https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.009

ESTUDO ATRAVÉS DE ENSAIO ACELERADO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ARGAMASSAS DE GEOPOLÍMERO

Neusa Aparecida Munhak Beltrame[1]*, Ronaldo Alves Medeiros-Junior[2]; Franky Bruno Witzke[3]
*Autor de contato: neusamunhakbeltrame@gmail.com

[1, 2, 3] Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, Brasil

RESUMO

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação físico-química que pode provocar a deterioração do concreto e reduzir a vida útil das estruturas. A manifestação patológica ocorre pela interação entre os álcalis (hidróxidos alcalinos), os agregados reativos e a presença da umidade. Nos geopolímeros, a elevada concentração de álcalis em relação ao cimento comum pode torná-los mais suscetíveis à reação álcali-sílica (RAS) e isso tem gerado dúvidas com relação a durabilidade desses materiais. Assim, essa pesquisa teve como objetivo avaliar a reatividade do agregado miúdo em cimento geopolimérico, inclusive se a adição de 10% de pirita poderia potencializar as reações de expansão. Argamassas de cimento Portland também foram produzidas para comparação. O geopolímero foi sintetizado com metacaulim, silicato de sódio e hidróxido de sódio. O monitoramento da variação dimensional e de massa foi realizado por 30 dias na solução de NaOH a 80 ºC. Os resultados mostraram que os geopolímeros, apesar do alto teor de álcalis, apresentaram menor expansão em comparação às misturas de cimento Portland comum. No entanto, uma desagregação superficial com perda de massa ocorreu nestas misturas. A adição de pirita não exerceu influência significativa na variação dimensional e de massa nas argamassas geopoliméricas.

Palavras-chave: reação álcali-agregado, geopolímero, pirita.

ABSTRACT

The alkali-aggregate reaction (AAR) is a physicochemical reaction that can cause concrete deterioration and reduce the service life of structures. The pathological manifestation occurs through the interaction between alkalis (alkaline hydroxides), reactive aggregates and the presence of moisture. In geopolymers, the high concentration of alkalis in relation to common cement can make them more susceptible to the alkali-silica reaction (ASR) and this has raised doubts about the durability of these materials. Thus, this research aimed to evaluate the reactivity of the fine aggregate in geopolymer cement, including whether the addition of 10% of pyrite could potentiate the expansion reactions. Portland cement mortars were also produced for comparison. The geopolymer was synthesized with metakaolin, sodium silicate and sodium hydroxide. The monitoring of the dimensional and mass variation was carried out for 30 days in the NaOH solution at 80 ºC. The results showed that the geopolymers, despite the high alkali content, showed less expansion compared to the common Portland cement mixtures. however, a superficial disaggregation with loss of mass occurred in these mixtures. The addition of pyrite had no significant influence on the dimensional and mass variation in geopolymeric mortars.

Keywords: alkali-aggregate reaction, geopolymer, pyrite.

1. INTRODUÇÃO

A reação álcali-agregado (RAA) é um fenômeno químico que causa deterioração do concreto em várias partes do mundo, inclusive no Brasil. De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018), essa interação envolve os íons hidroxila (OH^-) e os álcalis de sódio e potássio (Na^+ e K^+), com certas fases minerais dos agregados graúdos ou miúdos. Os álcalis de fontes internas podem advir do cimento Portland, dos agregados, das adições minerais, dos aditivos e da água de mistura ou de fontes externas como as águas alcalinas industriais ou marinhas (HASPARYK, 2011). O agregado reativo ou deletério é aquele que reage quimicamente com a solução alcalina e resulta em manifestações patológicas, tais como: destacamento, exsudação de um fluído sílico-alcalino, expansão, fissuração e consequentemente redução das propriedades mecânicas do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014, ABNT NBR 15577-1, 2018).

A reatividade dos agregados está relacionada ao conteúdo de minerais de sílica amorfa e/ou pouco cristalina que, na presença de solução de poros altamente alcalinos, causa a deterioração devido à formação do gel da RAS (reação álcali-sílica). Esse gel pode absorver água por osmose e expandir, levando ao aumento de volume e fissuração devido à pressão interna (MEHTA; MONTEIRO, 2014; POUHET; CYR, 2015; ABNT NBR 15577-1, 2018; RASHIDIAN-DEZFOULI; RANGARAJU, 2021). À medida que as reações ocorrem, as fissuras se propagam e permitem a entrada de maior quantidade de água, intensificando o processo expansivo (HASPARYK, 2011). O padrão típico da fissura originada por esse ataque é similar ao ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Fissuração típica da reação álcali-agregado.



