



VARIAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE GEOPOLÍMEROS EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$

Guilherme Viana Wanderley^a, Erika Pinto Marinho^a, George Santos Marinho^b

^a UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

^b Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 59078-970, Natal-RN-Brasil. gmarinho@ct.ufrn.br

Resumo

Realizaram-se análises de propriedades térmicas de geopolímeros e materiais cimentantes – pasta de cimento Portland e argamassa, tendo por objetivo proporcionar opções para construção civil, nesse caso, considerando aspectos de desempenho térmico. Os geopolímeros estudados possuíam razões molares $\text{Si}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ correspondentes a: 3,0; 3,5 e 4,0 e possuíam como fonte de Si / Al o metacaulim industrializado e solução alcalina à base de hidróxido de sódio e silicato de sódio. Amostras de geopolímeros, pasta de cimento e argamassa de cimento foram produzidas para estimativas das seguintes propriedades térmicas: condutividade, difusividade, resistividade e capacidade calorífica. Constataram-se reduções da condutividade e da difusividade, e aumentos da capacidade calorífica e da resistividade térmica das amostras de geopolímero em comparação às amostras de argamassa e pasta de cimento Portland. Os resultados podem, eventualmente, auxiliar em estudos e projetos que considerem aspectos de transferência de calor em sistemas construtivos visando obtenção de conforto térmico e redução de energia na climatização de ambientes.

Palavras-chave: Materiais construtivos; Conforto térmico; Conservação de energia.

Abstract

Analyzes of thermal properties of geopolymers and cementing materials were carried out – Portland cement paste and mortar, aiming to provide options for civil construction, in this case, considering aspects of thermal performance. The studied geopolymers had $\text{Si}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratios corresponding to: 3.0; 3.5 and 4.0 and had industrialized metakaolin and an alkaline solution based on sodium hydroxide and sodium silicate as a source of Si/Al. Samples of geopolymers, cement paste and cement mortar were produced to estimate the following thermal properties: conductivity, diffusivity, heat capacity and thermal resistivity. There were reductions in conductivity, diffusivity and increase in heat capacity and thermal resistivity of the geopolymer samples compared to the samples of mortar and Portland cement paste. The results may, eventually, help in studies and projects that consider aspects of heat transfer in constructive systems, aiming at obtaining thermal comfort and energy reduction in the acclimatization of environments.

Keywords: Building materials; Thermal comfort; Energy conservation.

1. INTRODUÇÃO

Para atender demandas cada vez mais complexas, a construção civil procura minimizar custos sem comprometer a qualidade das edificações, a exemplo da diminuição da espessura de alguns sistemas, como lajes e contrapisos. (BORGES, 2015). Para isso, é necessário inovar.

Na busca por inovação, a indústria pesquisa novos materiais que atendam de forma eficaz às necessidades modernas, concomitantes à redução de danos ao ambiente. É nesse contexto que se insere o geopolímero – considerado um material ambientalmente correto (HELMY, 2016), uma vez que sua produção não contribui para emissão os gases do efeito estufa e, ainda, permite o reaproveitamento de resíduos poluentes (e.g., precursores).

Os geopolímeros são estruturas amorfas, que consistem em uma rede de unidades de silicatos e aluminatos com compensação de metais alcalinos – sódio ou potássio. Apresentam uma falta de ordenação de longo alcance, que pode ser considerada análoga ao das zeólitas amorfas (MACKENZIE e O'LEARY, 2015). São obtidos pela reação entre a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3), constituintes dos alumino-silicatos. A reação ocorre em ambiente fortemente alcalino e, ao contrário do cimento Portland comum, sem a presença de cálcio. Formam-se por reação entre a caulinita desidroxilada e uma solução de silicato alcalino com conteúdo de água controlado.

De acordo com Pinto (2006), a reação necessária à obtenção de geopolímeros é do mesmo tipo daquela verificada nas zeólitas naturais, que são ligantes encontrados nos minerais e rochas que constituem a crosta terrestre, também identificada em cimentos antigos, que demonstram forte resistência à ação das intempéries.

