

VIABILIDADE E POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS ALCALINOS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS PRÉ-FABRICADOS

CARVALHO, Aldo Ribeiro de¹ (aldo.carvalho@engenharia.ufjf.br); CASTRO, Júlia Assumpção de¹ (julia.assumpcao@aluno.ufop.edu.br); OLIVEIRA, Thainá Faria¹ (thaina.oliveira@aluno.ufop.edu.br); OLIVEIRA, Thaís Mayra de² (thais.mayra@ufjf.edu.br); SILVA, Guilherme Jorge Brigolini¹ (guilhermebrigolini@ufop.edu.br); MENDES, Júlia Castro² (juliacastro.mendes@ufjf.br)

¹Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Brasil

²Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Brasil

Palavras-chave: Painel pré-moldado, Painel sanduíche, Geopolímero; Geopolímero poroso; Reaproveitamento de Resíduos

Resumo

As indústrias da construção civil e mineração são responsáveis por impactos ambientais atrelados a extração de matéria prima, consumo de energia, emissão de CO₂ e produção de resíduos. É possível desenvolver materiais de construção que incorporem os resíduos no ciclo produtivo e que possuam melhores propriedades térmicas para reduzir a utilização de energia com o condicionamento dos ambientes. Este estudo tem o objetivo de analisar a viabilidade técnica e financeira de uma fábrica de painéis-parede geopoliméricos pré-moldados do tipo sanduíche. Este painel proposto é constituído de um núcleo geopolimérico poroso, com uso de metacaulim, e uma superfície geopolimérica de elevada resistência, utilizando o rejeito de barragem de minério de ferro. O estudo se dividiu em 3 etapas: definição do perfil do consumidor, análise de mercado e desenvolvimento técnico e financeiro dos painéis. Os resultados mostram que os clientes estão dispostos a adotar métodos construtivos alternativos visando a sustentabilidade, podendo possuir um valor até 15% mais elevado; o principal concorrente direto são os painéis sanduíche com núcleo de espuma; e o preço do painel desenvolvido é idêntico ao de seu concorrente direto. Assim, conclui-se que o painel proposto é viável tecnicamente e financeiramente.

1 INTRODUÇÃO

As emissões de dióxido de carbono (CO₂) da indústria da construção civil representam aproximadamente 25% do total emitido em escala global, ocorrendo ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento (Farias; Marinho, 2020). Essas emissões estão relacionadas à elevada demanda energética desta indústria, que representa cerca de 42% do consumo mundial (Durante; Callejas; Amaral, 2020). Durante a fase de uso e operação das edificações, a energia é utilizada para iluminação, conforto térmico, entretenimento, trabalho ou estudos, saúde e outros fins (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

Neste contexto, torna-se atraente a adoção de alternativas construtivas que incorporem resíduos de outras indústrias e reduzam o consumo de energia nas edificações. Uma opção para este fim são os painéis-parede (Figura 1) que podem ser aplicados em qualquer edificação, sendo do tipo estrutural ou de vedação, pré-moldados ou moldados in loco, monolíticos ou sanduíche (ABNT, 2017). Usualmente, esses painéis são constituídos de concreto de cimento Portland e podem incorporar resíduos ou materiais reciclados em sua composição (Flansbjer *et al.*, 2017; Carvalho *et al.*, 2020) para torná-los mais sustentáveis. A produção do cimento Portland é responsável por 7%

de todas as emissões globais de CO₂ (WBCSD, 2017). Assim, a adoção de ligantes alternativos, como os geopolímeros, são uma solução promissora para reduzir o impacto ambiental dos painéis-parede.

