



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –

**COMPÓSITO DE TERRA AUTOADENSÁVEL ATIVADA
ALCALINAMENTE PARA A CONSTRUÇÃO DE PAREDES
MONOLÍTICAS**

Por

Lucas Giovanni Costa de Araújo e Araújo

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Março de 2022



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– MESTRADO –

**COMPÓSITO DE TERRA AUTOADENSÁVEL ATIVADA
ALCALINAMENTE PARA A CONSTRUÇÃO DE PAREDES
MONOLÍTICAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Lucas Giovanni Costa de Araújo e Araújo

Orientador: Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo

João Pessoa – Paraíba

Março de 2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A663c Araújo, Lucas Giovanni Costa de Araújo e.
Compósito de terra autoadensável ativada
alcalinamente para a construção de paredes monolíticas
/ Lucas Giovanni Costa de Araújo e Araújo. - João
Pessoa, 2022.
103 f. : il.

Orientação: Givanildo Alves de Azeredo.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Construção com terra. 2. Metacaulim. 3.
Autoadensável. 4. Sustentabilidade. I. Azeredo,
Givanildo Alves de. II. Título.

UFPB/BC

CDU 691(043)

LUCAS GIOVANNI COSTA DE ARAÚJO E ARAÚJO

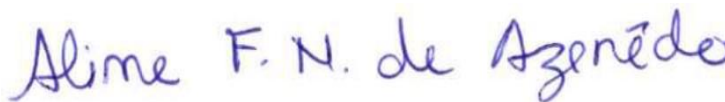
**COMPÓSITO DE TERRA AUTOADENSÁVEL ATIVADA
ALCALINAMENTE PARA A CONSTRUÇÃO DE PAREDES
MONOLÍTICAS**

Dissertação aprovada em 10 / 03 / 2022 como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo – UFPB
(Orientador)



Prof. Dr. Aline Figueirêdo Nóbrega de Azerêdo – UFPB
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE
(Examinador Externo)

Dedico aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradecer inicialmente a Deus, por me acompanhar e iluminar meu caminho durante toda a minha vida.

A toda minha família, principalmente meus pais Paulo Vandeci de Araújo, Marli Costa de Araújo e Araújo e meu irmão Thales Matheus Costa de Araújo e Araújo, que sempre me apoiaram e me deram todo o suporte e confiança para que eu pudesse trilhar os caminhos que escolhi.

A minha namorada, Layanny Silva Soares, que mesmo distante sempre esteve presente e me apoiou em minhas decisões e na minha caminhada.

Ao Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo, pelos ensinamentos, acompanhamento e orientação desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes, pela atenção e apoio desde o processo inicial para a entrada no Mestrado.

A todos os Professores do PPGECAm e Técnicos do Laboratório de Materiais e Estruturas da UFPB – LABEME que me auxiliaram de alguma forma, pelo esforço, atenção e tempo disponibilizados para a realização desse trabalho. Agradecimento especial para o técnico Sebastião que sempre esteve disposto a ajudar com o que podia.

Ao Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM), na pessoa de Lais, que sempre foi solícita para a realização dos ensaios de DRX e Espectroscopia Infravermelho.

Aos meus colegas de Mestrado, em especial Maria Silva, Wesley Vítor, Leane Priscilla e Anselmo Neto que me acompanharam e auxiliaram mais de perto a realização do trabalho.

Aos meus amigos Paulo Sérgio e Arthur Arão que sempre se mantiveram próximos durante esse período de mestrado e pandemia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior – CAPES, pelo apoio financeiro concedido ao longo do curso.

À Universidade Federal da Paraíba, desde funcionários aos Professores, por possibilitar a realização de mais uma etapa da minha vida.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esse trabalho fosse realizado.

RESUMO

A terra como material de construção vem voltando ao foco na comunidade científica devido sua baixa energia incorporada, além da crescente utilização da ativação alcalina como estabilizadora da terra, ao invés da cal ou do cimento Portland. Alguns poucos estudos tratam sobre matrizes de terra autoadensáveis como uma nova técnica construtiva. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um compósito de terra autoadensável estabilizado com ativação alcalina, voltado para a construção de paredes monolíticas. Após um estudo de dosagem por planejamento fatorial, foi selecionada a melhor composição de terra, areia, metacaulim e a solução ativadora para a produção do compósito, a partir do espalhamento da mistura no estado fresco e a resistência à compressão no estado endurecido. Foram também realizados ensaios para a caracterização física, ensaios de difração de raio-x (DRX) e espectroscopia infravermelho, funil V, resistência à compressão e à tração na flexão, além da construção de pequenas paredes para o ensaio de ruptura por compressão. O compósito atingiu uma resistência à compressão de 8,12 MPa com 3 dias e 9,75 MPa com 28 dias. A parede apresentou fissuras de retração, que não influenciaram diretamente no seu modo de ruptura, e suportou uma tensão de 3,30 MPa. Foi avaliado ainda a adição de fibras para mitigação das fissuras de retração. Por fim, o compósito apresentou um bom comportamento reológico tanto no estado fresco como no endurecido, podendo ser empregado na construção de paredes monolíticas.

