléculas mais energéticas para aquelas que possuem um menor nível de energia. O comportamento da condução por fônons em relação ao aumento da temperatura pode ser interpretado através de:

$$k = \frac{1}{3} \int_0^\omega c(\omega) \vartheta l(\omega) d\omega \quad (O)$$

onde, ϑ é a velocidade média de propagação dos fônons, $c(\omega)$ é a capacidade calorífica específica [J/(kg.K)], $l(\omega)$ é o tempo de relaxação dos fônons e ω é a frequência de vibração dos fônons. O tempo de relaxação é proporcional ao livre caminho médio dos fônons (l). Este último é definido como a distância média que uma onda eletromagnética pode trafegar sem sofrer qualquer tipo de atenuação ou espalhamento.

Inicialmente a capacidade calorífica aumenta com a temperatura, mas se aproxima de um valor constante. A velocidade de propagação dos fônons permanece relativamente constante e o livre caminho médio é inversamente proporcional à temperatura. Para os materiais refratários cristalinos, nas quais as vibrações do retículo cristalino são modos primários de condução de energia, o efeito do livre caminho médio é dominante e a condutividade térmica diminui com o aumento da temperatura. Este processo ocorre através das interações fônnon-fônnon, que ocasionam a atenuação das ondas elásticas térmicas, devido ao aumento da desordem atômica [15]. Para o caso das fibras não cristalinas, devido à sua estrutura atômica já ser considerada desordenada, o valor do livre caminho médio não se altera significativamente com o aumento da temperatura. Assim, para estes materiais, a capacidade calorífica possui um maior efeito na transferência de energia, e o valor da condutividade térmica na parte sólida das fibras aumenta com a temperatura [14].

Já o processo de condução no gás aprisionado entre as fibras está relacionado ao livre caminho médio ou distância média percorrida entre duas colisões sucessivas das moléculas do gás. Este processo pode ser estimado através da teoria cinética dos gases (Eq. E). Através desta equação, pode-se prever o valor do livre caminho médio entre as colisões das moléculas do gás estudado. Para o caso das fibras, e de acordo com os locais de instalação, apenas a temperatura é importante neste contexto, uma vez que a pressão é constante e próxima a 1 atm. Logo, considerando dois valores de temperatura, 25 e 1050 °C (operação de um forno de aquecimento de tarugos de ligas de aço-carbono, por exemplo), pressão constante e igual a 1 atm e diâmetro molecular dos gases (ar) próximo a 3 Å, pôde-se comparar, através da Eq. E, os resultados apresentados na Tabela I. À medida que o valor de temperatura é incrementado, a distância média percorrida entre duas colisões sucessivas das moléculas do gás também é aumentada. Logo, pode-se

Tabela I - Livre caminho médio entre as colisões das moléculas do ar em duas temperaturas distintas.
 [Table I - Mean free path between collisions of gas (air) molecules at two different temperatures.]

Temperatura (°C)	l (livre caminho médio) (µm)	l/d _m	Separação molecular média (nm)	Separação molecular média diâmetro molecular do gás
25	0,1016	338	3,437	11
1050	0,4508	1502	5,649	18

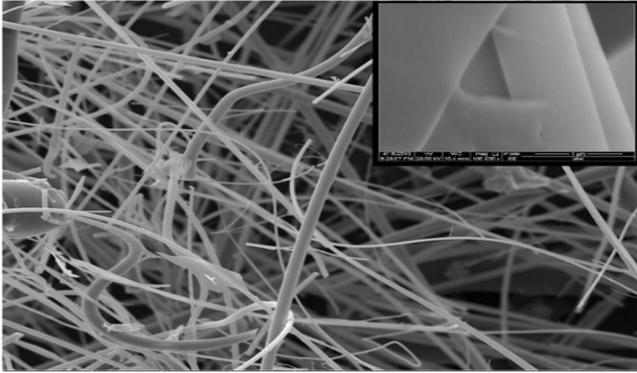


Figura 2: Microestrutura típica das fibras isolantes refratárias [16].
 [Figure 2: Typical microstructure of the thermal insulating fibers [16].]

concluir que as ondas eletromagnéticas percorrem um maior caminho antes de serem atenuadas e, conseqüentemente, os valores registrados de condutividade térmica gasosa são superiores quando comparados aos resultados anotados para temperaturas inferiores. Este fato é verdadeiro, caso esse percurso for livre. Para a microestrutura do material estudado, onde se tem a presença de um emaranhado de fibras, caso a distância entre suas paredes apresente valores inferiores em relação ao livre caminho médio de colisão entre as moléculas do gás, o resultado da condutividade do gás aprisionado entre elas pode ser atenuado. Na Fig. 2 é apresentado um exemplo típico da microestrutura das fibras estudadas. Portanto, para que as contribuições do modo de transferência de calor por condução sejam minimizadas, tanto na fração sólida das fibras quanto no gás aprisionado entre as fibras, deve-se primeiro gerar materiais com uma maior quantidade de fração de espaços vazios (porosidade) e, segundo, garantir que as distâncias entre as paredes das fibras sejam menores do que o livre caminho médio de colisão entre as moléculas do gás.

