

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND E ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS

Comparative Analysis between Portland Cement and geopolymer mortars

Évelyn Magalhães de Carli, aluna do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

evelynmagal@gmail.com

Joana Berno Rott, Engenheira Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ.

joana_rott@outlook.com

Emilia Jarutais Fensterseifer, aluna do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

emilia.fenst@gmail.com

Gihad Mohamad, professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

gihad@ufsm.br

Alexandre Silva de Vargas, professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

alexandre.vargas@ufsm.br

Resumo

O processo produtivo do cimento Portland é responsável por um elevado índice de emissões de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. Diante disso, os geopolímeros surgem como uma nova classe de ligantes alternativos ao cimento Portland, a fim de reduzir o impacto ambiental gerado por esse material. Portanto, o presente artigo tem por objetivo principal realizar uma análise comparativa entre argamassas à base de cimento Portland e argamassas geopoliméricas, com a finalidade de compreender as vantagens e desvantagens apresentadas por essa nova classe de ligantes. Diante da análise do processo produtivo, emissão de carbono, resistência à compressão axial, resistência a altas temperaturas e resistência a ataques químicos e, comparação dessas propriedades, foi possível concluir que as argamassas geopoliméricas podem ser um material alternativo às argamassas cimentícias à base de cimento Portland.

Palavras-chave: Geopolímeros; Impacto ambiental; Emissões

Abstract

The Portland cement production process is responsible for a high level of carbon dioxide (CO_2) emissions in the atmosphere. Therefore, geopolymers appear as a new class of alternative binders to Portland cement, in order to reduce the environmental impact generated by this material.

Therefore, the present article has as main objective to carry out a comparative analysis between Portland cement-based mortars and geopolymeric mortars, in order to understand the advantages and disadvantages presented by this new class of binders. In view of the analysis of the production process, carbon emission, resistance to axial compression, resistance to high temperatures and resistance to chemical attacks and, comparing these properties, it was possible to conclude that geopolymer mortars can be an alternative material to cement-based cement mortars Portland.

Keywords: Geopolymers; Environmental impact; Emissions

1. Introdução

O setor cimenteiro vem apresentando um crescimento representativo ao longo dos últimos 15 anos. Conforme dados cedidos pela U.S. Geological Survey (2019), estima-se que a produção mundial de cimento atingiu valores iguais a 2,3 bilhões de toneladas no ano de 2005. Já no ano de 2019, essa produção apresentou valores iguais a 4,1 bilhões de toneladas.

Aliado a isso, a indústria cimenteira é a segunda maior emissora de dióxido de carbono (CO₂) no mundo, sendo responsável por 7% das emissões globais. Para cada tonelada de cimento produzida emite-se em torno de 0,56 toneladas de CO₂ para cada tonelada (SNIC, 2019).

No Brasil, esse setor obteve um crescimento de 3,6% nas vendas do mercado interno em 2019. Diante disso, finalizou o ano com um montante de 54,5 milhões de toneladas de cimento vendidas (SNIC, 2019). A Figura 1 apresenta dados fornecidos pelo Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (2019), referentes à produção de cimento no Brasil desde o ano de 2005.