PALAVRAS-CHAVE: Construção com Terra; Metacaulim; Autoadensável; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The soil as a building material is coming back to the focus of the scientific community due to its low incorporated energy and the growing usage of alkaline activation instead of Portland cement or lime. There are few studies about self-compacting soil matrixes as a building technique. Thus, the present work has the objective to develop a self-compacting soil composite with alkali activation for construction of monolithic walls. After a factorial design study, it was selected the best composition of earth, sand, metakaolin and activation solution for the composite production by the mixture spreading in its fresh state and its compressive strength in the hardened state. It was also made assays for physical characterization, X Ray diffraction (DFX) and infrared spectroscopy, V funnel and compressive and flexural strength. 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. It was also evaluated the addition of fibers trying to mitigate the shrinkage cracks. Finally, the compound 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.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	CONSTRUÇÃO COM TERRA	17
3.1.1	<i>Contexto histórico</i>	<i>17</i>
3.1.2	<i>A terra como material de construção</i>	<i>19</i>
3.1.3	<i>Técnicas de Estabilização da Terra</i>	<i>22</i>
3.1.3.1	Fibras	23
3.1.4	<i>Técnicas Construtivas</i>	<i>23</i>
3.1.4.1	Pau a Pique e Cob	24
3.1.4.2	Taipa de Pilão	25
3.1.4.3	Alvenarias de Terra	26
3.2	COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAREDES DE TERRA	27
3.3	ATIVAÇÃO ALCALINA	29
3.3.1	<i>Uso da ativação alcalina na terra</i>	<i>33</i>
3.4	ESTADO DA ARTE PARA MATRIZES DE SOLO AUTOADENSÁVEL	33
3.5	CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	38
4.2	MATERIAIS	39
4.2.1	<i>Solo, Areia e Metacaulim</i>	<i>39</i>
4.2.2	<i>Ativador Alcalino.....</i>	<i>42</i>
4.2.3	<i>Fibra</i>	<i>42</i>
4.3	MÉTODOS	43
4.3.1	<i>Mistura e Moldagem.....</i>	<i>43</i>
4.3.2	<i>1º Bloco da Metodologia</i>	<i>45</i>

4.3.2.1	Testes Preliminares.....	45
4.3.2.2	Planejamento Fatorial	47
4.3.2.3	Ensaio de Espalhamento	49
4.3.2.4	Resistência à Compressão	49
4.3.3	2º Bloco da Metodologia	50
4.3.3.1	Caracterização da Matriz	50
4.3.3.2	Ensaio de Funil V	51
4.3.3.3	Resistência à Tração na Flexão	52
4.3.3.4	Módulo de Elasticidade	53
4.3.4	Parede Monolítica	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1	RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES	56
5.2	RESULTADO DO PLANEJAMENTO FATORIAL	58
5.2.1	Análise Estatística do Planejamento Fatorial.....	61
5.2.2	Otimização de Solução Ativadora	65
5.3	CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ.....	66
5.3.1	Absorção, Massa Específica e Índice de Vazios	66
5.3.2	Espectroscopia Infravermelho.....	67
5.3.3	Difratômetro de Raios X.....	68
5.4	FUNIL V.....	69
5.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	70
5.6	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	72
5.7	MÓDULO DE ELASTICIDADE	72
5.8	PAREDE MONOLÍTICA.....	73
5.8.1	Ensaio de Compressão	75
5.9	COMPÓSITO COM FIBRA.....	80
5.9.1	Dosagem	80
5.9.2	Caracterização da Matriz.....	83
5.9.2.1	Absorção, Massa Específica e Índice de Vazios	83
5.9.2.2	Difratômetro de Raios X.....	85
5.9.3	Funil V.....	86
5.9.4	Resistência à Compressão.....	86
5.9.5	Resistência à Tração na Flexão	88

