ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Efeito da molaridade de ácido fosfórico em geopolímeros ácidos

Effect of phosphoric acid molarity on acid-based geopolymers

Júlia Amaral Ribeiro Hippert
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora | Brasil|
julia.hippert@engenharia.ufjf.br
Aldo Ribeiro de Carvalho
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto | Brasil |
aldo.carvalho@engenharia.ufjf.br
Thais Mayra de Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora | Brasil |
thais.mayra@ufjf.br
Guilherme Jorge Brigolini Silva
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto | Brasil |
guilhermebrigolini@ufop.edu.br
Júlia Castro Mendes
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora | Brasil |
juliacastro.mendes@ufjf.br

Resumo

Matrizes geopoliméricas de ativação ácida são inovações com propriedades tão promissoras quanto os geopolímeros alcalinos. O ácido fosfórico é comumente adotado para geopolimerização ácida, mas sua molaridade ideal não é bem estabelecida. Esse artigo investiga os efeitos da proporção líquido/sólido (0,2 - 0,4), da concentração molar do ativador ácido (8 - 12 mol/l) e da temperatura de cura (25 / 60 °C) na confecção de argamassas geopoliméricas desenvolvidas com metacaulim e areia natural. Aferiu-se o pH ao longo do tempo e a resistência à compressão aos 28 dias sendo a maior resistência observada de 10,56 MPa e seu respectivo pH de 2,98. As melhores resistências foram encontradas para concentrações molares intermediárias, pois o ácido em excesso prejudicou as ligações geopoliméricas. A cura térmica não teve efeito significativo. Esses resultados indicam que matrizes geopoliméricas ativadas por ácido fosfórico têm potencial, mas ainda são necessários estudos mais aprofundados de composição e traço para garantir propriedades competitivas.

Palavras-chave: Geopolímeros. Geopolímeros ácidos. Ácido fosfórico. Metacaulim. Molaridade

Como citar:
HIPPERT, J. A.R., CARVALHO, A.R., OLIVEIRA, T.M., SILVA, G.J.B., MENDES, J.C. Efeito da molaridade de ácido fosfórico em geopolímeros ácidos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

Abstract

Acid-activated geopolymeric matrices are innovative materials with properties as promising as those of alkaline geopolymers. Phosphoric acid is commonly employed in acid geopolymerization; however, its optimal molarity is not yet well established. This study investigates the effects of the liquid/solid ratio (0.2 - 0.4), the molar concentration of the acid activator (8 - 12 mol/L), and the curing temperature (25 / 60 °C) on the fabrication of geopolymer mortars made from metakaolin and natural sand. The pH was measured over time, and the compressive strength at 28 days was evaluated, with the highest observed strength being 10.56 MPa, corresponding to a pH of 2.98. The best strengths were found at intermediate molar concentrations, as an excess of acid negatively affected geopolymeric bonds. Thermal curing did not have a significant effect. These results suggest that phosphoric acid-activated geopolymeric matrices hold potential, but further studies on composition and mix design are needed to ensure competitive properties.

Keywords: Geopolymers. Acid-based geopolymers. Phosphoric Acid. Metacaulim.Molarity.

INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados na indústria da construção, contribuindo com cerca de 7% de emissões de CO_2 no mundo [1]. Logo, é imperativo o desenvolvimento de técnicas que visem à substituição parcial ou total do cimento Portland em materiais de construção. A literatura dispõe de alternativas para sua substituição integral, por meio do desenvolvimento de aglomerantes geopoliméricos [2]. Os compósitos geopoliméricos resultantes possuem alta resistência à compressão, estabilidade térmica, baixa permeabilidade e certa resistência ao ataque químico [2].

Essa nova categoria de aglomerantes, os geopolímeros, têm sua composição química formada por estruturas tridimensionais de aluminossilicatos com fases amorfas ou semicristalinas [3] [4]. O conceito de geopolímeros surgiu para definir um grupo de materiais sólidos formados pela interação de um precursor aluminossilicato com uma solução alcalina [5]. Mais recentemente, Tchakouté e Rüscher [6] e Kaze et al. [7] constataram em seus estudos o potencial de ativadores ácidos para a produção de uma matriz geopolimérica. De acordo com os autores, geopolímeros sintetizados no meio ácido podem apresentar melhores propriedades mecânicas em comparação aos ativados por solução alcalina.