Quanto às propriedades térmicas, como qualquer material, os geopolímeros podem ser classificados em isolantes (aqueles que dificultam a dissipação de calor, estabelecendo uma barreira ao fluxo de energia térmica através do material) ou condutores de calor. Souza Filho (2015) destaca algumas propriedades que são imprescindíveis a um isolante térmico, como: condutividade, resistividade, capacidade calorífica, calor específico e resistência à chama.

A norma brasileira de desempenho NBR 15575-1:2013 (ABNT, 2013) estabelece requisitos e critérios de desempenho de diversos sistemas, como: estruturas, pisos, vedações e coberturas. Com base nessa norma, os sistemas são avaliados quanto ao desempenho térmico, acústico, estrutural e de segurança contra incêndio, a fim de conferir qualidade e segurança às habitações.

Investigando aspectos da condutividade térmica, Zhang et al. (2015) concluíram que o concreto geopolimérico exhibe melhor propriedade de isolamento quando comparado ao concreto de cimento Portland comum de mesma densidade.

Duan et al. (2017) estudaram algumas propriedades térmicas de um material composto por geopolímero e poliestireno, obtendo valores entre 0,03 a 0,09 W/m-K para condutividade térmica.

Shanmugasundaram (2017) estudou o efeito da cura de argamassas geopoliméricas na condutividade térmica e identificou grande variação nos valores obtidos. Quando submetida à cura em temperatura ambiente, a argamassa geopolimérica apresentou condutividade térmica de 0,910 W/m-K. Após cura em estufa, a mesma argamassa apresentou condutividade térmica de 0,363 W/m-K.

No presente trabalho foram comparadas propriedades térmicas de geopolímeros (com três diferentes proporções de sílica e alumina) e de materiais cimentantes convencionais (pasta de cimento Portland e argamassa).

2. PROCEDIMENTOS

O trabalho foi desenvolvido utilizando-se recursos da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e infraestrutura disponível no Laboratório de Transferência de Calor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – LTC / UFRN.

2.1 Produção dos geopolímeros

O geopolímero foi produzido utilizando-se metacaulim comercial como fonte de sílica e alumina. Na produção da solução alcalina, utilizou-se hidróxido de sódio em pérolas, com pureza maior que 97 %, e silicato de sódio (30 % de SiO_2 , 9 % de Na_2O e 61 % de H_2O destilada). A razão $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ do geopolímero foi obtida por meio de análise de FRX (espectrometria de fluorescência de raios-x), realizada na UFPE. Na tabela 1 apresentam-se resultados da análise química do precursor geopolimérico metacaulim HP.

Tabela 1 – Composição química dos precursores geopoliméricos

Óxidos	Metacaulim (%)
SiO_2	52,16
Al_2O_3	35,88
K_2O	1,34
CaO	0,85
MgO	0,27
Fe_2O_3	4,35
Outros óxidos	1,35
Perda ao fogo	3,82

Fonte: Santos (2017)

A partir dos dados apresentados na tabela 1 foi possível determinar a razão $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ do geopolímero.

Os geopolímeros foram produzidos dissolvendo-se hidróxido de sódio em solução com 10 mol / L. Por se tratar de processo exotérmico, a solução foi deixada em repouso após a produção até atingir temperatura ambiente.

Após resfriamento natural, a solução foi combinada ao silicato de sódio, formando a solução ativadora e, novamente, deixada em repouso por 24 horas em temperatura ambiente. Em seguida, adicionou-se metacaulim à solução ativadora e misturou-se por quatro minutos, quando a mistura se tornou homogênea. Na tabela 2 apresentam-se as composições dos geopolímeros analisados nesta pesquisa.

Tabela 2: Composições químicas dos geopolímeros

Óxidos	GEO 3.0	GEO 3.5	GEO 4.0
SiO ₂	47,65	51,90	54,33
Al ₂ O ₃	30,16	27,67	26,30
Na ₂ O	17,30	15,84	15,18
K ₂ O	0,84	0,80	0,75
CaO	0,07	0,07	0,07
MgO	0,25	0,20	0,12
Fe ₂ O ₃	2,20	2,19	2,07
Co ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00
CuO	0,07	0,00	0,00
Outros	1,46	1,33	1,18

Fonte: Santos (2017)

Na Tabela 3 veem-se as proporções adotadas na produção dos precursores utilizados para fabricar os geopolímeros. As combinações renderam 0,001178 m³ de geopolímero. Foram produzidos três corpos de prova para cada composição. Os corpos de prova possuíam geometria cilíndrica, com 50 mm de altura e 25 mm de diâmetro. Na Figura 1 observa-se a moldagem de um corpo de prova.

