

Compósito de terra autoadensável estabilizado com ativação alcalina para construção de paredes monolíticas

Self-compacting earth composite stabilized by alkaline activation for monolithic wall construction

Lucas Araújo 
Givanildo Azeredo 

Resumo

A terra como material de construção vem voltando ao foco da comunidade científica devido à sua baixa energia incorporada. Existem poucos estudos sobre matrizes de terra autoadensáveis como técnica construtiva. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo desenvolver um compósito de terra autoadensável estabilizado com ativação alcalina para construção de paredes monolíticas e avaliação do seu comportamento mecânico. Após um estudo de dosagem por planejamento fatorial, foi selecionada a melhor composição de terra, areia, metacaulim e solução ativadora para melhor avaliação do compósito e construção da parede. Com a mistura selecionada, foram realizados ensaios de caracterização física, difração de raios X (DRX), espectroscopia de infravermelho, funil V, resistência à compressão e à tração na flexão, além da construção de uma parede reduzida. A resistência à compressão do compósito foi de 8,12 MPa aos 3 dias e 9,75 MPa aos 28 dias. A parede apresentou fissuras de retração, que não influenciaram diretamente na sua ruptura, e atingiu uma tensão de 3,30 MPa. Por fim, o compósito apresentou um bom comportamento reológico tanto no estado fresco quanto no estado endurecido podendo ser utilizado na construção de paredes monolíticas.

Palavras-chave: Construção com terra. Metacaulim. Autoadensável. Sustentabilidade.

Abstract

The earth as a building material is coming back to the focus of the scientific community due to its low embodied energy. There are few studies about self-compacting earth composites as a building technique, therefore, the present work has the objective to develop a self-compacting earth composite with alkali activation for construction of monolithic walls and evaluation of its mechanical behavior. After a factorial design study, it was selected the best composition of earth, sand, metakaolin and activation solution for further evaluation of the composite and construction of the wall. For the selected composite, physical characterization, X Ray diffraction (XRD), infrared spectroscopy, V funnel, compressive and flexural strength were carried out, in addition to the construction of a reduced wall. The composite's compressive strength was 8.12 MPa at 3 days and 9.75 MPa at 28 days. The wall showed shrinkage cracks, which did not directly influence its failure mode, and reached a 3.30 MPa tension. Finally, the composite showed a nice rheological behavior both in its fresh and hardened states being able to be used on the construction of monolithic walls.

Keywords: Earth construction. Metakaolin. Self compacting. Sustainability.

¹Lucas Araújo

¹Universidade Federal da Paraíba
Cruzeta - RN - Brasil

²Givanildo Azeredo

²Universidade Federal da Paraíba
Castelo Branco - RN - Brasil

Recebido em 06/07/23

Aceito em 06/03/24

Introdução

A construção com terra é utilizada desde o início da civilização, sendo deixada como herança dos povos antigos e que pode ser observado ainda hoje, visto que a terra é utilizada como material de construção por aproximadamente 50% da população mundial (Clausell *et al.*, 2021; Minke, 2006; Pacheco-Torgal; Jalali, 2012).

Com o passar do tempo, a disseminação global e a performance de produtos de construção industrializados aumentaram consideravelmente; com isso, os materiais metálicos, cerâmicos e cimentícios se tornaram cada vez mais utilizados em contraste com as construções de terra. No entanto, o interesse na utilização e na pesquisa de materiais de construção derivados da terra vem sendo retomado gradativamente, a fim de possibilitar obras mais econômicas, simples de construir e, principalmente, menos agressivas ao meio ambiente (Maskell; Heath; Walker, 2015; Ojo *et al.*, 2020).

Ainda sob a vertente da sustentabilidade, os ligantes obtidos pela ativação alcalina têm sido cada vez mais empregados na construção civil. Tais ligantes substituem o cimento, que tem uma alta carga ambiental, sendo sua produção responsável por cerca de 5% da geração mundial de CO₂ (Demie; Nuruddin; Shafiq, 2013; Singh; Middendorf, 2020).

Os estudos que envolvem ligantes ativados alcalinamente já são suficientes para afirmar que eles têm propriedades mecânicas, pelo menos, equivalentes às do cimento e também são mais sustentáveis, sendo um ligante alternativo para o futuro da construção. Dessa forma, o direcionamento para a utilização da ativação alcalina na estabilização da terra também pode ser eficaz (Ghadir; Ranjbar, 2018; Rios *et al.*, 2016).

Os principais métodos construtivos com terra têm sido por muito tempo a taipa de pilão e as alvenarias de adobe ou bloco de terra comprimido (BTC). Atualmente, tem-se estudado uma proposta de construção com as misturas de terra estabilizada autoadensáveis.

Cristelo *et al.* (2012), em seu estudo de estabilização da terra através da ativação alcalina de cinzas volantes para taipa de pilão, obteve um compósito com a consistência de lama, não necessariamente autoadensável, não necessitando de compactação mecânica e apresentando valores de resistência à compressão superiores a 20 MPa. Udawattha e Halwatura (2018) também usaram ativação alcalina de cinzas volantes, mas para criar um compósito autoadensável direcionado à produção de blocos, cujas resistências eram próximas a 10 MPa. Além disso, diversos materiais podem ser inseridos no processo de estabilização da terra como mostram Gu e Chen (2020), onde são utilizados fosfogesso, cal, cinza volante e cimento Portland.

Utilizando o cimento Portland como material estabilizante, obtém-se a possibilidade do uso do superplastificante, uma vantagem em relação à ativação alcalina, como mostra o trabalho de Ouellet-Plamondon e Habert (2016) em que o superplastificante, na presença do cimento melhora a trabalhabilidade da mistura. Nessa vertente, Martins, Silva e Toledo Filho (2014) desenvolveram uma matriz de solo-cimento autoadensável incorporada com fibra de sisal e obtiveram resistência de 3,33 MPa aos 28 dias. Matos e Varum (2022) desenvolveram um compósito de solo-cimento para utilização em elementos verticais, atingindo resistências na faixa de 5 a 14 MPa.

Alcantara *et al.* (2017) relacionaram parâmetros de dosagem do solo-cimento autoadensável com resultados de espalhamento e de escoamento em funil V. Milani e Ferreira (2022) avaliaram definições de critérios para faixas de espalhamento no estado fresco de misturas de solo-cimento autoadensáveis. Enquanto Ma, Chen, Chen (2016a, 2016b, 2016c) avaliaram modelos preditivos de resistência para compósitos de argila autoadensáveis estabilizados.

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo propor um compósito de terra autoadensável estabilizado pela ativação alcalina do metacaulim para a construção de paredes, avaliando variáveis metodológicas de dosagem e suas respostas no estado fresco e endurecido, além da construção de uma parede em tamanho reduzido com a mistura selecionada, e o estudo do seu desempenho mecânico.

Metodologia

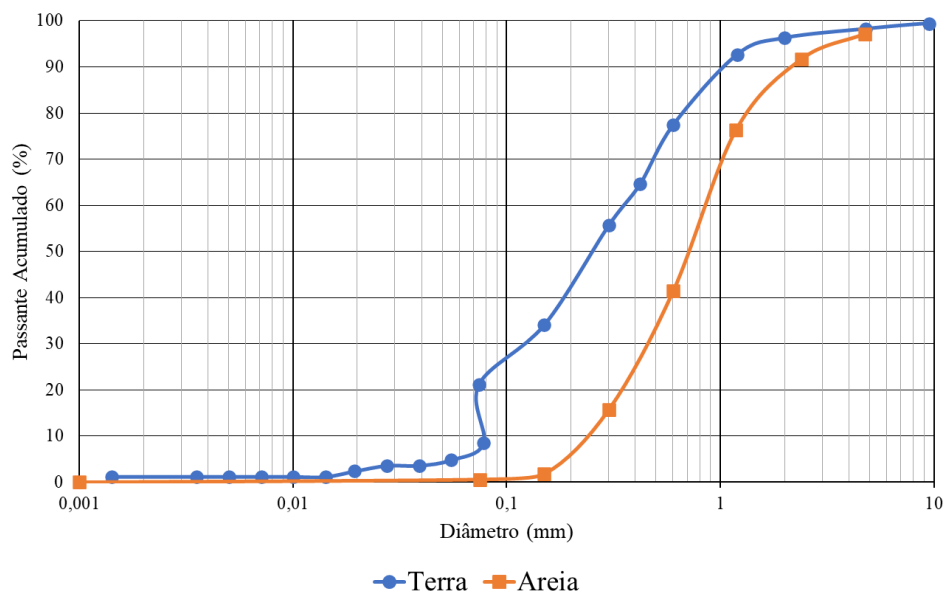
Caracterização dos materiais

A terra utilizada foi previamente peneirada em malha de 4,8 mm. Também foi usada areia média como uma substituição parcial da terra na mistura. A Tabela 1 e a Figura 1 mostram dados sobre o tipo de terra e areia de acordo com a sua caracterização (ABNT, 2016a, 2016b, 2016c, 2022).

Tabela 1 - Limites de Atterberg da terra

Limites de Atterberg	%
Limite de Liquidez	30,90
Limite de Plasticidade	20,90
Índice de Plasticidade	10,00

Figura 1 - Curva granulométrica da terra e da areia



O metacaulim foi obtido comercialmente na cidade de João Pessoa e foi caracterizado por ensaios de FRX e DRX, mostrados na Tabela 2 e na Figura 2.

O ativador alcalino utilizado foi uma solução de silicato de sódio e hidróxido de sódio. O hidróxido de sódio foi obtido em escamas e dissolvido em solução aquosa, com concentração de 10 mol/L, para ser incorporado ao silicato de sódio. O silicato de sódio tem densidade de 1,65 g/mL, 17,5% de Na_2O e relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de aproximadamente 2. Para a produção do ativador, foi dissolvido inicialmente o hidróxido de sódio, o qual foi mantido em repouso por 24 horas; em seguida foi adicionado o silicato de sódio e então a solução foi homogeneizada.

Todos os materiais foram obtidos no mercado local da cidade de João Pessoa, exceto o silicato de sódio que foi adquirido na cidade de Recife.

Mistura, moldagem e ensaios realizados

Todas as dosagens, exceto a mistura feita para a moldagem da parede, foram realizadas em misturador mecânico de argamassa, de maneira padronizada, cuja cuba tem capacidade de 5 L e na velocidade lenta do misturador (aproximadamente 62 rpm de movimento planetário e 140 rpm no eixo da espátula). O processo de mistura durou 5 minutos e seguiu os seguintes passos mostrados na Figura 3.

