

## **Compostos geopoliméricos: uma contribuição para a sustentabilidade do Design do Conforto Térmico**

### *Geopolimeric compounds: a contribution to the sustainability of Thermal Comfort Design*

**Amianti, Marcelo, Mestre, Universidade do Estado de Minas Gerais**

[marceloamianti@gmail.com](mailto:marceloamianti@gmail.com)

**Alvarenga, Cristiane do Bom Conselho Sales, Doutoranda, Universidade Federal de Minas Gerais**

[crisbcs@ufmg.br](mailto:crisbcs@ufmg.br)

**Aguilar, Maria Teresa Paulino, Doutora, Universidade Federal de Minas Gerais**

[teresa@ufmg.br](mailto:teresa@ufmg.br)

**Sales, Rosemary do Bom Conselho, Doutora, Universidade do Estado de Minas Gerais**

[rosemary.sales@uemg.br](mailto:rosemary.sales@uemg.br)

### **Resumo**

Nas construções, em geral, utilizam-se sistemas artificiais de climatização para se alcançar o Conforto Térmico dos ambientes, gerando um elevado consumo de energia elétrica. Do ponto de vista do Design do Conforto, é importante utilizar materiais sustentáveis, cujas propriedades contribuam para a eficiência energética no interior dos edifícios. Os compostos geopoliméricos são materiais de baixo impacto ambiental, boa resistência à compressão e alta durabilidade. Neste estudo, apresenta-se uma visão geral dos geopolímeros baseada na literatura. Os resultados mostram que os estudos sobre suas propriedades térmicas são recentes e os apontam como material capaz de produzir componentes para o Conforto Térmico. Fica evidente que a incorporação de resíduos contribui de forma ecológica e imprime melhores propriedades mecânicas e térmicas aos compostos. A trabalhabilidade, retração e fissuração por secagem merecem atenção especial. Os custos, cuidados de manuseio e a falta de normatização também são fatores dificultadores da sua prática. Embora haja muitos avanços, esforços são necessários para melhor se investigar suas propriedades térmicas, durabilidade, interação com o aço e previsões de vida em serviço.

**Palavras-chave:** Design do Conforto, Conforto Térmico, Sustentabilidade, Geopolímero

### ***Abstract***

*In buildings, in general, artificial air conditioning systems are used to achieve the Thermal Comfort of the environments, generating a high consumption of electrical energy. From the Comfort Design perspective, it is important to use sustainable materials whose properties contribute to energy efficiency inside buildings. Geopolymeric composites are materials with low environmental impact, good resistance to compression and durability. This study presents an overview of geopolymers based on the literature. The results show that studies on its thermal properties are recent and highlighting it as a material able to produce components for Thermal Comfort. It seems clear that the incorporation of residues, contributes ecologically, gives better mechanical and thermal properties to the compounds. The workability, shrinkage and drying cracking require special attention. Costs, careful handling, lack of standards, are also factors that hamper its practice. Although there are many advances, efforts are needed to better investigate its thermal properties, durability, interaction with steel, and predictions of service life.*

***Keywords:*** *Comfort design; Thermal comfort; Sustainability; Geopolymer*

## 1. Introdução

As mudanças na forma de vida das pessoas e o aumento populacional instigaram profissionais de vários setores a vislumbrar uma nova postura do homem em relação ao ambiente que o circunda. Sentir-se confortável passou a ser uma premissa para melhorar a qualidade de vida das pessoas. Segundo Frota e Schiffer (2007), o ambiente construído deve apresentar características de Conforto Térmico que promovam o bem estar das pessoas, sejam quais forem as condições climáticas externas. Neste sentido, torna-se necessário buscar soluções economicamente viáveis e de menor impacto ambiental que atendam às necessidades de Conforto Térmico. O Design do Conforto, associado ao Conforto Térmico, busca estabelecer os critérios para a concepção de ambientes apropriados às atividades humanas em conformidade com três pilares principais: sentir-se termicamente confortável, cuidar para não exceder em calor ou frio o estado geral do usuário e reduzir o consumo de energia elétrica (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016). A partir desses critérios, o design procura soluções, nos âmbitos dos espaços, que satisfaçam às necessidades dos usuários para uma melhor qualidade de vida das pessoas.