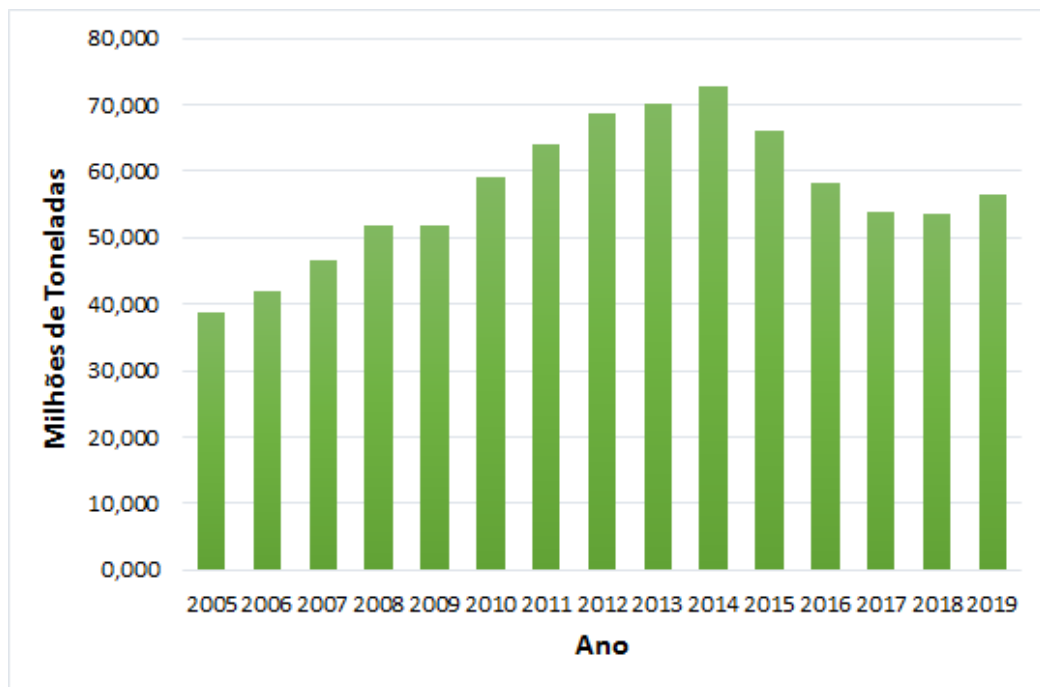


Figura 1 - Produção de cimento no Brasil. Fonte: SNIC (2019).

Diante disso, tendo em vista o crescimento apresentado pelo setor cimenteiro, torna-se bastante pertinente a busca por alternativas de mitigação dos impactos ambientais, gerados pelo processo produtivo do cimento Portland.

Desta forma, a Agência Internacional de Energia (EIA, 2018) desenvolveu um roteiro tecnológico com estratégias que visam à redução das emissões de CO₂ geradas pela indústria cimenteira. Dentre as quais, pode-se citar o desenvolvimento de ligantes cimentícios de menor impacto ambiental.

Os geopolímeros são ligantes pertencentes ao grupo dos materiais álcali-ativados, ou seja, são produzidos a partir da reação entre uma solução alcalina (ativador) e um material aluminossilicato amorfo (precursor). Tendo em vista que são ligantes isentos de clínquer em sua composição, esses materiais se apresentam como uma alternativa atrativa ao cimento Portland, com reduzido impacto ambiental gerado em seu processo produtivo (PROVIS e BERNAL, 2014).

Portanto, o presente artigo tem por objetivo principal realizar uma análise comparativa entre argamassas à base de cimento Portland e argamassas geopoliméricas, com a finalidade de compreender as vantagens e desvantagens apresentadas por essa nova classe de ligantes.

2. Metodologia

Para o desenvolvimento do presente estudo adotou-se uma abordagem metodológica baseada na literatura e pesquisa documental. Foi realizado um estudo comparativo entre as argamassas à base de cimento Portland e as argamassas geopoliméricas sob os aspectos de processos produtivos, resistência à compressão, resistência ao fogo e resistência a ataques químicos destas argamassas.

2.1 Processo produtivo

A argamassa é um material de construção civil, que resulta da mistura entre água, areia e cimento Portland (principal componente da mistura). O cimento Portland, consiste em um aglomerante hidráulico que endurece e permanece estável sob ação da água. O processo produtivo desse material é responsável por um alto consumo de energia térmica para a produção de clínquer, seu principal constituinte, consumindo em torno de 3,50 GJ/t de clínquer produzido (MEHTA; MONTEIRO, 2015; IEA, 2018).