5.9.6	<i>Módulo de Elasticidade</i>	89
5.9.7	<i>Parede com Fibra</i>	91
6	CONCLUSÕES	94
6.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cidade de Xibam.	17
Figura 2 - Regiões que apresentam construções com terra.	18
Figura 3 - Construções de pau a pique. (a) Pau a pique comumente encontrado no Brasil; e (b) Técnica de pau a pique bem executada.....	24
Figura 4 – Edificação em cob.....	25
Figura 5 – Edificação de terra feita com taipa de pilão.	25
Figura 6 – (a) Fabrica de adobe; e (b) Habitação de adobe.	26
Figura 7 – (a) BTC com tomada acoplada; e (b) Construção em BTC com estrutura incorporada.	27
Figura 8 – Mapa de fissuras da taipa de pilão.	28
Figura 9 – Modo de ruptura (a) Prisma; (b) Parede reduzida.	28
Figura 10 – Classificação de materiais ativados alcalinamente e comparação com outros ligantes.....	30
Figura 11 - Organograma de Metodologia.	38
Figura 12 - Granulometria da terra e da areia.....	40
Figura 13 – DRX do solo.....	40
Figura 14 – DRX Metacaulim	41
Figura 15 – Propriedades físicas e mecânicas da FibroMac® 24.	43
Figura 16 – Processo de mistura do compósito.	44
Figura 17 – (a) Molde para parede; (b) Corpos de prova cilíndricos.	45
Figura 18 – Ensaio de espalhamento.	49
Figura 19 – Ensaio do Funil V	52
Figura 20 – Ensaio de resistência à tração na flexão.	52
Figura 21 – Sistema de aquisição de dados do Sonelastic®.....	53
Figura 22 – Esquema de ensaio para o lado 1 da parede.	54
Figura 23 – Esquema de ensaio para o lado 2 da parede.	55
Figura 24 – Cristalização de carbonato de sódio.	61
Figura 25 – Gráfico de Pareto para o índice de espalhamento.	64
Figura 26 – Superfícies de resposta (a) Gm x S/H x Areia; (b) Gm x S/H x MK; (c) Fc7 x S/H x Areia; e (d) Fc7 x S/H x MK.....	64
Figura 27 – Espectrograma do material final.	67
Figura 28 – Resultados do DRX: (a) Metacaulim; (b) Solo e (c) Material Final	68

Figura 29 – Ensaio do Funil V.	70
Figura 30 – Resistência à compressão do compósito.	71
Figura 31 – Parede monolítica.	74
Figura 32 – Fissuras na parede.	74
Figura 33 – Parede posicionada para o ensaio de compressão.	76
Figura 34 – Deslocamento vertical da parede.	78
Figura 35 – Deslocamento de flexão.	78
Figura 36 – Deslocamento lateral.	79
Figura 37 – Modo de ruptura da parede.	80
Figura 38– Espalhamentos (a) Referência; (b) 1% de fibra; (c) e (d) 0,5% de fibra.	81
Figura 39 – Espalhamento 0,25% de fibra.	82
Figura 40 - Gráfico comparativo de absorção.	84
Figura 41 – DRX do metacaulim (a) reativo (b) não reativo.	85
Figura 42 - Resistência à compressão de todas as misturas.	87
Figura 43 – Gráficos de tensão x deslocamento para os compósitos (a) sem fibra e (b) com fibra.	88
Figura 44 – Gráfico comparativo da resistência à tração na flexão.	89
Figura 45 – Gráfico comparativo dos módulos de elasticidade médios das misturas.	91
Figura 46 – (a) Fissuração da parede sem fibra; e (b) Fissuração da parede com fibra.	92
Figura 47 – Aspecto visual das paredes (a) Sem fibra; e (b) com fibra.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Normas de construção com terra.	21
Tabela 2 – Relações molares para ativações alcalinas.	30
Tabela 3 - Caracterização da terra e das areias.	39
Tabela 4 - Composição química do metacaulim.	41
Tabela 5 – Caracterização do silicato de sódio.	42
Tabela 6 – Traços em massa dos testes.	47
Tabela 7 – Traços em massa do planejamento fatorial.	48
Tabela 8 - Resultados das dosagens piloto.	57
Tabela 9 - Resultados do Planejamento Fatorial	59
Tabela 10 – Relações Molares dos Traços	60
Tabela 11 – ANOVA para a resistência à compressão com 7 dias.	62
Tabela 12 – Teste de Fisher para a resistência à compressão.	62
Tabela 13 - ANOVA para o índice de espalhamento.	63
Tabela 14 – Teste de Fisher para o índice de espalhamento.	63
Tabela 15 – Otimização da solução ativadora.	65
Tabela 16 – Propriedades do material final.	66
Tabela 17 – Absorção da água.	67
Tabela 18 – Resistência à compressão do compósito sem fibra.	70
Tabela 19 – Resistência à tração na flexão.	72
Tabela 20 – Módulo de elasticidade obtido no Sonelastic.	72
Tabela 21 – Módulo de elasticidade obtido na prensa universal.	73
Tabela 22 – Resistência à compressão dos CP's relativos à parede.	77
Tabela 23 – Traço com fibra em massa.	82
Tabela 24 – Propriedades do compósito com fibra.	83
Tabela 25 – Resultados de absorção.	84
Tabela 26 – Resistência à compressão do compósito com fibra.	86
Tabela 27 – Resistência à tração na flexão.	89
Tabela 28 – Módulo de elasticidade obtidos no Sonelastic para as misturas com fibras. ...	90
Tabela 29 - Módulo de elasticidade obtidos na prensa universal para as misturas com fibras.	90
Tabela 30 – Resistência à compressão dos CP's da parede com fibra.	91

1 INTRODUÇÃO

Frente aos problemas ambientais e modificações climáticas enfrentados ao redor do mundo, a sociedade se conscientiza, cada vez mais, de que para a longevidade do planeta é necessário tomar providências quanto ao desenvolvimento sustentável. A partir das revoluções industriais, os recursos da Terra estão sendo exauridos de forma contínua e descompassada com o tempo de recuperação da natureza. Aliado a isso, existe ainda o aumento das pressões ambientais causadas pelo aumento significativo da população mundial durante o último século, fazendo repensar as tecnologias futuras.