Nesse cenário, os materiais de construção, segundo González Cruz (2003), são uma importante ferramenta, pois eles contribuem muito para o Conforto Térmico da edificação. No entanto, as construções não privilegiam materiais que propiciem esse conforto, o que exige sistemas de climatização artificiais que geram um alto consumo de energia elétrica (PEDRA; SALES; LANA, 2013). As Normas técnicas como a ISO 7730 (2005), a ASHRAE 55 (2017) e a NBR 15220-3 (ABNT, 2005) colocam parâmetros para avaliação do Conforto Térmico com base em características climáticas de desempenho locais. Contudo, o que se percebe é que não existem materiais que atendam, adequadamente, a essas demandas (GERALDO; CAMARINI, 2015).

A comunidade científica realiza pesquisas que buscam desenvolver materiais com alto potencial térmico para reduzir os impactos ambientais dos materiais de construção tradicionais (LELLAN et al., 2011). Dentre eles, podem-se destacar os compostos geopoliméricos que, por incorporarem resíduos e terem adequado desempenho mecânico, são materiais que possuem uma pegada de carbono muito pequena quando comparada aos compostos de cimento *Portland* tradicionais (TURNER; COLLINS, 2013; DUXSON et al., 2007). Estudos recentes indicam que os compostos geopoliméricos apresentam desempenho térmico superior aos dos materiais de construção tradicionais (SHADNIA; ZHANG; LI, 2015; WANG et al., 2016; MADDALENA; ROBERTS; HAMILTON, 2018; De ROSSI et al., 2018; CAO; BUI; KJØNIKSEN, 2019; AFOLABI et al., 2019; AHMAD et al., 2020; PASUPATHY; RAMAKRISHNAN; SANJAYAN, 2020), ou seja, se aplicados nas envoltórias e/ou estruturas das edificações, contribuiriam para o Conforto Térmico dentro da edificação. Dessa forma, são materiais que devem ser considerados pelos atores do Design quando se analisa o conforto humano como elemento presente no contexto das edificações. De forma a ampliar os conhecimentos acerca desses materiais para o Design do Conforto, este trabalho apresenta uma breve revisão da literatura sobre o tema.

## 2. Materiais, Design e sustentabilidade

O Design, como uma atividade projetual, tem uma interação direta com a complexidade do mundo moderno. Trabalha com a criação de produtos de forma a alcançar soluções que atendam às necessidades de uma sociedade mutante e muito mais exigente (CALABRETTA; KLEISMANN, 2017). Ao mesmo tempo, Manzini e Vezzoli (2008) afirmam que o designer é responsável pelo desenvolvimento de produtos que proporcionem experiências prazerosas aos usuários, assim como pela inovação nos materiais e processos para melhor se comunicar com as pessoas. Ashby e Johnson (2011) consideram que a escolha dos materiais não se limita a um problema somente da engenharia, sendo conveniente que haja uma interação entre áreas afins. Vivemos em um mundo de materiais e são eles que dão substância a tudo que vemos e tocamos. Segundo os mesmos autores, os educadores, na formação do designer, ignoram ou dedicam pouca atenção ao papel dos materiais e processos no Design de Produto. Para Brown e Farrelly (2014), a maneira como os materiais são utilizados em um ambiente pode ser influenciado por diferentes contextos, pois eles são a substância da criação de um projeto de Design. Nunes (2015) salienta que a grande revolução dos materiais consiste na liberdade de utilizá-los, integrando-os nos processos industriais, nas pesquisas e no desenvolvimento de produtos. Nesse sentido, esforços conjuntos estão sendo direcionados, entre várias áreas do conhecimento, no sentido de se estabelecerem estratégias unificadas na busca por soluções inovadoras, no que se refere aos materiais de construção, destinadas ao conforto humano em todos os seus aspectos (SALES; MOTTA; AGUILAR, 2016). Ao priorizar a necessidade de produzir materiais de construção com maior performance, de menor impacto ambiental e que incorporem resíduos com vistas à melhoria da qualidade de vida, enfatiza-se a sustentabilidade nas suas dimensões ambiental e econômica.