A reação de geopolimerização ácida ocorre pela ligação entre o Al-O, ativo no material precursor, e as unidades tetraédricas de PO existentes na solução ácida. O fosfato (PO_4) presente no ácido é um ânion, que é então balanceado pelos cátions de Al presentes no tetraédrico AlO_4, e assim forma-se $AlPO_4$ [8]. Em um primeiro momento, a estrutura molecular formada encontra-se em fase amorfa, chamada de fosfato de alumínio. Com o avanço da geopolimerização, é formado o cristal de berlinita [2]. Carvalho et al. [2] observaram que esse processo é semelhante para estruturas que possuem Fe em sua composição. Nesses casos, é originado o fosfato férrico, $FePO_4$, em estado amorfo [2]. Conforme avança a reação de geopolimerização, o $FePO_4$ se cristaliza em uma estrutura semelhante à da berlinita, o que confere resistência ao material [2]. Wang et al. [9] afirmam que para os átomos de Si, a reação ocorre como uma consequência da formação da estrutura de berlinita, originando o SiO_2 amorfo; que se torna cristalino conforme ocorre a interação com o ácido fosfórico, produzindo

o quartzo. Esses autores mencionam que o quartzo também é responsável pelo aumento da resistência do material [9]. A equação de geopolimerização balanceada pode ser pode ser observada nas equações (I) e (II):

$$Al_2O_3 . 2SiO_2 + H_3PO_4 \rightarrow Al_2O_3 . 2SiO_2 . P_2O_5 . 3H_2O \text{ (I)}$$

$$Al_2O_3 . 2SiO_2 . P_2O_5 . 3H_2O \rightarrow 2SiO2 + 2AlPO4 + 3H2O \text{ (II)}$$

Alguns fatores como a composição química e mineralógica dos precursores, o tipo e concentração de ativador ácido e as condições e temperatura de cura influenciam no resultado da geopolimerização [10]. Dessa forma, torna-se importante encontrar condições ideais que forneçam matizes geopoliméricas viáveis técnica e economicamente. Das variáveis citadas, serão abordadas nesse estudo a influência da molaridade e da temperatura de cura na obtenção de resistência mecânica em argamassas geopoliméricas.

O desenvolvimento de pastas, argamassas e concretos geopoliméricos alcalinos são amplamente encontrados na literatura. Para geopolímeros ácidos ou a base de fosfato (nomenclatura adotada por Carvalho et al. [2] e Wang et al [9]), a maioria dos estudos ainda se concentra na análise do desenvolvimento de pastas. Poucas pesquisas de argamassas geopoliméricas em meio ácido foram encontradas na literatura [11] e, até o momento, não foi detectado nenhum estudo a respeito de concretos geopoliméricos ácidos. Desta forma, buscando iniciar os estudos para o desenvolvimento de concretos geopoliméricos sintetizados em meio ácido, este estudo visa analisar a influência da concentração molar de H_3PO_4, a relação líquido-sólido e temperatura de cura na confecção de argamassas geopoliméricas ácidas.

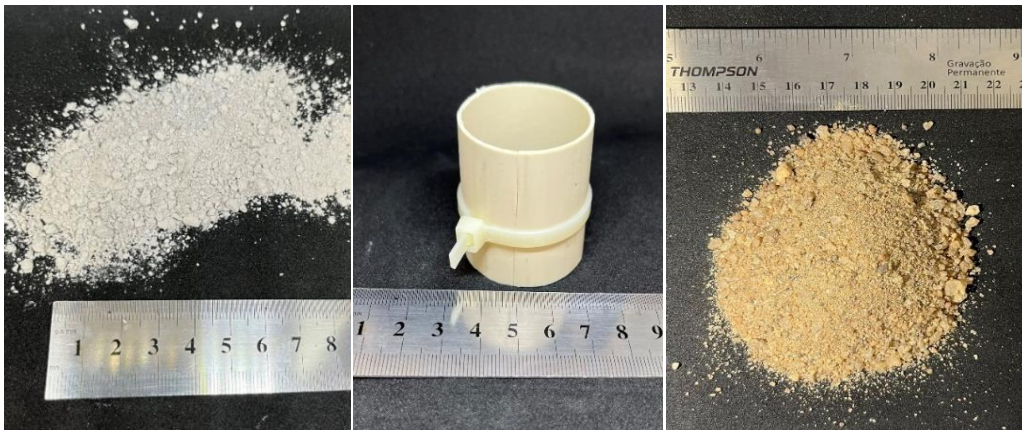
MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAS

Como precursor foi utilizado o metacaulim, doado pela Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda, apresentado Figura 1a. Adotou-se a solução de ácido fosfórico como agente ativador. Essa solução foi obtida pela mistura de água deionizada e ácido fosfórico da Neon Comercial Reagentes Analíticos Ltda na concentração de 85%. Foi utilizada areia de rio proveniente do Rio Preto como agregado miúdo, Figura 1b. Para a moldagem dos corpos de prova, foram utilizadas formas de PVC de 4 cm de diâmetro por 4 cm de altura, Figura 1c. O PVC foi escolhido para evitar reação do ácido com o aço dos moldes metálicos usuais. As medidas de 4x4 cm do PVC foram adotadas visando a redução de consumo de material frente aos custos de uma pesquisa laboratorial de pequeno porte. Além disso, Carvalho *et al.* [2] utilizaram em suas pesquisas corpos de prova de dimensões semelhantes. As argamassas foram investigadas no traço 1:3 (metacaulim: areia) em massa. A areia natural utilizada, cuja caracterização é apresentada na Tabela 2, foi preparada em 4 granulometrias conforme a NBR 7214 [12], descrito na seção “métodos” deste trabalho. Dessa forma o traço utilizado, por ser comum na literatura de cimento Portland, possibilita comparações entre o cimento Portland e o ligante geopolimérico deste estudo, sintetizado em meio ácido [12]. Para a investigação, foram propostos pelos autores 3 razões líquido-sólido (L/S): 0,2, 0,3 e 0,4; onde a parte líquida compreendeu a solução de água e ácido fosfórico e a parte sólida o metacaulim e a areia. A caracterização do

metacaulim, fornecida pelo fabricante, é apresentada na Tabela 1, enquanto a caracterização da areia natural é exposta na Tabela 2.

Figura 1: Materiais utilizados



a) Amostra de metacaulim. b) Forma de PVC 4x4 cm. c) Amostra de areia.
Fonte: Autores (2024).

Tabela 1 - Caracterização do Metacalim

Análises Físicas			Análises Químicas	
Análise	**Resultado**	**Norma Referência**	**Análise**	**Resultado**
Área Específica (BET, cm^2/g)	167.000	NBR 15894	Óxido de silício (SiO_2)	59,4%
			Óxido de alumínio (Al_2O_3)	32,7%
			Óxido de ferro (Fe_2O_3)	1,6%
Finura (Resíduo na peneira #325)	6,4 %	NBR 15894	Óxido de titânio (TiO_2)	1,0%
			Óxido de cálcio (CaO)	0,3%
Massa Específica (Kg/dm^3)	2,53	-	Óxido de magnésio (MgO)	0,3%
			Óxido de potássio (K_2O)	1,8%
			Óxido de sódio (Na_2O)	0,1%
Massa Unitária (Kg/dm^3)	0,67	-	Óxido sulfúrico (SO_3)	0,1%
			Perda ao Fogo	2,8%

Fonte: Metacaulim do Brasil (2023).

Tabela 2 - Caracterização da Areia Natural

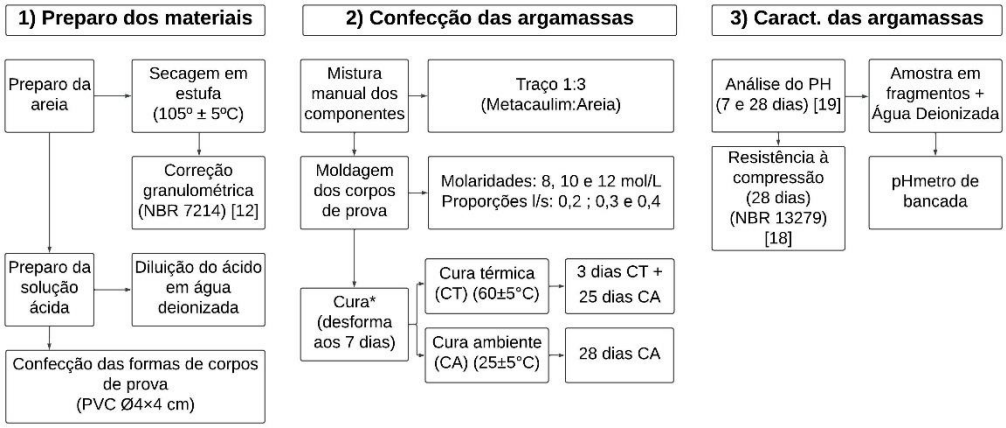
Propriedades Físicas	Resultados	Normas de Referência
Módulo de Finura	2,69	NBR 17054 [13]
Dimensão Máxima Característica	4,8 mm	NBR 17054 [13]
Massa Específica	2,656 g/cm^3	NBR NM 52 [14]
Massa Unitária Seca	1,483 g/cm^3	NBR 16973 [15]
Argila em torrões	4,575%	NBR 7218 [16]
Material Pulverulento	1,04%	NBR 16973 [15]
Matéria orgânica	≤ 300 ppm	NBR NM 49 [17]

Fonte: Autores (2024).

MÉTODOS

O procedimento experimental deste trabalho foi dividido em 3 etapas: 1) preparo dos materiais, 2) confecção de argamassas e 3) caracterização de argamassas. A visão geral é mostrada na Figura 2.