A indústria da construção civil é um dos eixos que utiliza grande quantidade de recursos naturais, seja na extração de matéria prima, seja em processos dispendiosos energeticamente, e por consequência gera resíduos poluentes. A concepção de um futuro mais sustentável passa por uma reformulação na forma de se construir, levando a comunidade científica e as indústrias a lançar um novo olhar sobre os materiais de construção ditos “não convencionais”.

Nesse contexto, a terra como material de construção está voltando ao interesse da comunidade científica por ser um material em abundância que necessita de pouco ou nenhum tratamento energético, ser simples de ser utilizado, proporciona conforto térmico para as construções e é facilmente reintegrado ao meio ambiente após a demolição da obra.

Outra classe de materiais que tem chamado maior atenção recentemente e que pode contribuir com uma nova fase da engenharia são os materiais ativados alcalinamente. Estes materiais possibilitam o uso de resíduos e subprodutos da indústria, atenuando seu impacto ambiental, para produzir ligantes que podem substituir o cimento Portland, cuja produção é uma das atividades mais danosas ao meio ambiente no ramo da construção civil.

Esses dois materiais, a terra e os produtos ativados alcalinamente, já estão sendo utilizados em conjunto em diversas aplicações: blocos de terra comprimidos, adobes, obras geotécnicas, etc. No entanto, compósitos de terra autoadensáveis, num contexto geral, são pouco pesquisados. Dessa forma, esse trabalho propõe ser um dos alicerces no desenvolvimento de matrizes de terra autoadensáveis utilizando produtos ativados alcalinamente como estabilizante.

2 OBJETIVOS

Objetivo Geral: Desenvolver compósito de terra autoadensável estabilizada por ativação alcalina para a construção de paredes monolíticas.

Objetivos Específicos:

- Avaliar parâmetros de dosagem e de mistura para terras estabilizadas com ativação alcalina, autoadensáveis, utilizando o metacaulim como precursor através do método de dosagem fatorial;
- Verificar aspectos da matriz autoadensável álcali ativada na fase fresca, a partir de ensaios de escoamento, e endurecida, com ensaios de resistência e caracterização física do compósito;
- Analisar o comportamento mecânico de paredes monolíticas construídas com o compósito proposto.

Assim, o presente trabalho procura unir a autoadensabilidade, a terra em seu estado natural e a estabilização alcalina num único produto, trazendo uma ótica moderna para os processos construtivos com terra, buscando contribuir com o estado da arte que envolve tal contexto.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Construção com terra

3.1.1 Contexto histórico

Técnicas de construção com a terra já são utilizados há mais de 9000 anos e foi utilizada por diversas civilizações do planeta, tanto para habitações comuns como para grandes obras, vide templos, fortes e muralhas. Adobes encontrados na região do Turcomenistão são datados de 8000 AC, fundações em terra de 5000 AC foram descobertas na Assíria, além da muralha da China, com 4000 anos de idade, que foi originalmente construída com solo compactado, são alguns dos exemplos da antiguidade dessa ferramenta construtiva (MINKE, 2006).

A Figura 1 mostra a cidade de Xibam, no Iêmen, que foi construída utilizando tijolos de adobe no século XVI e exemplifica a utilização desse material para grandes edificações.

Figura 1 - Cidade de Xibam.