A mistura dos materiais para a produção da parede monolítica foi feita de forma análoga, mas em uma betoneira. A única mudança no processo é que não houve pausa para limpeza. Com o mesmo material que foi confeccionada a parede, também foram moldados corpos de prova cilíndricos para correlação de resistência entre os corpos de prova e a parede.

Terminado o processo de mistura, foi realizada a avaliação correspondente do compósito no estado fresco e, em seguida, foram moldados corpos de prova para a caracterização e avaliação mecânica. Foram utilizados moldes metálicos: cilíndricos com 5 cm de diâmetro de base e 10 cm de altura, cilíndricos com 10 cm de diâmetro de base e 20 cm de altura e moldes prismáticos de dimensões (4 x 4 x 16) cm. Para a parede foi fabricado um molde, de (1 x 1 x 0,15) m, em madeira e fixado numa base de madeira de lei. A cura de todas as misturas foi feita em temperatura ambiente e tanto no momento após a moldagem quanto após o desmolde, os corpos de prova foram vedados com plástico filme até a idade do ensaio.

Tabela 2 - FRX do metacaulim utilizado

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Outros
%	53,66	31,79	9,90	0,12	1,17	0,08	0,20	0,66	1,84	0,58

Figura 2 - DRX do metacaulim

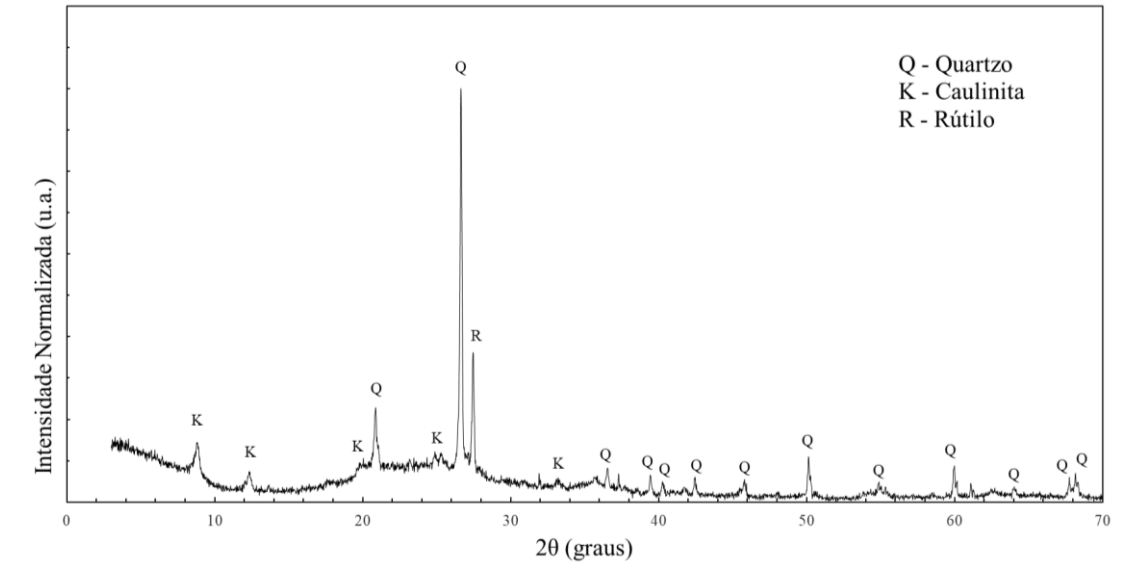
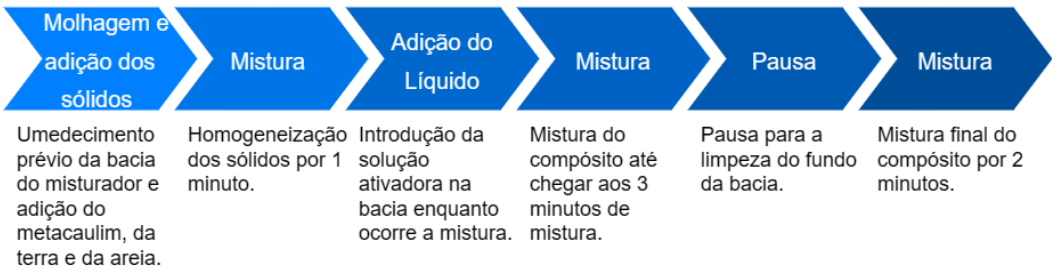


Figura 3 - Processo de mistura do compósito



Para a definição do traço utilizado, foi adotado um planejamento fatorial no modelo 2^k , avaliando três fatores, que seriam as variáveis independentes: a quantidade de precursor (metacaulim), definido de 20 a 30% da massa de terra e areia; 20 a 50% de substituição da terra por areia; e a variação de 1 a 3 da relação de massa entre silicato e hidróxido na solução ativadora. Além disso, foram avaliados três pontos centrais, resultando em um planejamento da forma 2^3+3 , totalizando 11 dosagens. Os valores acima foram definidos com base em testes preliminares realizados para o balizamento das variáveis. A Tabela 3 mostra o planejamento fatorial com os traços em massa empregados.

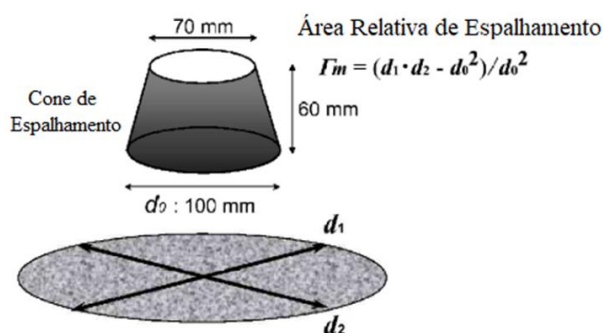
Como respostas do planejamento, variáveis dependentes, foram aferidas a resistência à compressão aos 7 dias (R_{c7}), com base na NBR 7215 (ABNT, 2019), e o espalhamento da mistura no estado fresco com base na metodologia de Okamura e Ouchi (2003), que propõe o chamado índice de deformabilidade (Γ_m), ou área relativa de espalhamento da mistura em estado fresco. O teste para medir o espalhamento está esquematizado na Figura 4.

Para a avaliação das dosagens propostas foram definidos os intervalos de valores bons, aceitáveis e ruins para a resposta do compósito no estado fresco e para o estado endurecido. Levou-se em consideração a discussão acerca de argamassas autoadensáveis em Santos *et al.* (2019a), além da observação do comportamento do compósito, para o estado fresco, e a NBR 13553 (ABNT, 2012a) para o estado endurecido. A Tabela 4 resume os valores adotados.

Tabela 3 - Planejamento de dosagem fatorial

	Traços (T)	Terra (g)	Areia (g)	Metacaulim (g)	Ativador Alcalino (AA)	
					NaOH (10 Mol/l) (g)	Silicato de Sódio (g)
Planejamento Experimental	T1	1,00	0,25	0,25	0,413	0,413
					0,825	
	T2	1,00	1,00	0,40	0,660	0,660
					1,320	
	T3	1,00	0,25	0,38	0,447	0,447
					0,894	
	T4	1,00	1,00	0,60	0,715	0,715
					1,430	
	T5	1,00	0,25	0,25	0,206	0,619
					0,825	
	T6	1,00	1,00	0,40	0,330	0,990
					1,320	
	T7	1,00	0,25	0,38	0,223	0,670
					0,894	

Figura 4 - Teste de espalhamento



Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

Tabela 4 - Intervalos de avaliação de resposta

Classificação	Estado Endurecido	Estado Fresco	
	Resistência à compressão com 7 dias de idade (Rc7) (MPa)	Diâmetro de Espalhamento (D) (mm)	Área relativa de Espalhamento (Γ_m)
Ruim	$Rc7 < 1$	$D < 200$ ou $D > 280$	$\Gamma_m < 3,00$ ou $\Gamma_m > 6,84$
Aceitável	$1 < Rc7 < 2$	$200 < D < 220$ ou $260 < D < 280$	$3,00 \leq \Gamma_m < 3,84$ ou $5,76 \leq \Gamma_m < 6,84$
Bom	$Rc7 > 2$	$240 \leq D \leq 260$	$3,84 \leq \Gamma_m < 5,76$

A partir dos resultados obtidos do planejamento fatorial, foi selecionado um traço com uma consistência autoadensável satisfatória e de maior resistência. Em seguida, houve uma avaliação para a otimização da solução ativadora, definindo-se a mistura que seria utilizada para o restante do trabalho. Com o traço selecionado, foram realizados os ensaios de caracterização, com índices físicos (ABNT, 2005a, 2012b), DRX, infravermelho, resistência à tração na flexão (ABNT, 2005b), funil V (Okamura; Ouchi, 2003), além da construção e avaliação da resistência à compressão da parede reduzida.

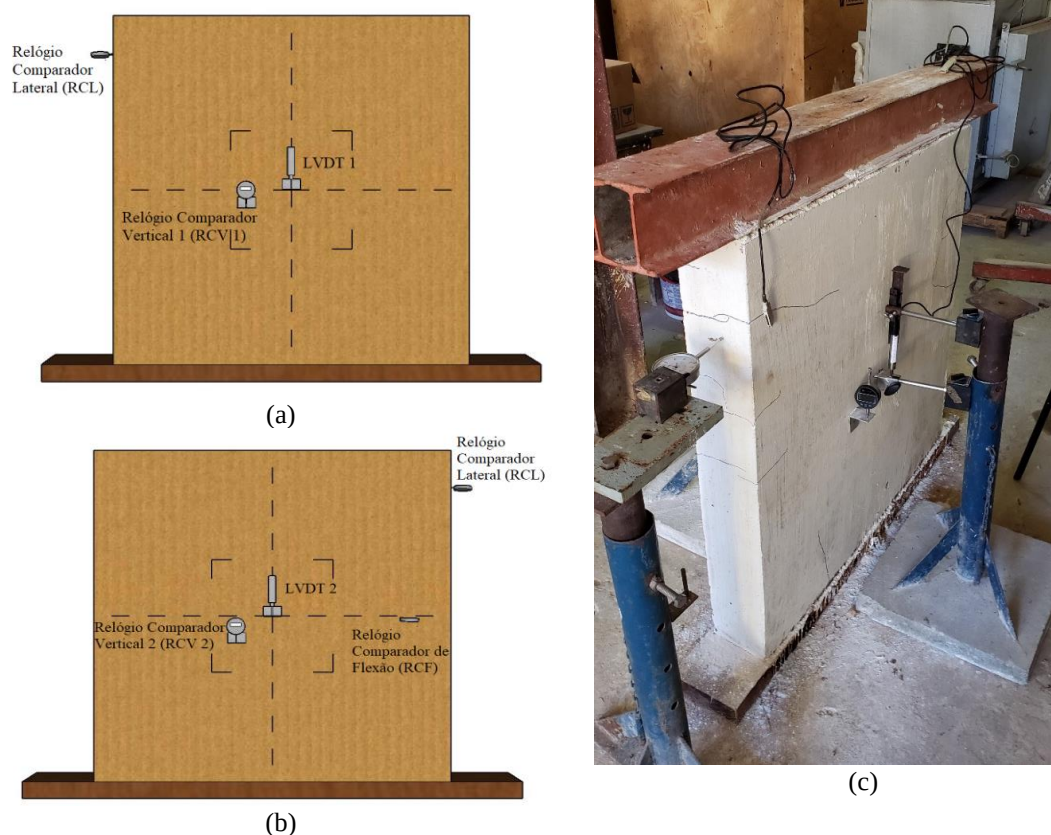
Parede reduzida

A parede e os respectivos corpos de prova foram fabricados como a dosagem selecionada, para a avaliação e correlação das resistências à compressão. Para o ensaio de compressão, a parede foi pintada de branco para facilitar a verificação das fissuras, foram designados os lados 1 e 2 da parede e esta foi instrumentada utilizando os seguintes equipamentos:

- (a) dois LVDT's, para medir deslocamento vertical no centro da parede (LVDT 1 e 2);
- (b) dois relógios comparadores para mensurar deslocamentos verticais no terço central (RCV 1 e 2);
- (c) um relógio comparador para o deslocamento horizontal devido à flexão, na lateral maior da parede, em uma altura de 45 cm da sua base (RCF); e
- (d) e um relógio comparador para o deslocamento lateral da parede (RCL).

As imperfeições de nível do topo da parede foram corrigidas usando gesso em pó e então apoiada uma viga metálica para que houvesse a distribuição uniforme da força de compressão aplicada pela célula de carga. Devido à impossibilidade de programação da taxa de carregamento, procurou-se controlar o incremento em no máximo 0,5 kN/s. As Figuras 5(a) e 5(b) apresentam o esquema dos dois lados 1 e 2, respectivamente, do ensaio e a (c) apresenta uma imagem da parede pronta para ser ensaiada.

Figura 5 - Ensaio de resistência à compressão da parede



Resultados

Resultados metodológicos

Planejamento fatorial

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos das avaliações dos estados fresco e endurecido dos traços definidos no planejamento fatorial.

O espalhamento é mostrado com os dois diâmetros ortogonais medidos e a área relativa de espalhamento calculada (Γ_m). Já a resistência à compressão foi obtida a partir da média de 4 corpos de prova por traço. O traço 7 (T7) foi destacado na Tabela 5, pois foi selecionado para o prosseguimento do estudo, cuja resistência foi a maior da série e o índice de deformabilidade foi considerado aceitável. As respostas foram destacadas de acordo com os parâmetros discutidos na Tabela 4. A partir do planejamento fatorial foi possível avaliar alguns resultados referentes à dosagem da mistura e analisar efeitos isolados das variáveis dependentes pareando certos traços.

A quantidade de areia adicionada se mostrou importante para a consistência do material no estado fresco, porém há um limite que começa a interferir mais fortemente na resistência do material. Realizando o pareamento referente à alteração da quantidade de areia utilizada nos traços, podemos parar os traços T1 e T2, T3 e T4, T5 e T6, T7 e T8. Dessa forma, os traços T1, T3, T5 e T7 (em azul na Figura 6) são aqueles que tiveram uma proporção menor de areia na sua composição (20% de substituição da terra) e, portanto, nos traços T2, T4, T6 e T8 (em laranja na Figura 6), foi utilizada uma quantidade maior de areia (50% de substituição da terra), sendo essa a única alteração percentual entre os pares de traços. A Figura 6 mostra os gráficos dos pares e o comportamento da resistência (Figura 6a) e da área de espalhamento relativa (Figura 6b). Pode-se perceber sempre um acréscimo do espalhamento quando há o incremento de areia no traço, isso acontece devido à menor coesão e ausência de plasticidade da areia em relação à terra, facilitando o espalhamento da mistura no estado fresco.

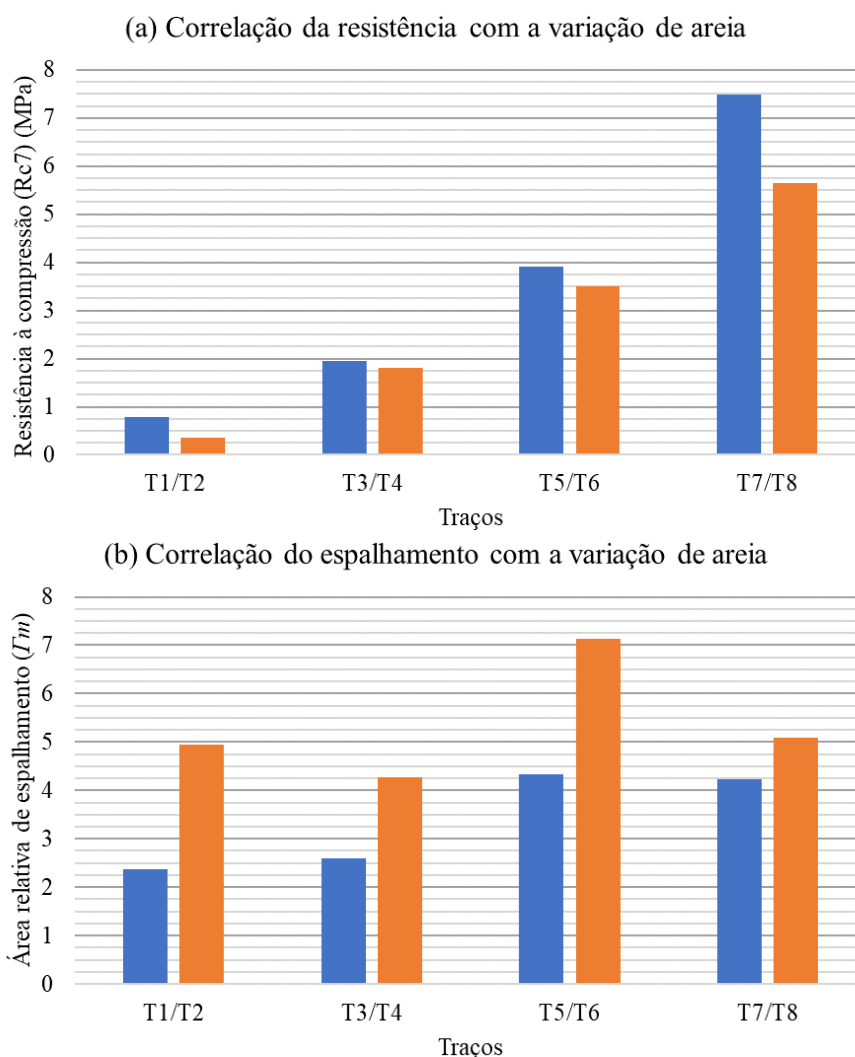
Tabela 5 - Resultados de espalhamento e resistência à compressão aos 7 dias de idade

	Traços (T)	Espalhamento		Resistência à compressão				
		D (mm)	Γ_m	Rc7 (MPa)				
Planejamento Experimental	T1	185,00	182,49	Rc7 (MPa)	0,84	0,74	0,70	0,85
		2,38		Média	0,78			
	T2	240,78	246,68	Rc7 (MPa)	0,34	0,34	0,35	0,37
		4,94		Média	0,35			
	T3	191,57	188,01	Rc7 (MPa)	2,11	1,75	2,10	1,83
		2,60		Média	1,95			
	T4	232,67	226,95	Rc7 (MPa)	1,86	1,81	1,77	1,79
		4,28		Média	1,81			
	T5	232,27	230,05	Rc7 (MPa)	3,71	4,03	4,09	3,80
		4,34		Média	3,91			
	T6	276,30	294,64	Rc7 (MPa)	3,72	3,71	3,53	3,03
		7,14		Média	3,50			
	T7	228,92	228,77	Rc7 (MPa)	7,55	7,44	7,82	7,13
		4,24		Média	7,49			
	T8	248,00	245,68	Rc7 (MPa)	4,28	5,51	6,36	6,42
		5,09		Média	5,64			
	T9 (C)	207,32	214,98	Rc7 (MPa)	2,79	3,05	3,16	3,21
		3,46		Média	3,05			
	T10 (C)	212,36	211,48	Rc7 (MPa)	2,86	3,52	4,17	3,26
		3,49		Média	3,45			
	T11 (C)	215,97	208,39	Rc7 (MPa)	3,97	3,95	3,55	3,73
		3,50		Média	3,80			

Nota: Legenda:

	Bom
	Aceitável
	Ruim

Figura 6 - Correlação da alteração da quantidade de areia nos traços com a resistência e o espalhamento da mistura



O metacaulim, como esperado, teve grande influência sobre a resistência do compósito no estado endurecido por ser fonte primária de sílica e alumina para a cadeia geopolimérica. A Figura 7a ilustra a variação da resistência à compressão na idade de 7 dias com relação à alteração do teor de metacaulim utilizado na mistura, assim os traços T1, T2, T5 e T6 possuem um teor de metacaulim de 20% em relação aos sólidos inertes (terra e areia), já os traços T3, T4, T7 e T8 utilizam um teor de 30% de metacaulim na sua composição. Já sobre o espalhamento da mistura no estado fresco, a variação do metacaulim teve baixa influência (Figura 7b), principalmente para os três primeiros pares de comparação. No último par percebe-se uma considerável diminuição do espalhamento, que pode ser elucidado pelo fato de que, com aumento do metacaulim no traço 8 (T8), mais silicato foi necessário para a ativação alcalina, restando menos silicato e diminuindo o espalhamento, enquanto que o traço 6 (T6), traz uma formulação com baixo teor de metacaulim e altas porcentagens de areia e silicato, favorecendo o espalhamento do compósito no estado fresco, sendo inclusive o traço com maior Γ_m .