Figura 2: Fluxo metodológico adotado



Fonte: Autores (2024)

Na primeira etapa, foi realizado o preparo dos materiais utilizados para moldagem das argamassas. Preparou-se a areia a partir da secagem e da divisão em faixas granulométricas de acordo com a NBR 7214 [12]. Além disso, realizou-se a diluição do ácido em água deionizada para obtenção das soluções de diferentes molaridades e foram confeccionados os moldes de PVC dos corpos de prova.

A segunda etapa consistiu na confecção dos corpos de prova das argamassas. Os materiais foram misturados manualmente e a moldagem foi realizada em 3 camadas, sendo cada uma delas adensada com 10 golpes. 27 corpos de prova foram mantidos em cura ambiente (25±5°C) com umidade relativa do ar de 80% e outros 27 corpos de prova em cura térmica a 60±5°C. O preparo dos corpos de prova seguiu as premissas da NBR 13279 [18] visando o mesmo método de preparo de argamassas convencionais, possibilitando uma eventual comparação. Esse método foi previamente adotado e avaliado por Carvalho *et al.* [2]. A definição da temperatura para cura térmica é baseada também no estudo de Carvalho *et al.* [2], visando investigar o efeito da temperatura, sem incorrer em uma incorporação de energia excessiva no material.

A última etapa consistiu na avaliação mecânica e do pH. A resistência à compressão foi verificada de acordo com a NBR 13279 [18] e o pH medido seguindo o método da Embrapa [19]. Cada ensaio foi feito com 3 amostras e os resultados obtidos são apresentados na Figura 3.

RESULTADOS

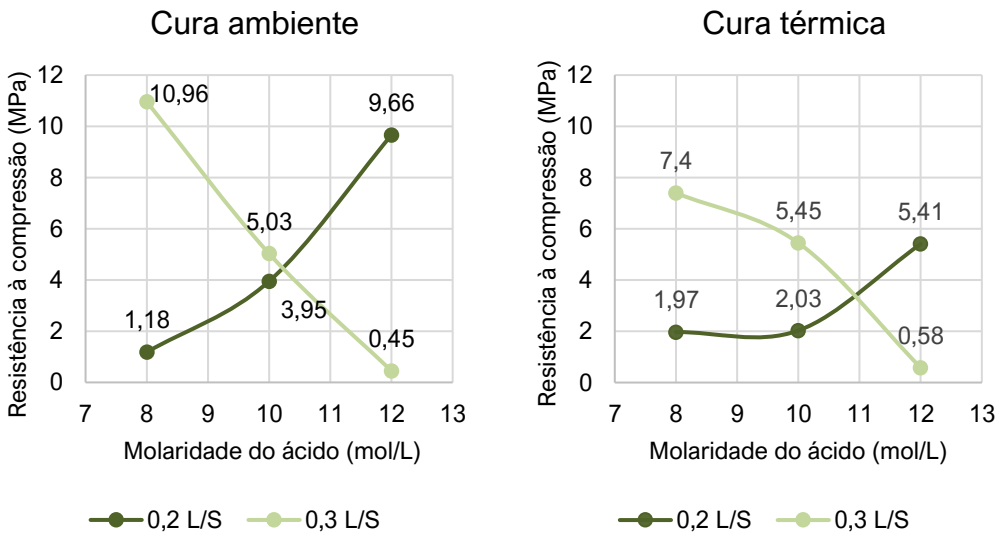
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Este estudo analisou a influência da molaridade do ácido fosfórico, temperatura de cura e da proporção líquido/sólido na resistência a compressão da argamassa geopolimérica ácida. Os corpos de prova (CPs) das argamassas de proporção de 0,4 líquido/sólido (L/S) de todas as molaridades foram dispensados, uma vez que não adquiriram pega suficiente para a desmoldagem mesmo após 7 dias.

A Figura 3 mostra os resultados de resistência à compressão aos 28 dias. Considerando os CPs curados em temperatura ambiente e à 60º C, nota-se que para a 0,2 L/S a

resistência à compressão aumentou com o aumento da molaridade, enquanto para de 0,3 L/S o aumento da molaridade ocasionou na perda de resistência. Tanto em temperatura ambiente quanto em cura térmica, o traço que apresentou melhor comportamento mecânico foi de 8 mol/L de proporção igual a 0,3, chegando a 10,96 MPa.