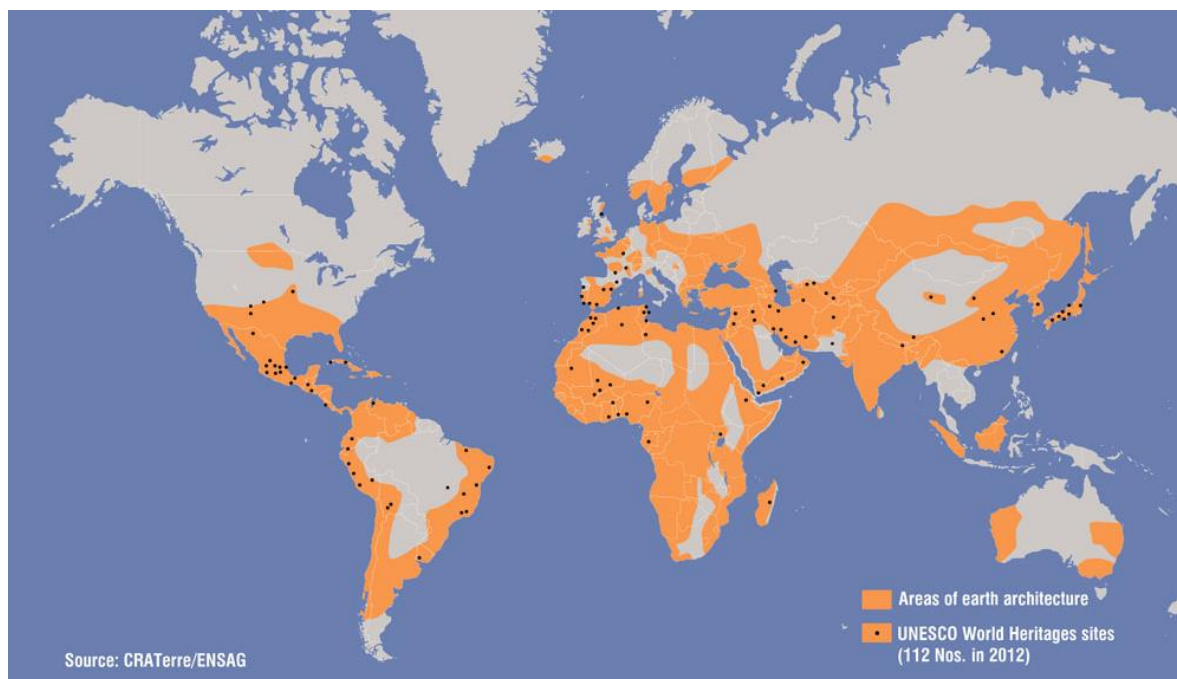


Fonte: Pacheco-Torgal; Eires e Jalali (2009).

A construção com terra permanece ao longo dos anos como uma herança dos povos antigos e pode ser percebida até os dias de hoje. Pacheco-Torgal e Jalali (2012) trazem valores na ordem de 50% para a população mundial que ainda utilize habitações de terra, Silva *et al.* (2015) fala em um quarto, enquanto Keefe (2005) cita que pelo menos 30% das pessoas moram em casas feitas com terra. O fato é que esse tipo de edificação ainda é significativamente presente na sociedade.

A Figura 2 destaca as regiões do planeta onde há presença de edificações com terra segundo os dados da CRA Terre, importante instituto francês que desde os anos 80 estuda a utilização de terra crua na arquitetura.

Figura 2 - Regiões que apresentam construções com terra.



Fonte: Auroville Earth Institute¹.

Muitas das construções de terra são feitas de forma equivocada, em regiões pobres e sem acompanhamento qualificado, incapacitando extrair toda a potencialidade do material, e assim, corroborando com Silva *et al.* (2015), criou-se um estigma de pobreza e má qualidade para esse tipo de obra. No Brasil por volta dos anos 70, o fenômeno da doença de chagas esteve amplamente ligado às condições sofríveis de habitações rurais feita de pau a pique, comprovando a má utilização do insumo (FÉLIX, 2016).

Com o passar do tempo, a disseminação global e a performance de produtos de construção industrializados aumentaram consideravelmente e as construções com terra, cada vez mais escassas, perderam preferência às obras de metal, concreto e cerâmica. No entanto, o interesse na utilização e na pesquisa de materiais de construção derivados da terra vem sendo retomado aos poucos, a fim de possibilitar obras mais econômicas, simples de

¹ Disponível em: <http://www.earth-auroville.com/world_techniques_introduction_en.php>. Acesso em: 26 de junho de 2020.

construir e, principalmente, menos agressivas ao meio ambiente (MASKELL; HEATH; WALKER, 2015; OJO et al., 2020).

3.1.2 A terra como material de construção

Em relação aos materiais convencionais, os autores Minke (2006) e Pacheco-Torgal, Eires e Jalali (2009) citam como algumas das vantagens de se utilizar a terra na construção: a capacidade de equilibrar a temperatura e umidade dos ambientes, sendo bastante eficaz em climas secos; o baixo consumo energético dos processos produtivos e construtivos, a possibilidade de autoconstrução e a facilidade de reúso e reintegração do material a natureza. Além disso, custos relacionados ao transporte e à obtenção do material podem ser reduzidos caso o mesmo esteja disponível no próprio terreno.

Ma, Chen e Chen (2016) destacam que, atualmente, custo energético e as alterações climáticas são conceitos chaves para o desenvolvimento moderno, principalmente no âmbito da construção civil, e inclui as obras de terra como uma alternativa à redução do impacto ambiental neste contexto. Leitão *et al.* (2017) ainda coloca que o potencial da construção com terra para se obter obras menos impactantes ao meio ambiente é subestimado.

Uma das grandes ferramentas para o conforto térmico das habitações de terra é a higroscopicidade, ou seja, a capacidade do material absorver a umidade ao ambiente como comprovado pelo estudo de Fouchal *et al.* (2015). A pesquisa de Giada, Caponetto e Nocera (2019) corroboram com esses resultados e coloca a baixa resistência a difusão de vapor, juntamente com a higroscopicidade, como duas grandes propriedades que ajudam a regular o microclima interno de uma edificação de terra.