Ainda utilizando a análise por pares, a relação silicato de sódio/hidróxido de sódio se mostrou importante para os dois estados avaliados, pois o silicato fornece uma fonte de sílica adicional e tende a elevar a reatividade da mistura, conforme mencionado por Costa (2020), possibilitando ganhos de resistência (Figura 8a), além de melhorar a trabalhabilidade do compósito no estado fresco (Figura 8b), por funcionar como defloculante em argilas e dispersões de caulim, como citado por Landrou *et al.* (2016).

Na ativação alcalina, muitas propriedades estão ligadas às razões molares presentes nos materiais reativos da mistura. No entanto, para o caso estudado, não necessariamente ocorre assim. Nas ativações alcalinas padrões, as relações molares são ajustadas nas quantidades de solução ativadora e precursor para se chegar em

determinadas proporções e propriedades, mas para o caso do presente estudo avaliado a solução ativadora foi utilizada com função principal de possibilitar a autoadensabilidade da mistura, sendo dosada para tal e não balizada em relações molares pré-definidas.

A partir da Tabela 6 podemos ver as principais relações molares obtidas com os traços que foram utilizados no planejamento, considerando apenas a composição química dos componentes da solução ativadora e do metacaulim.

Mesmo as relações molares não podendo ser comparadas diretamente ao padrão proposto às ativações alcalinas, algumas tendências podem ser observadas. Como indica Silva (2019), a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ é o principal indicativo das ligações químicas referentes ao endurecimento das ativações alcalinas. Pode-se perceber, no entanto, que é nas dosagens com maior proporção de silicato de sódio na solução ativadora (T5 até T8) em que começam a ocorrer valores mais altos de resistência, comprovando o suposto incremento de polimerização e reatividade obtida com o silicato, citado anteriormente.

Comparando com as relações estudadas por Davidovits, Davidovics e Davidovits (1994) e Khale e Chaudhary (2007), as razões utilizadas no presente estudo de $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ e $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ estão acima daquelas empregadas nas referências. Dessa forma, quando o material é exposto à atmosfera, o sódio livre, excedente, pode combinar-se com o gás carbônico, formando pequenos cristais de bicarbonato de sódio hidrossolúveis. Esses sais em excesso podem vir a obstruir os poros da superfície, modificando a permeabilidade do material e, consequentemente, as propriedades de higroscopicidade e a durabilidade. Porém esse aspecto não foi objeto de estudo deste trabalho.

Figura 7 - Correlação da resistência à compressão do compósito avaliado em relação à alteração de variáveis independente

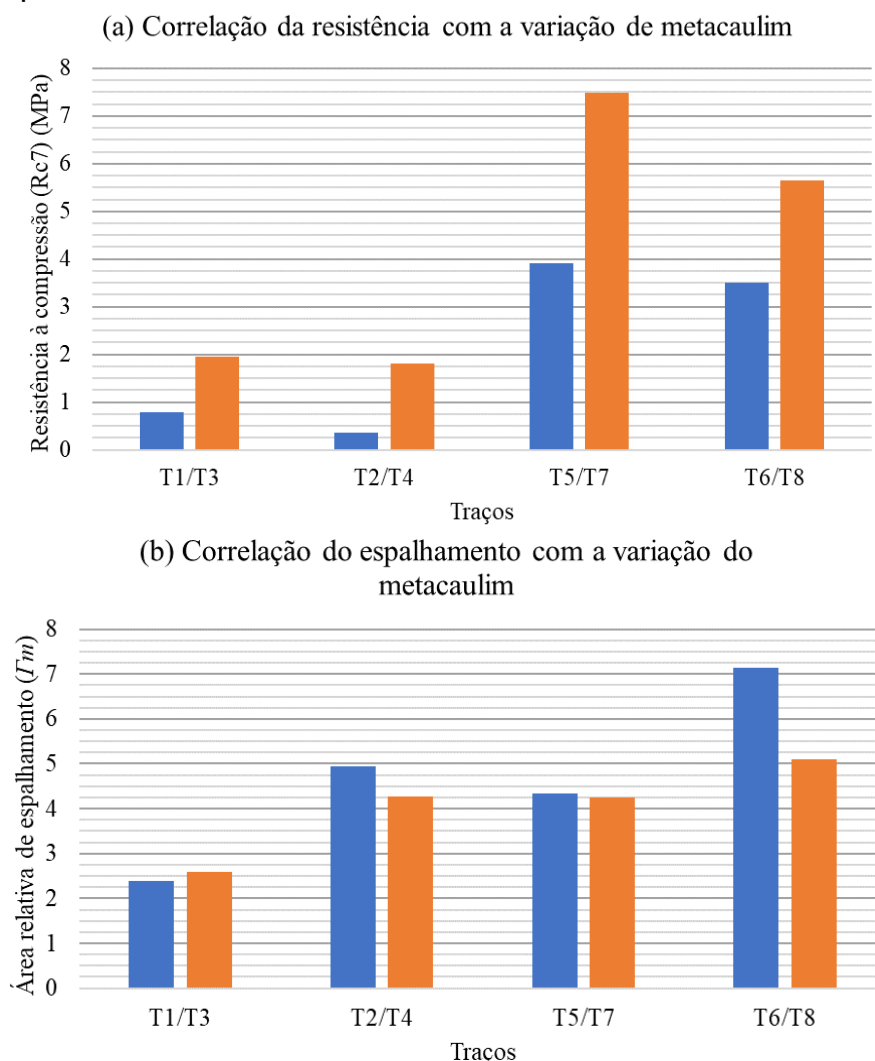


Figura 8 - Correlação da resistência e do espalhamento da mistura com a variação do silicato de sódio

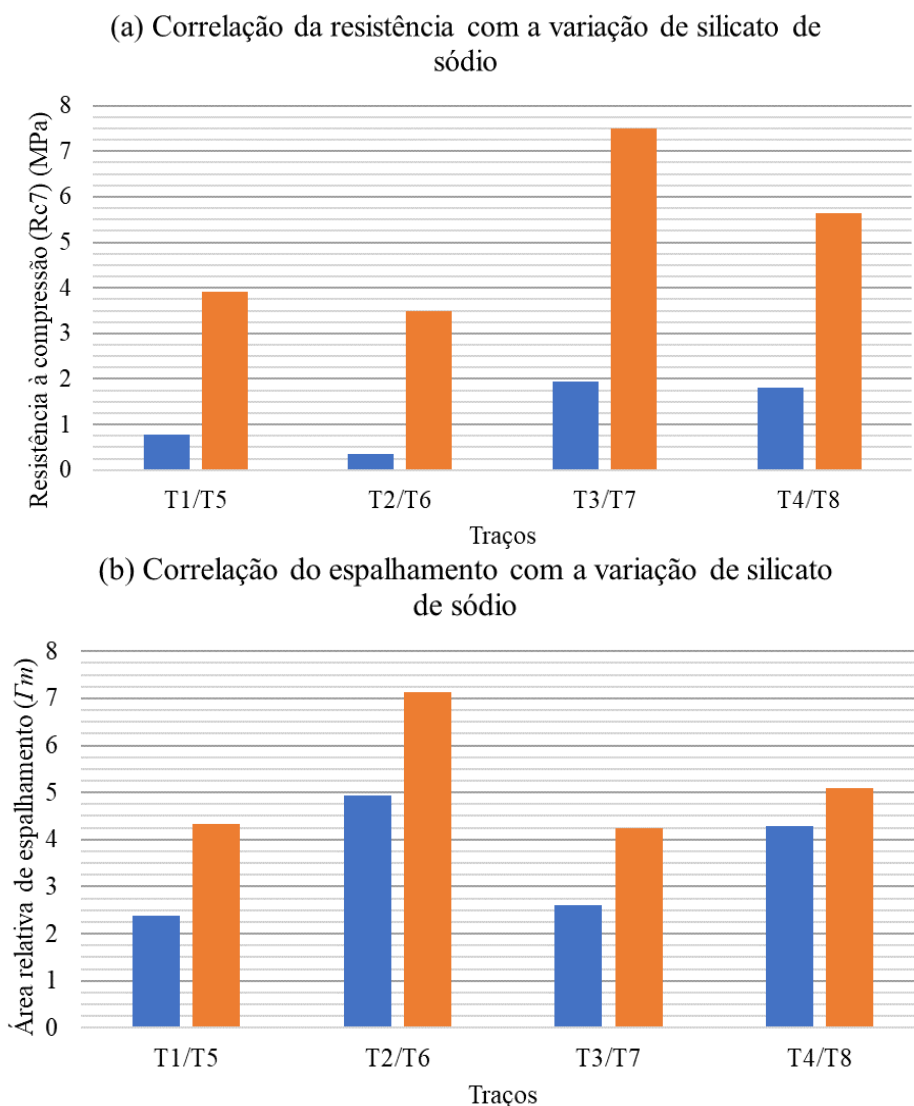


Tabela 6 - Relações molares dos traços

	Traços (T)	Relações Molares			
		SiO ₂ /Al ₂ O ₃	NaO ₂ /SiO ₂	H ₂ O/NaO ₂	NaO ₂ /Al ₂ O ₃
Planejamento	T1	4,26	0,62	9,49	2,64
	T2	4,26	0,62	9,49	2,64
	T3	3,62	0,53	9,49	1,90
	T4	3,62	0,53	9,49	1,90
	T5	5,41	0,45	9,38	2,42
	T6	5,41	0,45	9,38	2,42
	T7	4,45	0,39	9,38	1,75
	T8	4,45	0,39	9,38	1,75
	T9 (C)	4,52	0,46	9,42	2,08
	T10 (C)	4,52	0,46	9,42	2,08
	T11 (C)	4,52	0,46	9,42	2,08

Avaliação estatística

A Tabela 7 mostra a análise de variância (ANOVA) e a Tabela 8 o teste de Fisher do modelo proposto de planejamento fatorial para a resposta de resistência à compressão aos 7 dias de idade.

Percebe-se que as variáveis significativas (destacadas em vermelho) são o metacaulim (MK) e a relação silicato/hidróxido (S/H), corroborando com a literatura em que ambos influenciam diretamente na formação dos compostos responsáveis pelo ganho de resistência. A areia e as interações das variáveis não apresentaram respostas estatisticamente significativas, nem mesmo com a análise de curvatura; percebeu-se então que, mesmo em um modelo quadrático tais variáveis não influenciariam significativamente no fenômeno. Outro parâmetro interessante é que o R^2 mostra que o modelo explica 98% da variação dos dados observados. Além disso, através das relações do teste de Fisher, confirma-se que o modelo é estatisticamente significativo e que não necessita de ajustes.