Tabela 3 – Composição dos geopolímeros

Material	Unidade	GEO 3,0	GEO 3,5	GEO 4,0
Metacaulim	g	273,35	273,35	273,35
Silicato de Sódio	g	106,71	206,85	306,99
Hidróxido de Sódio	g	69,68	57,7	45,71
Água destilada	mL	174,22	144,25	114,28



Figura 1 – Amostra em processo de moldagem.

Na tabela 4 apresenta-se a nomenclatura das amostras.

Tabela 4 – Amostras produzidas

Descrição materiais produzidos	Nomenclatura
Geopolímero, razão SiO ₂ / Al ₂ O ₃ = 3,0	GEO 3,0
Geopolímero, razão SiO ₂ / Al ₂ O ₃ = 3,5	GEO 3,5
Geopolímero, razão SiO ₂ / Al ₂ O ₃ = 4,0	GEO 4,0
Pasta de cimento (500 mL H ₂ O / 1 kg cimento)	PCI
Argamassa de cimento para contrapiso (traço 1:3 cimento / areia)	ARG

2.2 Propriedades térmicas

Utilizou-se o analisador de propriedades térmicas *KD-2 Pro Thermal Analyzer* (fabricado pela Decagon Devices Incorporation) para realizar estimativas das seguintes propriedades: condutividade, difusividade, resistividade e capacidade calorífica.

A sonda de medição (SH – 1) é composta por duas agulhas: uma dotada de uma resistência elétrica – responsável pelo aquecimento da amostra por efeito Joule, e outra equipada com um termopar – para determinação da variação de temperatura durante o aquecimento da amostra.

Cada ensaio teve duração de 10 minutos, com quinze minutos de intervalo de medição entre cada ensaio – procedimento recomendado pelo fabricante (DECAGON, 2016) para retorno da amostra à temperatura inicial. Cada amostra foi submetida a três processos de medição.

Para evitar interferência de pequenas variações da temperatura do ambiente de realização dos experimentos, o conjunto amostra – sonda foi acomodado no interior de uma câmara termicamente isolada (preenchida com flocos de poliestireno expandido – EPS), conforme apresentado na Figura 2.

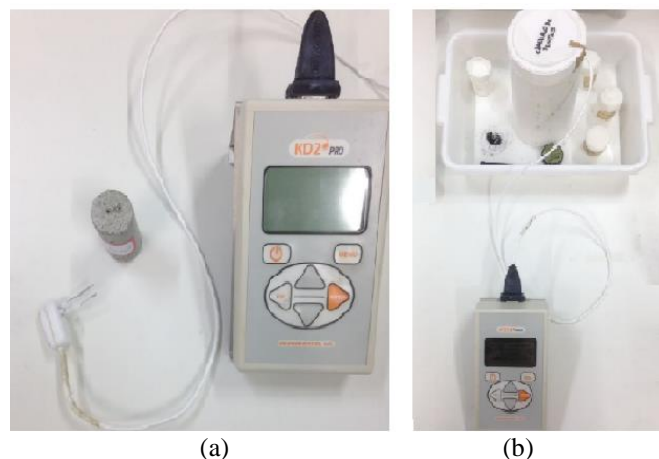


Figura 2 – (a) Amostra e medidor de propriedades térmicas (b) Conjunto com câmara de isolamento térmico

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados coletados, foram construídos os gráficos representados nas figuras 3 a 6, acompanhados das respectivas faixas de desvio padrão.

3.1 Condutividade térmica

No gráfico da Figura 3 são apresentados os valores obtidos para condutividade térmica (k , W/m-K) das amostras das formulações consideradas no presente estudo.