A clinquerização, consiste na queima da mistura de matérias primas (calcário, argila e minério de ferro), que para a formação do clínquer são levadas a temperaturas em torno de 1450°C. Desta forma, para que as reações químicas de formação do clínquer ocorram, a temperatura de chama do forno deve ser em torno de 2000°C. Ocorridas as reações, o clínquer passa pelo processo de resfriamento e, após, é armazenado. Por conseguinte, faz-se a moagem do clínquer com gesso resultando na produção do cimento Portland (CEMBUREAU, 2019; SNIC, 2019).

Já nas argamassas geopoliméricas, tem-se a substituição do cimento Portland por geopolímeros. Esses ligantes, por sua vez, possuem um processo produtivo distinto do cimento Portland. A produção dos geopolímeros ocorre a partir da reação entre um material aluminossilicato amorfo (precursor) e uma solução alcalina (ativador), a partir de proporções adequadas entre os reagentes. A partir dessa reação, tem-se a formação de um

material endurecido com uma microestrutura tridimensional amorfa de átomos de sílica e alumina (KWASNY et al., 2018).

Ainda, segundo o mesmo autor, diferentes fontes de aluminossilicatos podem ser utilizadas como precursores para a produção de geopolímeros, desde resíduos até subprodutos industriais. Dentre as fontes mais comuns, pode-se citar o metacaulim, diferentes tipos de argilas calcinadas, escórias e cinzas. Além disso, como ativadores, os materiais mais comuns empregados são os silicatos de sódio ou de potássio, hidróxidos de sódio ou de potássio solúveis, que misturados com água resultam em soluções alcalinas.

No entanto, cabe ressaltar que as propriedades adquiridas pelas argamassas geopoliméricas dependerão da composição química e grau de amorficidade do material precursor, assim como o ativador(es) utilizado(s) e sua concentração. Diante disso, a partir de combinações distintas entre precursor e ativador, será possível obter propriedades e características diferentes (ROCHA, 2017).

2.2 Emissão de carbono

Borges et al. (2014) realizaram estudos sobre geopolímeros compostos por uma mistura de metacaulim, hidróxido de sódio e silicato de sódio. Os autores constataram que o consumo energético envolvido na produção desses componentes tem ligação direta com as suas matérias-primas. Uma vez que é necessário realizar a queima de combustíveis fósseis, a fim de gerar calor para transformar os materiais e, conseqüentemente, resultando em emissões de CO₂ na atmosfera.

De acordo com Pinto (2006), para a produção de 1 kg de clínquer é gerado 1 kg de CO₂ emitido na atmosfera, sendo que a emissão de CO₂ na produção do cimento tem relação com a proporção de clínquer neste aglomerante hidráulico, variando entre 0,5 e 0,95 (WORRELL *et al.*, 2001). Em contrapartida, a produção de geopolímeros emite seis vezes menos CO₂ quando comparada à fabricação de cimento Portland, (NOGUEIRA; ALVES, 2018). Portanto, a produção de CO₂ pode variar de 500 a 950 kg emitidos na atmosfera durante a produção de 1000 kg de clínquer para cimento e para produção de geopolímeros esse valor pode variar de 200 kg para 380 kg de emissão de CO₂.

Além disso, conforme estudos desenvolvidos por Davidovits (2002), os aluminossilicatos naturais são modificados em baixas temperaturas e possuem consumo energético reduzido em sua fabricação quando comparados ao cimento Portland. Conseqüentemente, a produção de gás carbônico é menor no processo de produção de polímeros inorgânicos, devido à utilização de argilominerais naturais e sintéticos.

Devido a isso, novas pesquisas devem ser realizadas para estudar o reaproveitamento de materiais alternativos com características próximas às do silicato de sódio. Uma vez que, o processo produtivo desse material gera altas emissões de CO₂ e apresenta um custo de mercado elevado (CARRASCO; PUERTAS, 2017). Destaca-se ainda, a cinza de casca de arroz como uma fonte promissora de silicato de sódio com reduzido impacto ambiental (CONCEIÇÃO, 2019).