A Tabela 9 apresenta a ANOVA e a Tabela 10 o teste de Fisher para a resposta do índice de espalhamento das misturas. É possível observar que todas as linhas estão destacadas como significativas estatisticamente, inclusive a falta de ajuste (“Lack of Fit”) e um erro puro quase nulo, porém o R^2 foi de 89,16%, o que é suficiente para correlacionar a análise com os resultados esperados. Tais considerações podem ser endossadas pelo teste de Fisher que mostra uma relação maior que 1 tanto para o modelo como para a falta de ajuste, sendo ambas estatisticamente significativas. Com o auxílio do gráfico de Pareto (Figura 9), pode-se visualizar que as variáveis mais significativas para o espalhamento da mistura são a areia e a relação silicato/hidróxido, resultados já citados anteriormente nos resultados metodológicos.

Tabela 7 - ANOVA da resistência aos 7 dias de idade

Fator	ANOVA; Var.: Rc7; R-sqr = 0,98089; Adj: 0,95222 Modelo 2**(3-0); MS Erro Puro = 0,160833 DV: Rc7				
	SS	df	MS	F	p
(1) Areia	1,00111	1	1,00111	6,2245	0,130043
(2) MK	8,71531	1	8,71531	54,1885	0,017958
(3) S/H	30,61531	1	30,61531	190,3543	0,005212
1 e 2	0,16531	1	0,16531	1,0278	0,417364
1 e 3	0,35701	1	0,35701	2,2198	0,274714
2 e 3	1,19351	1	1,19351	7,4208	0,112473
Falta de ajuste	0,49761	2	0,24881	1,5470	0,392621
Erro puro	0,32167	2	0,16083	-	-
Total da soma dos quadrados (SS)	42,86685	10	-	-	-

Tabela 8 - Teste de Fisher para o modelo de resistência aos 7 dias de idade

Parâmetros	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F Calculado	F Tabelado	Teste F
Regressão	42,04757	6	7,00793	34,22	6,16	5,55
Resíduo	0,81928	4	0,20482			
Falta de Ajuste	0,49761	2	0,24881	1,55	19,00	0,08
Erro Puro	0,32167	2	0,16084			
Total	42,86685	8				

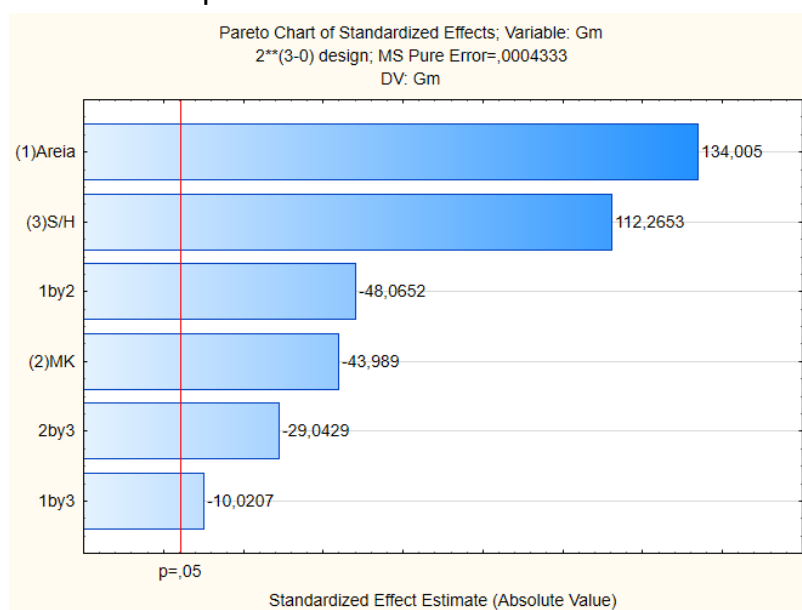
Tabela 9 - ANOVA para o espalhamento da mistura no estado fresco

Fator	ANOVA; Var.: Gm; R-sqr = 0,8916; Adj: 0,72899 Modelo 2**(3-0); MS Erro Puro = 0,0004333 DV: Gm				
	SS	df	MS	F	p
(1) Areia	7,78151	1	7,781513	17957,34	0,000056
(2) MK	0,83851	1	0,838512	1935,03	0,000516
(3) S/H	5,46151	1	5,461513	12603,49	0,000079
1 e 2	1,00111	1	1,001113	2310,26	0,000433
1 e 3	0,04351	1	0,043513	100,41	0,009812
2 e 3	0,36551	1	0,365512	843,49	0,001183
Falta de ajuste	1,88268	2	0,941338	2172,32	0,000460
Erro puro	0,00087	2	0,000433	-	-
Total da soma dos quadrados (SS)	17,37522	10	-	-	-

Tabela 10 - Teste de Fisher para o espalhamento da mistura no estado fresco

Teste de Fisher						
Parâmetros	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalc	Ftab	Teste F
Regressão	40,98330	6	6,83055	14,5057	6,16	2,3548 2
Resíduo	1,88355	4	0,47089			
Falta de Ajuste	1,88268	2	0,94134	2164	19,00	113,89 5
Erro Puro	0,00087	2	0,00044			
Total	42,86685	8				

Figura 9 - Gráfico de Pareto do espalhamento da mistura no estado fresco



Otimização da solução ativadora

A fim de avaliar a influência da solução ativadora na resistência à compressão da mistura, foi realizado um estudo de variação do teor de substituição por água, visando uma melhor utilização do silicato de sódio e do hidróxido sódio. A Tabela 11 mostra os resultados obtidos.

Tabela 11 - Estudo da variação da quantidade de água na solução ativadora

TS	D (mm)		Rc7 (MPa)				Rcm (MPa)	σ (MPa)
0%	228,92	228,77	7,55	7,44	7,82	7,13	7,49	0,29
20%	228,86	228,89	5,30	4,62	6,14	6,00	5,52	0,70
40%	209,45	206,97	1,78	1,02	1,39	1,27	1,37	0,32
60%	257,91	258,96	0,15	0,15	0,13	0,13	0,14	0,01

Nota: Legenda:

TS: Teor de substituição;

D: Diâmetro de espalhamento;

Rc7: Resistência à compressão aos 7 dias;

Rcm: Resistência média à compressão; e

σ : Desvio padrão.

Percebeu-se que, para o espalhamento da mistura, a influência da utilização da água não segue uma variação linear. É possível que, até 20% de substituição da solução ativadora por água, o efeito dispersor do silicato de sódio, citado por Landrou *et al.* (2016), não seja prejudicado pela água excedente. Enquanto que, ao atingir o teor de substituição de 40%, a terra fica mais coesa, diminuindo o diâmetro de espalhamento. Quando essa reposição é de 60%, o aumento expressivo do espalhamento pode ter ocorrido devido ao limite de liquidez ter sido atingido. De qualquer forma, somente ao atingir o teor de 60% que se observa uma melhora no espalhamento, voltando a apresentar a propriedade desejada de autoadensabilidade originalmente observada na mistura.

Quando analisado o efeito do aumento da proporção de água em relação à resistência, observa-se que o incremento de água tem relação linear com a perda da resistência. Mesmo nos níveis mais baixos, a introdução da água conduz a um decréscimo na resistência aos 7 dias das misturas. Ao atingir 40% no teor de substituição da solução ativadora por água, a resistência foi significativamente menor que da mistura de controle e em 60% não houve desenvolvimento significativo de resistência. Esse efeito é explicado tanto pela diminuição da disponibilidade de silicatos reativos presentes na solução ativadora, que deteriora a formação dos compostos que dão resistência ao compósito, quanto pelo aumento da porosidade ocasionado pela presença de água no estado endurecido do material. Dessa forma, a fase líquida da mistura utilizada para a construção da parede monolítica permaneceu somente com a solução ativadora, sem água adicional.

Caracterização de índices físicos

Absorção, massa específica e índice de vazios

Foram realizados ensaios para verificar a absorção de água do material, além da sua massa específica e seu índice de vazios, mostrados na Tabela 12 (ABNT, 2005a).

Para quesito comparativo, também foi realizado o ensaio de absorção baseado na norma direcionada para solo-cimento (ABNT, 2012b), exposto na Tabela 13.

Os principais dados obtidos aqui são os valores de absorção, que interferem diretamente na resistência e na durabilidade dos compósitos de terra. Os valores de ambas as metodologias foram relativamente próximos e os dois foram menores que 20%, valor limite da NBR 13553 (ABNT, 2012a), que demonstra requisito para os materiais empregados em paredes monolíticas sem função estrutural.

Espectroscopia infravermelho

O resultado do ensaio de espectroscopia infravermelho para o compósito final está exibido na Figura 10.

De acordo com Gonçalves *et al.* (2022), Apolonio *et al.* (2020), Azevedo, Strecker e Lombardi (2018) e Santa (2016), pode-se inferir que o pico obtido na região de 1000 cm⁻¹ indica geopolimerização, com bandas características de ligações Si-O-Si e Si-O-Al. Em materiais não ativados, o pico ocorre na região de 1060-1090 cm⁻¹ e, de acordo com a quantidade de alumínio, esse pico é deslocado cerca de 80-90 cm⁻¹ em direção às bandas inferiores. Os picos na região de 3450 cm⁻¹ e 1650 cm⁻¹ mostram a presença de bandas O-H e H-O-H, que podem estar associadas à água adsorvida ou à solução ativadora. O pico na região entre as bandas de 1400-1500 cm⁻¹ está relacionado à carbonatação do excesso de sódio na solução ativadora. Picos na região entre 700-800 cm⁻¹ estão associados à formação de tetraedros na cadeia geopolimérica. As bandas inferiores, na faixa de 500 cm⁻¹, estão ligadas às formações cristalinas de Si-O e Al-O. Dessa forma, pôde-se observar que houve a ativação alcalina, criando compostos característicos da geopolimerização e proporcionando uma estrutura resistente para a mistura de terra e areia.