Convecção

Este modo de troca térmica está relacionado à transferência de calor de uma superfície restrita a um fluido em movimento, ou a transferência de calor ao longo da posição do fluxo dentro do interior do fluido em movimento. Caso estas trocas de energia sejam induzidas por um soprador ou ventilador, o processo é chamado de convecção forçada. Se a movimentação do fluido ocorrer como resultado da diferença de densidade produzida pela diferença de temperatura, o processo é chamado de convecção livre ou natural. Quando a energia térmica ocorre entre a superfície de um sólido e o seu fluido adjacente, a taxa do fluxo de

calor pode ser descrita pela lei de resfriamento de Newton, representada por:

$$q_h = h \cdot (T_w - T_f) = h \cdot \Delta T \quad (P)$$

onde, q_h é o fluxo de calor convectivo por unidade de área [W/m^2]; h é o coeficiente de transferência de calor ou coeficiente de película [$W/(m^2.K)$]; T_w é a temperatura da parede [K]; T_f é a temperatura do fluido [K]. A convecção em materiais porosos pode ser separada em dois eventos: convecção natural dentro dos poros fechados e convecção natural e/ou forçada através dos poros abertos e intercomunicados [17]. Para o caso da microestrutura das fibras isolantes refratárias, não faz sentido falar em poros fechados, mas sim em uma possível subdivisão do gás (ar) aprisionado pelas fibras em poros considerados suficientemente pequenos (micrométricos), abertos e intercomunicados. Este raciocínio é válido para materiais fibrosos com densidades iguais ou superiores a 20 kg/m^3 , nos quais a contribuição de transferência térmica por convecção natural pode ser negligenciada [8]. Esta conclusão está evidenciada em outras pesquisas [18, 19]. Assim sendo, considerou-se um caso onde o gradiente de temperatura foi gerado na mesma direção da gravidade. Logo, para que a convecção natural ocorra, a força gravitacional deve ultrapassar o valor da resistência viscosa ocasionada pelas paredes das fibras. Essa relação entre as duas forças descritas é frequentemente caracterizada pelo número de Rayleigh, representado por:

$$Ra = \frac{\rho_g \cdot g \cdot \chi_g \cdot L \cdot \eta_1 \cdot c_{pg} \cdot \Delta T}{\nu_g \lambda_g} \quad (Q)$$

onde, ρ_g é a densidade do gás [kg/m^3]; g é a aceleração da gravidade [m^2/s]; χ_g é o coeficiente de expansão térmica do gás [1/K]; L é a espessura do material poroso [m]; η_1 é a permeabilidade Darciana [m^2]; c_{pg} é o calor específico do gás [$J/(kg.K)$]; ΔT é a diferença entre as temperaturas de face quente e face fria medidas na espessura do material poroso [K]; ν_g é a viscosidade cinemática do gás [m^2/s] e λ_g é a condutividade térmica do gás na ausência de convecção [$W/(m.K)$]. O número de Rayleigh crítico, para um meio poroso, acima do qual espera-se a ocorrência do processo de convecção natural, apresenta valor igual a $4\pi^2$ [20].

Para comprovar ou não o efeito da convecção natural, foi adotado como exemplo um forno industrial que opera a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, pressão atmosférica (1 atm) e que tem como revestimento de trabalho uma fibra cerâmica refratária

Tabela II - Propriedades do ar na temperatura de 535 °C e pressão de 1 atm [22].

[Table II - Air properties at 535 °C and 1 atm [22].]

ρ_g (kg/m ³)	χ_g (10 ⁻³ 1/K)	c_{pg} (J/kg.K)	ν (10 ⁻⁴ m ² /s)	λ_g (W/m.K)
0,4353	1,154	1099	0,8498	0,0577

(FCR) instalada na parede plana com as seguintes características: densidade aparente de 128 kg/m³, temperatura de classificação de 1260 °C, e valores de condutividade térmica [W/(m.K)] próximos a 0,06 (200 °C), 0,10 (400 °C), 0,15 (600 °C), 0,20 (800 °C) e 0,27 (1000 °C) [21]. Além destes pontos, considerou-se que o revestimento tem espessura de 203 mm, é suportado por uma carcaça metálica e que, externamente a esta, ocorre convecção natural, radiação (emissividade da chaparia igual a 0,90) e temperatura ambiente de 30 °C. Aplicando-se a lei de Fourier para uma condução unidimensional, regime estacionário, entre superfícies planas e sem geração de energia interna, a temperatura de face fria calculada é de 70 °C. Desta forma, considerando uma temperatura média entre as faces quente e fria do revestimento de 535 °C, podem-se obter as propriedades do gás, que para este caso é o ar. Estes valores estão apresentados na Tabela II. Para a permeabilidade Darciana foi utilizado o valor de 1.10⁻¹⁰ m² [6]. Através da Eq. Q calculou-se o valor do número de Rayleigh igual a 0,02062. Desta forma, conclui-se para revestimentos em fibra isolante refratária, instalados em equipamentos que operam em altas temperaturas e pressões próximas à atmosférica, o efeito da convecção natural pode ser desprezado. Já para o caso da convecção forçada através dos poros abertos e intercomunicados, esta pode ser gerada pela diferença de pressão ao longo da espessura do material, devido à utilização de alguma força motriz natural (vento) ou induzida (ventilador). Julgando esta contribuição para os testes de condutividade térmica ou fornos siderúrgicos, como ambos são conduzidos em pressões próximas à atmosférica, este fator pode ser desprezado, uma vez que não há diferença entre as pressões interna e externa nestes equipamentos e conseqüentemente entre a espessura do revestimento refratário.