2.3 Resistência à compressão axial

Metha et al. (2014) define a resistência como a capacidade de resistir à tensão sem se romper. Dito isso, Tristão (1995) determina que fatores como recalque (movimentação da

fundação), variação de temperatura (causadores de dilatação ou contração), entre outros, devem ser resistidos pelas argamassas, sem comprometer a sua durabilidade.

A resistência à compressão das argamassas se inicia com o endurecimento e aumenta continuamente com o tempo (SANTOS; PRUETER; SADULA, 2013). Enquanto argamassas exclusivamente de cal e areia desenvolvem pouca resistência, lentamente, dependendo de fatores ambientais, as argamassas de cimento desenvolvem a resistência à compressão esperada com pouca dependência das condições ambientais.

Nas argamassas cimentícias, quanto maior o teor de cimento, maior serão as resistências à compressão e à tração. Além disso, Kretzer (2020) mostra que pequenas quantidades de cal também podem influenciar na resistência positivamente. Por outro lado, altos valores da relação água/cimento resultam na diminuição da resistência das argamassas (QUARCIONI; CINCOTTO, 2005).

Já nas misturas de argamassas geopoliméricas, Zhang et al. (2018) apresentam que o primeiro parâmetro a ser considerado é a resistência à compressão. Porém, conforme Kretzer (2020), como existem muitos tipos de material de base para a produção de geopolímeros, cada um desses materiais e sua proporção afetam de forma diferente a resistência à compressão.

Conforme Ken et al. (2015), em geral, a resistência à compressão cresce com o aumento da concentração do ativador alcalino. Os ativadores mais utilizados são: hidróxido de cálcio ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de sódio (NaOH) + carbonato de sódio (Na_2CO_3), hidróxido de potássio (KOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3) (KRETZER, 2020). Ainda, a autora mostra que diversos estudos desenvolvidos apontam o silicato de sódio como o ativador com maior potencial, enquanto o hidróxido de potássio possui o menor potencial, destacando o diâmetro iônico entre o sódio e o potássio como principal fator causador desta diferença.

Segundo Kretzer (2020), os geopolímeros exibiram melhores resultados de resistência à compressão com o aumento de substituição de cinza volante (CV) por escória granulada de alto forno (EGAF). Diante disso, conforme Chi et al. (2013), a razão de cinza volante e escória granulada de alto forno é um fator de extrema importância no desenvolvimento da resistência.

Zahn et al. (2020) desenvolveram um estudo comparativo entre argamassas convencionais de cimento Portland e argamassas geopoliméricas, produzidas a partir da mistura de metacaulin, hidróxido de sódio, sílica ativa e areia fina. Ao avaliar a resistência à compressão das argamassas, os autores constataram que as argamassas geopoliméricas apresentaram valores superiores às argamassas convencionais (à base de cimento Portland), como pode ser observado na Figura 2.

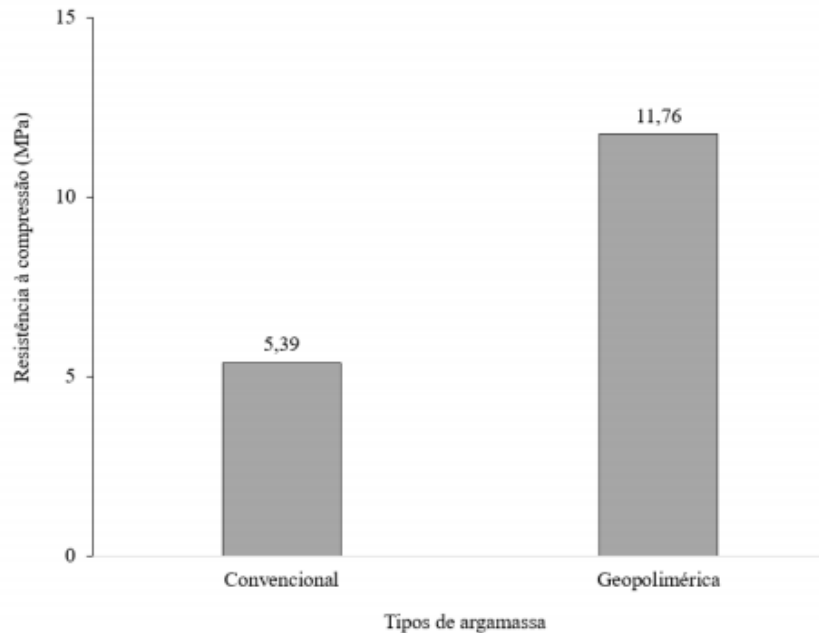


Figura 2 - Resistência à compressão de argamassas convencionais e geopoliméricas. Fonte: Zahn et al. (2020).