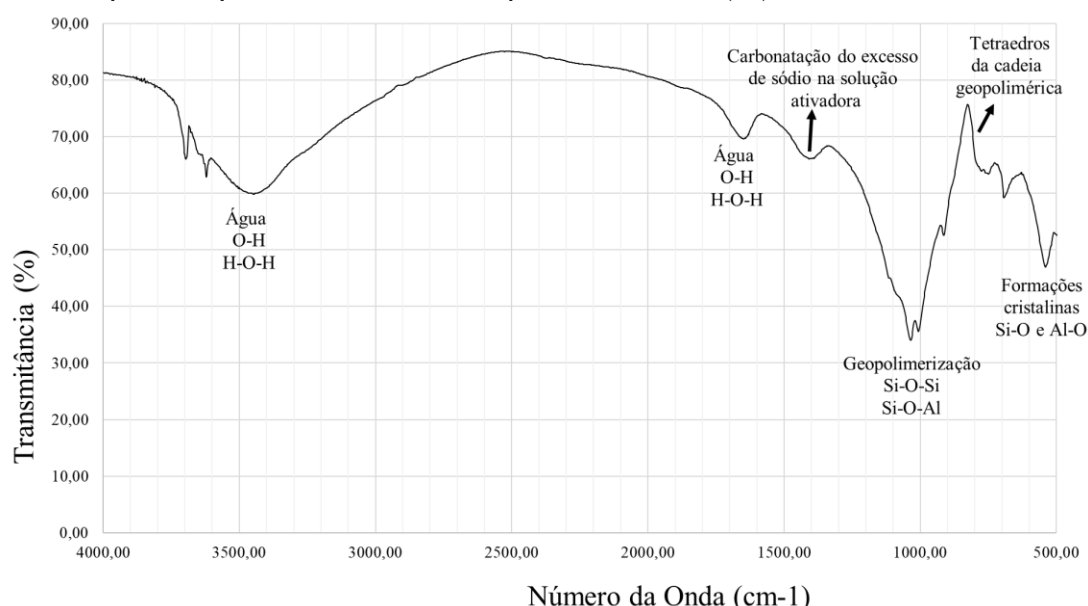
Tabela 12 - Parâmetros físicos do compósito selecionado pela NBR 9778 (T7)

CP	1	2	3	4	Média	σ
Massa seca (g)	304,7	302,1	307,6	303,4	-	-
Massa imersa em água (g)	175,6	172,2	175,6	172,7	-	-
Massa saturada (g)	354,0	351,4	358,1	352,6	-	-
Absorção (%)	16,18	16,32	16,42	16,22	16,28	0,11
Índice de vazios (%)	27,63	27,51	27,67	27,35	27,54	0,15
Massa específica seca (g/cm ³)	1,71	1,69	1,69	1,69	1,69	0,01

Tabela 13 - Absorção pela NBR 13553

CP	1	2	3	4	5	Média	σ
Massa seca (g)	300,5	301,2	300,6	-	-	-	-
Massa saturada (g)	341,2	343,7	342,7	-	-	-	-
Absorção (%)	13,54	14,11	14,01	-	-	13,89	0,30

Figura 10 - Espectroscopia infravermelho do compósito selecionado (T7)



Resultados reológicos

Funil V

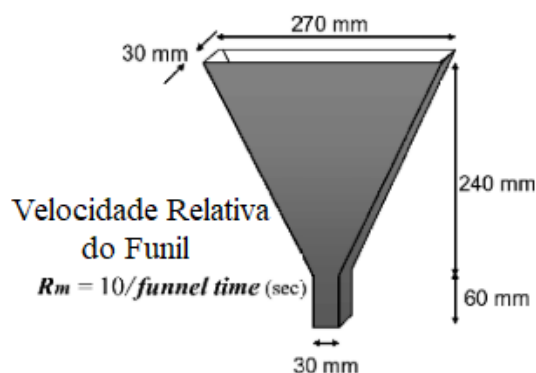
O teste de funil V foi realizado com base na metodologia de Okamura e Ouchi (2003), onde há o preenchimento total do funil com o material e posterior escoamento cronometrado, dando um parâmetro para a fluidez do compósito avaliado. O aparato utilizado está ilustrado na Figura 11.

Para o ensaio do funil V, a queda contínua do material durou cerca de 14,71 segundos, retornando um valor de escoamento relativo de 0,68, menor que 1, valor considerado mínimo para argamassas autoadensáveis (Santos *et al.*, 2019b). Esse resultado pode ser elucidado devido à maior viscosidade da parte líquida da mistura (solução ativadora), principalmente pelo silicato de sódio, dificultando a fluidez da mistura. O valor mínimo de 1 trazido por Santos *et al.* (2019b) está relacionado aos ligantes de cimento Portland, onde a água é um dos principais fatores governantes da reologia da parte fresca, portanto é justo tal resultado visto a alta viscosidade da solução ativadora em relação à água.

Resistência à compressão

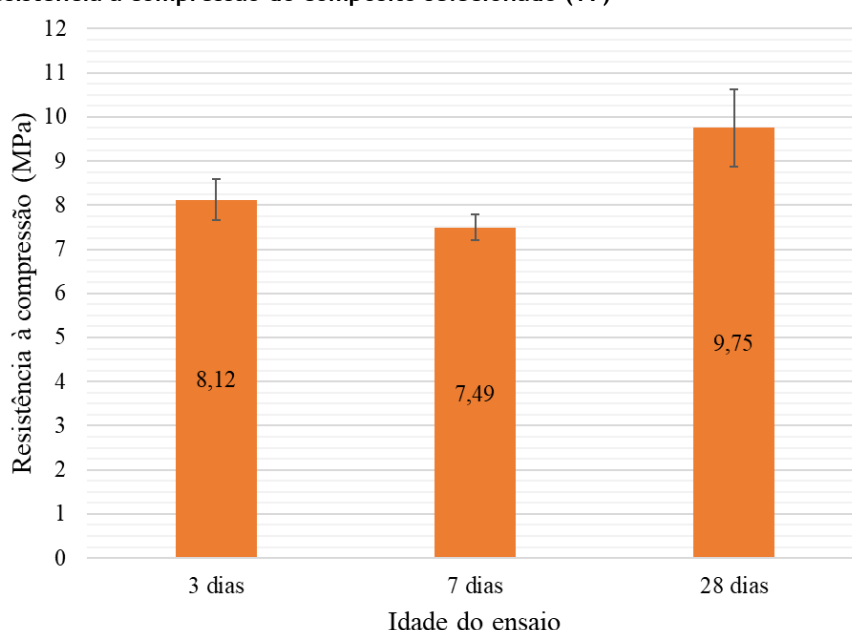
Foram avaliadas as resistências à compressão para as idades de 3, 7 e 28 dias. Os resultados estão apresentados na Figura 12.

Figura 11 - Teste do Funil V



Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

Figura 12 - Resistência à compressão do compósito selecionado (T7)



Pode-se visualizar o rápido ganho de resistência do material, característico das ativações alcalinas. Cerca de 80% da resistência do material aos 28 dias foi adquirida nos três primeiros dias, o que pode agilizar a logística de uso de formas para o material. Acerca do leve decréscimo de resistência dos 3 para os 7 dias, um dos motivos pode ser o excesso de NaOH na solução ativadora, o álcali em excesso pode precipitar e perturbar a estruturação da ativação alcalina, porém a literatura observa que a resistência dos materiais ativados alcalinamente tende a estabilizar após os 28 dias de cura (Amran *et al.*, 2020; Azevedo; Strecker, 2017; Parathi; Nagarajan; Pallikkara, 2021).

Com relação à bibliografia consultada, os valores encontrados nesta pesquisa foram superiores a alguns trabalhos que utilizaram o cimento como estabilizante, como o de Martins, Silva e Toledo Filho (2014), com resistência aos 28 dias de 3,33 MPa, de Milani e Barboza (2016), com resistência máxima de 1,78 MPa, e de Alcantara *et al.* (2017), com resistências entre 2,704 e 6,492 MPa.

Já em Udawattha e Halwatura (2018), que também utilizaram a ativação alcalina, foram obtidas resistências próximas à 10 MPa, resultados comparáveis aos obtidos com o compósito proposto no presente trabalho aos 28 dias.

Cristelo *et al.* (2012) e Gu e Chen (2020) atingiram valores de resistência acima de 20 MPa. No primeiro estudo foi utilizada a estabilização pela ativação alcalina, mas a autoadensabilidade da mistura foi sugerida somente através do texto dos autores com o termo “slurry consistence”, não sendo necessariamente autoadensável. Assim, uma comparação direta com os resultados obtidos nesta pesquisa é inviável, pois as

condições obtidas no estado fresco interferem nas propriedades de resistência do compósito. O segundo trabalho avaliou diversas condições, como a cura térmica e a utilização de até quatro estabilizantes, de modo que também foge do que foi realizado no estudo. No entanto, esses valores mostram que há espaço para evolução e obtenção de compósitos de terra autoadensáveis ainda mais resistentes.

Resistência à tração na flexão

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão estão na Tabela 14.

Os resultados de tração estão próximos aos valores obtidos na literatura. As misturas com fibras de Martins (2014) obtiveram resistência máxima de 1,78 MPa na flexão, Gu e Chen (2020) obtiveram até 1,5 MPa e Clausell et al. (2021) atingiram 1,43 MPa. Aos 28 dias a resistência à flexão dos corpos de prova avaliados foi levemente superior aos citados.

Parede reduzida

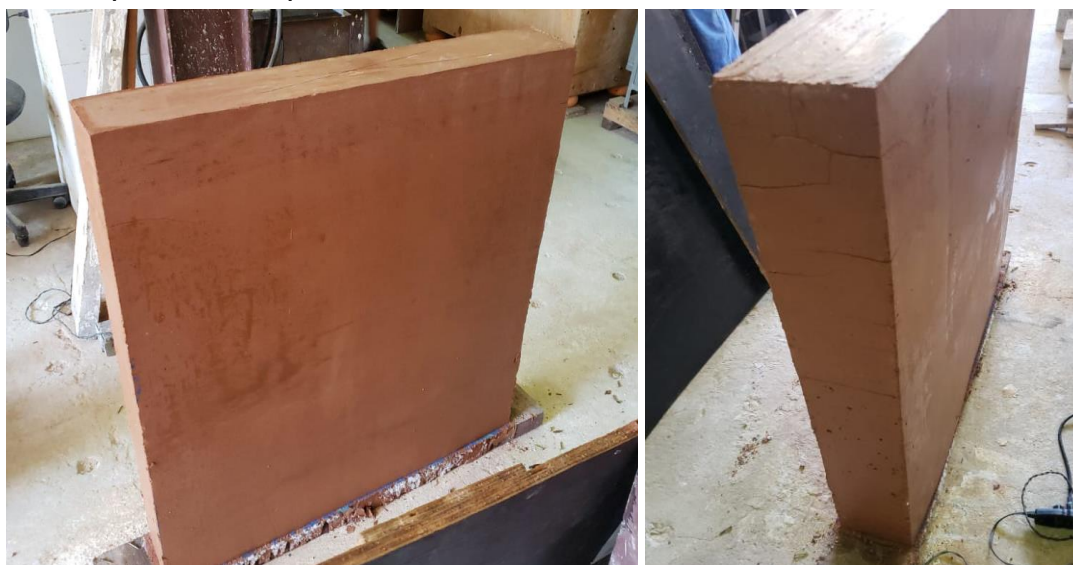
Ao ser desmoldada, aos 28 dias de cura, pôde-se notar algumas fissuras de retração nos menores lados e na base da parede, mas nenhuma na sua parte central; além disso, tais fissuras não comprometeram sua estabilidade. Ademais, a estrutura não apresentou nenhum nicho ou falha na acomodação do material na forma, apresentou uma superfície consideravelmente uniforme e um topo relativamente nivelado, comprovando na prática a autoadensabilidade da matriz produzida. A Figura 13 mostra o aspecto da parede após o desmolde e as fissuras apresentadas.