Laborel-Préneron, Magniont e Aubert (2018) citam que apesar da terra não ser um bom isolante térmico ela tem uma boa capacidade de armazenar calor, dessa forma a inércia térmica do material também possibilita um bom desempenho e condiciona o conforto térmico no interior dos ambientes. Fouchal *et al.* (2015) ainda trazem relatos de moradores de habitações de terra, afirmando que tal propriedade reflete num efeito de resfriamento da habitação, em climas quentes, tornando a terra uma espécie de ar-condicionado natural.

Ambientalmente as construções com terra também são bastante atrativas. Shukla, Tiwari e Sodha (2009) avaliaram energeticamente uma casa construída com adobes, obtendo como resultado uma energia incorporada de 475 GJ/100 m² de área construída, 33% a menos que uma construção convencional (tijolo queimado, cimento e concreto), que possui uma energia incorporada de aproximadamente 720 GJ/100 m² de área construída. Os autores ainda citam que em 1,54 anos o material ressarce o usuário (*payback*) em relação à energia

que seria gasta para aquecimento/resfriamento da habitação, além de mitigar a emissão de 101 toneladas de CO₂ por ano.

Outra grande vantagem ambiental das construções de terra é a fácil reintegração dos resíduos gerados à natureza, tanto na fase de construção quanto após a fase de demolição. Já que o material predominante da estrutura da obra é a terra, ele pode simplesmente ser realocado no próprio terreno utilizado causando um dano mínimo ao solo da área.

Apesar do uso da terra poder propiciar uma economia em relação aos materiais convencionais, principalmente no custo de obtenção do material e no seu transporte, já que o material pode ser extraído do próprio terreno, essa economia pode não refletir no aspecto global. Como destaca Pacheco-Torgal e Jalali (2012), o fator econômico nesse tipo de construção depende de muitos fatores, tais como: custo da mão de obra, técnica utilizada, processo de estabilização, etc. Pacheco-Torgal, Eires e Jalali (2009) complementam que a grande mais-valia desse tipo de construção sobre as tradicionais está nos critérios ambientais e não necessariamente em questões econômicas.

Minke (2006) e Pacheco-Torgal e Jalali (2012) também destacam algumas desvantagens na construção com terra: Dificuldade de normatização do material, desgastes devido à água e vento além de limitações estruturais quando comparado a outros materiais, necessitando ainda de um maior cuidado com a manutenção.

Como colocado por Silva *et al.* (2015), de fato a construção com terra é uma alternativa viável para um contexto mais sustentável na indústria da construção civil, porém a principal desvantagem do material é não ser normatizado em grande parte dos países. Isso dificulta até mesmo a pesquisa pois impossibilita uma universalização dos parâmetros analisados.

Giada, Caponetto e Nocera (2019), em sua pesquisa de revisão, percebe a falta de normatização para protocolos experimentais dos pesquisadores consultados, dificultando até mesmo a correlação de resultado entre eles, já que cada experimento é realizado com condições de metodologia própria.

Alguns países já estão formando normas próprias para avaliar parâmetros da terra enquanto material de construção. Em seu trabalho, Silva *et al.* (2015) destaca que países como a Nova Zelândia, Austrália, Peru e Espanha já possuem legislação própria para esse tipo de material. Cid, Mazarrón e Cañas (2011) fizeram um estudo mais aprofundado sobre as normas de terra ao redor do mundo e trazem uma gama maior de países citados, tais como: Índia, Itália, Turquia, Zimbábue, Quênia, Tunísia, França e Colômbia. A Tabela 1 traz as normas encontradas pelos autores com a atualização dos dados referentes ao Brasil.

Tabela 1 - Normas de construção com terra.

País	Ano	Norma
Brasil*	1989	NBR 10832
	1994	NBR 10835
	2012	NBR 8491; NBR 8492; NBR 10833; NBR 10834; NBR 12023 a NBR 12025; NBR 13553 a NBR 13555.
	2013	NBR 10836
	2020	NBR 16814
Peru	1979	NTP 331.201 a NTP 331.203
Índia	1980	IS 2110
	1982	IS 1725
	1993	IS 13827
Turquia	1985	TS 537; TS 2514; TS 2515.
África Regional	1996	ARS 670 a ARS 683
Tunísia	1996	NT 21.33; NT 21.35
Nigéria	1997	NIS 369
Nova Zelândia	1998	NZS 4297; NZS 4298
	1999	NZS 4299
Quênia	1999	KS 02-1070
Peru	2000	NTE E 0.80
França	2001	XP P13-901
Zimbábue	2001	SAZS 724
Colômbia	2004	NTC 5324
EUA	2004	NMAC, 14.7.4
	2010	ASTM E2392 M-10
Itália	2004	Ley nº 378, 2004
	2006	L.R. 2/06
Espanha	2008	UNE 41410
Sri Lanka	2009	SLS 1382-1 a SLS 1382-3

* Dados do Brasil atualizados para o ano de 2020

Fonte: Adaptado de Cid, Mazarrón e Cañas (2011).