Fonte: https://www.atecnologiadoconcreto.com.br e https://escriba.ipt.br

As reações químicas deletérias são condicionadas, conjuntamente, pelas fases do agregado reativas, pelos hidróxidos alcalinos e pela umidade, conforme apresentado na Figura 2 (HASPARYK, 2011). Isso quer dizer que se a solução de poros conter álcalis dissolvidos (K^+ ou Na^+) e na presença de íons hidroxilas (OH^-), a reação RAA será desencadeada se houver sílica disponível a partir dos agregados quimicamente instáveis. A água é fundamental para o processo de dissolução da sílica, transporte de álcalis e o mecanismo de inchamento do gel da RAA (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A solubilidade da sílica amorfa ou não bem cristalizada é fortemente dependente dos valores de pH, especialmente em faixas de pH alto (POUHET; CYR, 2015).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o fenômeno de RAA é influenciado pelo teor de álcalis do cimento e consumo de cimento do concreto; pela contribuição de íons alcalinos de outras fontes; pela quantidade, dimensão e a reatividade dos constituintes reativos presentes nos agregados; pela disponibilidade de umidade e temperatura do ambiente. A utilização de materiais cimentícios suplementares (metacaulim, escórias, cinza volante, sílica ativa e outros) é um dos métodos mais conhecidos para mitigar a expansão relacionada à reação álcali-sílica em componentes de cimento

Portland (RASHIDIAN-DEZFOULI; RANGARAJU, 2021). Além disso, a substituição de parte do agregado reativo por outro não reativo (25 - 30%), redução da umidade e lavagem do agregado com água doce também tem sido recomendada pela literatura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 2 – Condicionantes para a ocorrência da reação álcali-agregado.



Fonte: Adaptado de Couto (2008) apud Hasparyk (2011).

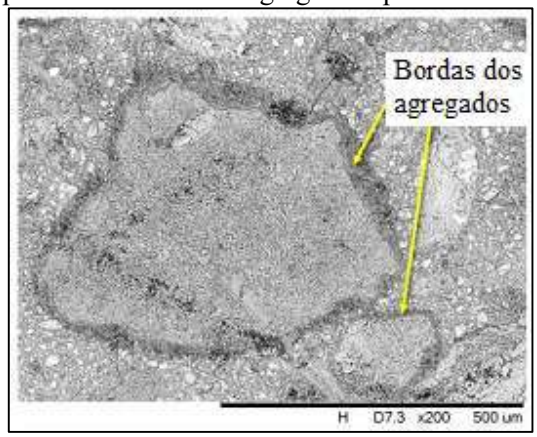
Em cimentos Portland, a RAA e os danos causados por essa reação tem sido amplamente discutida na literatura e muitos estudos sobre o tema têm contribuído para minimizar os efeitos nocivos, quando agregados reativos precisam ser empregados. Contudo, estudos sobre o comportamento dos materiais geopoliméricos ainda é limitado. Os concretos geopoliméricos têm se mostrado atrativos como materiais alternativos ao cimento Portland, devido ao bom desempenho mecânico, baixo impacto ambiental e quimicamente mais estáveis (ROBAYO-SALAZAR; AGUIRRE-GUERRERO; GUTIÉRREZ, 2020; SINGH; MIDDENDORF, 2020). A principal diferença entre o cimento Portland e os geopolímeros está na composição química (BAKHAREV, 2005). O primeiro é formado principalmente por CaO e SiO_2, sendo o CaO presente em maior quantidade, enquanto o segundo é formado, principalmente, por SiO_2 e Al_2O_3, com o SiO_2 em maior quantidade.

Os geopolímeros são sintetizados por meio de uma fonte de aluminossilicatos e ativadores químicos alcalinos que promovem a dissolução de fases amorfas e possibilitam a formação de compostos ligantes (GUO et al., 2020; PARK; POUR-GHAZ, 2018; REPETTE, 2017). Os precursores aluminossilicatos comumente empregados são o metacaulim, a escória de alto forno, a cinza volante e outros, enquanto os ativadores alcalinos têm-se o hidróxido de sódio, o silicato de sódio ou uma combinação desses materiais. O principal produto da reação de ativação geopolimérica é o gel N-A-S-H (aluminossilicato de sódio hidratado) (GRANIZO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2014).

Alguns estudos têm sido realizados para avaliar a reação álcali-agregado em geopolímeros (POUHET; CYR, 2015; RASHIDIAN-DEZFOULI; RANGARAJU, 2021). De acordo com essas pesquisas, os geopolímeros apresentam menor expansão em comparação com o cimento Portland comum devido a menor quantidade de Portlandita (CH); diminuição rápida do pH após a mistura e maior porosidade da matriz geopolimérica. Na ausência do CH, o gel rico em sílica liberado do agregado não é rígido o suficiente para causar danos significativos à pasta, como ocorre nas misturas de cimento Portland. A diminuição rápida do pH não permite a dissolução da sílica dos agregados pelos hidróxidos, reduzindo com isso a formação do gel e o efeito nocivo do RAA. A maior porosidade possibilita a acomodação dos géis na rede porosa sem causar expansão

significativa. No entanto, a penetração do gel nas imediações da pasta e ao redor dos agregados (Figura 3) reduziu o módulo de elasticidade das amostras testadas e foi associada à baixa resistência de ligação da pasta-agregado.

Figura 3 - Aspecto das bordas dos agregados após RAA em geopolímero.