Antes do ensaio, as fissuras de retração pré-existent foram demarcadas em cor diferente para haver distinção entre elas e as provenientes do ensaio. No decorrer do ensaio, aos 280 kN, a cantoneira base do LVDT 2 desprende-se da estrutura e não foi possível aferir tal medida a partir desse momento. Aos 340 kN todos os medidores de deslocamento foram retirados para evitar qualquer acidente com eventual ruptura da parede. No ensaio de compressão, a parede resistiu a uma carga máxima de 494,40 kN, correspondente a uma tensão de 3,30 MPa. (Exclusão de frase final fora de contexto)

Tabela 14 - Resistência à tração na flexão

Idade	CP	Tensão (MPa)	Idade	CP	Tensão (MPa)
7 dias	1	1,08	28 dias	1	2,09
	2	1,14		2	1,90
	3	1,40		3	1,84
	4	1,20		4	1,91
Média		1,21	Média		1,94
σ		0,14	σ		0,11

Figura 13 - Aspecto visual da parede



Os corpos de prova confeccionados com o mesmo material utilizado para a moldagem da parede foram rompidos com a mesma idade e apresentaram resistências médias próximas, de 10,68 MPa para os cilíndricos de medida 5 x 10 cm e 10,49 MPa para os cilíndricos de 10 x 20 cm, como mostra a Tabela 15.

Pôde-se observar que a resistência média não se alterou em relação à dimensão dos corpos de prova cilíndricos, porém para a parede houve uma redução de aproximadamente 1/3. A relação média da resistência entre os corpos de prova e a parede é de 3,21, podendo ser um indicativo para um coeficiente de segurança nesse tipo de material.

Monteiro *et al.* (2019) avaliaram a resistência à compressão de pequenas alvenarias estruturais com blocos de concreto com metodologia semelhante ao presente estudo e obtiveram uma carga máxima de 439,70 kN para paredes com dimensões de 140 x 1200 x 1200 mm, correspondendo a uma tensão de 2,57 MPa. Assim, existe a possibilidade que compósitos de terra autoadensável estabilizada alcalina possam atender à determinadas condições estruturais.

A parede de taipa de pilão e a de BTC ensaiadas no trabalho de Miccoli, Müller e Fontana (2014) obtiveram resistências de 3,73 e 3,28 MPa, respectivamente, para ensaios de compressão em paredes reduzidas, estando bem próximo, portanto, ao valor de 3,30 MPa obtido nesta pesquisa. Enquanto que as paredes reduzidas de taipa de pilão de Reddy e Kumar (2011) alcançaram 5,47 MPa, um valor superior aos citados. Bui *et al.* (2014) e Jayasinghe e Kamaladasa (2007) também realizaram testes em paredes de taipa reduzida e atingiram, respectivamente, as resistências máximas de 3,71 MPa e 1,22 MPa.

Acerca dos deslocamentos, Oliveira (2015) avaliou alvenarias reduzidas de BTC e encontrou um deslocamento vertical de aproximadamente 4,40 mm com uma carga de 330 kN. Como ilustrado na Figura 14, com 340 kN, na parede proposta obteve-se no máximo 3,22 mm de deslocamento, porém é importante observar que para o caso de Oliveira (2015) a carga de ruptura foi de 407,20 kN e já a terra autoadensável resistiu até 494,40 kN, possibilitando uma deformação final maior. No estudo de Jayasinghe e Kamaladasa (2007), o deslocamento vertical máximo para a parede de taipa arenosa foi de 6 mm, enquanto no trabalho de Bui *et al.* (2014) o deslocamento vertical da parede de taipa no momento da ruptura foi de 4,5 mm.

Os deslocamentos obtidos na parede de compósito autoadensável foram próximos aos valores da literatura, com leve tendência a um comportamento mais frágil. As Figuras 14, 15 e 16 mostram os deslocamentos verticais medidos e os deslocamentos referentes à linha de flexão da parede e o deslocamento lateral, respectivamente.

Na ruptura da parede, inicialmente houve o esmagamento do material próximo à base, caracterizando a ruptura por compressão, e logo em seguida com o reajuste da parede, ocorreu um esmagamento mais próximo ao topo, em lados invertidos, como mostra a Figura 17. Formaram-se fissuras características a esse tipo de ensaio, como uma vertical central ao longo de toda a altura da parede e também a fissura inclinada com origem na quina superior. Mesmo com a presença de fissuras de retração no início do ensaio, elas não foram responsáveis pela formação de planos de fragilidade e não tiveram interferência significativa no resultado final.

Tabela 15 - Resistência à compressão dos corpos de prova referentes à parede

Tipo	CP	Tensão (MPa)	Tipo	CP	Tensão (MPa)
50 x 100 mm	1	9,28	100 x 200 mm	1	10,94
	2	9,07		2	10,89
	3	12,38		3	9,25
	4	12,01		4	10,89
	5	-		5	9,45
Média		10,68	Média		10,49
σ		1,75	σ		0,83

Figura 14 - Deslocamento vertical

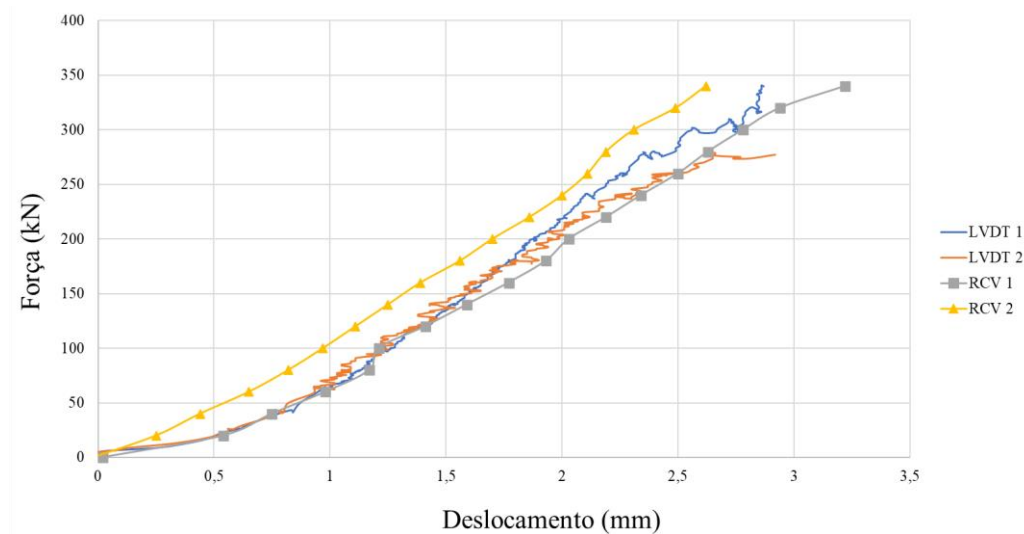


Figura 15 - Deslocamento de flexão

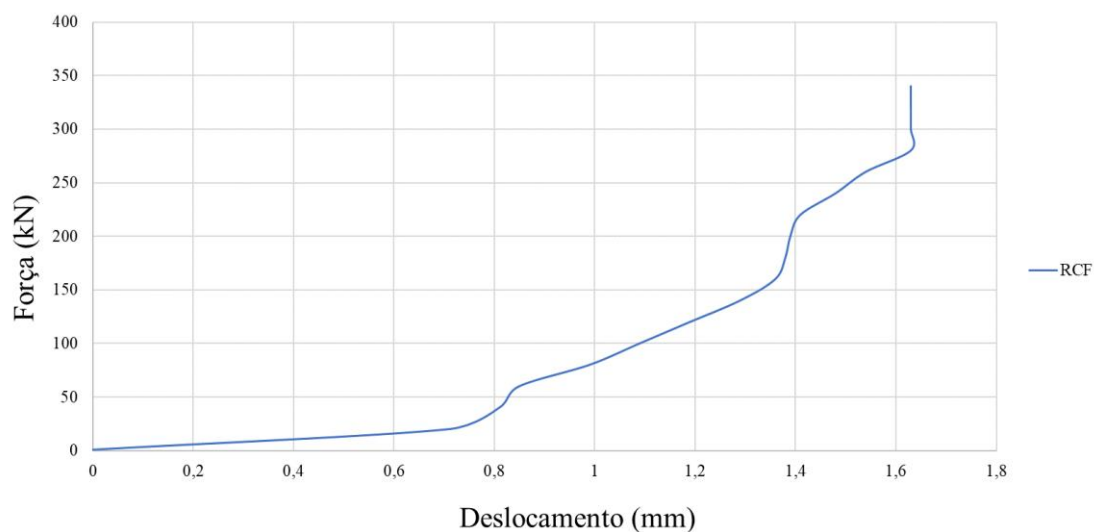


Figura 16 - Deslocamento lateral

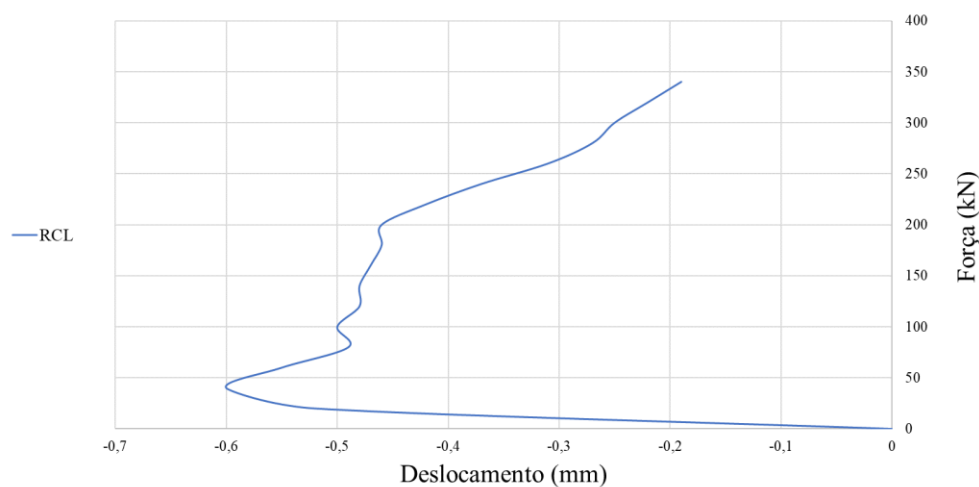


Figura 17 - Padrão de ruptura



Conclusões

Este estudo buscou unir as propriedades autoadensáveis e a ativação alcalina com a terra com o objetivo de construir paredes monolíticas e obter um material resistente com possibilidades estruturais. O experimento se deu em busca de modernizar as técnicas construtivas com terra, trazendo mais opções para uma engenharia mais sustentável.

