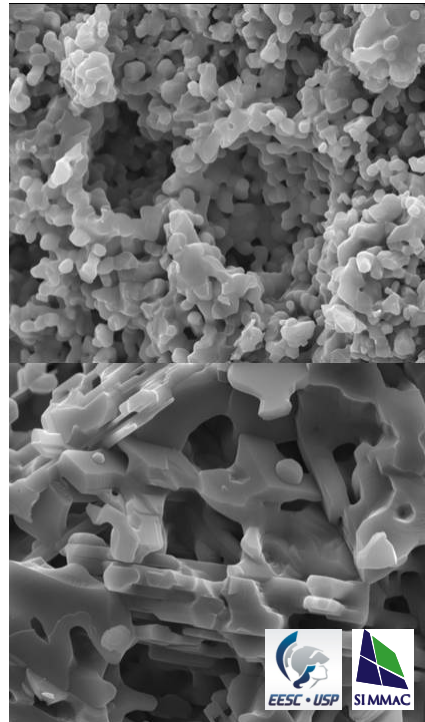


**TECNOLOGIA DE
ISOLAMENTO TÉRMICO
DE ALTA TEMPERATURA (> 500°C):
O PAPEL DAS CERÂMICAS
POROSAS**

Prof. Dr. Rafael Salomão

Escola de Engenharia de São Carlos
Depto. Engenharia de Materiais (SMM)

Contato: rsalomao@sc.usp.br
<http://www.smm.eesc.usp.br>



Cerâmicas refratárias microporosas & Isolamento térmico

Apresentação: Minha formação

- Engenheiro de Materiais (Cerâmicas & Polímeros), Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais (Cerâmicas)
- Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Depto. Engenharia de Materiais (DEMa)



<https://www.ufscar.br/>

<http://www.dema.ufscar.br>

“Soluções Integradas em Manufatura e Materiais Cerâmicos” (SIMMAC)



• Prof. Dr. Rafael Salomão:
(Refratários e cerâmicas porosas)
rsalomao@sc.usp.br

• Profa. Dra. Vera L. Arantes
(Cerâmicas técnicas)
vera@sc.usp.br

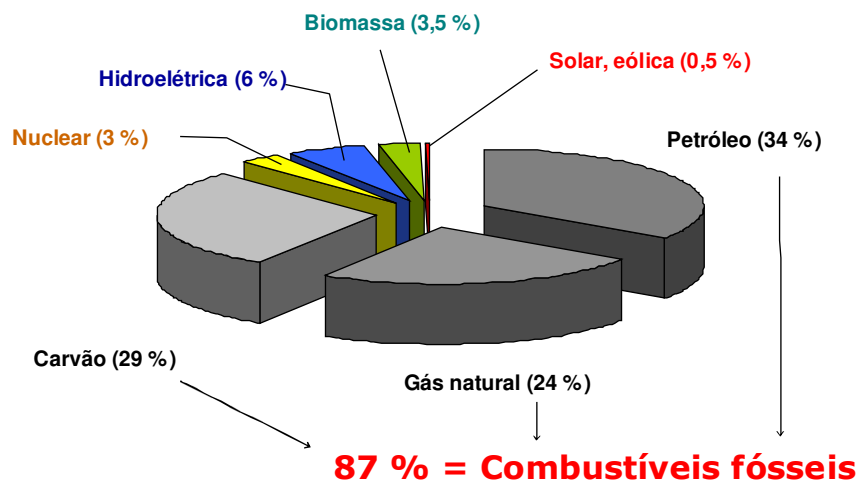
• Prof. Dr. Eduardo B. Ferreira
(Vidros e vitrocerâmicas)
ebferreira@sc.usp.br



Discutiremos:

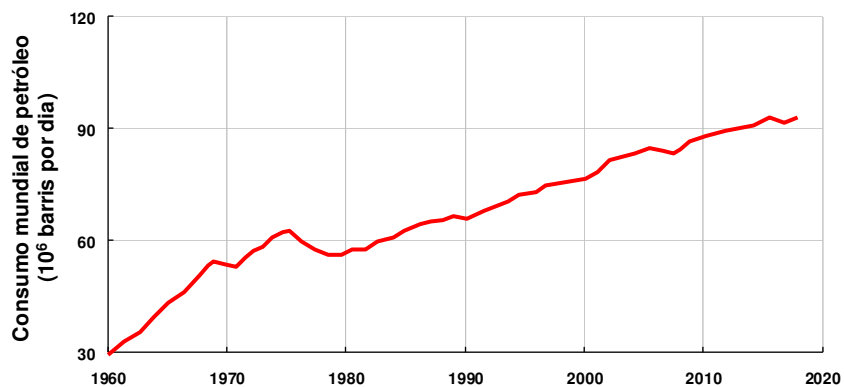
- Consumo / geração de energia
- Necessidade de isolamento térmico
- Por que cerâmicas porosas?
- Classes de isolantes térmicos cerâmicos

Energia: De onde vem, para onde vai?