Radiação

Neste trabalho o foco para a explicação dos modos de contribuição de transferência térmica em meios fibrosos está direcionado para equipamentos industriais que operam em altas temperaturas, mais especificamente entre 600 e 1300 °C. Este fato torna a radiação térmica dominante, uma vez que a condutividade radiativa (k_r) representada pela aproximação de Rosseland, na Eq. G, varia com a temperatura elevada à terceira potência. Em contrapartida, as componentes de condução nas fibras e no gás são dependentes da temperatura elevada à primeira potência. Outro ponto que deve ser avaliado na transferência de energia por radiação térmica é o coeficiente de extinção médio de Rosseland (β_r). Fisicamente, este parâmetro representa a taxa de atenuação do fluxo de energia térmica passando através do material, ou seja, para o caso das fibras isolantes refratárias, é a porção

de energia transmitida através desses revestimentos após parte desta radiação ter sofrido um processo de absorção e espalhamento, também conhecido como extinção. Desta forma, compreender como estes dois efeitos interagem com a microestrutura das fibras, dentro da faixa de temperatura descrita, pode contribuir para explicar os baixos valores das condutividades térmicas registrados para esses produtos. Avaliando-se a microestrutura das mantas de fibras isolantes refratárias, estas apresentam valores de porosidade superiores a 95% [7]. Assim sendo, o julgamento da contribuição referente à radiação térmica é dividido em duas fases: a parte relativa à fração sólida e outra em relação aos espaços vazios preenchidos por ar, como se fossem considerados poros. A metodologia adotada neste documento é a mesma para a fase sólida e para a fase de vazios.

Considerando a parte sólida (fibras) como se fossem pequenas partículas, as ondas eletromagnéticas ou fótons que propagam pelo meio podem ser transmitidos, refletidos ou absorvidos. Adicionalmente, a interação da radiação térmica com as fibras pode mudar a direção de propagação do fóton. Este fato pode ocorrer através de três mecanismos distintos: difração (alteração do caminho do fóton sem colidir com a fibra), reflexão (mudança da direção do fóton após colisão com a fibra) ou refração (fóton penetra na fibra, mudando a sua direção). Estes três mecanismos juntos são denominados de espalhamento. Logo, na presença dos processos de absorção e espalhamento, a transmissividade do material deve ser incrementada de acordo com [23]:

$$T_\eta = e^{-\kappa_\eta + \sigma_\eta} L \quad (R)$$

onde, T_η é transmissividade espectral [-], κ_η é o coeficiente de absorção espectral [cm⁻¹], σ_η coeficiente de espalhamento espectral [cm⁻¹] e L é a espessura do material [cm]. O somatório dos dois parâmetros é conhecido como coeficiente de extinção espectral [23]. Referente ao processo de absorção, buscou-se representar na Tabela III as principais bandas de absorção para cada um dos tipos de ligações presentes nos constituintes majoritários das fibras isolantes refratárias. Juntamente a esta análise, foi utilizada a lei de deslocamento de Wien, a qual é possível estimar a temperatura de uma fonte a partir de seu espectro de emissão ou vice-versa. Como, para este estudo, a faixa de interesse de utilização das fibras encontra-se entre 600 e 1300 °C, foi possível efetuar o cálculo dos comprimentos de onda referentes aos picos de emissão de cada temperatura, através da Eq. S. Logo, estes valores foram iguais a 1,8415 μm (1300 °C) e 3,3178 μm (600 °C).

$$\lambda = \frac{2897}{T} \quad (S)$$

onde, λ é o comprimento de onda [μm] e T é a temperatura [K]. Para que a absorção seja considerada significativa, devem-se avaliar as bandas de absorção no infravermelho de cada fase majoritária presente nas fibras, e compará-las à faixa dos comprimentos de onda calculados através da Eq. S, referentes aos picos de emissão nas temperaturas

Tabela III - Principais bandas de absorção para os óxidos majoritários das fibras.
 [Table III - Major bands of absorption according to the main oxides presented in the fibers.]