Fonte: Adaptado de Rashidian-Dezfouli; Rangaraju (2021).

A Tabela 1 apresenta o grau de reatividade do agregado em função da expansão aos 30 dias pelo método acelerado de barras de argamassa, de acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018). O agregado é considerado potencialmente inócuo quando as expansões são inferiores a 0,19%, enquanto expansões superiores a 0,19%, o agregado é classificado como potencialmente reativo. Assim, dependendo das condições a que a estrutura de concreto estará exposta e do grau de reatividade do agregado, essa reação deletéria pode gerar expansões intensas em diferentes idades a partir da sua instalação (HASPARYK, 2011).

Tabela 1 – Classificação da reatividade do agregado.

Classificação da reatividade potencial do agregado	Expansão das barras de argamassa aos 30 dias (%)
Inócuo – grau R0	< 0,19
Reativo – grau R1	0,19 a 0,40
Reativo – grau R2	0,41 a 0,60
Reativo – grau R3	> 0,60

Fonte: Adaptado da NBR 15577-1 (2018).

Apesar da NBR 15577-2 (ABNT, 2018) orientar a periodicidade de testes para identificação do potencial reativo dos agregados (a cada seis meses), na prática, essas informações dificilmente são disponibilizadas. Por essa razão, identificar o potencial reativo dos agregados empregados no concreto torna-se necessário para evitar danos às estruturas quando colocadas à serviço, bem como reduzir custos desnecessários com reparos.

De forma análoga aos agregados contaminados com fases reativas da RAA, os sulfetos de ferro, a exemplo da pirita (FeS_2), são minerais igualmente encontrados nos agregados naturais e são responsáveis por reações expansivas; porém, os mecanismos químicos envolvem a liberação de íons sulfatos. A presença do oxigênio e da água são fatores essenciais para o desenvolvimento das reações de oxidação dos sulfetos no interior do concreto, liberação dos íons sulfatos ($SO4^{-2}$) e reação com a pasta de cimento Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Por essa razão, os agregados contendo a pirita também são prejudiciais e inadequados para aplicação em concretos.

Nos cimentos geopoliméricos, os elevados teores de álcalis, provenientes dos ativadores químicos, em relação ao cimento Portland comum podem torná-los mais suscetíveis à reação álcali-sílica e isso tem gerado dúvidas com relação a durabilidade desses materiais. Os teores de álcalis em concretos de cimento comum estão próximos de 2 a 6 kg/m³, enquanto nos geopolímeros essa concentração pode chegar até 40 kg/m³ (POUHET; CYR, 2015). Assim, esse experimento teve como objetivo avaliar a reatividade do agregado miúdo em argamassas geopolimérica e de cimento Portland, inclusive se a adição de pirita poderia potencializar as reações de expansão nestes materiais.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