### **3. Conforto Térmico**

Buscando estabelecer uma relação de conforto ligada ao ser humano, surge o Design do Conforto como uma especialidade do Design, destinada a compreender as demandas de conforto físico, psicológico e os fatores que o influenciam. O termo tem suas raízes no conforto humano e busca satisfazer, de forma efetiva, as condições da mente que expressam conforto e/ou desconforto, no lugar ou situação na qual o sujeito esteja inserido (PEDRA; SALES; LANA, 2013). Nesse contexto, o Conforto Térmico se destaca, visto que, na sua origem, a edificação tem como objetivo principal proteger o homem do clima. Dessa forma, Lamberts, Dutra e Pereira (2016) definem o Conforto Térmico como a sensação de bem-estar necessária para que o indivíduo desenvolva normalmente suas atividades, sem acionar, de forma perceptível, seus mecanismos de defesa contra o calor ou frio. Segundo Chappells e Shove (2004), além das variáveis físicas, que são passíveis de quantificação, deve-se levar em conta o usuário, pois, quando ele está em desconforto, tende a reagir para restabelecer suas condições favoráveis. Contudo, as preferências pessoais constituem um processo árduo para se estabelecerem critérios objetivos e se definirem parâmetros de conforto interno nos ambientes.

A Norma americana ASHRAE 55 (2017) classifica o conforto térmico como a sensação de bem-estar ambiental em relação à temperatura, umidade relativa, movimentação do ar, radiação solar e infravermelha, emitidas pelo entorno. Esta Norma associa a sensação térmica ao conforto térmico do indivíduo, e considera esse conforto

uma expressão subjetiva, consciente, da percepção térmica dos ocupantes do ambiente. A Norma brasileira NBR 15220-1 (ABNT, 2005) declara que a edificação deve oferecer ao indivíduo condições térmicas internas compatíveis com o conforto térmico humano, independentemente das condições climáticas externas. A Norma ISO 7730 (2005) considera que a sensação térmica está relacionada ao equilíbrio térmico do corpo. Esse equilíbrio é influenciado pela atividade física, pelas vestimentas, pelos parâmetros ambientais, temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e umidade do ar. Embora essa Norma tenha sido desenvolvida especificamente para o ambiente de trabalho, ela também é aplicável a outros tipos de ambiente.

Dessa forma, o Design do Conforto Térmico deve considerar, além dos aspectos individuais das pessoas, no que diz respeito a níveis adequados de iluminação, ruído, ventilação, umidade e temperatura, as condições climáticas do meio onde ela se encontra. Devem-se considerar o entorno e as construções próximas, levando-se em consideração a relação interior/exterior, visto que é no entorno da edificação que as forças externas atuam e afetam a edificação, através de sua envoltória. Por sua vez, o microclima da edificação depende, além de aspectos de forma/aberturas/posição, dos materiais que compõem as estruturas e fachadas, que, na realidade, funcionam como barreiras ao meso/macroclima. Sendo assim, as propriedades térmicas dos materiais tornam-se ferramenta importante para o Conforto Térmico no interior das edificações.

#### **4. Propriedades térmicas dos materiais de construção**

No estudo das propriedades térmicas é importante realizar uma distinção entre temperatura e calor. A temperatura é o nível de atividade térmica ou a força motriz para a transferência de calor entre os elementos. Sua notação é feita em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) ou Kelvin (K). O calor é a energia térmica, expressa em calorias (cal), ou Joule (J). Quando um sólido absorve calor, sua temperatura aumenta e sua energia interna (U) também aumenta. Sempre que um corpo, a certa temperatura, entra em contato com outro corpo com uma temperatura diferente, acontece a transferência de calor daquele que tem a temperatura mais alta para aquele que tem a temperatura mais baixa. A velocidade de transferência, assim como a sua eficiência, é determinada por características intrínsecas dos materiais envolvidos. Essas características são representadas por duas grandezas empíricas conhecidas como calor específico e calor latente. No primeiro caso, tem-se uma medida de como a temperatura do corpo varia quando a energia lhe é fornecida ou retirada. A segunda grandeza mede a energia necessária para operar uma mudança de fase (fusão, ebulição, etc.) em dada quantidade de matéria. Desta forma, as condições térmicas na vizinhança de um material o afetam de diversas formas, sendo os efeitos mais importantes aqueles que produzem alterações na sua microestrutura e, portanto, no seu desempenho (INCROPERA; DEWITT, 2014).