Fonte: "BP Statistical Review of World Energy 2018,

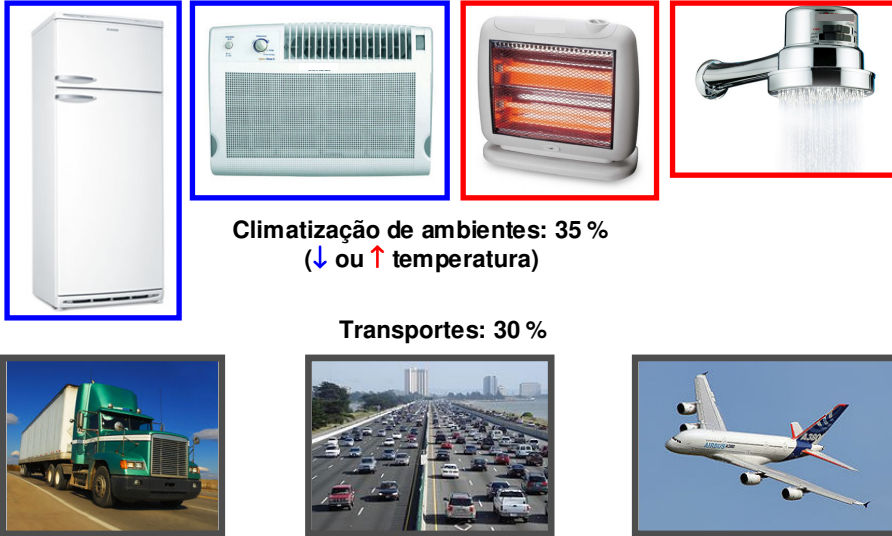
Energia: De onde vem, para onde vai?



Consumo mundial de petróleo em 2018:
168.000.000 de litros ~ 165.000.000 ton

Fonte: "BP Statistical Review of World Energy 2018,

Energia: De onde vem, para onde vai?

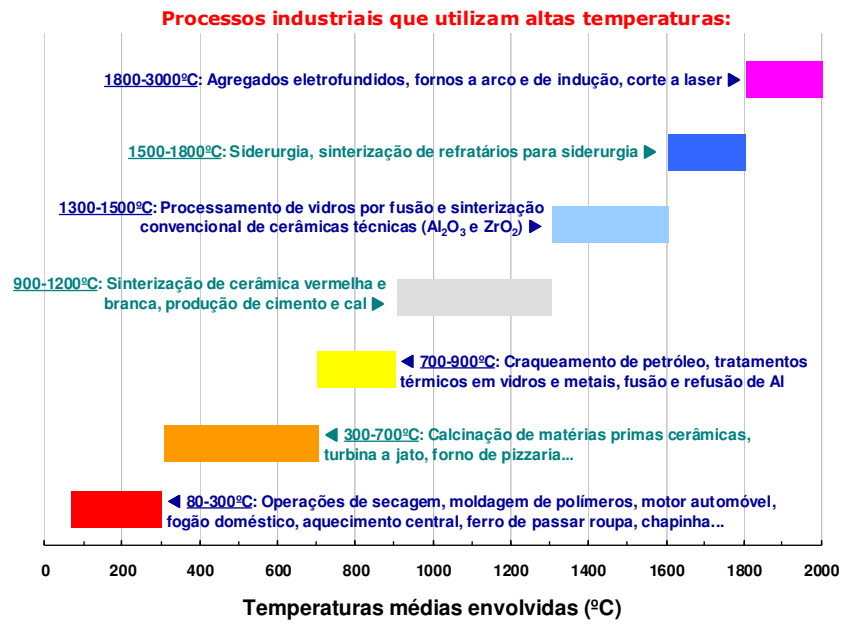


* Fonte: <http://www.worldenergy.org/>

Energia: De onde vem, para onde vai?



* Fonte: <http://www.worldenergy.org/>



Processos industriais que utilizam altas temperaturas:

Como impedir que a perda de energia nesses processos?



R₁: Isolamento térmico!



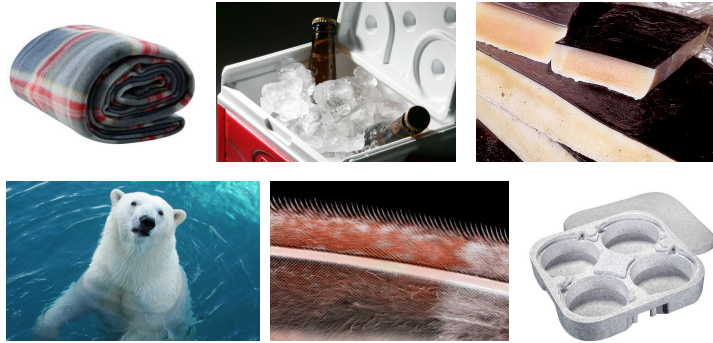
Menor consumo / perda de energia, custos competitivos

R₂: Isolamento térmico!