Constituinte (elemento)	Ligação	λ (μm)	Tipo de vibração	Ref.
	Si-O-Si	9-9,5	Estiramento simétrico	
Silício	Si-O-Si	12,5	Estiramento simétrico	[25]
	O-Si-O	21-23	Dobramento	
Zircônio	Zr-O	21,46	Estiramento	[26]
Alumínio	Al-O	11,1-16,6	Estiramento	[27]
Magnésio	Mg-O	14,9-22,2	Estiramento	[28]
Cálcio	Ca-O	16,6-40	Estiramento	[29]

compreendidas entre 600 e 1300 °C. Cabe ressaltar que esta metodologia faz-se necessária, uma vez que a transferência de energia por radiação térmica nessa faixa de temperatura ocorre no espectro do infravermelho próximo ($\lambda = 0,78\text{-}2,5 \mu\text{m}$) e do infravermelho médio ($\lambda = 2,5\text{-}5,0 \mu\text{m}$) [24]. Na Tabela III, observa-se que todos os óxidos majoritários presentes na constituição das fibras não são bons absorvedores de radiação térmica nos espectros avaliados do infravermelho. Portanto, a atenuação da transferência de calor, devido a este fenômeno, pode ser desprezada.

O processo de espalhamento pode ser determinado através do tamanho relativo das partículas (fibra ou poros) comparadas ao comprimento de onda da radiação térmica. Três critérios distintos podem ser avaliados e estão representados por: i) $\pi d/\lambda \gg 1$, partículas grosseiras - óptica geométrica; ii) $\pi d/\lambda \ll 1$, partículas finas - espalhamento de Rayleigh; e iii) $\pi d/\lambda = 1$, espalhamento de Mie, onde d é o diâmetro efetivo da partícula [m] e λ é o comprimento de onda do fóton [m]. Utilizando os valores dos comprimentos de ondas calculados referentes aos picos de emissão a 600 e 1300 °C, o provável regime que representa estas condições é o de espalhamento de Mie. A solução do espalhamento de Mie descreve o resultado da interação de uma onda eletromagnética plana com partículas de formato esférico, cuja distribuição de diâmetros e cujos índices de refração sejam conhecidos [23]. Esta solução pode ser aplicada mesmo para partículas não esféricas, caso a microestrutura do material seja composta por partículas aleatoriamente orientadas [30], como é o caso das fibras isolantes térmicas estudadas. Para calcular os coeficientes de espalhamento para cada comprimento de onda, foi utilizada uma página da web interativa, na qual é possível utilizar a solução de Mie [31]. Para estes cálculos foram considerados os dois comprimentos de onda, 1,8415 μm (1300 °C) e 3,3178 μm (600 °C), porosidade das fibras de 95 % [7] e valor do índice de refração do meio de 1,027 [8]. Cabe ressaltar que, como a fração volumétrica de vazios é dominante, esta avaliação foi realizada para este parâmetro e, posteriormente, a mesma linha de raciocínio foi adotada para a parte sólida, e que os espaços entre as fibras foram considerados como se fossem poros. Os valores dos coeficientes de espalhamento versus a

distância entre as paredes das fibras, para os comprimentos de onda da radiação térmica a 1300 e 600 °C, estão representados na Fig. 3.

Para o comprimento de onda de 3,3178 μm (600 °C, Fig. 3), os coeficientes de espalhamento apresentam maiores valores para distância entre as paredes das fibras compreendida no intervalo de 1 a 3 μm . Já para o comprimento de onda de 1,8415 μm (1300 °C), esta faixa encontra-se entre 2 e 6 μm . Desta forma, dentro do intervalo de temperatura de utilização das fibras isolantes refratárias neste documento, para que o modo de contribuição de transferência de energia através da radiação térmica seja atenuado, os espaços entre as fibras devem apresentar dimensões variando entre 1 e 6 μm . Cabe ressaltar que estes espaços foram considerados como se fossem pequenos poros esféricos com gás (ar) aprisionado. Outra constatação retirada da Fig. 3 é que o processo de atenuação torna-se mais intenso à medida que a temperatura é incrementada. Esta conclusão está ancorada na Fig. 1, onde os resultados de cada contribuição dos modos de transferência de energia térmica nas fibras estão estratificados para duas temperaturas distintas. Mesmo não tendo apresentado os cálculos da solução de espalhamento para a fração sólida, cabe ressaltar que partículas mais grosseiras não ajudam no processo de atenuação da radiação térmica. Desta forma, adotando a mesma linha de raciocínio dos cálculos da solução de Mie, para que parte da radiação térmica também seja extinta pela fração sólida, diâmetros de fibras entre 1 e 6 μm devem ser pretendidos durante o processo de fabricação. Após a compreensão da interação da microestrutura de meios fibrosos com os fótons, torna-se necessário apresentar parâmetros relevantes das fibras, que as tornam vantajosas comercialmente, quando comparadas a outros materiais refratários comumente empregados nas indústrias. Este assunto é abordado na próxima seção.