Figura 3: Resistência à compressão aos 28 dias para corpos de prova curados em temperatura ambiente e térmica de proporção líquido/sólido igual a 0,2 e 0,3

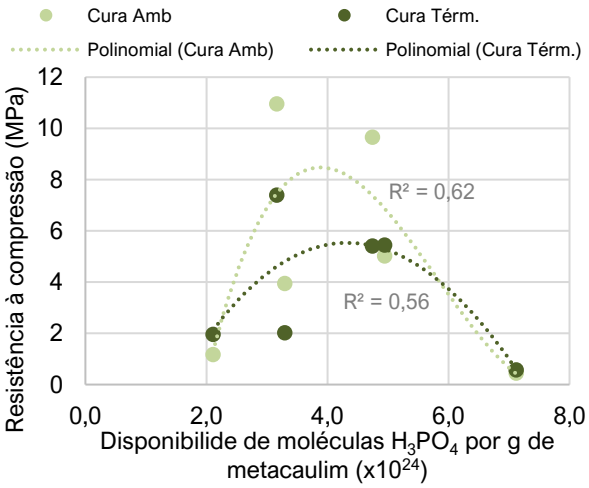


Fonte: Autores (2024)

O ganho de resistência se justifica pelas interações do ânion PO_4 com os cátions de Al e Fe conforme foi verificado na literatura [2] [8]. Considerando a composição química do metacaulim, as interações com o Al são maiores pois estão presentes em maior quantidade que o Fe (Tabela 1). Outra razão seria a formação de quartzo em alguma proporção, promovida pela cristalização do SiO_2 do metacaulim durante a reação de geopolimerização [9].

A Figura 4 mostra o número de moléculas disponíveis de H_3PO_4 para cada grama de metacaulim por traço versus a resistência à compressão obtida. A partir da mesma, verifica-se que o número de moléculas disponíveis não está intimamente ligado ao valor obtido para resistência à compressão. Isso é evidenciado pelo fato que tanto o traço 8 mol/L | 0,3 L/S quanto 12 mol com L/S de 0,2 obtiveram valores aproximados de resistência à compressão em cura ambiente, ainda que a disponibilidade de molécula entre essas amostras seja diferente. Da mesma forma, o traço 8 mol/L | 0,3 L/S e 10 mol/L | 0,2 L/S tinham valores próximos de disponibilidade de moléculas e atingiram resistências significativamente diferentes, tanto em cura ambiente quanto cura térmica.

Figura 4: Gráfico e tabela relacionando a disponibilidade de molécula de ácido para cada grama de metacaulim com a resistência à compressão média da matriz resultante. Nota: CA – cura ambiente; CT – cura térmica.



Traço	Disp. De moléculas	Rc CA (MPa)	Rc CT (MPa)
8 mol/L | 0,2 L/S	$2{,}11 \times 10^{24}$	1,18	1,97
8 mol/L | 0,3 L/S	$3{,}16 \times 10^{24}$	10,96	7,4
10 mol/L | 0,2 L/S	$3{,}29 \times 10^{24}$	3,95	2,03
10 mol/L | 0,3 L/S	$4{,}94 \times 10^{24}$	5,03	5,45
12 mol/L | 0,2 L/S	$4{,}75 \times 10^{24}$	9,66	5,41
12 mol/L | 0,3L/S	$7{,}10 \times 10^{24}$	0,45	0,58

Fonte: Autores (2024)

Nota-se na Figura 4 que o comportamento da resistência à compressão com o aumento da disponibilidade de moléculas de H_3PO_4 não é linear. Foi destacado no gráfico uma linha de tendência polinomial de 3ª ordem para buscar ilustrar esta tendência. No início das curvas de cura ambiente e cura térmica, há um crescimento com o aumento da disponibilidade de moléculas. Isso provavelmente se deve à reação de geopolimerização do Al e Si do metacaulim. No trecho intermediário há um pico de resistência, indicando uma disponibilidade mais favorável. Ao fim da curva, tem-se uma queda das resistências com o aumento da disponibilidade de moléculas. Uma possível causa para esse comportamento é o teor excessivo de ácido. Acima de uma certa quantidade, as moléculas de ácido ultrapassam as necessárias para as reações de geopolimerização e passam a quebrar as ligações geopoliméricas já realizadas, reduzindo, assim, a resistência da matriz.

No entanto, a faixa de disponibilidade molecular intermediária traz resultados contraditórios. Com pode ser visto na tabela à direita, na faixa entre 3,2 e 3,3 x 10^{24} moléculas/grama, o aumento da molaridade de 8 para 10 mol/L resultou em uma queda significativa da resistência. Na faixa entre 4,7 e 4,9 x 10^{24} moléculas/grama, o aumento da molaridade de 10 para 12 mol/L levou a um aumento da resistência. Esse comportamento pode estar relacionado à intensidade do ataque ácido, dado que concentrações molares maiores tem menor pH e maior disponibilidade de moléculas H+. Aparentemente, a intensidade do ataque leva a comportamentos diferentes em matrizes com disponibilidades de moléculas diferentes. Recomenda-se maiores estudos para elucidar este fenômeno.