No estudo do Conforto Térmico torna-se importante considerar algumas propriedades térmicas mais relevantes: difusividade térmica (indica como o calor se difunde através de um material); condutividade térmica (é a quantidade de energia térmica que “flui” através de uma unidade de área por unidade de tempo) e o calor específico (que define a variação térmica de um corpo ao receber determinada quantidade de calor), pois são essas as propriedades que determinam se o material, que constitui a envoltória, é eficiente do ponto de vista energético. Atualmente, no campo da construção civil, as novas tecnologias estão

se empenhando em desenvolver materiais para construções que possam diminuir custos, aumentar o valor agregado e disponibilizar maior conforto térmico aos usuários. Dentre eles, destacam-se os compostos geopoliméricos.

## 5. Geopolímeros: material sustentável

Os compostos geopoliméricos são constituídos por agregados e um aglomerante alternativo e surgiram como uma opção ecoeficiente aos compostos de cimento *Portland* para determinadas aplicações. Os geopolímeros são materiais obtidos da ativação alcalina de aluminossilicatos com baixo teor de cálcio (PROVIS; BERNAL, 2014). Para produção dos geopolímeros comumente se utilizam como matéria prima materiais ricos em sílica e alumina como o metacaulim, resíduos industriais e agrícolas, como o bagaço de cana-de-açúcar, a casca de arroz, as cinzas volantes, e alguns resíduos com alto teor de sílica (ARULRAJAH, *et al.*, 2016). Segundo Liew *et al.* (2017), os geopolímeros podem ser produzidos utilizando-se ativadores líquidos (*two-part-mixing*) ou sólidos (*one-part-mixing* ou *just add water*). Para sua produção, normalmente se utiliza um silicato alcalino para complementar a fonte de sílica da matéria prima utilizada. Contudo, o uso de silicatos tradicionais dificulta o amplo uso dos geopolímeros devido ao seu alto custo. Dessa forma, várias pesquisas têm sido realizadas para obtenção de silicatos alcalinos de baixo custo, à base de resíduos agroindustriais ricos em sílica (ADESANYA *et al.*, 2021). Em relação à produção de geopolímeros com ativadores alcalinos em solução, deve-se levar em consideração o cuidado no transporte e manipulação desses aglomerantes no canteiro de obra, devido ao elevado pH. Dessa forma, existe um grande interesse por parte dos pesquisadores em desenvolver pesquisas utilizando ativadores sólidos. No entanto, a liberação de calor resultante da mistura dos hidróxidos alcalinos sólidos com água promove o estresse térmico no gel em desenvolvimento e provoca o rápido endurecimento da mistura (PROVIS *et al.*, 2014).

Segundo Luukkonen *et al.* (2018), os materiais ativados pelo método *one-part-mixing* são promissores em relação à resistência mecânica, se comparados com outras propriedades, como durabilidade, retração e eflorescência, contudo ainda não estão bem documentadas na literatura. Fernández-Jiménez *et al.* (2008) apresentam estudos que mostram que os geopolímeros também mantêm suas boas propriedades mecânicas em altas temperaturas. Bouguermouh *et al.* (2017) e Mellado *et al.* (2017) mostram que a alta durabilidade dos geopolímeros está relacionada à sua elevada resistência aos ataques de ácidos e sulfatos, à baixa porosidade e permeabilidade ao oxigênio, e ao menor percentual de problemas relacionados à expansão pela reação álcali-agregado. Aguirre-Guerrero *et al.* (2017) avaliam o desempenho de argamassas geopoliméricas utilizando cinzas volantes e metacaulim. As argamassas foram aplicadas em revestimentos de estruturas de concreto armado e submetidas à solução de cloreto de sódio. Os resultados foram comparados a concretos de referência e mostraram que o geopolímero apresenta o melhor desempenho ao reduzir a taxa de corrosão. Biranchi *et al.* (2017) avaliaram as propriedades de geopolímeros à base de cinzas volantes para a manufatura de elementos de construção impressos em camada de argamassa, diretamente em modelo 3D, auxiliado por computador. Os resultados mostraram que seu uso pode contribuir para um meio ambiente mais sustentável, e as propriedades mecânicas dos geopolímeros em impressão 3D são

dependentes da direção de carregamento, devido à natureza anisotrópica do processo de impressão, e retêm o desempenho intrínseco do material.