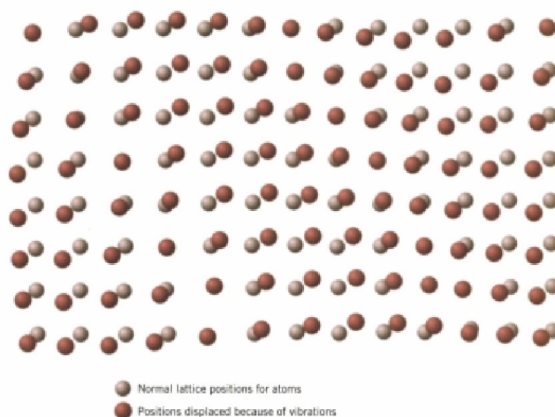
Conforto térmico para operadores, menor desgaste de equipamentos

Processos industriais que utilizam altas temperaturas:
Que materiais podem ser utilizados nessa aplicação?



DEPENDE DA FAIXA DE TEMPERATURA!
Calor específico + condutividade térmica

Como os materiais ganham / perdem / conduzem calor?



- Elétrons livres (metais)
- Vibrações elásticas da rede cristalina (*fônons*)
- Similares a uma onda sonora que percorre material
- Dão origem ao calor específico (C_p) e condutividade térmica (k)

FIGURE 17.1 Schematic representation of the generation of lattice waves in a crystal by means of atomic vibrations. (Adapted from "The Thermal Properties of Materials" by J. Ziman. Copyright © 1967 by Scientific American, Inc. All rights reserved.)

Como os materiais ganham / perdem / conduzem calor?



Capacidade calorífica (C_p , *heat capacity*) =

- Capacidade de “absorver” calor do exterior
- Quantidade de energia necessária (dQ) para elevar a temperatura (dT) de uma certa quantidade de material (unidade: [J.K⁻¹.mol⁻¹ ou cal.K⁻¹.mol⁻¹])

$$C_p = \frac{dQ}{dT}$$

Calor específico (c, *specific heat*) =

- Capacidade calorífica expressa em massa [J.kg⁻¹.K⁻¹, cal.g⁻¹.K⁻¹, Btu.lb_m⁻¹.°F⁻¹]

Como os materiais ganham / perdem / conduzem calor?



Calor específico (c, *specific heat*): Exemplos

Material	C_p (J/(Kg.K))
Cobre (Cu)	386
Tungstênio (W)	138
Alumina (Al ₂ O ₃)	775
Magnésia (MgO)	940
Polietileno (PEAD)	1850
Água (H ₂ O)	4000

É possível apagar um incêndio com cobre em pó?

$C_{p \text{ Água}} \sim 4000 \text{ J/Kg.K}$



Para apagar um incêndio:

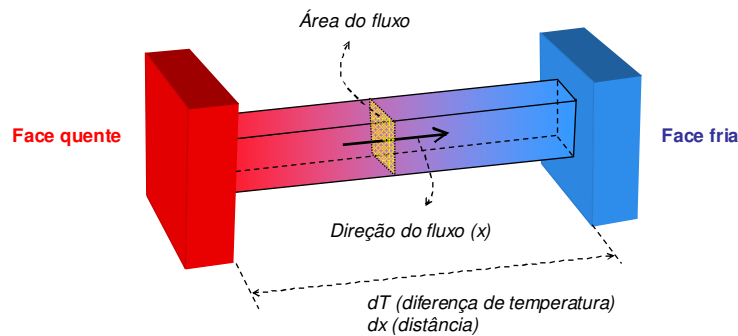
- Tira O_2 (comburente)
e/ou
- Tira combustível
e/ou
- Tira calor do sistema

$C_{p \text{ Cobre}} = 386 \text{ J/Kg.K}$



→ Cobre tem $\downarrow C_p$ e muda de temperatura usando muito pouca energia

Resultado: não tiraria calor do combustível



$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

q = fluxo de calor por área = Q/A
 k = condutividade térmica
 dT/dx = gradiente de temperatura
 (em estado estacionário = não depende do tempo)

Condutividade térmica é a dificuldade que um material impõe à passagem de um fluxo de calor por sua estrutura

Como os materiais ganham / perdem / conduzem calor?



Condutividade térmica (k): Exemplos

Material	k (W/(m.K))
Cobre (Cu)	398
Tungstênio (W)	178
Alumina (Al ₂ O ₃)	39
Magnésia (MgO)	38
Polietileno (PEAD)	0.5
Água (H ₂ O)	0.5

◀ Refratário
≠
Isolante!