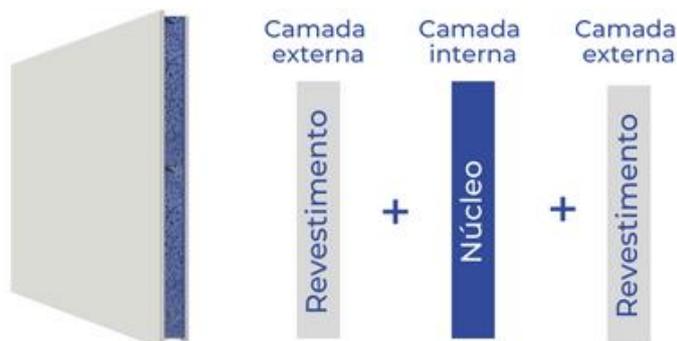


Figura 1. Ilustração de painel sanduíche

Os geopolímeros são compostos inorgânicos de estruturas tridimensionais de aluminossilicatos com fases amorfas ou semicristalinas (Davidovits, 2020). Esses ligantes são formados pela interação entre um agente ativo, de natureza ácida ou alcalina, e os materiais precursores, normalmente ricos em Al, Si e Fe, desenvolvendo uma matriz densa, compacta e resistente (Carvalho *et al.*, 2023). Algumas das principais características desse material englobam: resistência à compressão e durabilidade elevadas (Xu *et al.*, 2015; Zeng; Wang, 2016; Pouhet; Cry, 2016); resistência significativa ao fogo e ao ataque ácido e baixa condutividade térmica (Tchakoute *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015) Quando respeitadas as condições ideais de cura e de proporção entre o agente ativo e o material precursor, os ligantes geopoliméricos apresentam retração reduzida (Carvalho *et al.*, 2023). Nesse cenário, este trabalho busca avaliar a viabilidade técnica e financeira de uma fábrica de painéis pré-moldados do tipo sanduíche.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O painel proposto possui um núcleo isolante térmico de 10 cm de geopolímero poroso à base de metacaulim e hidróxido de sódio (NaOH), proposto por Nadia *et al.* (2023); as camadas externas possuem 2,5 cm e são constituídas do geopolímero à base de rejeito de minério de ferro e NaOH de Defáveri *et al.* (2019), de 112,8 MPa de resistência à compressão e 21,3 MPa de resistência à flexão.

Para analisar a viabilidade e o potencial de aplicação de geopolímeros alcalinos na produção de painéis pré-fabricados, foram desenvolvidas três etapas metodológicas, a saber: a primeira consiste na determinação do perfil do consumidor por meio da aplicação de formulários; a segunda é uma análise de mercado a partir de uma pesquisa exploratória e, por fim, a terceira e última etapa consiste no desenvolvimento técnico e financeiro por meio da utilização de normas técnicas, nacionais e internacionais, ferramentas de certificação e levantamento de custos atrelados ao produto.

2.1 Perfil do consumidor

Para analisar a viabilidade de novos produtos é importante determinar o perfil do consumidor. Esse perfil engloba informações como gênero, idade, escolaridade, estado civil e renda familiar do

público-alvo. Por meio dessas informações é possível traçar estratégias comerciais, analisar as necessidades e expectativas dos consumidores e verificar a viabilidade financeira do produto frente ao poder aquisitivo do público-alvo.

O perfil do consumidor foi determinado a partir da aplicação de formulários para profissionais da engenharia civil e usuários/clientes. Dentre as perguntas do questionário estavam gênero, idade, escolaridade, estado civil, renda familiar, atuação e experiência na engenharia civil, uso de redes sociais e abertura para construção utilizando métodos não-convencionais.

2.2 Análise do Mercado

O intuito dessa etapa é analisar e comparar o painel proposto com seus concorrentes diretos e indiretos. Para isso, foi realizada uma revisão da literatura e uma pesquisa de mercado. Comparamos os painéis em 2 parâmetros: CO₂ embutido e transmitância térmica. Os parâmetros foram estimados utilizando a mesma metodologia dos dados dos concorrentes encontrados na literatura. O primeiro parâmetro analisa a emissão de CO₂ direta e indireta durante o processo produtivo. O CO₂ embutido foi calculado na abordagem “do berço ao portão”. Essa abordagem considera a emissão desde a extração de matérias-primas até o produto estar pronto para sair da fábrica (ICE, 2019). Os dados necessários foram obtidos no Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – SIDAC (MME; CBCS, 2022). Já a transmitância térmica indica o fluxo de calor conduzido nos painéis, sendo, portanto, uma das maneiras de analisar o desempenho térmico do material.