PARÂMETROS E PROPRIEDADES FÍSICAS RELEVANTES DOS MATERIAIS ESTUDADOS

Massa específica e densidade aparente das fibras: os valores de massa específica da fibra por categoria são FCR

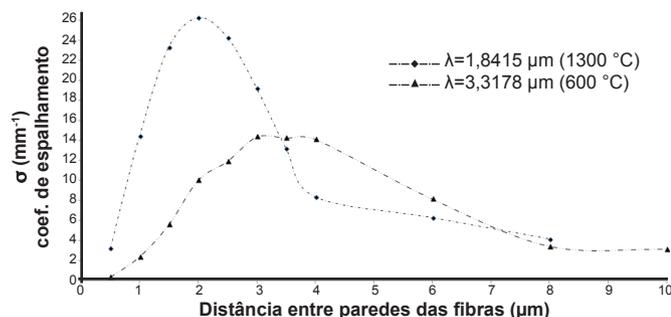


Figura 3: Coeficiente de espalhamento versus distância entre as paredes das fibras para $\lambda=3,3178 \mu\text{m}$ ($600 \text{ }^\circ\text{C}$) e $\lambda=1,8415 \mu\text{m}$ ($1300 \text{ }^\circ\text{C}$).

[Figure 3: Scattering coefficient versus fiber spacing for $\lambda=3.3178 \mu\text{m}$ ($600 \text{ }^\circ\text{C}$) and $\lambda=1.8415 \mu\text{m}$ ($1300 \text{ }^\circ\text{C}$).]

2,6-2,7 g/cm³ e AES 2,5 g/cm³. Para as PCW têm-se para as fibras de mulita 2,9-3,3 g/cm³ e para as fibras de alumina 3,3-3,9 g/cm³ [32]. Os valores da densidade aparente para as três categorias de materiais estudados são apresentados em ampla faixa, variando conforme método de fabricação, tipo e formato do produto final. Para o formato em manta, os valores típicos da densidade aparente das fibras FCR e AES são 64, 96, 128, 160 e 192 kg/m³. Já para a PCW têm-se valores de 60, 100 e 120 kg/m³. Logo, por apresentarem baixo valor de densidade aparente quando comparadas a outros tipos de refratários, uma menor quantidade de energia é demandada para atingir o equilíbrio térmico ao longo de todo revestimento. Esta característica apresenta duas vantagens no cenário de produtividade em relação aos demais isolantes. A primeira está ligada a uma menor quantidade de material necessária para cumprir a finalidade de conservação de energia como revestimento térmico. Exemplificando, enquanto as fibras PCW utilizadas em temperatura constante de 1500 °C possuem valor médio de densidade aparente próximo a 100 kg/m³, tijolos isolantes que podem ser expostos à mesma temperatura de trabalho sem a perda de suas propriedades físicas possuem valores próximos a 1000 kg/m³ [33]. Desta forma, estes tijolos isolantes possuem 10 vezes mais massa a ser aquecida, quando comparados às fibras de mesma refratariedade. Com isto, toda a estrutura mecânica e civil do equipamento revestido com estes produtos pode ser menos robusta e consequentemente o custo inicial de instalação é menor. Outra vantagem é a quantidade de energia e tempo gastos para promover o encharque do revestimento. Como a massa total do revestimento é no mínimo 10 vezes inferior ao outro produto, em processos intermitentes e/ou em ajustes nas temperaturas de tratamento térmico de diferentes produtos, o forno industrial tem uma maior disponibilidade produtiva. Além de a densidade aparente fornecer uma medida indireta da capacidade de absorção de calor na forma de energia, estes dois parâmetros podem ser utilizados em conjunto para se obter as frações volumétricas das porções sólida (V_s) e de vazios (V_v), através de [6]:

$$V_s = \frac{\text{densidade aparente}}{\text{massa específica}} \quad (\text{T})$$

$$V_v = 1 - V_s \quad (\text{U})$$

Estas duas equações fornecem avaliações iniciais e individuais em relação à porosidade dos materiais e consequentemente, ao poder de isolamento térmico destes produtos.

Porosidade total: a porosidade total de materiais refratários é dita como o somatório entre as partes consideradas abertas (quantidade de poros abertos ou interconectados, acessíveis ao preenchimento por algum fluido e são majoritária na microestrutura dos refratários) e fechadas (inacessíveis ao preenchimento). Valores de porosidade encontrados na literatura para as mantas de fibras isolantes refratárias são, em geral, superiores a 90% [34] e algumas pesquisas trazem valores superiores a 95% [7]. Utilizando as Eqs. T e U e considerando valores de densidade aparente próximos a 128 kg/m³, os resultados de porosidade esperados para as três classes de fibras são: FCR e AES próximo a 95% e PCW próximo a 97%.