Condutividade térmica (k): Exemplos cerâmicos

Material *	k (W/(m.K))
Diamante	1800-2500
SiC	100-350
AlN	70-285
ZnO	54
MgO	32-63
Al ₂ O ₃	24-39
3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	2-15
TiO ₂	3-4
ZrO ₂	1,5-3
SiO ₂	1-11
Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	

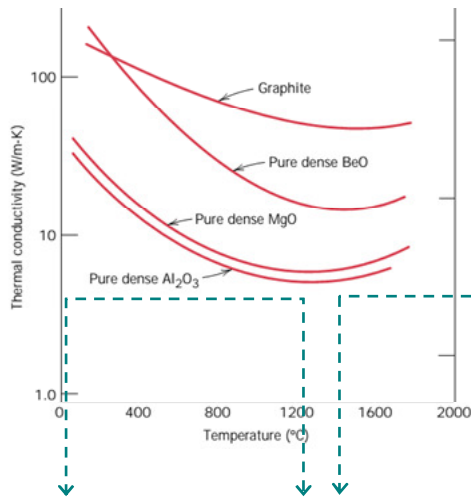
◀ Valores muito altos
(Condutores de calor *intrínsecos*)

◀ Valores intermediários

◀ Valores muito baixos
(Isolantes térmicos *intrínsecos*)

* At room temperature

Propriedades importantes: Condutividade térmica



A condutividade térmica é fortemente dependente da temperatura



Diversos mecanismos de condução de calor

Muda de condução no sólido para irradiação

Temperaturas ~ 1000°C:

↑ espalhamento dos fônons
↓ condutividade térmica

Acima de 1000°C:

↑ Emissão de radiação infravermelha

Dependence of thermal conductivity on temperature for several ceramic materials. (Adapted from W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd edition. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Isolamento térmico: ↑ calor específico + ↓ condutividade térmica

Cerâmicas porosas como isolantes térmicos:



Combinação de propriedades:

Matriz cerâmica (densa)	Fase porosa (dispersa)
<p>R₁: Tem valores de k intermediários (principalmente silicatos e aluminosilicatos)</p>	<p>R₁: Baixíssima condutividade térmica ($k_{Ar} = 0.02 \text{ W/(m.K)}$)</p>
<p>R₂: Elevada resistência química (são óxidos ou quimicamente inertes)</p>	<p>R₂: Atua como sítio de espalhamento de fônons</p>
<p>R₃: Refratariedade (resistência à exposição a ↑ T)</p>	<p>R₃: (Em alguns casos) Tenacificam o material</p>

Vejamos algumas propriedades e casos importantes!

Isolamento térmico: ↑ calor específico + ↓ condutividade térmica

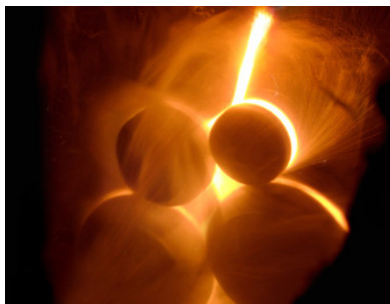
Cerâmicas porosas como isolantes térmicos:

Propriedades físicas desejadas (idealmente):

<i>O que é esperado?</i>		<ul style="list-style-type: none"> • Razão teórica • Dificuldade tecnológica
Porosidade: acima de 80 %	→	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar a condutividade térmica • Redução drástica de resistência
D_{Poros} : 0,5 a 5 μm	→	<ul style="list-style-type: none"> • Maximizar espalhamento dos fônons • Poros desaparecem ou crescem
Formato: esférico e fechado	→	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar convecção de gases • Poros abertos e de formato irregular
Opacificantes: SiC, TiO ₂	→	<ul style="list-style-type: none"> • Bloquear transmissão de IV • Compatibilidade com sistema?

Revisão: Fundamentos e materiais para o projeto da microestrutura de isolantes térmicos refratários de alto desempenho
 D. O. Vivaldini, A. A. C. Mourão, V. R. Salvini, V. C. Pandolfelli
 Cerâmica 60 (2014) 297-309

Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Lã-de-rocha ou lã-de-vidro



“Lã-de-rocha” ou “Lã-de-vidro”

Compostos cerâmicos de baixo ponto de fusão

- Rocha basáltica: 40-50 % SiO₂, 10-20 % K₂O, 40-30 % Fe₂O₃)
- Vidros sodo-cálcico (SiO₂-Na₂O-CaO)

- Fiação do fundido (*melt-spinning* ou *blow-spinning*)

- Formação de mantas 3D

- Compactação: mantas, blocos, placas, cordas, flocos

Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Lã-de-rocha ou lã-de-vidro

"Lã-de-rocha" ou "Lã-de-vidro"



▲ Manta flexível

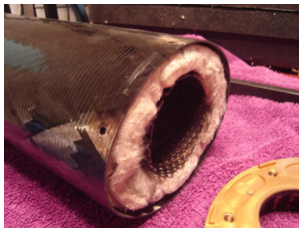
- Não-estrutural
- 70-80 % porosidade
- k : 0.10-0.25 W/(m.K)
- T_{uso} : -20-600°C