2.3 Desenvolvimento Técnico e Financeiro

Para o desenvolvimento técnico foi adotado os seguintes quesitos de desempenho: estrutural; estanqueidade; durabilidade e manutenibilidade; térmico; acústico; conforto tátil e antropodinâmico; segurança contra incêndio; segurança à saúde; adequação ambiental e respeito e conformidade com aspectos culturais locais. É necessário que o painel possua um baixo impacto ambiental e seja compatível com os processos construtivos disponíveis no mercado.

O geopolímero é uma tecnologia pouco difundida fora do ambiente acadêmico. Salienta-se que não existem normas técnicas que regulamentam seu uso, sendo necessário adaptar as normas aplicadas a matrizes de cimento Portland. Diante disso, a proposta inicial é que o painel seja utilizado como componente do sistema de vedação vertical não-estrutural, a fim de tornar a tecnologia dos geopolímeros mais aceitável para o consumidor, evitando qualquer sensação de insegurança devido ao desconhecimento, caso fosse aplicado com finalidade estrutural. Com isso, somente é necessário que o painel possua resistência à flexão para suportar as tensões do peso próprio e externas, como: esforços de expansão e dilatação volumétrica proveniente de variações térmicas; choque mecânico de objetos; carga de vento; tensões provenientes do deslocamento de vigas e pilares, entre outras.

É fundamental que os requisitos de desempenho a serem cumpridos sejam iguais ou superiores ao determinado pela NBR 15575 (ABNT, 2021), além do atendimento aos parâmetros disponíveis em outras normas nacionais e internacionais, a saber: resistência ao impacto - NBR 11675 (ABNT, 2016); desempenho térmico - NBR 15220 (ABNT, 2003); requisitos e procedimentos para painéis de parede de concreto - NBR 16475 (ABNT, 2017); cálculo estrutural - NBR 6120 (ABNT, 2019) e NBR 6123 (ABNT, 2013); isolamento acústico - ISO 717-1 (ISO, 2020); parede pré-fabricada - BS EM 14992 (BSI, 2011).

3 RESULTADOS

3.1 Perfil do Consumidor

A partir da aplicação do formulário de pesquisa de mercado, foi possível traçar o perfil do consumidor dos painéis propostos (Figura 2). Ao todo foram coletadas 108 respostas, sendo 63% do gênero feminino e 37% do masculino. A maioria das respostas foram feitas por pessoas entre 21 e 30 anos, com ensino médio completo, solteiras e com renda familiar acima de 2 salários-mínimos. Dentre os usuários/clientes, 90% afirmaram que estão abertos a construir utilizando métodos construtivos não convencionais e 63% afirmaram que pagariam até 15% a mais por um produto mais sustentável e que proporcionasse maior conforto térmico.