Diâmetro médio das fibras: os valores dos diâmetros médios das fibras por categoria são aproximadamente 1-3 μm para a FCR, 2-4 μm para a AES, 3-6 μm para PCW (mulita) e 3-10 μm para PCW (alumina) [32]. Avaliando este parâmetro em relação ao espalhamento da radiação térmica, verifica-se que os valores médios registrados encontram-se dentro da faixa dos espectros do infravermelho próximo ($\lambda= 0,78-2,5 \mu\text{m}$) e médio ($\lambda= 2,5-5,0 \mu\text{m}$). Esta explicação encontra-se na seção sobre radiação.

Comprimento das fibras: os valores dos comprimentos das fibras por categoria, mesmo não apresentando resultados exatos, podem ser assim representados: FCR e AES variando entre μm e cm e PCW (mulita e alumina) na ordem de centímetros [32].

Materiais não fibralizados: pequenos grãos de vidro (formato globular ou de meia-lua) que não são transformados em fibras recebem a denominação de *shot*. Este produto possui um diâmetro médio próximo ou superior a 60 μm. Os valores de *shot* para as três categorias de produtos estudados podem variar para: FCR entre 20 e 45%, AES entre 35 e 40% e PCW próximo a 30% [35]. Contudo, estes valores diferem significativamente dependendo do fabricante, processo de manufatura e qualidade da matéria-prima. O *shot* para fibras policristalinas à base de mulita pode alcançar valores próximos a 5% [36]. A presença deste material não fibralizado contribui negativamente nas propriedades físicas dos produtos. Avaliando o aspecto ligado à resistência mecânica, assumindo que uma manta em fibra isolante apresente densidade aparente de 128 kg/m³, e tenha teor de 50% em *shot*, a sua nova densidade aparente seria 64 kg/m³. Logo, o valor de sua resistência à tração seria compatível ao de uma fibra de densidade aparente igual a 64 kg/m³. Já em relação ao aspecto térmico, é o valor da sua dimensão característica, o diâmetro médio, que influencia negativamente. Como os valores desta grandeza são superiores quando comparados ao diâmetro médio das fibras, esta característica torna o produto final menos eficiente em relação ao espalhamento da radiação térmica nos espectros do infravermelho próximo

($\lambda = 0,78-2,5 \mu\text{m}$) e médio ($\lambda = 2,5-5,0 \mu\text{m}$).

Orientação das fibras: todas as três classes de materiais deste trabalho são consideradas como um aglomerado não direcional de fibras com distribuições variadas de diâmetro e comprimento. A não direcionalidade das fibras, também descrita como orientação randômica no espaço ou no plano ou mesmo alinhada em determinados planos, pode atenuar a radiação térmica em maiores ou menores proporções [37]. Neste documento, foi utilizada a solução de Mie para explicar o efeito da extinção da radiação térmica. Nesta abordagem são adotadas partículas esféricas na modelagem matemática, as quais apresentam um ângulo máximo de espalhamento igual a π . Para o caso das fibras, consideradas partículas cilíndricas infinitas (comprimento muito superior ao diâmetro) e apresentando orientação randômica no espaço, o ângulo máximo de espalhamento também pode ser adotado igual a π [38].

Condutividade térmica: os valores típicos de condutividade térmica das três categorias de fibras estudadas estão representados na Tabela IV [21]. Estes produtos apresentam as seguintes características: formato de manta; densidades aparentes de 128 kg/m^3 para as fibras AES e FCR e 100 kg/m^3 para as fibras PCW; e temperatura de

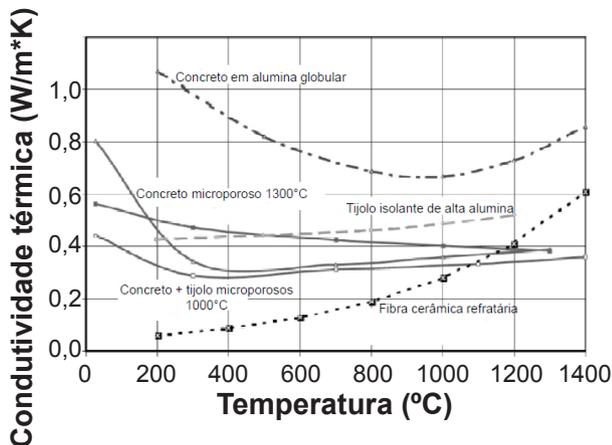


Figura 4: Condutividade térmica de materiais refratários isolantes para altas temperaturas [39].

[Figure 4: Thermal conductivity of high temperature insulating materials [39].]

Tabela IV - Valores típicos de condutividade térmica, K [W/(m.K)], de três categorias de fibras [21].

[Table IV - Typical thermal conductivity values, K [W/(m.K)], of three categories of fibers [21].]