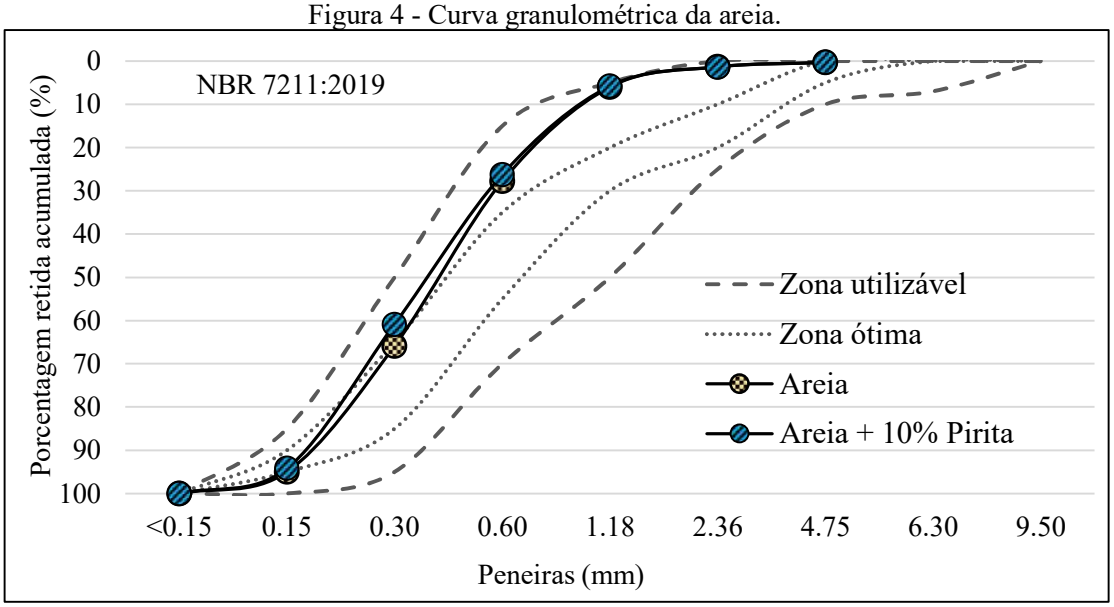
2.1 Materiais e métodos

Um metacaulim comercial com diâmetro médio de 15,63 μm, composto principalmente por quartzo (40,03%), ilita (27,54%), caulinita (22,78%) e microclinio (9,66%) foi utilizado como precursor aluminossilicato. O ativador alcalino foi preparado inicialmente misturando o hidróxido de sódio (NaOH ≈ 99%) com água deionizada e, posteriormente adicionado na solução silicato de sódio. O cimento geopolimérico foi sintetizado com 45,18% de metacaulim, 50,0% de silicato de sódio e de 4,82% de hidróxido de sódio, razão molar Na_2SiO_3 / NaOH = 1,60 e relação Na_2O ativadores / metacaulim = 23,0%. Argamassa de cimento Portland (CP V-ARI RS) também foi produzida para comparação.

Os prismas de argamassas com dimensões de (25 x 25 x 285) mm foram confeccionados com o traço 1: 2,25: 0,47 (cimento: areia: água). A areia utilizada nesta pesquisa apresentou reduzida quantidade de partículas retidas na peneira #2,36 mm (1,02%) e, por essa razão, a areia foi distribuída em 5 frações para realização dos testes, com as seguintes proporções: #2,36 mm (1,02%), #1,18 mm (27,49%), #600 μm (27,50%), #300 μm (27,50%) e #150 μm (16,49%), sendo que 10% em cada faixa foram substituídas por pirita de mesma granulometria para avaliar a reatividade desse material. A curva granulométrica do agregado miúdo natural e com a adição de pirita estão apresentadas na Figura 4. A pirita é um mineral proveniente do beneficiamento de carvão mineral, de granulometria original entre 9,5 e 19 mm, cujos fragmentos foram beneficiados em moinho de bolas para a obtenção de partículas passantes na peneira de 2,36 mm (granulometria da fração mais fina da areia).

A reação álcali-agregado (RAA) entre o agregado miúdo e os álcalis presentes no cimento geopolimérico e no cimento Portland, tais como de sódio e de potássio, foram avaliados com base na NBR 15577-4 (ABNT, 2018), inclusive se a adição de pirita às argamassas poderia potencializar as reações químicas expansivas. Após a mistura e moldagem dos corpos de prova, as amostras foram curadas por 24 horas (23 ± 2) ºC, desmoldadas e imersas em água por mais 24 horas a temperatura de (80 ± 2) ºC. Em seguida, a água foi retirada dos recipientes e substituída pela solução de NaOH (40 g / 1000 g). Três exemplares foram submersos nessa solução e armazenados em estufa (80 ± 2) ºC para monitoramento da expansão e variação de massa por 30 dias. As leituras foram realizadas aos 16 e 30 dias com medições intermediárias em cada período, totalizando nove aferições.

Figura 4 - Curva granulométrica da areia.



Fonte: os autores.

O monitoramento foi realizado com a retirada das barras dos recipientes (uma por vez) e colocadas no suporte metálico acoplado com um relógio comparador de comprimento digital, com resolução de 0,001 mm, calibrado com uma barra padrão de aço. Antes da leitura, as superfícies das amostras foram secas com pano limpo e úmido para a retirada do excesso de água e evitar a evaporação. Foi aceito como leitura padrão o valor final observado no relógio com uma volta completa de 360 graus, observando a mesma posição e sentido de rotação. Imediatamente após as medições, os corpos de prova retornaram para a solução.

As mudanças no comprimento das barras, expansões (positiva) ou retrações (negativa), foram obtidas pela diferença entre o valor medido na idade correspondente (Lx) e a leitura inicial da mesma barra (Li), dividida pelo seu comprimento nominal (Lg), conforme a Equação (1) (ASTM C1012, 2018). A primeira medida, antes da exposição, foi designada como comprimento inicial (Li). O valor de cada barra foi determinado por meio da média de três leituras consecutivas e o resultado obtido através da média das três barras testadas.

$$\Delta L = (Lx - Li) / Lg \times 100 \quad (1)$$

Onde:
ΔL = Mudança no comprimento na idade x, em %;
Lx = Leitura da barra na idade x;
Li = Leitura inicial da barra;
Lg = Comprimento nominal (distância entre as extremidades internas dos pinos).

A variação de massa do material durante os testes pode fornecer uma visão complementar do processo de deterioração devido à formação de substâncias na superfície ou no interior das amostras, resultando em incremento de massa, ou fragmentação da camada externa originando decréscimo de massa. Assim, logo após a leitura no comparador de comprimento, os corpos de prova foram pesados em uma balança digital, com precisão de 0,01 g e os valores calculados por meio da Equação (2). Durante as leituras, as barras de argamassa também foram inspecionadas visualmente a fim de identificar possíveis alterações, tais como: fissuração, desagregação, empenamento, deposição de resíduos nos recipientes e outros, que podem ocorrer durante os

ensaios. O resultado foi obtido por meio da média dos três exemplares. O tratamento estatístico dos dados foi realizado pelos métodos da análise da variância ANOVA e teste Tukey, com nível de significância de 5%.