As principais desvantagens desses aglutinantes é a tendência de retração e fissuração por secagem, que podem ocorrer devido à alta demanda de água das misturas reagentes, devido ao formato da partícula e à maior área superficial do metacaulim (BERNAL *et al.*, 2011). Como consequência, os geopolímeros podem apresentar baixa resistência à tração e à flexão. O fator econômico é outro dificultador, pois o concreto geopolimérico, em função de seus precursores, pode atingir custos de 10,6 vezes maiores que o cimento *Portland* (BITENCOURT *et al.*, 2012). Deve-se, contudo, destacar que esse material ainda carece de normatização no Brasil, pois coloca em risco sua utilização no mercado. Além disso, a alta alcalinidade da solução ativadora e o controle tecnológico necessário para sua produção dificultam seu emprego em canteiros de obra comuns. Como as soluções ativadoras são formadas, geralmente, pela mistura de silicato de sódio com uma solução alcalina, o aspecto viscoso do silicato é transferido para a pasta, tornando-a pegajosa e dificultando bastante o seu manuseio (ALLEM, 2016). Dessa forma, é mais indicado sua utilização nas indústrias de pré-fabricados, que podem se beneficiar do ganho de resistência nas primeiras horas, o que possibilita uma maior velocidade de produção.

Também se fazem necessários estudos das características de durabilidade no que se refere à interação com o aço, no que se refere às previsões de vida em serviço e se os métodos de projeto de engenharia existentes para o concreto estrutural de cimento *Portland* são aplicáveis ao concreto geopolimérico (PROVIS, 2017). Além disso, cada mercado possui peculiaridades próprias, pois as cadeias de logística, fornecimento e produção para o concreto geopolimérico são diferentes. Provis e Bernal (2014) destacam, como exemplo de aplicação de concretos ativados alcalinamente, as empresas *Pyrament* na América do Norte e a *E-Crete* na Austrália, com obras de infraestrutura civil e projetos de construção residencial.

## 6. Geopolímero aplicado ao Conforto Térmico

Na literatura atual, podem-se destacar alguns poucos estudos que avaliaram as propriedades térmicas dos geopolímeros como material alternativo, destinado ao Conforto Térmico das construções e à sustentabilidade. Shadnia, Zhang e Li, (2015) estudaram experimentalmente as propriedades mecânicas e térmicas da argamassa geopolimérica, sintetizada com cinzas volantes de baixo teor de cálcio, onde foram adicionadas diferentes quantidades de material de mudança de fase - *Phase Change Material (PCM)*. Os resultados indicam que a incorporação do *PCM* promove uma ligeira diminuição tanto do peso unitário quanto da resistência à compressão, assim como leva a uma diminuição da condutividade térmica, sendo bastante eficiente na redução da temperatura interna dos ambientes testados.

Wang *et al.* (2016) estudaram a influência do *PCM* nas propriedades mecânicas e térmicas de argamassas geopoliméricas à base de argila. Os autores descrevem uma nova forma de preparar argamassa de geopolímero, incorporando parafina como material de absorção de calor e perlita expandida como material de suporte, usando o método de absorção a vácuo. Os resultados mostram que a parafina imobilizada na estrutura da rede tridimensional, durante o processo de mudança de fase, reduz, efetivamente, a

condutividade térmica do material, podendo ser utilizado na área rural como material de construção, uma vez que a argila é abundante naquelas regiões.

Maddalena, Roberts e Hamilton (2018) investigaram o desempenho térmico de diferentes geopolímeros obtidos com metacaulim, sílica ativa e nanossílica e compararam com o comportamento térmico do cimento *Portland*. Devido à alta porosidade, a condutividade térmica dos compostos geopoliméricos foi menor do que a do cimento *Portland*.