2.4 Resistência a altas temperaturas

A exposição a elevadas temperaturas tem influência significativa na durabilidade das argamassas. Desta forma, realizar a análise de seus comportamentos frente a essas condições é uma forma de caracterizar as argamassas em função das propriedades do seu ativador (ROCHA, 2017).

Os geopolímeros apresentam alta resistência térmica, visto que são compostos de matérias-primas naturais ou resíduos industriais. Um estudo realizado por Davidovits (2011) determinou que ligantes geopoliméricos projetados adequadamente, podem apresentar resistência ao fogo com temperaturas de até 1200°C. Diante disso, podem ser utilizados como materiais refratários e isolantes de calor, apesar de resultarem de matérias-primas diferentes e com parâmetros de dosagem distintos (ROCHA, 2017).

Mane e Jadhav (2012) comprovaram que as argamassas produzidas com geopolímeros resistem à exposição de elevadas temperaturas. Desta forma, apresentaram um desempenho melhor que as argamassas de cimento Portland, sem que houvesse fragmentação visível nas amostras ensaiadas compostas por geopolímeros.

Sitarz, Hager e Kochanek (2018) analisaram as propriedades de argamassas geopoliméricas e argamassas de cimento Portland, após exposição térmica. As amostras foram aquecidas até 800°C, sendo que ambos os materiais apresentaram um comportamento de perda de densidade com o aumento da temperatura. No entanto, a argamassa geopolimérica apresentou um melhor desempenho térmico frente a elevação de temperatura, quando comparada com a argamassa de cimento Portland.

A partir dos estudos realizados por Sitarz, Hager e Kochanek (2018), foram elaborados gráficos que comparam as resistências à flexão e à compressão entre as argamassas

cimentícias à base de cimento Portland e argamassas geopoliméricas, quando expostas a altas temperaturas conforme Figura 3.

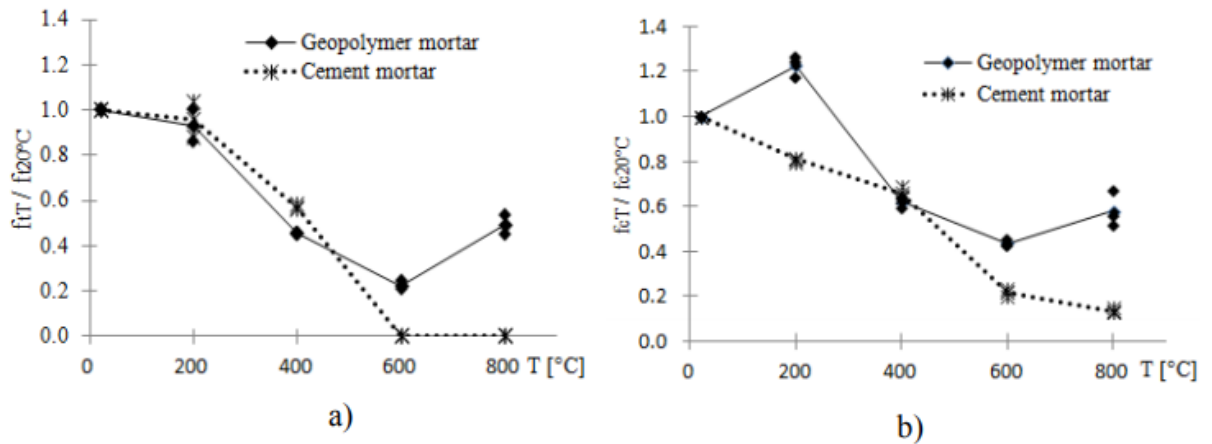


Figura 3 - Mudanças no valores relativos à a) flexão b) resistência à compressão em altas temperaturas. Fonte: Sitarz, Hager e Kochanek (2018).