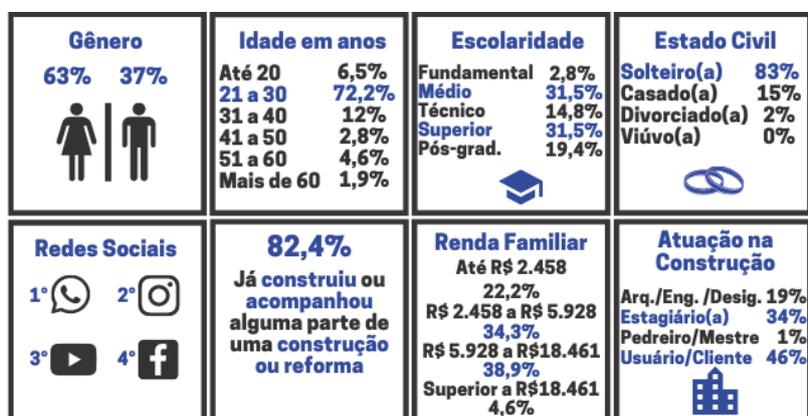


Figura 2. Caracterização do perfil do consumidor

Diante desse perfil de consumidor, as principais estratégias comerciais propostas para este produto são: presença e investimento em mídias sociais, apresentação de palestras e presença de stands em congressos e eventos da construção civil, envio de ebooks, parcerias com profissionais e projetistas e a produção de vídeos didáticos sobre a construção a partir de painéis pré-fabricados.

3.2 Análise do Mercado

Com a realização da análise de mercado foi possível obter os concorrentes diretos e indiretos do objeto de estudo. Os concorrentes diretos são outros tipos de painéis encontrados no mercado e na literatura, como o painel com núcleo de EPS e o com núcleo em concreto poroso. Já os concorrentes indiretos são produtos que possuem a mesma função, podendo substituir os painéis, dentre eles: parede de alvenaria com bloco cerâmico, parede de concreto e drywall.

Os dados de CO₂ embutido e transmitância térmica dos concorrentes diretos e indiretos foram obtidos na literatura. Os valores de CO₂ embutido e transmitância térmica estão apresentados na Tabela 1. Nota-se que o valor de CO₂ embutido do painel proposto é inferior ao painel de EPS, que é o mais encontrado no mercado, e inferior à parede de concreto. O valor de transmitância térmica é inferior a todos os concorrentes indiretos, que são as formas de construção mais consolidadas no meio da construção civil brasileira atual. Ao utilizar o painel deste estudo, é possível reduzir a troca de calor com o ambiente externo, preservando a temperatura interna e viabilizando maior conforto para os usuários, além de diminuir os gastos energéticos com aparelhos de arrefecimento. Assim, o painel tem um apelo ambiental e sustentável, pois insere resíduos ao processo produtivo e é

capaz de reduzir o consumo de energia na fase de uso e operação das edificações, contribuindo para a diminuição das emissões de CO₂ pela indústria da construção civil.

Tabela 1. CO₂ embutido e transmitância térmica do painel proposto e seus concorrentes

| Concorrentes diretos | | |
|--|---|---|
| Painéis | CO ₂ embutido (kgCO ₂ /m ²) | Transmitância térmica (W/m ² .K) |
| Painel proposto Geopolímero de RBMF (2,5cm) + Geopolímero de metacaulim (10cm) + Geopolímero de RBMF (2,5cm) | 26,30 (Valor estimado pelos autores) | 0,88* (NADIA <i>et al.</i> , 2013) |
| Painel com núcleo em EPS Concreto (3cm) + EPS (9cm) + Concreto (3cm) | 32,00 (HOU <i>et al.</i> , 2020) | 0,36 (HOU <i>et al.</i> , 2020) |
| Painel com núcleo em concreto poroso Concreto sustentável (2,5cm) + Concreto poroso (10cm) + Concreto sustentável (2,5cm) | 15,80 (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2022) | 0,45 (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2022) |
| Concorrentes indiretos | | |
| Vedação vertical | CO ₂ embutido (kgCO ₂ /m ²) | Transmitância térmica (W/m ² .K) |
| Parede de alvenaria com bloco cerâmico vazado Emboço (2,5cm) + Bloco cerâmico vazado (9cm) + Emboço (2,5cm) | 24,00 (PARES, 2020) | 2,42 (CASTRO, 2019) |
| Parede de concreto (10cm) | 41,80 (ICE, 2019) | 4,40 (O'HEGARTY; KINNANE, 2020) |
| Drywall (1,25cm) | 9,50 (COSTA, 2012) | 5,80 (RAHMANIAN; WANG, 2012) |

* Valor estimado com base no núcleo de geopolímero poroso à base de metacaulim e hidróxido de sódio