▼ Unidade petroquímica

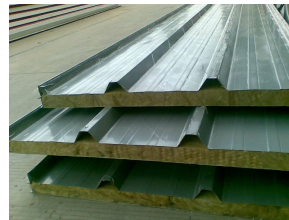


▲ Manta de alta densidade

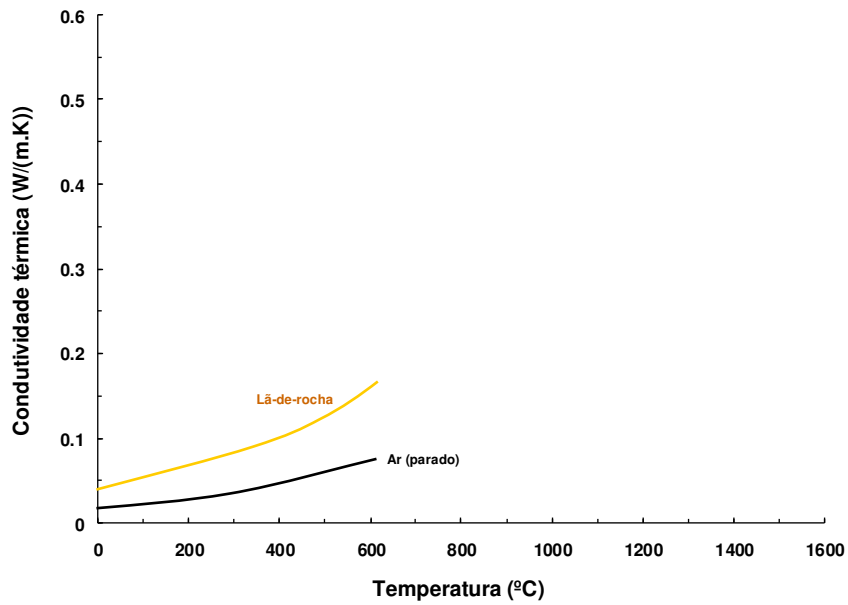
▼ Escapamento automotivo



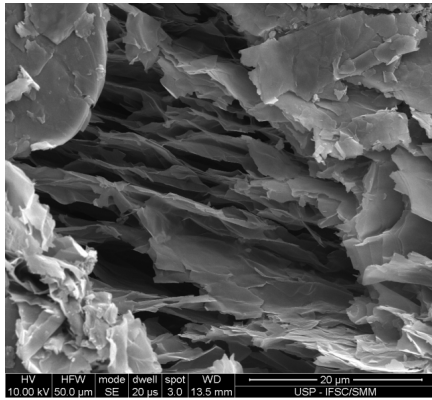
▼ Telha com isolamento termoacústico



Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Lã-de-rocha ou lã-de-vidro



Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Vermiculita expandida



Vermiculita expandida

Argilomineral parcialmente calcinado

- $(MgFe,Al)_3(Al,Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$.
- Calcinação rápida a 500-600°C

- Grande quantidade de ar entre as lamelas

- Formação de pequenos flocos

- Compactação na forma de tijolos



Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Vermiculita expandida

Vermiculita expandida



- Semi-estrutural
- 50-70 % de porosidade
- k: 0.10-0.25 W/(m.K)
- T_{uso}: 20 - 800°C

▲ Tijolo



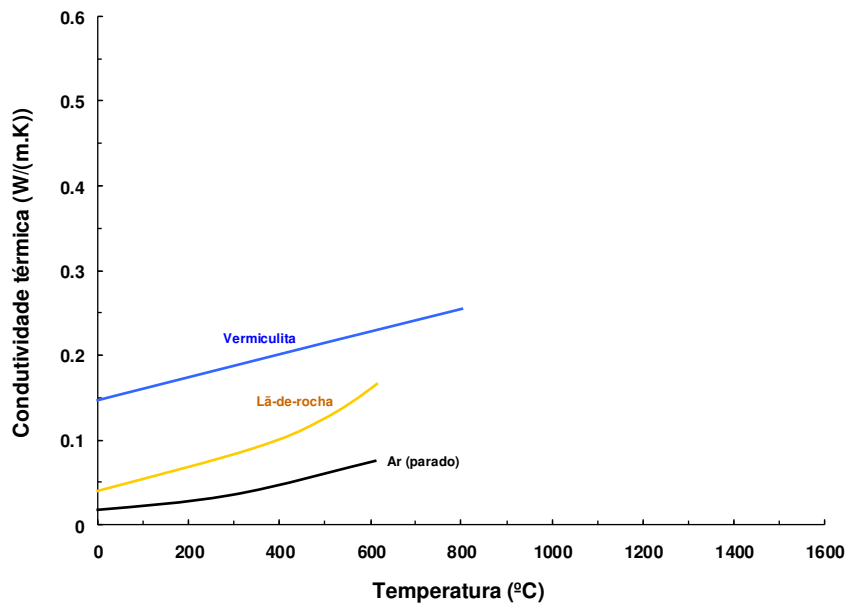
Isolamento termoacústico ▲

Forno rotativo de cimento e cal ▶

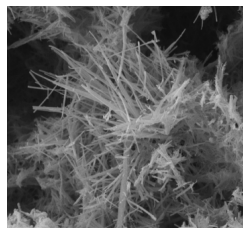
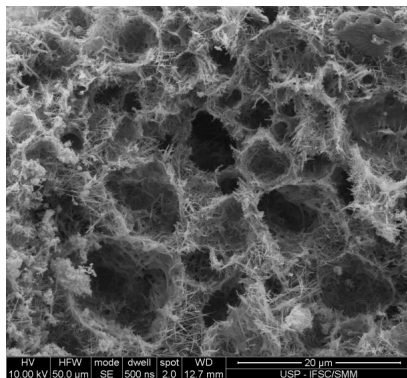
▼ Suporte para resistências



Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Vermiculita expandida



Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Silicato de cálcio



Silicato de cálcio

• Placas microporosas

• $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, Ca_3SiO_5 ; $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, Ca_2SiO_4 ;
 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$, $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, CaSiO_3

• Cristais aciculares (*whiskers*)

• Mistura com partículas orgânicas (serragem)

• Porosidade organizada em diversos níveis

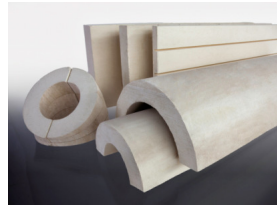
• Isotrópico

Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Silicato de cálcio



Silicato de cálcio

- Semi-estrutural
- 70-85 % Porosidade
- k: 0.05-0.2 W/(m.K)
- T_{uso}: 20 - 800°C



Calha para Al fundido ▲

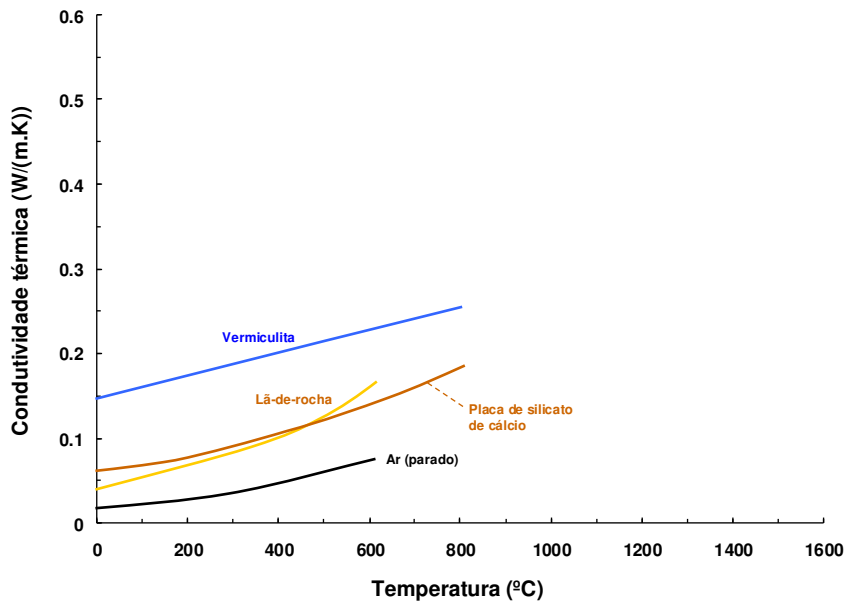
▲ Blocos

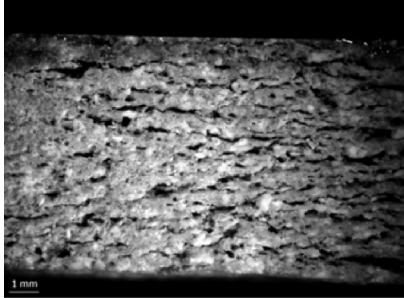
▼ Isolamento antichama

Forno rotativo de cimento e cal ▶



Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Silicato de cálcio





Cerâmica 59 (2013) 609-613



Tijolos silico-aluminosos

- Tijolos pré-formados (prensagem uniaxial ou extrusão)

- Areia (SiO_2) + bauxita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) + chamote + orgânicos

- Sílica + mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) porosa

- Porogênicos: orgânicos (10-30 % serragem) + desidroxilação da argila no chamote

- Grande controle dos níveis de porosidade e resistência mecânica

Tijolos silico-aluminosos

- Semi-estrutural
- 50 % Porosidade
- k : 0.15-0.25 W/(m.K)
- $T_{\text{Us}}: 1400^\circ\text{C}$

- Estrutural
- 30 % Porosidade
- k : 0.4-0.6 W/(m.K)
- $T_{\text{Us}}: 1400^\circ\text{C}$