$$\Delta m = \{(Mx - Mi) / Mi\} \times 100\% \quad (2)$$

Onde:
Δm = Variação de massa na idade x, em %;
Mx = Leitura da massa na idade x;
Mi = Leitura inicial da massa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Reatividade álcali-agregado

As barras de argamassas com agregado miúdo natural foram monitoradas na solução de NaOH por 30 dias, com base na NBR 15577-4:2018 (GEO-R e CP-R). Exemplares com 10% de pirita em substituição ao agregado miúdo natural também foram avaliados (GEO-P e CP-P). A Tabela 2 apresenta os valores da variação dimensional e de massa aos 16 e 30 dias. Nota-se que todas as argamassas apresentaram expansão, porém com intensidades diferentes. Por outro lado, as argamassas geopoliméricas exibiram um decréscimo de massa, enquanto as argamassas de cimento Portland um incremento ocorreu durante os testes.

Tabela 2 – Resultados da variação dimensional e de massa das argamassas.

Tipo de mistura	Expansão (%)		Massa (%)	
	16 dias	30 dias	16 dias	30 dias
GEO-R	0,08	0,16	-3,04	-5,19
GEO-P	0,08	0,14	-4,23	-5,56
CP-R	0,19	0,38	0,41	0,77
CP-P	0,22	0,33	1,49	1,54

Fonte: os autores.

As análises comparativas (ANOVA-Tukey) entre os resultados médios de expansão aos 30 dias indicaram diferença significativa entre as argamassas geopoliméricas e de cimento Portland, independentemente do tipo de mistura (com ou sem pirita). De forma análoga, os valores médios da variação de massa também apresentaram diferenças consideráveis. A Tabela 3 apresenta o resultado do tratamento estatístico dos dados referente à expansão e à variação de massa.

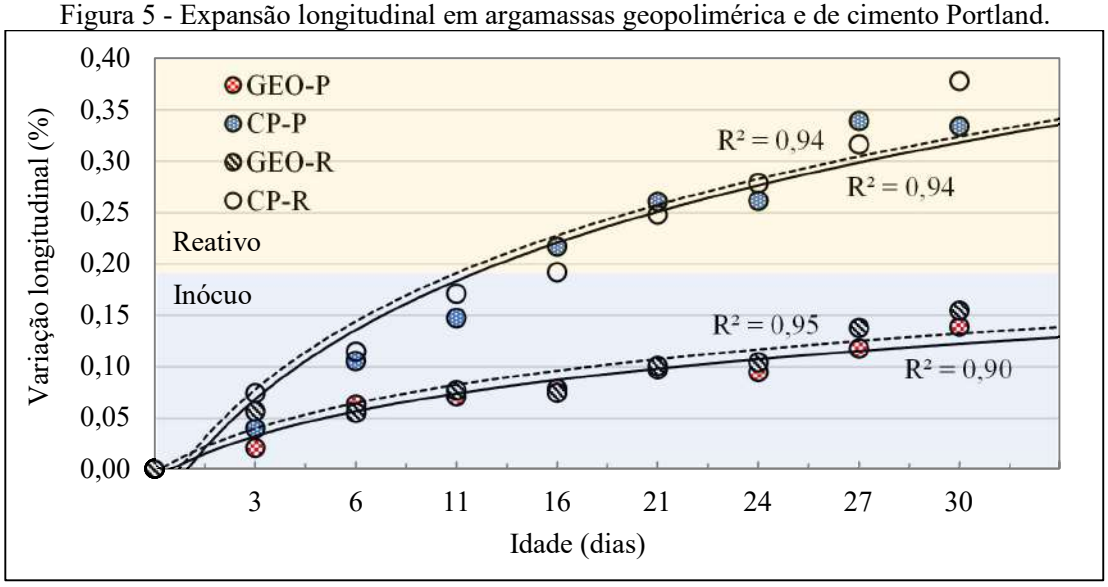
Tabela 3 – Resultado da análise estatística da ANOVA e teste Tukey.

Expansão	GEO-P	GEO-R	CP-P	CP-R
GEO-P	--	Não-significativo	Significativo	Significativo
GEO-R		--	Significativo	Significativo
CP-P			--	Significativo
CP-R				--
Massa	GEO-P	GEO-R	CP-P	CP-R
GEO-P	--	Não-significativo	Significativo	Significativo
GEO-R		--	Significativo	Significativo
CP-P			--	Não-significativo
CP-R				--

Fonte: os autores.