3.3 Desenvolvimento Técnico e Financeiro

A Figura 3 apresenta todos os custos relacionados à produção e transporte dos painéis sanduíche que foram levantados para determinar a precificação do produto. A Tabela 2, por sua vez, apresenta os valores relacionados às receitas. A partir destas informações, foi detectado que o custo unitário do painel é de R\$ 106,81/m². Com isso, sugere-se que o preço de venda do produto seja de R\$ 135,00/m², que é 26,39% superior ao custo unitário e o mesmo valor comercial do seu principal concorrente de mercado, os painéis de núcleo de EPS, dominante no mercado. Salienta-se que os usuários estão dispostos a pagar até 15% a mais em um produto que seja mais sustentável. Diante desta informação, o painel geopolimérico tem maior competitividade ao ter seu preço comercial igualado ao de seu principal concorrente.



Figura 3. Composição dos custos de produção dos painéis geopoliméricos

Tabela 2. Informações relacionadas à receita

| Informações mensuradas | Quantidade | Detalhamento |
|---|------------|---|
| Capacidade de produção mensal (m ²) | 5640 | Com essa produção é possível atender até 20 casas de padrão normal com 106m ² em planta e 213m ² de vedações verticais. |
| Custo (R\$/m ²) | 106,81 | Referente ao custo total mensal dividido pela capacidade produtiva. |
| Preço unitário com transporte (R\$/m ²) | 135,00 | |
| Receita bruta (R\$) | 761.397,13 | Considerando a capacidade de produção mensal |
| Receita líquida (R\$) | 689.064,41 | Considerando dedução de 9,5% referente ao Simples Nacional (Inclui IRPJ, IPI, CSLL, COFINS, PIS/PASEP, CPP, ICMS e ISS). |
| Lucro operacional bruto mensal (R\$) | 86.645,60 | Referente à receita líquida com subtração dos custos totais mensais. |

| Informações mensuradas | Quantidade | Detalhamento |
|--|--------------|--|
| Lucro operacional líquido mensal (R\$) | 80.645,60 | Referente ao lucro operacional bruto com dedução de serviços e custos com advogados, por exemplo. |
| Ponto de equilíbrio (m²) | 2.818 | Custo (custo fixo + custo variável operacional + custo variável de insumos para produção) + impostos = preço unitário dos painéis x quantidade de painéis vendidos (m²). |
| Ponto de equilíbrio (nº de casas) | 13 | Quantidade de casas atendidas (padrão normal) para alcançar o ponto de equilíbrio. |
| Capital de giro (R\$) | 1.204.837,62 | Referente ao custo total para manter a produção por 2 meses. |
| Investimento total inicial (R\$) | 1.851.966,24 | Referente à soma do custo inicial, custos fixos, custos variáveis e capital de giro. |
| Resumo dos Custos | | |
| Custo inicial (R\$) | 647.129 | Valor referente à abertura |
| Custo fixo operacional (R\$) | 53.094 | Valores referentes ao período de um mês |
| Custo variável operacional (R\$) | 33.422 | |
| Custo variável de insumo para produção (R\$) | 515.903 | |
| Custo total mensal (R\$) | 602.419 | Referente à soma do custo fixo operacional, custo variável operacional e custo variável de insumos para produção |

A estratégia sugerida para se obter recursos é por meio do investimento inicial de investidores anjo, que consiste em investir em empresas iniciantes que ainda não estão estabelecidas no mercado. Os investidores anjos são considerados sócios e têm direito a receber até 50% dos lucros da empresa por um período de até cinco anos (BRASIL, 2021). Assim, recomenda-se que o investimento inicial seja realizado por, pelo menos, dois anjos e, em troca, recebem 70% do lucro operacional líquido, mensalmente, durante os dois primeiros anos.