De Rossi *et al.* (2018) avaliaram argamassas geopoliméricas preparadas com cinza volante e metacaulim, resíduos de construção e demolição e um agente formador de poros. Os resultados mostraram que a adição do agente formador de poros às composições aumentou a capacidade de retenção de umidade das argamassas e melhorou a condutividade térmica.

Afolabi *et al.* (2019) utilizam o grafite expandido para encapsular material de mudança de fase. O composto foi incorporado ao geopolímero, usando-se a técnica de impregnação a vácuo para produzir material térmico de alvenaria. O geopolímero se mostrou térmica e quimicamente estável sob condições solares variadas, sendo considerado um excelente material para o Conforto Térmico na indústria de construção.

Cao, Bui e Kjøniksen (2019) utilizaram o método de elementos finitos para analisar o conforto humano e o desempenho térmico de paredes multicamadas contendo materiais de mudança de fase microencapsulados em concreto geopolimérico. O material PCM se mostrou mais eficaz quando localizado próximo ao ambiente externo, e a redução da condutividade térmica diminuiu o consumo de energia. Contudo, a eficácia de armazenamento de calor foi reduzida.

Ahmad *et al.* (2020) desenvolveram um concreto vegetal sustentável com base em aglutinante geopolimérico *one-part-mixing* e resíduos industriais. Foram avaliadas as propriedades mecânicas, microestruturais, térmicas, perda de calor e higroscópicas. Os resultados mostram que o coeficiente térmico aumentou com o aumento da temperatura. A análise de perda de calor mostrou que o material de isolamento pode reduzir as perdas de energia através das alvenarias, em comparação com as de referência.

Pasupathy, Ramakrishnan e Sanjayan (2020) analisaram o comportamento do concreto de geopolímero de estrutura porosa. Utilizou-se perlita expandida hidrofóbica como agregado poroso e adição de 10% e 20% do ligante geopolimérico. Observou-se que o uso da perlita expandida apresentou melhorias nas propriedades mecânicas e térmicas do geopolímero poroso. Os testes de desempenho revelaram que, devido à presença de grande quantidade de poros com a adição de 10% e 20% de perlita, a densidade foi reduzida em 19% e 53%, respectivamente.

## 7. Considerações finais

Os materiais geopoliméricos tem grande potencial para substituir os aglomerantes tradicionais à base de cimento *Portland* em determinadas aplicações. Apresentam vantagens do ponto vista ambiental, melhores propriedades mecânicas e estabilidade química, além de possibilitar a utilização de diversos resíduos industriais na sua fabricação.



Ao incorporar resíduos, o geopolímero pode ser considerado um material sustentável, caso seu uso seja com vistas a proporcionar maior qualidade de vida. Nesse sentido, seria uma boa estratégia de sustentabilidade utilizar compostos geopoliméricos para melhorar o Conforto Térmico das edificações.

Os estudos da literatura ainda são poucos, mas eles apontam para a potencialidade do uso dos geopolímeros como material alternativo para se obter um melhor Conforto Térmico dentro do ambiente construído. Materiais de mudança de fase, associados ao geopolímero, são uma das técnicas a fim de aumentar a eficiência para armazenamento de energia térmica. Além disso, o geopolímero oferece um grande potencial para atender às demandas crescentes de aplicações de resfriamento e aquecimento em edifícios.

Apesar das vantagens associadas ao geopolímero, seu custo de produção, especialmente devido ao uso dos silicatos, ainda é um fator limitante para sua utilização em larga escala, quando comparado ao cimento *Portland*. Isso evidencia que ele ainda não é um material alternativo, economicamente viável, para construção. A trabalhabilidade da pasta e a fissuração durante a cura também são dificuldades enfrentadas para a universalização do uso do geopolímero.

Outro agravante para sua ampla utilização é a falta de normas técnicas que garantam a segurança e correta utilização e produção do material, visto que as soluções químicas utilizadas na produção do geopolímero são alcalinas e podem provocar acidentes durante seu manuseio. Por outro lado, ainda existem muitas lacunas a serem preenchidas, tanto no que se refere à síntese, caracterização, microestrutura, quanto no que se refere às propriedades químicas e térmicas do geopolímero, indicando tudo isso a necessidade de mais pesquisas na área.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

## Referências

ADESANYA, E. *et al.* **Opportunities to improve sustainability of alkali-activated materials:** A review of side-stream based activators. *Journal of Cleaner Production*, v. 286, p. 125558, 2021.