A maior resistência geral obtida foi em temperatura ambiente, de 10,96 MPa. Essa molaridade destoa do resultado de Carvalho *et al.* em seu trabalho com pastas ativadas com ácido fosfórico, em que os autores obtiveram os melhores resultados com 10 mol/L também a 0,3 L/S [2]. Por sua vez, Wu *et al.* desenvolveram argamassas geopoliméricas com H_3PO_4 e obtiveram os melhores resultados com a concentração

molar próxima a 8,64 mol/L [11], valor mais próximo ao evidenciado no presente estudo.

Os CPS curados por 3 dias à 60°C (cura térmica) tiveram comportamento similar aos curados em temperatura ambiente para as duas proporções L/S. A maior resistência obtida em cura térmica foi de 7,40 MPa para a amostra de 8 mol/L de proporção 0,3 L/S. Nota-se que o desenvolvimento da resistência a compressão se comporta de forma similar independente da temperatura de cura, porém as amostras curadas em temperatura ambiente obtiveram resistência à compressão média superior às amostras de cura térmica.

Carvalho et al. produziram compósitos geopoliméricos sintetizados com H_3PO_4 e também observaram decaimento na resistência com a cura térmica do material [2]. Segundo os autores, isso ocorreu devido à rápida evaporação de água presente na mistura, o que estimulou o desenvolvimento de poros e fissuras, além de ter interrompido prematuramente a reação de geopolimerização, impedindo a formação completa dos cristais [2]. Acredita-se que essa seja a razão pela qual a cura térmica também resultou na redução da resistência à compressão nas argamassas geopoliméricas produzidas neste estudo.

Verifica-se que o aumento da proporção L/S de L/S 0,2 para 0,3 resulta em uma notória elevação da resistência à compressão, que foi cerca de 937% para temperatura ambiente e de 375% para cura térmica. O mesmo comportamento foi observado para as 3 concentrações molares do ácido estudadas. Com esses resultados, conclui-se que não se justifica a utilização de energia para a cura térmica inicial deste material.

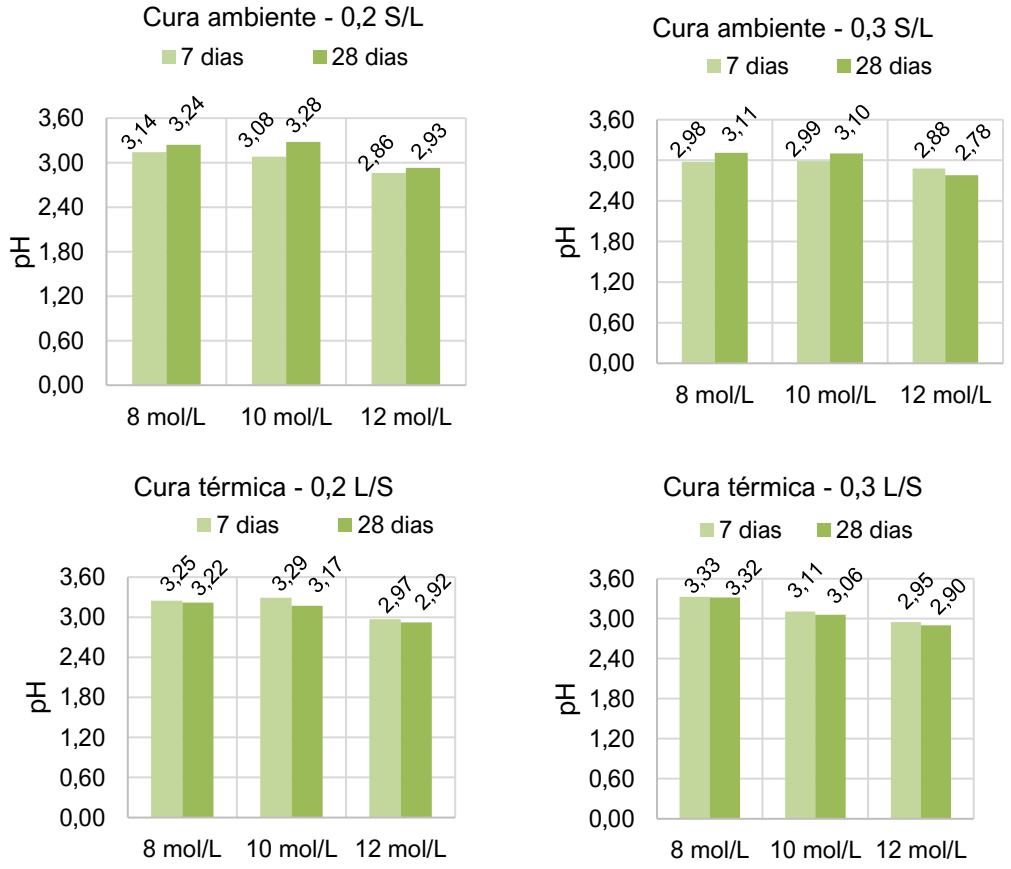
Foi observado na literatura de argamassas geopoliméricas a influência do traço quanto à proporção do agente precursor e da areia, sendo este um limitante do presente estudo, que avaliou apenas o traço 1:3 (metacaulim : areia). Zailani *et al*. desenvolveu argamassas geopoliméricas alcalinas com traços (precursor : agregado miúdo) de 1:4, 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 e observou que a proporção ideal de ligante/areia é 1:2, uma vez que teores adicionais de areia apresentaram um declínio na resistência à compressão em temperatura ambiente [20]. Os autores atribuem a redução da resistência à compressão à presença insuficiente de material precursor para a eficaz aderência do agregado [20]. Por sua vez, Wu *et al.* estudou argamassas geopoliméricas ativadas com ácido fosfórico e curadas em temperatura igual à 60°C nos traços 1:3, 1:1, 3:1 [11]. Os autores verificaram que os traços 1:1 e 1:3 foram os mais efetivos para o desenvolvimento à resistência à compressão.