Caso dois investidores anjos apliquem R\$ 925.983,00 cada um e recebam 35% do lucro operacional líquido, em 33 meses o investimento inicial poderá ser quitado e em mais 27 meses o lucro obtido será de R\$ 767.574,40. Este montante equivale a rentabilidade de aproximadamente 82% em cinco anos. Por fim, 30% do lucro mensal remanescente (R\$ 24.193) deve ser reinvestido na expansão do empreendimento durante cinco anos. Sugere-se, dessa forma, realizar duas rodadas de investimento com as estratégias apresentadas na Figura 4.

| 1ª Rodada de Investimento | | 2ª Rodada de Investimento | |
|---------------------------|---|---------------------------|--|
| Duração | Ações | Duração | Ações |
| 5 anos | <ul style="list-style-type: none"> Abertura da empresa Entrada no mercado Expansão 70% do lucro destinado para Investidores Anjo 30% do lucro destinado para a empresa | 1 ano | <ul style="list-style-type: none"> Consolidação da empresa no mercado 20% do lucro destinado aos Investidores Anjo 40% do lucro destinado à empresa 13,3% do lucro destinado para cada sócio |

Figura 4. Estratégias de rodadas de investimento

4 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou a viabilidade técnica e financeira de painéis geopoliméricos pré-moldados do tipo sanduíche. Para isso, foi traçado o perfil do consumidor, analisando as características de

mercado e foi elaborado técnica e financeiramente o painel geopolimérico a partir dos materiais desenvolvidos por Defáveri *et al.* (2019) e Nadia *et al.* (2023).

Foi constatado que os usuários são suscetíveis a utilizar métodos construtivos inovadores, como os painéis sugeridos, e estão dispostos a pagar um preço mais elevado por um produto com menor emissão de CO₂ e maior conforto térmico. Definiu-se que o concorrente direto do painel proposto é o painel sanduíche com núcleo de espuma e que os concorrentes indiretos são as paredes convencionais de alvenaria. O custo unitário do painel geopolimérico é de R\$106,81/m² e pode ser vendido por R\$135,00/m². Este valor é idêntico ao seu concorrente direto.

O estudo identificou que a fábrica de painéis geopoliméricos pré-moldados é viável tecnicamente e financeiramente considerando os parâmetros adotados neste estudo. O painel proposto é composto de material residual em sua composição, atuando de forma ativa na inserção de resíduos sólidos no ciclo produtivo, favorecendo a economia circular e evitando a extração desnecessária de recursos naturais. Os painéis oferecem melhor desempenho térmico para a edificação, o que pode reduzir o consumo de energia com uso de aparelhos climatizadores. O produto possui um método racionalizado de execução que gera economia de mão de obra quando comparado aos concorrentes indiretos. Assim, espera-se com este estudo incentivar que os materiais desenvolvidos no meio acadêmico sejam aplicados no mercado, promovendo uma indústria da construção civil mais sustentável.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016) NBR 11675: Divisórias leves internas moduladas - Verificação da resistência aos impactos. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). NBR 15575: Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR 15900: Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). NBR 16475: Painéis de parede de concreto pré-moldado - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações - Versão corrigida. Rio de Janeiro: ABNT.
- Brasil. (2021). Lei complementar nº 182, de 1º de junho de 2021 - Institui o marco legal das startups e do empreendedorismo inovador; e altera a Lei no 6.404, de 15 de dezembro de 1976, e a Lei Complementar no 123, de 14 de dezembro de 2006. (p. 8). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/Lcp182.htm. Data de acesso: 16 de junho de 2022.
- British Standards Institution. (2011) BS EN 14992: Precast concrete products. Wall elements.
- Carvalho, J. M. F. et al. (2020). Enhancing the eco-efficiency of concrete using engineered recycled mineral admixtures and recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120530. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120530>
- Carvalho, A. R. et al. (2023). Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid. *Construction and Building Materials*, v. 403, Nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133078>