Conforme Sitarz, Hager e Kochanek (2018), como resultado da exposição a altas temperaturas, as propriedades mecânicas de ambos os materiais deterioraram gradualmente. Como pode ser observado no gráfico a), enquanto a resistência à flexão da argamassa cimentícia cai para zero quando exposta a temperatura de 600°C, a argamassa geopolimérica tem uma queda gradual de resistência até certo ponto, chegando a 20%, porém, quando a temperatura aumenta para 800°C, ocorre um ligeiro aumento da sua resistência.

Por outro lado, como pode ser observado na figura 3b), a argamassa cimentícia apresentou comportamento decrescente para a resistência à compressão, porém, não chega a zero, dentro da faixa de temperatura testada, diferente do resultado de resistência à flexão. Segundo Sitarz, Hager e Kochanek (2018), este comportamento é resultado do processo de desidratação da fase C-S-H, da decomposição da portlandita e do craqueamento, que pôde ser observado na superfície das amostras, quando aquecidas a 600°C e 800°C.

A resistência à compressão da argamassa geopolimérica teve um comportamento diferente. Quando aquecida a 200°C, ocorreu um aumento desta resistência, o que os autores definem ser provavelmente causado pelo processo de geopolimerização progressiva. Quando aquecidas a 400°C e 600°C, as amostras apresentaram uma diminuição progressiva da resistência à compressão, porém, assim como ocorrido no estudo da resistência à flexão, quando o material foi aquecido a 800°C, ocorreu um aumento de resistência. Este comportamento é apontado pelos autores como sendo resultante da sintetização de ingredientes minerais do material.

2.5 Ataques químicos

Nos estudos do comportamento de um material exposto a ataques químicos, a principal propriedade analisada é a durabilidade. Segundo Mauri et al. (2009), a procura por alternativas para a substituição do cimento, sobretudo considerando condições de

exposição a ambientes agressivos, objetiva maior durabilidade. Além disso, os autores também apontam que outro ponto importante na busca pela substituição do cimento é a mitigação dos efeitos negativos do emprego de cimento portland, principalmente, os impactos ambientais.

Dentre os ataques químicos mais frequentes, citam-se os ataques por sulfatos e por ácidos. Nas estruturas de materiais cimentícios, estes ataques afetam principalmente a durabilidade do material, a longo prazo.

Conforme os estudos de Al-Akhras (2006) e de Metha et al. (2014), a exposição do material cimentício a um ambiente sulfatado como água subterrânea, água do mar ou solo, conduz o elemento à expansão e fissuração, aumentando assim, a permeabilidade e a entrada de água, resultando na deterioração do material. O ataque por ácidos, por outro lado, afeta a estrutura da matriz cimentícia através do fenômeno de lixiviação, além de causar a sua degradação gradativa.

O cimento geopolimérico, que aparece como alternativa de substituição total ou parcial do cimento portland em argamassas e outros compostos, apresenta grande potencial. Uma vez que, sua qualidade está condicionada à natureza do material de origem. Em seu estudo, Mauri et al. (2009) mostram que, no caso de produtos obtidos por calcinação, como o metacaulim, o geopolímero apresenta boas características de resistência química, se comparado a produtos de origem não-calcinada.

3. Resultados e discussão

A partir da revisão bibliográfica realizada no presente estudo, foi possível constatar que as argamassas geopoliméricas possuem um processo produtivo simplificado quando comparadas às argamassas de cimento Portland. No entanto, ao produzir esse material, constatam-se algumas dificuldades referentes à dosagem, visto que a partir de combinações distintas entre precursor e ativador, será possível obter propriedades e características diferentes.