Atualmente o Brasil possui sete normas relacionadas à blocos de terra comprimido (BTC) de solo-cimento, uma norma para materiais empregados em paredes monolíticas de solo-cimento, cinco normas para solo-cimento e uma norma para adobes, publicada em janeiro de 2020. Como pode ser observado pela Tabela 1, o Brasil está relativamente bem provido de normas para a construção com terra, mas existem ainda lacunas para serem preenchidas, avaliando normas que abranjam blocos de terra com função estrutural e outros sistemas construtivos como a taipa de pilão, por exemplo.

O âmbito estrutural da construção com terra é bastante reduzido se comparado às construções convencionais de concreto armado. Como já foi citado, no Brasil os métodos construtivos com terra não têm caráter estrutural, e, se comparado ao concreto, as construções com terra têm uma energia incorporada bastante reduzida, o que reflete na resistência final do material.

Além da dificuldade de normatização, a terra também é bastante vulnerável à ação da água e do vento. Desenvolveram-se técnicas de estabilização da terra afim de melhorar seu comportamento perante as ações mecânicas e de intempéries, mas mesmo assim o material deve ficar sob proteção de coberturas com beirais grandes ou pinturas para aumentar a vida útil da construção. Minke (2006) ainda destaca os problemas de retração das alvenarias de terra, que também são combatidos por meio das técnicas de estabilização.

3.1.3 Técnicas de Estabilização da Terra

É fato que nem toda terra é adequada para a utilização em obras, inclusive pela sua heterogeneidade de acordo com as condições de sua origem. Dessa forma, as propriedades do solo são importantíssimas para determinar o seu uso. Algumas características que fornecem parâmetros de aceitabilidade do solo são: a granulometria, umidade ótima, densidade máxima e os limites de Atterberg.

O uso da terra vem sendo desenvolvido ao longo dos anos de modo que, para haver um melhoramento das propriedades do material e atender os requisitos exigidos em certas aplicações, realiza-se a estabilização da terra crua utilizando, geralmente, processos mecânicos, como a compactação por meio de prensas ou de apiloamento, ou químicos, como adições que modificam a matriz do solo por meio de reações químicas, tal qual o cimento Portland e a cal.

De acordo com Barbosa e Ghavami (2014), a estabilização da terra pode melhorar sua resistência mecânica, o seu desempenho contra a ação de água, a trabalhabilidade e sua ductilidade. Os autores ainda citam que as fibras, emulsões betuminosas e até a areia podem ser tratados como estabilizadores, caso melhore as propriedades da terra.

Alcântara, Nunes e Rio (2014) definem o solo-cimento como um material formado a partir da estabilização química da terra com cimento. Geralmente são utilizados solos arenosos ou areno-siltosos, permitindo que a matriz cimentícia envolva os grãos de terra, criando um esqueleto sólido, e possibilite o melhoramento das propriedades do material. Rios et al. (2016) coloca a utilização de ligantes cimentícios como uma das principais técnicas de estabilização, em que tradicionalmente são usados o cimento e/ou a cal.

Atualmente, alguns autores também têm utilizado ligantes ativados alcalinamente para estabilizar matrizes de terra (CRISTELO et al., 2012; DE LEANDRO SANTOS et al., 2014; PALANISAMY; KUMAR, 2018; RIOS et al., 2016; SILVA et al., 2015).

3.1.3.1 Fibras

As fibras são um dos produtos utilizados para a estabilização da terra, estando presente na técnica construtiva cob e também muitas vezes utilizada nos adobes, sendo geralmente uma adição que atua com outros estabilizadores.

Consoli *et al.* (2011) cita que, no solo-cimento, a união dos grãos de terra com a pasta cimentícia já é suficiente para dar uma resistência relativa aceitável, mas com a adição de fibras há uma melhora, principalmente devido ao controle na propagação das fissuras. Sabbà *et al.* (2021) também adiciona que uma das principais razões pelo uso da fibra é o incremento na resistência à tração, mas além disso a fibra também proporciona um aumento na ductilidade e ajuda na redução de retração. A resistência à compressão, em si, não é substancialmente afetada com a adição de fibras, devido ela não ser solicitada nesse tipo de esforço, mas altera o comportamento de deformação do compósito.

A quantidade de fibra utilizada varia de acordo com o material, a técnica e os tipos de fibras, devendo ser avaliada de modo que haja uma boa dispersão e não prejudique em demasiado a trabalhabilidade da mistura. Barbosa e Ghavami (2015) citam valores de 1 a 2% do peso da mistura para estudos com fibras de coco, enquanto Consoli *et al.* (2011) e Sabbà *et al.* (2021) citam valores de literatura que variam de 0,5 até 8% para misturas de adobe e de 1 a 3% de fibras utilizadas no cob, portanto sem outras referências para a taipa de pilão, os autores optaram por utilizar o teor de 0,25% da massa de solo.