Portanto, o traço utilizado nesse estudo pode não ter sido o mais adequado para a confecção de argamassas geopoliméricas, visto que foi adotado seguindo padrões estabelecidos para argamassas convencionais. Por outro lado, traços com uma maior relação aglomerantes/agregados implicam em maiores custos econômicos e ambientais. Como aparentemente ainda não há consenso sobre traços ideais de matrizes geopoliméricas ácidas, sugere-se que mais investigações sejam feitas nessa área.

MEDIÇÃO DO PH

O pH das amostras foi medido a fim de analisar o caráter ácido da argamassa geopolimérica aos 7 e 28 dias (Figura 5). Todas as amostras apresentaram alteração relativamente pequenas no seu caráter ácido para um intervalo de 21 dias. Salienta-se, entretanto, que a redução do pH foi sutilmente superior nas amostras que foram submetidas a cura térmica. Infere-se que quanto maior a molaridade do ácido, menor o pH, o que confirma o maior teor de ácido do corpo de prova analisado com o aumento da molaridade. Não foi observada uma relação clara entre a diferença do PH aos 7 e 28 dias com a resistência à compressão das amostras.

Figura 5: Variação do PH para amostras de proporção 0,2 e 0,3 L/S curadas em temperatura ambiente. Nota: Eixo horizontal corresponde à concentração molar da solução.



Fonte: Autores (2024)

Entre os diferentes tipos de cura, a cura ambiente aos 7 dias estava ligeiramente mais ácida do que a cura térmica aos 7 dias. Isso pode indicar que a cura térmica "consumiu" mais ácido no início da cura e poderia ter levado a resistências maiores a longo prazo. Entretanto, é inviável, do ponto de vista logístico e energético da construção civil, ter elementos de concreto curados por várias semanas em altas temperaturas. Aos 28 dias, a diferença entre o PH da cura ambiente e témica foi desprezível, sem uma tendência clara.

CONCLUSÕES

Após os ensaios feitos, o maior valor médio da resistência a compressão encontrado foi próximo de 11 MPa aos 28 dias para argamassas geopoliméricas ácidas de 8 mol/L com proporção líquido/sólido de 0,3 curadas em temperatura ambiente. Uma vez que a menor molaridade e a cura ambiente apresentaram melhor resultado, as vantagens econômicas e ambientais da argamassa se tornam maiores devido ao menor gasto de ácido e de energia empregada na sua produção, bem como na maior facilidade de cura que em temperatura ambiente dispensa da utilização de aparelhos.

A disponibilidade das moléculas de H_3PO_4 para cada grama de metacaulim se comporta de forma não-linear, portanto, existe uma quantidade considerada como "ótima" que está associada à disponibilidade responsável por gerar maior resistência. A disponibilidade de moléculas de ácido está diretamente ligada à molaridade da solução e à relação L/S adotada. Quanto maior a molaridade, maior a quantidade de moléculas para um mesmo volume, mas também maior é o "ataque ácido" da solução. Portanto, o aumento da resistência se dá até atingir a quantidade ideal de moléculas de H_3PO_4 por grama de metacaulim, após isso, o excesso de moléculas de ácido pode ser prejudicial à reação de geopolimerização e resultar na redução da resistência.

O incremento na proporção líquido/sólido pode ser benéfico e contribuir para o aumento da resistência da argamassa. Entretanto, para molaridades superiores a 10 mol/L, tal fator perde sua validade, uma vez que a molaridade atinge um nível elevado, resultando em um excesso de ácido além do necessário para a formação do ligante, ocorrendo o ataque das ligações do material antes que os cristais sejam formados.