AFOLABI, L. O.; ARIFF, Z. M.; MEGAT-YUSOFF, P. S. M.; AL-KAYIEM, H. H.; AROGUNDADE, A. I.; AFOLABI-OWOLABI, O. T. **Red-mud geopolymer composite encapsulated phase change material for thermal comfort in built-sector.** *Solar Energy*. Volume 181, 15 March 2019, Pages 464-474.

AGUIRRE-GUERRERO, A. M; ROBAYO-SALAZAR, R. A.; GUTIÉRREZ, R. M. **A novel geopolymer application:** Coatings to protect reinforced concrete against corrosion. *Ciência Aplicada à Argila*. Volume 135, 2017 p. 437-446.

AHMAD, M. R.; CHEN, B.; HAQUE, M. A.; ODERJI, S. Y. (2020). **Multiproperty characterization of cleaner and energy-efficient vegetal concrete based on one-part geopolymer binder**. Journal of Cleaner Production, Volume 253, 20 April 2020, 119916.

ALLEM, P. M. **Avaliação do desempenho mecânico de concreto geopolimérico com o uso de fibra de aço**. 2016. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING: Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **ASHRAE 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. USA, 2017.

ARULRAJAH, A.; KUA, T. A.; SUKSIRIPATTANAPONG, C.; HORPIBULSUK, S.; SHEN, J. S. (2017). **Compressive strength and microstructural properties of spent coffee grounds-bagasse ash based geopolymers with slag supplements**. Journal of Cleaner Production, 162, 1491-1501.

ASHBY, M.; JOHNSON, K. **Materiais e Design - Arte e ciência da seleção de materiais no design de produto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.

BERNAL, S. A.; RODRI, E. D.; MEJI, R.; PROVIS, J. L. **Mechanical and thermal characterization of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends**. p. 5477–5486, 2011.

BIRANCHI, P.; SUVASH, C. P.; LIM, J. H.; YI, W. D. T.; MING, J. T. **Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment**. Journal of Cleaner Production. Volume 167, 20, 2017, p. 281-288.

BITENCOURT, C. S.; TEIDER, B. H.; GALLO, J. B.; PANDOLFELLI, V. C. **A geopolimerização como técnica para a aplicação do resíduo de bauxita**. Cerâmica, São Paulo, v. 58, n. 345, p. 20-28, jan./mar. 2012.

BOUGUERMOUH, K. *et al.* **Effect of acid attack on microstructure and composition of metakaolin-based geopolymers: The role of alkaline activator**. Journal of Non-Crystalline Solids, v. 463, p. 128–137, 2017.

BROWN, R.; FARRELLY, L. **Materiais no design de interiores**. Tradução de Alexandre Salvaterra. São Paulo: Gustavo Gili, 2014.

CALABRETTA, G.; KLEISMANN, M. **Technology-driven evolution of design practices: envisioning the role of design in the digital era**. Journal of Marketing Management, Reino Unido, v. 33, 2017.

CAO, V. D.; BUI, T. Q.; KJØNIKSEN, A. L. **Thermal analysis of multi-layer walls containing geopolymer concrete and phase change materials for building applications**. Energy. Volume 186, 1. November 2019, 115792.