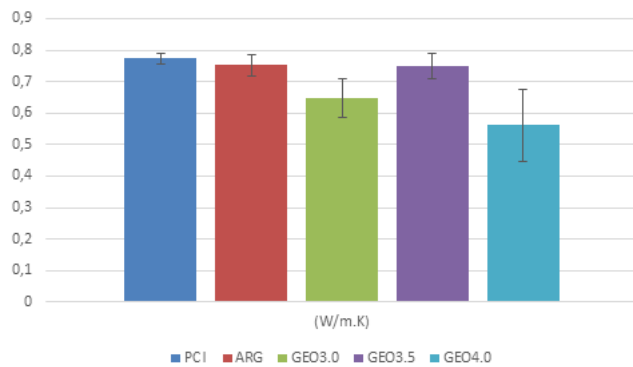


Figura 3 – Valores de condutividade térmica

Os geopolímeros GEO3.0 e GEO4.0 tiveram valores de k menores do que os obtidos no PCI e ARG. A amostra GEO4.0 teve k cerca de 25 % inferior ao k das amostras de PCI e ARG; porém, teve desvio padrão maior. Assim, os geopolímeros analisados apresentaram k menores que materiais feitos com cimento Portland comum. Os valores de k encontrados para ARG e PCI estão abaixo do que é apresentado na NBR 15220, que atribui uma condutividade de 1,15 W/m-K para argamassa comum. O geopolímero apresentou k um pouco menor que a determinada por Shanmugasundaram (2017), que obteve 0,910 W/m-K para argamassa geopolimérica com cura em temperatura ambiente (procedimento desta pesquisa).

3.2 Capacidade calorífica

Na Figura 4 veem-se os valores de capacidade calorífica volumétrica ($\rho.C_p$, MJ/m³.K) das amostras.

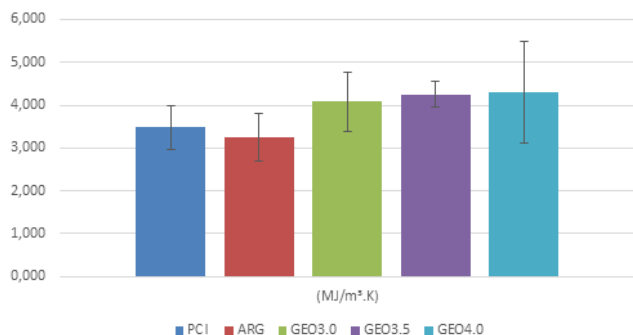


Figura 4 – Valores de capacidade calorífica volumétrica

Sabe-se que quanto maior a capacidade calorífica de um material maior será o tempo para alterar sua temperatura.

Analisando-se a Figura 4 constata-se que as amostras de geopolímero apresentaram valores de $\rho.C_p$ superiores aos do cimento Portland comum – em média, 20 % maior. Porém, devido à magnitude do desvio padrão, pode-se afirmar que apenas a amostra GEO3.5 possui uma capacidade calorífica volumétrica superior ao valor obtido na amostra ARG.

3.3 Difusividade térmica

Na Figura 5 estão os valores obtidos para a difusividade térmica (α , mm²/s) das formulações de materiais estudadas.

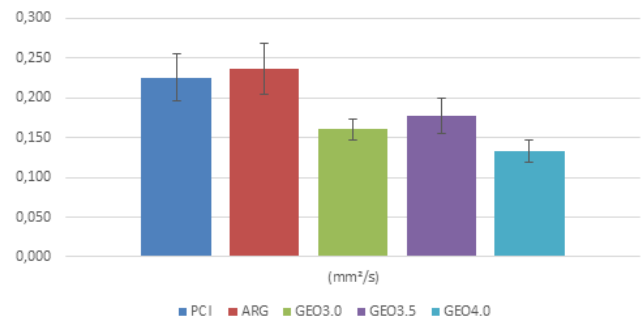


Figura 5 – Valores de difusividade térmica

A difusividade traduz o tempo de propagação de calor através da matéria. Quanto maior α , mais rápida a propagação de calor (OZISIK, 1990) e, portanto, menor a capacidade de isolamento térmico do material. As amostras de geopolímero apresentaram valores abaixo dos compostos com cimento Portland comum. Logo, o calor se propaga mais lentamente nas amostras de geopolímero do que nas amostras cimentícias. A GEO4.0 teve valores inferiores aos demais compostos, chegando a ser 40 % menor do que a amostra de ARG.