Não foi observada uma variação significativa do PH entre 7 e 28 dias, independentemente da molaridade, proporção líquido/sólido ou temperatura de cura, portanto permanece um material caracteristicamente ácido sendo questionável sua aplicação em conjunto com materiais metálicos, devido à possível corrosão. O PH também não está linearmente relacionado à maior ou menor resistência à compressão. Recomenda-se realizar estudos de longa duração para avaliar a evolução do caráter ácido desse material.

Posto que o metacaulim utilizado possui pouca quantidade de Fe, recomenda-se que sejam feitos estudos com uma adição mineral de óxido de ferro na mistura, para viabilizar maior número de cristais de $FePO_4$. Também é sugerido que outras proporções entre material precursor e areia sejam avaliadas. É recomendando, para os estudos futuros, que seja analisada a formação dos cristais por meio de ensaio de Difração de Raios-X e aferido o aspecto morfológico do material, com auxílio da Microscopia Óptica de Varredura. Espera-se que esse estudo inicial possa ter corroborado com o entendimento do comportamento argamassas geopoliméricas ácidas.

REFERÊNCIAS

[1] COSTA, F. N.; RIBEIRO, D. V. Reduction in CO2 emissions during production of cement, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW). **Journal of Cleaner Production**, 26, 2020.

[2] CARVALHO, A. R. D. et al. Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid. **Construction and Building Materials**, 403, 2023.

[3] CUI, X. M. et al. A novel aluminosilicate geopolymer material with low dieletric loss. **Materials Chemistry and Physics**, 130, 2011. 1-4.

[4] DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 5. ed. França: Institut Géopolymère, 2020.

[5] GORYUNOVA, K. et al. Phosphate-activated geopolymers: advantages and application. **RSC Advances**, 43, 2023.

[6] TCHAKOUTÉ, H. K.; RÜSCHER, C. H. Mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements from sodium waterglass and phosphoric acid solution as hardeners: A comparative study. **Applied Clay Science**, 140, Maio 2017. 81-87.

[7] KAZE, C. R. et al. Mechanical and physical properties of inorganic polymer cement made of iron-rich laterite and lateritic clay: A comparative study. **Cement and Concrete Research**, 140, Fevereiro 2021.

[8] LOUATI, S. et al. Structure and properties of new eco-material obtained by phosphoric acid attack of natural Tunisian clay. **Applied Clay Science**, 101, 2014. 60-67.

[9] WANG, Y.-S. et al. Phosphate-based geopolymer: Formation mechanism and thermal stability. **Materials Letters**, March 2017. 209-212.

[10] PROVIS, J. L.; DEVENTER, J. S. **Geopolymers:** Structure, processing, properties and industrial applications. [S.l.]: CRC Press, 2009.

[11] WU, H. et al. Effects of Spodumene Flotation Tailings on Mechanical Properties of Acid-Based Geopolymer Mortar. **Minerals**, 13, n. 2, 2023. 150.

[12] ABNT. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação**. Rio de Janeiro. 2015.

[13] ABNT. **NBR 17054: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um por lavagem**. Rio de Janeiro. 2022.

[14] ABNT. **NBR 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica**. Rio de Janeiro. 2009.

[15] ABNT. **NBR 16973: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um por lavagem**. Rio de Janeiro. 2021.

[16] ABNT. **NBR 7218: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. ABNT. Rio de Janeiro. 2019.

[17] ABNT. **NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impirezas orgânicas**. ABNT. Rio de Janeiro. 2001.

[18] ABNT. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro. 2005.

[19] EMBRAPA SOLOS. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Embrapa. Brasília. 2017.

[20] ZAILANI, W. W. A. et al. Physico-mechanical properties of geopolymer mortars for repair applications: Impact of binder to sand ratio. **Construction and Building Materials**, 412, 2024.

[21] CARVALHO, A. R. D. et al. Influência do efeito fíler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, 23, n. 4, Outubro/Dezembro 2023. 217-239.

[22] SUPRIYA et al. Low-CO2 emission strategies to achieve net zero target in cement sector. **Journal of Cleaner Production**, 417, 2023.

[23] DOAN, D. T. et al. A critical comparison of green building rating.**. Building and Environment,** 123, 2017. 243-260.

[24] CHANDAR, S. P.; SANTHOSH, R. Partial replacement of cement with alternative cementitious material in the production of concrete: A review. **Materials Today: Proceedings**, 68, Part 6, 2022. 2421-2426.

[25] ABNT. **NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro. 2010.

[26] WU, H. et al. Effects of Spodumene Flotation Tailings on Mechanical Properties of Acid-Based Geopolymer Mortar. **Minerals**, 19 January 2023.

[27] ABNT. **NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro. 2022.