T (°C)	AES	FCR	PCW
200	0,04	0,06	-
400	0,08	0,10	0,08
600	0,14	0,15	0,12
800	0,23	0,20	0,17
1000	0,34	0,27	0,24
1200	0,48	-	0,33

classificação de $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ (AES), $1425 \text{ }^\circ\text{C}$ (FCR) e $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ (PCW). A metodologia adotada na obtenção dos coeficientes de condutividade térmica seguiu as premissas da norma ASTM-C-201 (*Standard test method for thermal conductivity of refractories*). Na Fig. 4 estão representados os materiais refratários que apresentam os melhores desempenhos como isolantes térmicos a altas temperaturas, comumente empregados nos setores industriais [39]. Observa-se que as fibras cerâmicas refratárias possuem menores valores de condutividade térmica abaixo de $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo superada apenas por materiais microporosos após temperaturas próximas a $1100 \text{ }^\circ\text{C}$.

CONCLUSÕES

As fibras isolantes térmicas, mais precisamente as três classes de materiais FCR (fibras cerâmicas refratárias), AES (fibras de silicato de metais alcalino-terrosos) e PCW (fibras policristalinas), possuem características particulares que garantem a sua utilização como revestimento de trabalho em fornos industriais que operam a altas temperaturas. Os três principais modos de contribuição de transferência de energia térmica através da microestrutura de meios fibrosos são condução na parte sólida das fibras, condução gasosa nos espaços entre as fibras e troca de radiação térmica com o meio participante. Para o primeiro fenômeno e em relação às fibras PCW, como as vibrações do retículo cristalino são consideradas os modos primários de condução de energia e o efeito do livre caminho médio é dominante, a condutividade térmica diminui com o aumento da temperatura. Já para as fibras FCR e AES, devido ao seu arranjo atômico ser constituído de forma desordenada, a capacidade calorífica possui maior efeito na transferência de energia. Logo, o valor da condutividade térmica é incrementado com o aumento da temperatura. Em relação à condução no gás e conforme estabelece a termodinâmica clássica, a condutividade térmica do ar aprisionado entre as fibras aumenta com o incremento da temperatura. Contudo, este valor pode ser atenuado à medida que as distâncias entre as paredes das fibras são reduzidas a valores inferiores à distância média percorrida entre duas colisões sucessivas das moléculas do ar (l_{ar}). Exemplificando, para temperaturas próximas a $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, o l_{ar} é igual a $0,4508 \mu\text{m}$. Desta forma, caso a distância entre as fibras seja inferior a este valor, o coeficiente de condução térmica do gás é reduzido, uma vez que o ar não se move livremente. Cabe ressaltar que a contribuição gasosa é diretamente proporcional ao aumento da temperatura. A presença das fibras exerce um efeito de atenuação neste modo de transferência de energia térmica. Em relação à troca de energia térmica em meios fibrosos considerados participantes, a radiação pode ser emitida em uma taxa proporcional à terceira potência da temperatura absoluta da superfície ou meio. Assim sendo, a sua contribuição para o aumento da condutividade térmica global é incrementada com a elevação da temperatura. Outro comportamento particular destes materiais está

relacionado à quantidade de fração de vazios. Para valores de porosidade superiores a 90%, o aumento da fração sólida até valores de densidade aparente próximos a 250 kg/m³ reduz a contribuição da radiação térmica na transferência de energia. Isto se deve a três fatores: o primeiro considera que, para valores de porosidade próximos e/ou superiores a esse percentual, a fração volumétrica de vazios pode ser considerada como uma fase contínua e a fração volumétrica da porção sólida pode ser adotada como descontínua. Desta forma, a fase composta por vazios é julgada como dominante no processo de radiação térmica. O segundo fator avalia como a presença de espaços vazios interage com os fótons. Considerando equipamentos industriais que operam na faixa de temperatura de 600-1300 °C, caso a distância entre as paredes das fibras esteja compreendida entre os valores dos comprimentos de onda dos espectros do infravermelho próximo ($\lambda = 0,78-2,5 \mu\text{m}$) e do infravermelho médio ($\lambda = 2,5-5,0 \mu\text{m}$), a radiação térmica tende a ser atenuada, através do processo conhecido como espalhamento. O terceiro e último fator está relacionado à parte sólida. Dentro da mesma linha de raciocínio adotada anteriormente para a fração vazia, diâmetros de fibras compreendidos entre 1-6 μm também contribuem na atenuação do efeito radiativo. Somado a este fator, a aleatoriedade da orientação das fibras também contribui para o espalhamento da radiação. Desta forma, quando os princípios físicos básicos que regem a transferência de energia térmica em meios fibrosos são descritos, ao se apresentarem os parâmetros microestruturais das fibras, fica mais claro compreender o porquê do seu baixo valor de condutividade térmica, e de sua importância para o alcance de metas vinculadas à eficiência energética e produtividade nos meios industriais.