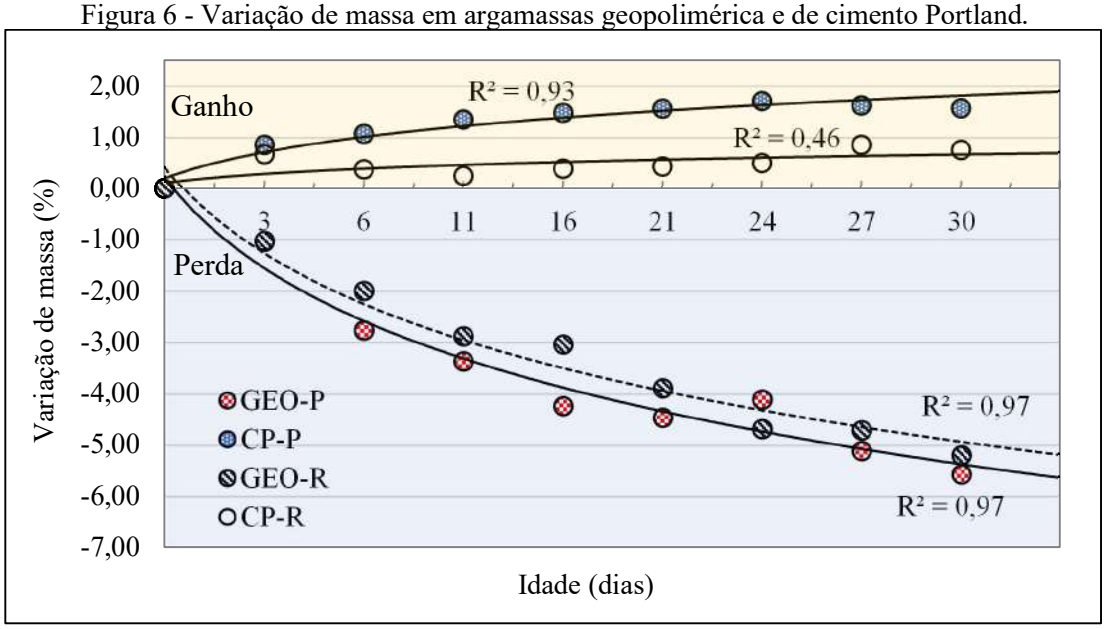
As Figuras 5 e 6 ilustram a variação longitudinal e de massa ao longo do tempo, respectivamente. Os dados indicaram coeficientes de determinação $R^2 \geq 0,90$, o que indicam uma boa correlação entre as variáveis analisadas, exceto para a variação de massa do CP-R que foi de 0,46, pois a massa se manteve abaixo de 1,0% até o final dos ensaios.

Figura 5 - Expansão longitudinal em argamassas geopolimérica e de cimento Portland.



Fonte: os autores.

Figura 6 - Variação de massa em argamassas geopolimérica e de cimento Portland.