▲ Tijolo isolante

▼ Isolamento estrutural

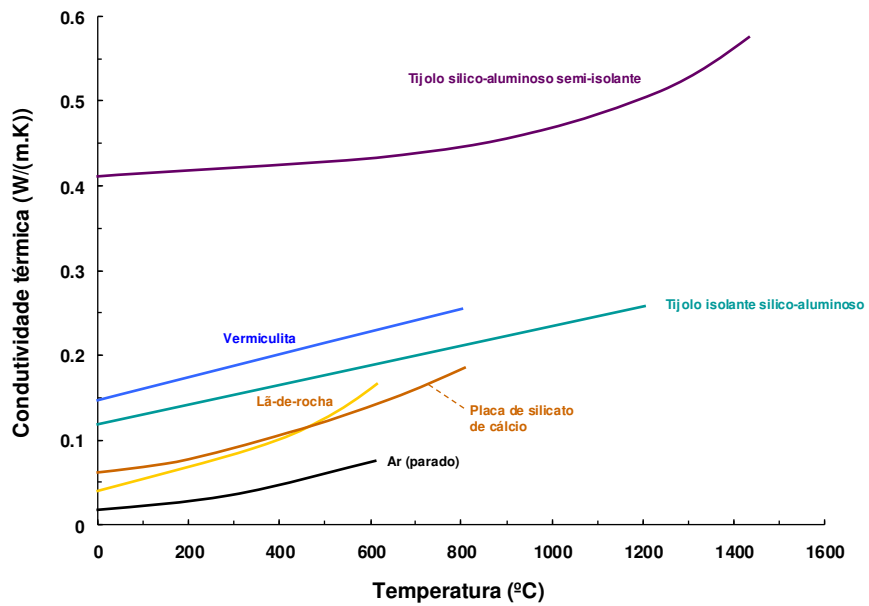


Mobília de forno ▲

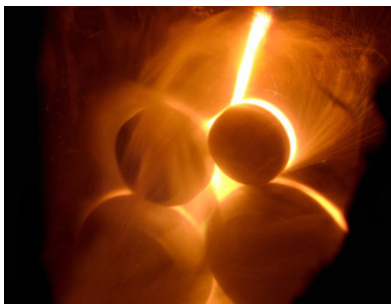
Seção de fornos de vidro ▼



Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Tijolos silico-aluminosos

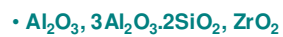


Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Mantas de fibras cerâmicas



Mantas de fibras cerâmicas

- Fibras de alto ponto de fusão (*blow-spinning* ou *melt-spinning*)



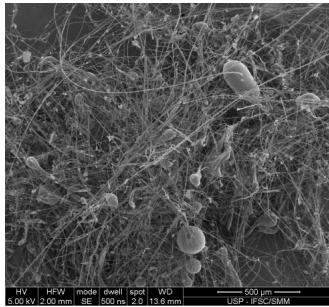
- Fibras são compactadas 3D

- Folhas, mantas, blocos e placas

- Aplicação por spray

- *Altíssima capacidade de isolamento térmico acima de 1500°C e resistência ao choque térmico*

Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Mantas de fibras cerâmicas



Mantas de fibras cerâmicas:

Por que funcionam tão bem?



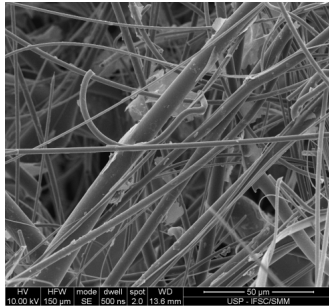
R₁: Tem elevado teor de poros (70-90 %)

R₂: Amorfas devido ao rápido resfriamento
(menor k que seu equivalente cristalino)

R₃: Não há muito contato entre elas

R₄: Orientação aleatória + espaços entre as fibras e
diâmetros têm dimensões semelhantes ao λ_{IV}
(~2,5-5 μm) (grande espalhamento dos fônons)

Obs.: Perdem desempenho acima de 1700°C pela
elevada transparência ao IV



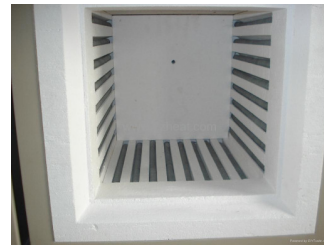
Cerâmicas porosas como isolantes térmicos: Mantas de fibras cerâmicas

Mantas de fibras cerâmicas



◀ Aplicação por
projeção

- Não-estrutural
- 70-90 % Porosidade
- k: 0.05-0.35 W/(m.K)
- T_{Us0}: 1800°C



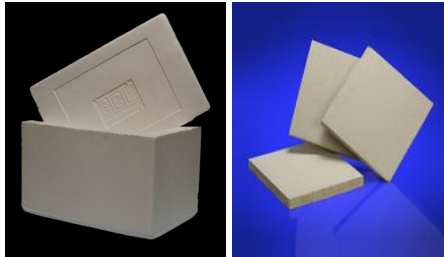
Suporte de resistências ▲



◀ Placas de fibras compactadas

Manta flexível e cordão para
isolamento ou gaxetas ▼





Cerâmicas microporosas

- Matriz de alta refratariedade contendo pelo menos 50 %v poros $\varnothing < 10 \mu\text{m}$

- Al_2O_3 , $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, ZrO_2 , Ca_6

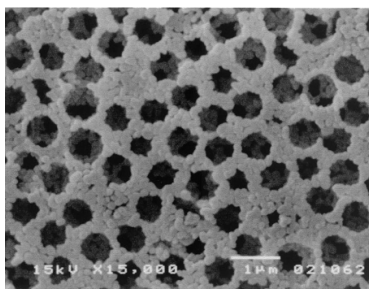


- Combinação de resistência à condução por fônons + baixa transparência ao IV

- Blocos pré-formados, moldáveis ou aplicados por spray

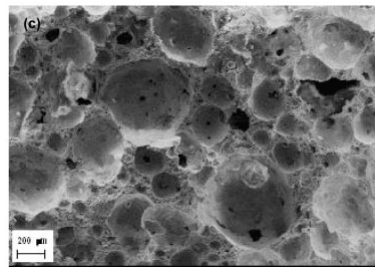
- Altíssima capacidade de isolamento térmico acima de 1500°C e resistência química