AGRADECIMENTOS

Ao grupo Vallourec e Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho. Às instituições de fomento à pesquisa CAPES, CNPQ e FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- [1] D.G.M. Silva, W.L. Vasconcelos, *Cerâmica* **63**, 367 (2017) 281.
- [2] Plano da Comissão Europeia, “Europa 2020” <<http://ec.europa.eu/europe2020>>, acesso 20/06/2014.
- [3] H. Wimmer, *In: 54th International Colloquium on Refractories*, European Centre for Refractories, Aachen, Germany (2011).
- [4] H. Wimmer, *Gaswarme Int.* **53**, 5 (2004) 273.
- [5] Nippon Steel Techn. Report **98** (2008) 110.
- [6] E. Horie, *Ceramic fiber insulation theory and practice*, Eibun Press, Osaka, Japan (1987) 25.
- [7] B.K. Larkin, S.W. Churchill, *AIChE J.* **5**, 4 (1959) 467.
- [8] C. Stark, J. Fricke, *Int. J. Heat Mass Transfer* **36**, 3 (1993) 617.
- [9] K. Daryabeiji, *J. Thermophys. Heat Transfer* **17**, 1 (2003) 10.
- [10] K. Daryabeiji, *J. Spacecr. Rockets* **39**, 4 (2002) 509.
- [11] J.D. Verschoor, P. Greebler, N.J. Manville, *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* **74**, 8 (1952) 961.
- [12] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, *Energy Build.* **43** (2011) 761.
- [13] R. Wulf, G. Barth, U. Gross, *Keram. Z.* **56** (2004) 554.
- [14] D.W. Richerson, *Modern ceramic engineering*, 2nd Ed., Marcel Dekker, New York (1992) 142.
- [15] W.D. Kingery, H.K. Bowen, D.R. Uhlmann, *Introduction to ceramics*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, USA (1975) 612.
- [16] S.Y. Zhao, X.D. He, B.M. Zhang, S.Y. Du, *Compos. Sci. Technol.* **71** (2011) 415.
- [17] A. Berge, P. Johansson, *Literature review of high performance thermal insulation*, Chalmers Un. Techn., Gothenburg (2012) 5.
- [18] M. Bomberg, S. Klarsferd, *J. Thermal Insul.* **6** (1983) 156.
- [19] G.N. Dulnev, Y.P. Zarichnyak, A.V. Sharkov, *Inzh.-Fiz. Zh.* **35** (1978) 655.
- [20] D.A. Nield, A. Bejan, *Convection in porous media*, 2nd Ed., Springer Verlag, Nova Iorque (1999) 177.
- [21] Morgan Thermal Ceramics <<http://morganthermalceramics.com>>, acesso 15/10/2015.
- [22] R.H. Perry, D.W. Green, *Perry's chemical engineers' handbook*, 7th Ed., McGraw-Hill, USA (1997) 2.
- [23] M.F. Modest, *Radiative heat transfer*, 2nd Ed., Acad. Press, USA (2003) 21.
- [24] D.A. Skoog, F.J. Holler, T.A. Nieman, *Princípios de análise instrumental*, 5 Ed., Bookman, S. Paulo (2001) 100.
- [25] S. Music, N.F. Vinceković, L. Sekovanić, *Braz. J. Chem. Eng.* **28** (2011) 89.
- [26] H.R. Sahu, G.R. Rao, *Bull. Mater. Sci.* **23**, 5 (2000) 349.
- [27] Y. Zhang, Y. Ding, J. Gao, J. Yang, *J. Eur. Ceram. Soc.* **29** (2005) 1101.
- [28] P. Tamilselvi, A. Yelilarasi, M. Hema, R. Anbarasan, *Nano Bull.* **2**, 1 (2013) 13106.
- [29] M. Gonzalez, E. Hernandez, J.A. Ascencio, F. Pacheco, S. Pacheco, R. Rodriguez, *J. Mater. Chem.* **13** (2003) 2948.
- [30] D. Baillis, J.F. Sacadura, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **67** (2000) 327.
- [31] Scattport <<http://www.scattport.org>>, acesso 10/03/2015.
- [32] Inst. Nat. Recherche et de Sécurité (INRS), “Fibres céramiques réfractaires isolation et protection thermique em mileu industriel”, Paris (2011) 67.
- [33] Am. Soc. Test. Mater., ASTM C155: “Standard classification of insulating firebrick”, USA (1997) 2.
- [34] Superwool Technical Manual <<http://www.morganthermalceramics.com>>, acesso 10/02/2013.
- [35] *Int. Ag. Res. Cancer (IARC)* **81**, Lyon (2002).
- [36] Nippon Steel Techn. Report **98** (1998) 110.
- [37] S.C. Lee, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **36** (1986) 253.

[38] S.C. Lee, *Int. J. Heat Mass Transfer* **33** (1990) 2183.

[39] M. Schnabel, A. Buhr, G. Büchel, R. Kockegey-Lorenz,

J. Dutton, *Refractories World Forum Magazine* **3** (2011) 87.

(*Rec. 18/04/2016, Rev. 11/08/2016, Ac. 31/03/2017*)