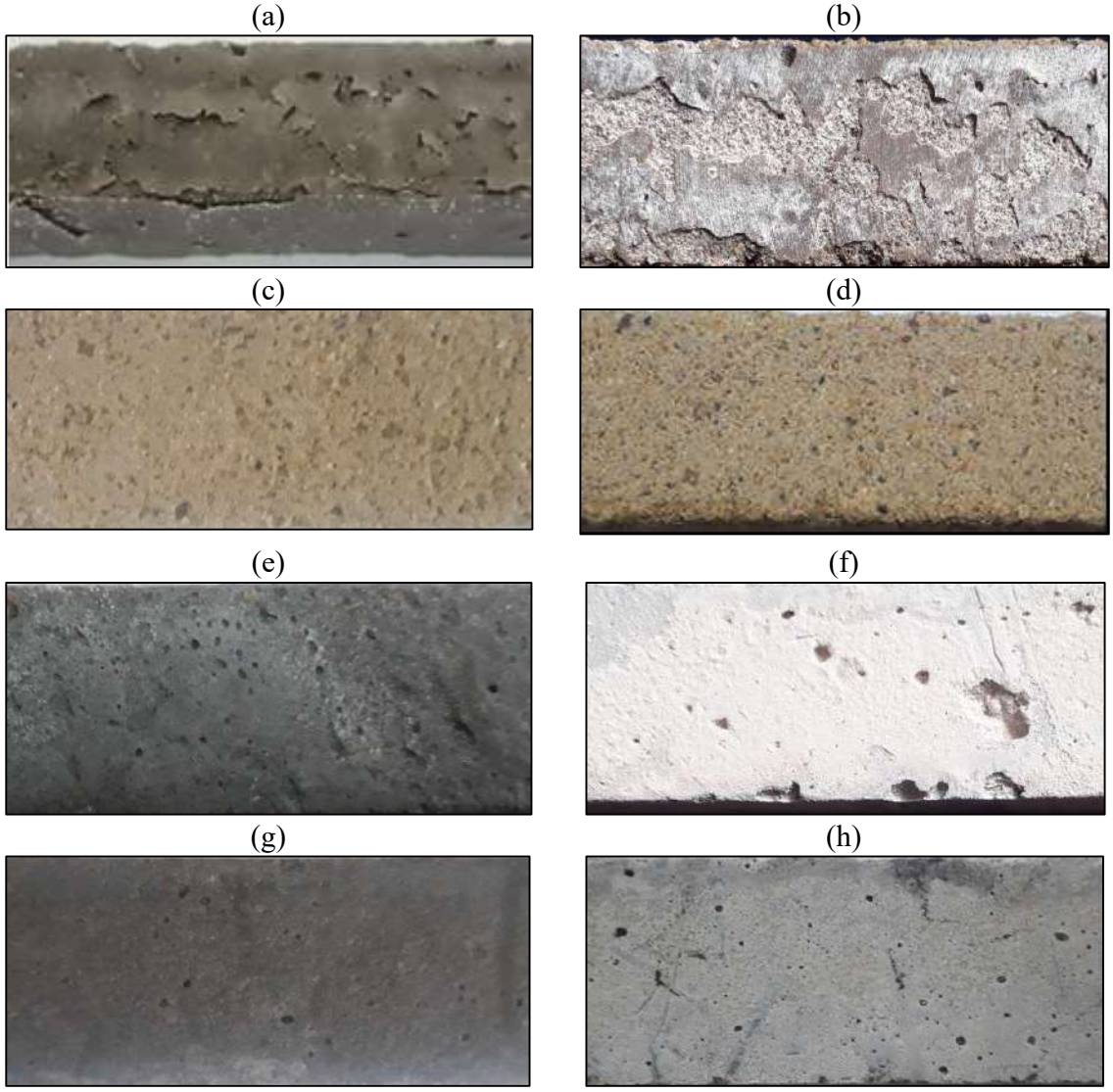


Fonte: os autores.

Aos 30 dias de exposição, o GEO-P (com pirita) apresentou expansão de 0,14% e redução de massa cerca de 5,56%, enquanto o GEO-R (sem pirita) a expansão foi de 0,16% e a perda de massa de 5,19% na mesma idade. De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018), esses agregados podem ser classificados como inócuos, pois até a idade testada, as argamassas geopoliméricas não apresentaram expansões consideradas deletérias.

Por outro lado, a redução de massa nesses materiais ocorreu devido à desagregação superficial, conforme ilustrado na Figura 7 (a) e (b) para o GEO-P e (c) e (d) para o GEO-R. No GEO-R, a perda de massa de proporções ligeiramente inferior ao GEO-P foi registrada. Acredita-se que esse comportamento esteja relacionado a RAA, já que a formação do gel no entorno do agregado pode fragilizar a ligação pasta-agregado (RASHIDIAN-DEZFOULI; RANGARAJU, 2021; POUHET; CYR, 2015) e isso pode ter gerado a erosão superficial, expondo as partículas de areia.

Figura 7 - Superfície das argamassas após exposição à solução de NaOH: (a) e (b) geopolímero com 10% pirita - 16 e 30 dias; (c) e (d) geopolímero sem pirita – 16 dias e 30 dias; (e) e (f) cimento Portland com 10% pirita - 16 e 30 dias; (g) e (h) cimento Portland sem pirita – 16 e 30 dias.



Fonte: os autores.

Na argamassa contaminada com pirita (GEO-P), além da RAA, a oxidação dos sulfetos pode ter liberado o ácido sulfúrico. Esse ácido (H_2SO_4) pode provocar a corrosão superficial devido à despolimerização do aluminossilicato (SINGH *et al.*, 2013), o que poderia justificar a maior intensidade de deterioração superficial ocorrida nestas misturas. No entanto, é importante destacar que mesmo com a perda de massa, a expansão dos geopolímeros são notavelmente inferiores às argamassas de cimento Portland.

Nas amostras CP-P (com pirita), apresentada na Figura 7 (e) e (f), um comportamento distinto foi observado, tais como: ausência de deterioração superficial, aumento de massa e expansão longitudinal superior às argamassas geopoliméricas. Aos 30 dias, a expansão longitudinal alcançou 0,33% e o incremento de massa foi de 1,54%. Uma camada branca e densa se formou em toda a área superficial destas amostras, conforme ilustrado na Figura 7 (f). A exposição ao ácido sulfúrico leva à deposição de uma camada branca de cristais de gipsita na superfície dos componentes de cimento Portland (SINGH *et al*., 2013). Esse ácido pode ter sido liberado pela oxidação da pirita e reagido com o hidróxido de cálcio para formação da gipsita e isso reforçaria a presença desse ácido durante os ensaios.

Nos CP-R (sem pirita), tendência similar de expansão (0,38%) também foram registradas nessas amostras, porém, o incremento de massa (0,77%) foi menor em comparação com os corpos de prova CP-P (Fig. 7 (g) e (h)). Desta forma, a pirita nas misturas de cimento Portland exerceu influência significativa no processo de expansão conforme indicado na Tabela 3, bem como os agregados foram classificados como potencialmente reativos de grau 1, de acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

Os resultados desta pesquisa mostraram que o agregado miúdo pode ser considerando reativo em componentes de cimento Portland, mas não em misturas geopoliméricas nas mesmas condições. De forma similar, a adição da pirita não teve influência significativa na expansão dos materiais geopoliméricos, mas, o contrário ocorreu em argamassas de cimento Portland. A menor expansão das argamassas geopoliméricas encontradas neste trabalho, em comparação com o cimento Portland, corrobora com as pesquisas de Rashidian-Dezfouli e Rangaraju (2021) e Pouhet e Cyr (2015). De acordo com os autores, esse resultado pode ser justificado pelo baixo teor de cálcio, maior porosidade do sistema geopolimérico e redução do pH.