Estruturas microporosas



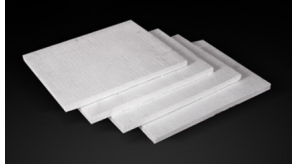
J. Am. Ceram. Soc., 86 [12] 2050–54 (2003)

◀ Estrutura microporosa: Al_2O_3 + partículas de PMMA (preparada por heterocoagulação)



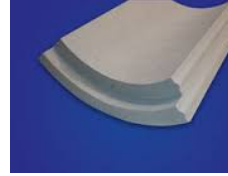
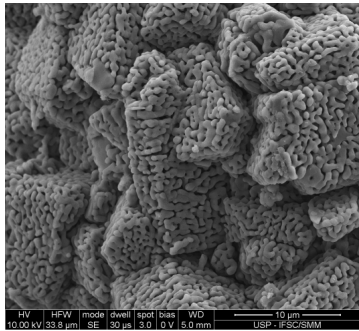
Espuma cerâmica consolidada por *gelcasting* ▶

Estruturas microporosas



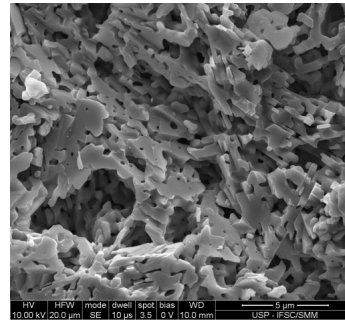
▲ Placa microporosa Al_2O_3

▼ Estrutura microporosa: $Al_2O_3 + Al(OH)_3$

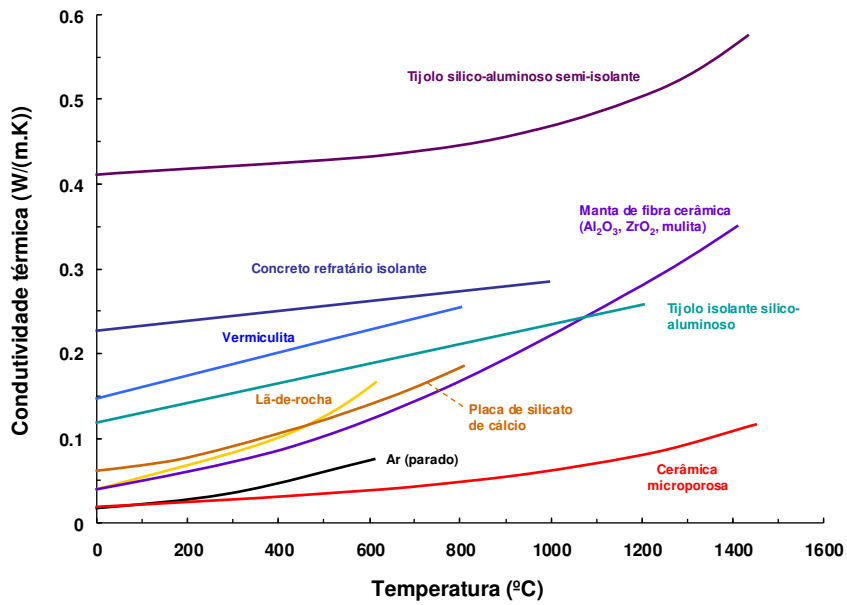


Revestimento microporoso de Ca_6 ▲

Ca_6 microporoso ▼



- Semi-estrutural
- 50-70 % Porosidade
- $k: 0.01-0.05 \text{ W/(m.K)}$
- $T_{uso}: 1700^\circ\text{C}$

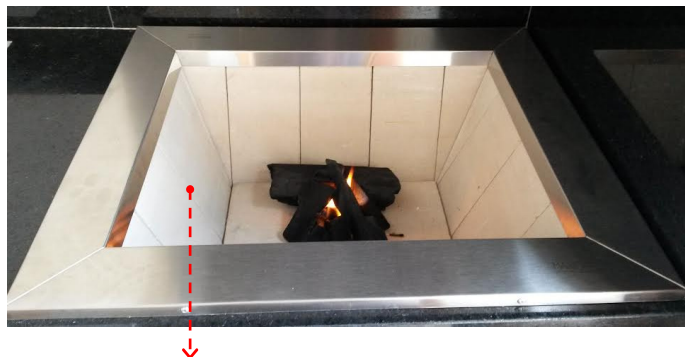


Considerações finais

- **Atenção ao isolamento térmico**
(reduzir consumo de energia é mais fácil que gerar mais)
- **Cada faixa de temperatura requer um isolante apropriado**
(res. mecânica, condutividade térmica, calor específico)
- **Isolamento é parte de um sistema complexo**
(considerar: desgaste, manutenção, custos de instalação, operação sob condições extremas...)
- **Isolamento não é apenas para processos industriais...**

Considerações finais

... vale também para sua churrasqueira!



Tijolo de vermiculita expandida