3.4 Resistividade térmica

Na Figura 6 são apresentados os valores da resistividade térmica (r , °C.cm / W) das composições estudadas.

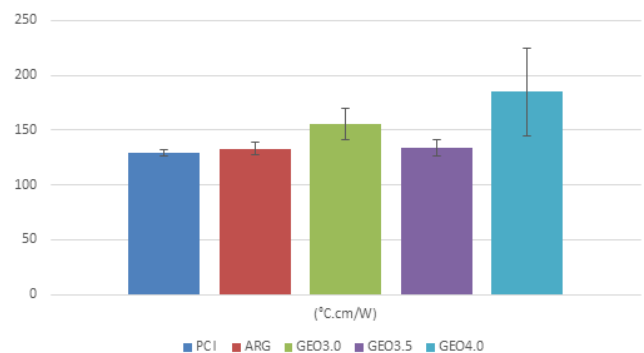


Figura 6 – Valores de resistividade térmica

Os geopolímeros apresentaram valores mais interessantes do ponto de vista de isolamento térmico do que as amostras de cimento Portland comum, consequência dos valores de condutividade térmica menores quando comparados aos da pasta de cimento e da argamassa comum.

4. CONCLUSÃO

Os geopolímeros analisados apresentaram significativa variação nos valores das propriedades térmicas em função, principalmente, da razão molar $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$.

Do ponto de vista de aplicação para fins de isolamento térmico e, conseqüentemente, de economia de energia, os geopolímeros apresentaram resultados mais interessantes quando comparados à pasta de cimento e à argamassa comum.

De modo geral, o geopolímero com razão $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ igual a 4,0 teve melhores resultados, embora, ao mesmo tempo, tenha apresentado valor alto de desvio padrão.

Deve-se evitar o uso de geopolímero com GEO 3,0 pelo fato de sua composição ter apresentado uma grande incidência de eflorescência, fato que identifica fragilização mecânica.

Diante dos resultados, conclui-se que, desde que respeitados os limites de resistência mecânica, os geopolímeros possuem interessante potencial de isolamento térmico para uso em substituição ao cimento Portland nas edificações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos funcionários do Núcleo Tecnológico Industrial – NTI da UFRN.

REFERÊNCIAS

DECAGON DEVICES INCORPORATION. *KD2 Pro Thermal Properties Analyzer Operator's Manual*. Pullman, Washington. Version: February 29, 2016. 67 p.

OZISIK, M. N. *Transferência de Calor, Um Texto Básico*. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan S. A. 1990, 661 p.

ABNT. *Norma ABNT NBR 15575-1:2013 - Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais*. 2013. 71 p.

BORGES, J. G. K. *Análise das propriedades acústicas de contrapisos produzidos com materiais reciclados*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

HELMY, A. I. I. *Intermittent curing of fly ash geopolymer mortar*. Civil Engineering Department, The British University in Egypt, Cairo, Egypt, 2016.

MACKENZIE, K. J. D., O'LEARY, B. G. *Inorganic polymers (geopolymers) as precursors for carbothermal reduction and nitridation (CRN) synthesis of SiAlON ceramics*. Journal of the European Ceramic Society, 2015.

PINTO, A. T. *Introdução ao estudo dos geopolímeros*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2006.

SOUZA FILHO, J. R. *Obtenção e caracterização de um eco-compósito à base de látex e bainha da palha do coqueiro para isolamento térmico e acústico*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

DUAN, P., Song, L., Yan, C., Ren, D., Li, Z. *Novel thermal insulating and lightweight composites from metakaolin geopolymer and polystyrene particles*. China University of Geosciences, Wuhan, China, 2017.

SHANMUGASUNDARAM, A. N. P. *An experimental investigation on flyash-based geopolymer mortar under different curing regime for thermal analysis*. <![CDATA[Energy & Buildings]]> (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.079>

ZHANG, Z., Provis, J. L., Reid, A. Wang, H. *Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete*. University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia, 2015.