Diante disso, novas pesquisas nessa área são muito importantes, pois visam explorar os materiais disponíveis para o emprego em argamassas geopoliméricas e suas combinações ideais.

Conforme os estudos realizados referentes às emissões de dióxido de carbono (CO_2), afirma-se que as emissões geradas pelas argamassas geopoliméricas são significativamente inferiores às emissões geradas pelas argamassas convencionais de cimento Portland. Acredita-se que isso ocorra devido às diferenças encontradas nos processos produtivos dos materiais.

Referente às propriedades mecânicas, diversos estudos concluíram que as argamassas geopoliméricas apresentam maior resistência à compressão do que as argamassas cimentícias. Salientando que estes comportamentos podem variar, pois dependem dos componentes utilizados na produção dos geopolímeros. Zhang et al. (2018) determinou que, para geopolímeros à base de metacaulim, cinza de óleo de palma e escória granulada de alto forno, a resistência à compressão reduz quando a taxa de substituição de EGAF passa de 35%.

Além disso, conforme as revisões realizadas, as argamassas geopoliméricas apresentam resistência a elevadas temperaturas superior às argamassas de cimento Portland. Uma vez

que, as argamassas de cimento Portland sofrem reduções das suas propriedades mecânicas, quando elevadas a temperaturas maiores que a temperatura de decomposição da portlandita (SITARZ; HAGER; KOCHANNEK, 2018).

De acordo com as análises realizadas a respeito da resistência a ataques químicos, constata-se que argamassas geopoliméricas apresentam um melhor comportamento frente a ambientes agressivos quando comparadas com as argamassas à base de cimento Portland. Acredita-se que isso ocorra, pois é possível utilizar materiais calcinados para a produção de geopolímeros e esses, por sua vez, proporcionam uma maior resistência a ataques químicos.

4. Considerações finais

Com base no presente artigo, pôde-se concluir que as argamassas geopoliméricas apresentam resistência à compressão, resistência a ataques químicos e resistência a elevadas temperaturas superiores, quando comparadas às argamassas de cimento Portland. Todavia, apesar de possuírem um processo produtivo simplificado e com reduzidas emissões de CO₂ na atmosfera, esse material apresenta uma dosagem complexa, que demanda maior atenção.

Devido a isso, cabe ressaltar que, mesmo com diversas vantagens apresentadas pelo emprego dos geopolímeros, é necessário que sejam desenvolvidas novas pesquisas a respeito do tema. Deste modo, será possível explorar os materiais disponíveis para a utilização como precursores e ativadores e, estudar suas combinações ideais.

Além disso, acredita-se que a obtenção de novos conhecimentos a respeito dos geopolímeros, tornará possível a elaboração de normativas e pareceres técnicos, dando início a uma produção em larga escala.

Referências

AL-AKHRAS, N.M., “Durability of metakaolin concrete to sulfate attack”, **Cement and Concrete Research**, v. 36, pp. 1727-1734, 2006.

BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun. 2014.

CARRASCO, M. T.; PUERTAS, F. Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers. **Revista Ingeniería de Construcción, RIC**, v. 32, n. 2, p. 5-12, 2017.

CEMBUREAU (The European Cement Association). **The story of cement manufacture. Bruxelas**, 2019. Disponível em: https://cembureau.eu/media/drylkjo0/manufacturing-process-factsheet_update-jan2021.pdf. Acesso em: 20 de janeiro de 2021.

CONCEIÇÃO, L. C. S. **Avaliação de parâmetros físico-químicos na produção de geopolímeros constituídos por vidro vulcânico e silicato de sódio alternativo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UNISINOS, São Leopoldo, 2019.