Com relação a deterioração superficial das argamassas geopoliméricas, esse fenômeno pode estar associado à formação do gel RAA. O gel em torno do agregado pode ter fragilizado a ligação da pasta-agregado miúdo, principalmente na região superficial, contribuindo para a perda de massa ao longo dos ensaios. Apesar desses materiais ter sido classificados como inócuo, a deterioração superficial com perda de massa é uma lacuna que precisa ser investigada.

Por essa razão, é importante destacar que monitorar a expansão como forma de avaliar o grau de desgastes pode não ser a melhor maneira de avaliar a deterioração relacionada ao RAA em misturas geopoliméricas, já que em outras pesquisas (RASHIDIAN-DEZFOULI; RANGARAJU, 2021; POUHET; CYR, 2015) o bom desempenho dimensional foi alcançado, mas, a rigidez do material foi afetada. Já nas argamassas de cimento Portland, a calcificação do gel RAS pode ter causado a maior expansão. Os íons de cálcio reagem com sílica dissolvida e formam os géis ricos em cálcio deletérios (LIU; MENG, 2021).

4. CONCLUSÃO

Os testes experimentais avaliaram a reatividade do agregado miúdo em argamassas geopoliméricas e de cimento Portland por 30 dias, na solução de NaOH (80 ºC). As principais conclusões foram:

- Todas as argamassas avaliadas apresentaram expansão. Apesar da maior concentração de álcalis no geopolimérico, as expansões dessas argamassas foram inferiores às misturas de cimento Portland;

- A adição de pirita potencializou a expansão das argamassas de cimento Portland, porém não teve influência significativa nas misturas geopoliméricas;
- Os geopolímeros apresentaram decréscimo de massa, enquanto o cimento Portland um incremento de massa ocorreu ao longo dos testes.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à Universidade Federal do Paraná – UFPR e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, à Universidade Paranaense – UNIPAR, CAPES, Fundação Araucária, CNPq, Agência Nacional de Águas (ANA), Metacaulim do Brasil e a Carbonífera Cambuí que contribuíram para que esta pesquisa pudesse ser realizada.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1012: **Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.** West Conshohocken, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1: **Agregados — Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-2: **Agregados — Reatividade álcali-agregado Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-4: **Agregados — Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, 2018.

BAKHAREV, T. **Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions**. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1233-1246, 2005.

GRANIZO, N.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. **Effect of temperature and alcaline concentration on metakaolin leaching kinetics**. Ceramics International, v. 40, p. 8975-8985, 2014.

GUO, L.; WU, Y.; XU, F.; SONG, X.; YE, J.; DUAN, P.; ZHANG, Z. **Sulfate resistance of hybrid fiber reinforced metakaolin geopolymer composites**. Composites Part B, v. 183, p.107689, 2020.

HASPARYK, N. P. **Reação álcali-agregado no concreto**. In: G.C. Isaia. Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. vol. 2. p. 933-1001. São Paulo: IBRACON, 2011.

LIU, Z.; MENG, W. **Fundamental understanding of carbonation curing and durability of carbonation-cured cement-based composites: A review.** Journal of CO_2 Utilization, v. 44, p. 101428, 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

PARK, S.; POUR-GHAZ, M. **What is the role of water in the geopolymerization of metakaolin?** Construction and Building Materials, v. 182, p. 360-370, 2018.

POUHET, R.; CYR, M. **Alkali–silica reaction in metakaolin-based geopolymer mortar**. Materials and Structures, V. 48, p. 571-583, 2015.

RASHIDIAN-DEZFOULI, H.; RANGARAJU, P. R**. Study on the effect of selected parameters on the alkali-silica reaction of aggregate in ground glass fiber and fly ash-based geopolymer mortars**. Construction and Building Materials, v. 271, p. 121549, 2021.

REPETTE, W.L. **Cimentos alternativos e especiais de base mineral e geopolímeros**. In: G.C. Isaia. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais. 3.ed. vol.1. p. 842-884. São Paulo: IBRACON, 2017.

ROBAYO-SALAZAR, R. AL; AGUIRRE-GUERRERO, A. M.; GUTIÉRREZ, R. M. **Carbonation-induced corrosion of alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan.** Construction and Building Materials, v. 232, p. 117189, 2020.

SINGH, N.; VYAS, S.; PATHAK, R.P.; SHARMA, P.; MAHURE, N. V.; GUPTA, S. L. **Effect of Aggressive Chemical Environment on Durability of Green Geopolymer Concrete.** International Journal of Engineering and Innovative Technology, v. 3, p. 277-284, 2013.

SINGH, N.B.; MIDDENDORF, B. **Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview.** Construction and Building Materials. v. 237, p. 117455, 2020.