- Castro, Y. V. P. (2019). Estudo da transmitância térmica de paredes e sua influência no consumo de energia de uso de edificações. Orientador: Pedro Kopschitz. 80f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- Costa, B. L. C. (2012). Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Davidovits, J. (2020). Geopolymer: Chemistry & Applications. 5ª Edição. França: Institut Géopolymère.
- Defáveri, K., C. S. et al. (2019) Iron Ore Tailing-Based Geopolymer Containing Glass Wool Residue: A Study of Mechanical and Microstructural Properties. *Construction and Building Materials*. v. 220, p. 375-385.
- Durante, L. C.; Callejas, I. J. A.; Amaral, G. M. (2020) Energia embutida de uma habitação: abordagem considerando as fases do ciclo de vida. In: Durante et al. (2020) *Habitações de Interesse Social [recurso virtual]: Inovações Aplicadas ao desempenho do ambiente construído*. 1 ed., p. 43-73.
- Farias, L. M.; Marinho, J. L. A. (2020). Construções sustentáveis: Perspectivas sobre práticas utilizadas na construção civil. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 16023-16033, mar 2020.
- Flansbjerg, M.; et al (2018). "Composite Behaviour of Textile Reinforced Reactive Powder Concrete Sandwich Façade Elements", *International Journal of Concrete Structures and Materials* 12:71, 01-17.
- Hou, H. et al. (2020). Testing of insulated sandwich panels with GFRP shear connectors. *Engineering Structures*, v. 209. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109954.
- ICE Database - Circular Ecology, Embodied Carbon (2019). <https://circularrecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>. Acesso em: 16 de Junho de 2022.
- International Organization for Standardization. (2020). ISO 717-1: Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation.
- Lamberts, R.; Dutra, L.; Pereira, F. O. (2014). Eficiência energética na arquitetura. 3ª edição. São Paulo: PW.
- Ministério de Minas e Energia - MME; Conselho Brasileiro de Construção Sustentável – CBCS (2022). SIDAC - Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção, São Paulo.
- Nadia, N. F. J. et al. (2023). Comparative study of laterite and metakaolin/hematite-based geopolymers: Effect of iron source and alkalization. *Applied Clay Science*, 2023.
- O'hegarty, R; Kinnane, O. (2020). Review of precast concrete sandwich panels and their innovations, *Construction and Building Materials*, v. 233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117145>
- Oliveira, T. F. et al (2022). Estudo da viabilidade técnica e financeira de uma fábrica de painéis pré-moldados sustentáveis. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 4, Salvador. Anais [...] Salvador: ABMTENC, p. 1385-1397.
- Pesquisa aplicada em materiais e sustentabilidade - PARES 2023. CasaCO. Juiz de Fora. Disponível em: <http://casaco.herokuapp.com/login>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- Rahmanian, I.; Wang, Y. C. (2012). A combined experimental and numerical method for extracting temperature-dependent thermal conductivity of gypsum boards, *Construction and Building Materials*, v. 26, n.1, p. 707-722. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.078>.
- Tchakoute, H. K et al. (2015). D. Influence of gibbsite and quartz in kaolin on the properties of metakaolin-based geopolymer cements. *Applied Clay Science*, v. 107, p. 188- 194.
- Wang, K et al. (2015). Effects of the metakaolin-based geopolymer on high-temperature performances of geopolymer/PVC composite materials. *Applied Clay Science*, v. 114, p. 586-592.
- World Business Council for Sustainable Development. (2017). *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Geneva: CSI.
- Xu, M. X. et al. (2015). Preparation and characterization of a self-supporting inorganic membrane based on metakaolin-based geopolymers. *Applied Clay Science*, v. 115, p. 254-259.
- Zeng, S.; Wang, J. (2016). Characterization of mechanical and electric properties of geopolymers synthesized using four locally available fly ashes. *Construction and Building Materials*, v. 121, p. 386-399.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e a Universidade Federal de Juiz de Fora, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto (PROPEC-UFOP), à Pró-reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPPi-UFOP) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo apoio e financiamento das bolsas de doutorado de Aldo Ribeiro de Carvalho e Júlia Assumpção de Castro.