- KRETZER, Manuela B. **Argamassas com cimento geopolimérico à base de metacaulim, cinza volante e escória granulada de alto forno ativado por solução alcalina de silicato**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UDESC, Joinville, Santa Catarina, 2020.
- CHI, Maochieh; HUANG, Ran. Binding mechanism and properties of alkali-activated flyash/slag mortars. **Construction and Building Materials**. Vol. 40, p. 291-298. 2013.
- DAVIDOVITS, J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. In: **Geopolymer 2002 Conference**, 2002. Melbourne, Australia, 2002.
- DAVIDOVITS, J. Geopolymer, chemistry and applications. 2011. **Institute geopolimere**, Saint-Quentin, 2011.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap-Low-carbon Transition in the Cement Industry**. World Business Council for Sustainable Development, France, 66pg, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>. Acesso em: 10 de janeiro de 2021.
- KEN, Part Wei; RAMLI, Mahyuddin; BAN, Cheah Chee. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. **Construction and Building Materials**. Vol. 77, p.370-395, 2015.
- KRETZER, Manuela B. **Argamassas com cimento geopolimérico à base de metacaulim, cinza volante e escória granulada de alto forno ativado por solução alcalina de silicato**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UDESC, Joinville, Santa Catarina, 2020.
- KWASNY, Jacek; SOUTSOS, Marios N.; MCINTOSH, John A.; CLELAND, David J. Comparison of the effect of mix proportion parameters on behaviour of geopolymer and Portland cement mortars. **Construction and Building Materials**. Vol. 187, p. 635-651, 2018.
- MANE, S.; JADHAV, H. S. Investigation of Geopolymer Mortar and Concrete Under High Temperature. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 2, n. 12, p. 384-390, 2012.
- MAURI, J.; DIAS, D. P.; CORDEIRO, . C.; DIAS, A. A. Argamassa geopolimérica: estudo da degradação por sulfato de sódio e ácido sulfúrico. 2009. **Revista Matéria**, v. 14, n.3, pp. 1039 - 1046, 2009.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2ª ed. Editora IBRACON, São Paulo, 2014.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: microstructure, properties, and materials. New York: McGraw-Hill Education, 4. ed., 2015.
- NOGUEIRA, A. S.; ALVES, L. A. O uso de geopolímeros como alternativa sustentável na construção civil. **Projectus**, v. 3, n. 4, p.18-29, 2018.
- PINTO, A.T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2006.

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

QUARCIONI, Valdecir Ângelo; CINCOTTO, Maria Alba. Influência da cal em propriedades mecânicas de argamassas. In: **Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**, 6, 2005. Florianópolis, Santa Catarina. Anais...Florianópolis, 2005, p.233-250.

ROCHA, T. da S. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores e seus comportamentos frente à elevação da temperatura**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em:https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wp-content/uploads/sites/3/2017/12/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Thais-da-Silva-Rocha_2017.pdf. Acesso em: 10 de janeiro de 2021.

SANTOS, Jaqueline C. P. dos; PRUETER, Luiz Guilherme; SADULA, Tatyana. Trabalho de conclusão de curso. (Curso Superior de Tecnologia em Concreto). UTFPR, Curitiba, Paraná, 2013.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>. Acesso em: 10 de janeiro de 2021.

SITARZ, M.; HAGER, I.; KOCHANNEK, J. Effect of High Temperature on Mechanical Properties of Geopolymer Mortar. **MATEC Web of Conferences**, v. 163, 2018.

TRISTÃO, Fernando Avancini. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. 1995. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information>. Acesso em 10 de janeiro de 2021.

WORRELL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N.; HENDRIKS, C.; MEIDA, L. O. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. **Annual Review of Energy and Environment**. v. 26, p. 303-329, 2001.

ZAHN, E. J. S.; MELLO, M. F. de.; BRAGA, V. R.; SAMPAIO, Y. A.; JESUS, A. M. de. Estudo comparativo das propriedades das argamassas de cimento portland e geopolímero. **Revista Saberes da UNIJIPA**. Vol. 16, nº 1, p. 75 - 85, 2020.

ZHANG, Peng; ZHENG, Yuanxun; WANG, Kejin; ZHANG, Jinping. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. **Composites Part B: Engineering**. Vol. 152, p. 79 - 95, 2018.