Conclusões metodológicas do trabalho também devem ser destacadas, como a importância do silicato de sódio, tanto no aspecto fresco quanto nas propriedades do material endurecido; a interferência negativa da água nas propriedades desejadas para o compósito; a importância da areia para se obter um espalhamento adequado da mistura e o cuidado na avaliação das proporções molares para esse tipo de material, já que a análise deve ser distinta a que é feita para os materiais ativados alcalinamente no geral.

A dosagem selecionada mostrou um espalhamento médio aproximado de 228 mm, com espalhamento relativo de 4,24, e uma resistência que atingiu 9,75 MPa com 28 dias de idade. A construção da parede demonstrou a autoadensabilidade da mistura no âmbito prático e suportou uma carga de 494,4 kN, sendo uma tensão de 3,3 MPa, mostrando-se com resistência que sinaliza a possibilidade de uso estrutural do compósito proposto.

Por fim, o trabalho atingiu o seu objetivo de obter um compósito de terra autoadensável estabilizado por ativação alcalina, voltado para a construção de paredes monolíticas. Porém, tanto os compósitos de terra autoadensáveis quanto a ativação alcalina ainda carecem de estudos mais amplos de modo que sua aplicabilidade seja totalmente comprovada e tenha suporte legal de normas próprias. Além disso, devido ao alto pH da solução ativadora utilizada na ativação alcalina, existem alguns conceitos de segurança que podem não ser facilmente aplicados nas construções mais informais ou com menor controle, sendo mais factível a utilização do material por construtoras ou concreteiras de maior porte e maior controle tecnológico.

Devido ao interesse em compósitos de terra autoadensáveis ser relativamente recente, há lacunas a serem exploradas em trabalhos futuros: utilização de diferentes precursores e sua influência nas propriedades do compósito; avaliar adições ou aditivos para evitar fissuração por retração, como ocorreu nas paredes desse estudo; uso do compósito autoadensável para a produção de blocos de diferentes dimensões para a construção de alvenarias; produção de uma mistura de materiais que permita a ativação alcalina do compósito

autoadensável apenas com a adição de água, trazendo mais simplicidade e segurança ao processo, como são denominadas as ativações alcalinas com uma parte (Luukkonen *et al.*, 2018).

Referências

- ALCANTARA, M. A. D. M. *et al.* Aspectos reológicos e mecânicos do estado fresco de um solo-cimento autoadensável. **Revista Materia**, v. 22, n. 3, 2017.
- AMRAN, Y. H. M. *et al.* Clean production and properties of geopolymers concrete: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119679, 2020.
- APOLONIO, P. H. *et al.* Produção de geopolímeros utilizando cinza da casca de arroz como fonte complementar de sílica. **Cerâmica**, v. 66, n. 378, p. 172–178, jun. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13553**: materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13555**: solo-cimento: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2012b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: requisitos. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão: índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005a.
- AZEVEDO, A. G. de S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 64, n. 371, p. 388–396, set. 2018.
- AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K. Influência da composição química das soluções alcalinas ativadoras na produção de geopolímeros a base de cinza volante. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 12, n. 1, p. 39–46, 2017.
- BUI, T.-T. *et al.* Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 295–302, jan. 2014.
- CLAUSELL, J. R. *et al.* Environmental evaluation of a self-compacted clay based concrete with natural superplasticizers. **Materials and Structures**, v. 54, n. 1, p. 20, fev. 2021.
- COSTA, L. M. **Influência da pozolanicidade na ativação alcalina**. Belo Horizonte, 2020. 139 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- CRISTELO, N. *et al.* Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 727–735, nov. 2012.
- DAVIDOVITS, J.; DAVIDOVICS, M.; DAVIDOVITS, N. **Process for obtaining a geopolymeric alumino-silicate and products thus obtained**. United States Patent 5.342.595, 1994.
- DEMIE, S.; NURUDDIN, M. F.; SHAFIQ, N. Effects of micro-structure characteristics of interfacial transition zone on the compressive strength of self-compacting geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 41, n. 2013, p. 91–98, 2013.

- GHADIR, P.; RANJBAR, N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 361–371, 2018.
- GONÇALVES, D. K. C. *et al.* Study of metakaolins with different amorphities and particle sizes activated by KOH and K₂SiO₃. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, n. October 2021, p. e00778, jun. 2022.
- GU, K.; CHEN, B. Loess stabilization using cement, waste phosphogypsum, fly ash and quicklime for self-compacting rammed earth construction. **Construction and Building Materials**, v. 231, 2020.
- JAYASINGHE, C.; KAMALADASA, N. Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 11, p. 1971–1976, nov. 2007.
- KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 3, p. 729–746, fev. 2007.
- LANDROU, G. *et al.* Lime as an anti-plasticizer for self-compacting clay concrete. **Materials**, v. 9, n. 5, p. 330–345, abr. 2016.
- LUUKKONEN, T. *et al.* One-part alkali-activated materials: a review. **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 21–34, jan. 2018.
- MA, C.; CHEN, B.; CHEN, L. Effect of organic matter on strength development of self-compacting earth-based construction stabilized with cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 414–423, 2016a.
- MA, C.; CHEN, B.; CHEN, L. Variables controlling strength development of self-compacting earth-based construction. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 336–345, 2016b.
- MA, C.; CHEN, L.; CHEN, B. Experimental study of effect of fly ash on self-compacting rammed earth construction stabilized with cement-based composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 7, p. 04016022, 2016c.
- MARTINS, A. P. de S. **Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal**. Rio de Janeiro, 2014. 297 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- MARTINS, A. P. S.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Mechanical behavior of self-compacting soil-cement-sisal fiber composites. **Key Engineering Materials**, v. 634, n. January, p. 421–432, dez. 2014.
- MASKELL, D.; HEATH, A.; WALKER, P. Use of metakaolin with stabilised extruded earth masonry units. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 172–180, 2015.
- MATOS, A. M.; VARUM, H. Self-compacting earth-based composites: mixture design and multi-performance characterisation. **Buildings**, v. 12, n. 5, may 2022.
- MICCOLI, L.; MÜLLER, U.; FONTANA, P. Mechanical behaviour of earthen materials: a comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 327–339, 2014.
- MILANI, A. P. da S.; BARBOZA, C. S. Contribuição ao estudo de propriedades do solo-cimento autoadensável para fabricação de paredes monolíticas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 143–153, out./dez. 2016.
- MILANI, A. P. S.; FERREIRA, A. P. F. Criteria to assess the flow of cement-stabilised self-compacting earth. **Acta Scientiarum - Technology**, v. 44, 2022.
- MINKE, G. **Building with earth: design and technology of a sustainable architecture**. Basel: Birkhäuser, 2006.
- MONTEIRO, A. C. L. *et al.* Experimental and numerical study of masonry with emphasis on the structural efficiency. In: IBERO-LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 40., Natal, 2019. **Proceedings [...]** Natal, 2019.
- OJO, E. B. *et al.* Mechanical performance of fiber-reinforced alkali activated un-calcined earth-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118588, 2020.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003.

OLIVEIRA, G. M. de. **Avaliação do comportamento estrutural de alvenarias de terra construídas com blocos de terra compactados (BTC)**. João Pessoa, 2015. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

OUELLET-PLAMONDON, C. M.; HABERT, G. Self-Compacted Clay based Concrete (SCCC): proof-of-concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 160–168, 2016.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 512–519, 2012.

PARATHI, S.; NAGARAJAN, P.; PALLIKKARA, S. A. Ecofriendly geopolymer concrete: a comprehensive review. **Clean Technologies and Environmental**, v. 23, p. 1701–1713, 2021.

REDDY, B. V. V.; KUMAR, P. P. Structural behavior of story-high cement-stabilized rammed-earth walls under compression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 3, p. 240–247, mar. 2011.

RIOS, S. *et al.* Structural performance of alkali-activated soil ash versus soil cement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 2, p. 04015125, 2016.

SANTA, R. A. A. B. **Síntese de geopolímeros a partir de cinzas pesadas e metacaulim para avaliação das propriedades de solidificação/imobilização de resíduos tóxicos**. Florianópolis, 2016. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SANTOS, V. C. *et al.* Behavior of the self-compacting mortar with sugarcane bagasse ash in the fresh and hardened state. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 1, p. 179–198, fev. 2019b.

SANTOS, V. C. *et al.* Estudo do comportamento da argamassa autoadensável com cinza do bagaço de cana-de-açúcar no estado fresco e endurecido. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 1, p. 179–198, 2019a.

SILVA, J. V. E. **Síntese e caracterização de geopolímeros macroporosos com uso de peróxido de hidrógeno**. Belo Horizonte, 2019. 102 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

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

UDAWATTHA, C.; HALWATURA, R. Geopolymerized self-compacting mud concrete masonry units. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, p. e00177, 2018.

Lucas Araújo

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Administração do projeto, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental | Universidade Federal da Paraíba | Rua Teotônio Guerra, 141, Novo Horizonte | Cruzeta - RN - Brasil | CEP 59375-000 | Tel.: (84) 99193-6888 | E-mail: lucasgiovannic@hotmail.com

Givanildo Azeredo

Conceitualização, Análise de dados, Recebimento de financiamento, Metodologia, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | Universidade Federal da Paraíba | Campus I, Cidade Universitária | Castelo Branco - RN - Brasil | CEP 58059-900 | Tel.: (83) 3216-7355 | E-mail: givanildo.azeredo@academico.ufpb.br

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Editora de seção: **Ercília Hitomi Hirota**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.