- CHAPPELLS, H.; SHOVE, E. **Comfort: a review of philosophies and paradigms.** Future Comforts Project, UK ESRC Programme, 2004.
- DE ROSSI, A.; CARVALHEIRAS, J.; NOVAIS, R. M.; RIBEIRO, M. J.; LABRINCHA, J. A.; HOTZA, D.; MOREIRA, R. F. P. M. (2018). **Waste-based geopolymeric mortars with very high moisture buffering capacity.** *Construction and Building Materials*, 191, 39–46.
- DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. **The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete”.** *Cement and Concrete Research*, vol. 37, p. 1590–1597, Aug. 2007.
- FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. *et al.* **New cementitious materials based on alkali-activated fly ash: Performance at high temperatures.** *Journal of the American Ceramic Society*, v. 91, n. 10, p. 3308–3314, 2008.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual do Conforto Térmico.** 8. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2007.
- GERALDO R. H.; CAMARINI, G. **Geopolimers studies in Brazil: A metaanalysis and perspectives.** Artigo. *IACSIT International journal of engineering and technology*, Vol. 7, nº 5, Oct. 2015.
- GONZÁLEZ CRUZ, E. M. **Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática.** Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD). Universidad Del Zulia, Maracaibo/Venezuela, 2003.
- INCROPERA, F. P.; DeWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARD. **ISO 7730: moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the conditions of Thermal Comfort.** Geneva, 2005.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura.** 3 ed. [S. l.]: Eletrobrás/Procel, 2016.
- LELLAN, B. C. M.; WILLIAMS, R. P.; LAY, J.; RIESSEN, A. V.; CORDER, G. D. **Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement.** *Journal of Cleaner Production*. Vol. 19, p. 1080-1090, Feb. 2011.
- LIEW, Y. M.; HEAH, C. Y.; LI, L.; JAYA, N. A.; ABDULLAH, M. M. A. B.; TAN, S. J.; HUSSIN, K. (2017). **Formation of one-part-mixing geopolymers and geopolymer ceramics from geopolymer powder.** *Construction and Building Materials*, 156, 9–18. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.110.
- LUUKKONEN, T.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; YLINIEMI, J.; KINNUNEN, P.; ILLIKAINEN, M. (2018). **Comparison of alkali and silica sources in one-part alkali-activated blast furnace slag mortar.** *Journal of Cleaner Production*. 187:171–179.
- MADDALENA, R.; ROBERTS, J. J.; HAMILTON, A. (2018). **Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements.** *Journal of Cleaner Production*, 186, 933–942. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.138.

MANZINI, E.; VEZOLLI, C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis**. 1. ed. São Paulo, 2008.

MELLADO, A. *et al.* **Resistance to acid attack of alkali-activated binders: Simple new techniques to measure susceptibility**. *Construction and Building Materials*, v. 150, p. 355–366, 2017.

NUNES, T. V. L. **Seleção de materiais e design: um método com base nas redes neurais artificiais**. 131 p. Tese, Programa de Pós-graduação em Design da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação - UNESP, Bauru, 2015.

PASUPATHY, K.; RAMAKRISHNAN, S.; SANJAYAN, J. (2020). **Enhancing the mechanical and thermal properties of aerated geopolymer concrete using porous lightweight aggregates**. *Construction and Building Materials*. Volume 264, 20 December 2020, 120713.

PEDRA, S. A.; SALES, R. B. C.; LANA, S. L. B. **Termografia Infravermelha aplicada à análise térmica de alvenaria estrutural**. In: IV Simpósio de Pesquisa e Pós-Graduação, Bauru, 2013.

PROVIS, J. L. **Alkali-activated materials**. *Cement and Concrete Research*, 2017.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. **Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials**. *Annual Review of Materials Research*. V. 44, n. 1, p. 299–327, 2014.

PROVIS, J.; DUXSON, P.; KAVALEROVA, E.; KRIVENKO, P.V.; PAN, Z.; PUERTAS, F.; VAN DEVENTER, J. S. J. (2014). **Historical aspects and overview**. In: *Alkali-Activated Materials, State-Of-The-Art Report Rilem TC 224-AAM*. Springer, Dordrecht.

SALES, R. B. C.; MOTTA, S. R. F; AGUILAR, M. T. P. **Role of materials selection in establishing the identity of a product from its design**. *Collection of advanced studies in design: Design and Identity*, Editora EdUEMG, 2. ed., Belo Horizonte, p. 99-111, 2016.

SHADNIA, R.; ZHANG, L.; LI, P. **Experimental study of geopolymer mortar with incorporated PCM**. *Construction and Building Materials*, v. 84, p. 95–102, 2015.

TURNER, L.; COLLINS, F. **Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 43, p. 125-130, 2013.

WANG, Z. *et al.* **Influence of phase change material on mechanical and thermal properties of clay geopolymer mortar**. *Construction and Building Materials*, v. 120, p. 329–334, 2016.