Apesar de importante característica das fibras, o fator de forma não foi citado diretamente nos trabalhos citados no parágrafo anterior. Nos estudos citados por Barbosa e Ghavami (2015) o fator de forma é trabalhado indiretamente através de diferentes tamanhos de fibras, enquanto que no trabalho de Consoli *et al.* (2011) só foram apresentados o diâmetro e o comprimento das fibras utilizadas, sem citar o fator de forma.

3.1.4 Técnicas Construtivas

Alguns métodos construtivos que incorporam a terra em seu processo já estão relativamente consolidados. Pacheco-Torgal e Jalali (2012) citam como as técnicas mais usuais: alvenarias em blocos comprimidos ou em blocos moldados com fôrmas (adobe), o pau a pique, cob e a taipa de pilão.

3.1.4.1 Pau a Pique e Cob

A técnica de pau a pique consiste na utilização de um solo no estado plástico, podendo haver adição de fibras, o qual é pressionado manualmente num suporte de tramas de madeiras, geralmente de galhos ou de bambu, e então vai se moldando uma parede (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2012; VAN DAMME; HOUBEN, 2018).

É uma técnica bastante antiga usada há mais de 6000 anos e no Brasil está bastante presente em regiões mais pobres, áreas litorâneas e áreas rurais, onde os materiais de construção comuns são menos acessíveis. Como já foi citado no item 2.1.1, a doença de Chagas no Brasil esteve bastante ligada às casas de pau a pique devido às más condições da construção, favorecendo a proliferação de insetos vetores de doenças. A Figura 3 ilustra construções que utilizam dessa técnica.

Figura 3 - Construções de pau a pique. (a) Pau a pique comumente encontrado no Brasil; e (b) Técnica de pau a pique bem executada



(a)



(b)

Fonte: (a) Wikipedia²; (b) Pacheco-Torgal; Eires e Jalali (2009).

O cob, assim como o pau a pique, também utiliza o solo no estado plástico com a adição de fibras, porém a matriz de terra vai sendo empilhada formando largas paredes monolíticas. Dessa forma o cob favorece o caráter escultural das paredes, principalmente com formatos curvos, como ilustrado na Figura 4. Essa técnica foi bastante utilizada no Reino Unido antes da popularização dos tijolos queimados. No sudoeste da Inglaterra, por exemplo, estima-se que 40 mil habitações de cob permanecem em uso atualmente. (VAN DAMME; HOUBEN, 2018).

² Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Pau_a_pique>. Acesso em: 20 de julho de 2020.

Figura 4 – Edificação em cob.



Fonte: Earth Architecture³

3.1.4.2 Taipa de Pilão

A taipa de pilão é um método que consiste na compactação de camadas de terra confinada dentro de fôrmas, resultando numa parede monolítica. Tradicionalmente as paredes tem larguras de 40 a 70 cm e é utilizado um pilão como ferramenta de compactação, o que dá nome à técnica. Atualmente a técnica foi aprimorada para uso de compactadores mecânicos. A Figura 5 mostra um exemplo de construção que utiliza a taipa de pilão associando a terra com materiais de construção industrializados como o vidro.

Figura 5 – Edificação de terra feita com taipa de pilão.



³ Disponível em: <<https://eartharchitecture.org/?cat=76>>. Acesso em: 20 de julho de 2020.

3.1.4.3 Alvenarias de Terra

Na parte de alvenarias de terra podemos destacar os adobes, técnica mais antiga e mais simples de construção em terra, e os blocos de terra comprimida (BTC) que são tidos como a versão moderna dos adobes.

Como colocado por Pacheco-Torgal e Jalali (2012), a palavra adobe vem do árabe “*attob*” que significa tijolo seco ao sol, e resume o processo de produção da unidade de alvenaria: moldes de madeira são preenchidos com a terra no estado plástico e então são colocados ao sol para secar, como ilustrado na Figura 6 (a). A quantidade de silte e argila tem um papel importante na fabricação do adobe devido a plasticidade que é conferida por essas partículas e também à ocorrência de trincas por retração, caso haja um teor muito grande de finos (acima de 50%). Além disso, fibras vegetais podem ser incorporadas na terra para a sua fabricação. A Figura 6 (b) mostra como esse material pode ser utilizado na arquitetura contemporânea.

Figura 6 – (a) Fabrica de adobe; e (b) Habitação de adobe.



(a)



(b)

Fonte: Van Damme e Houben (2018)

Para a confecção dos BTC's é necessária uma prensa, que pode ser manual ou mecânica, onde a terra com uma consistência úmida será colocada em uma fôrma para haver a compressão e resultar no bloco. Van Damme e Houben (2018) colocam o BTC, juntamente com a taipa de pilão, como as técnicas de construção com terra mais utilizadas atualmente. O aprimoramento dos BTC's ainda possibilitou uma maior compatibilidade entre diferentes sistemas das construções, como ilustra a Figura 7.

Figura 7 – (a) BTC com tomada acoplada; e (b) Construção em BTC com estrutura incorporada.



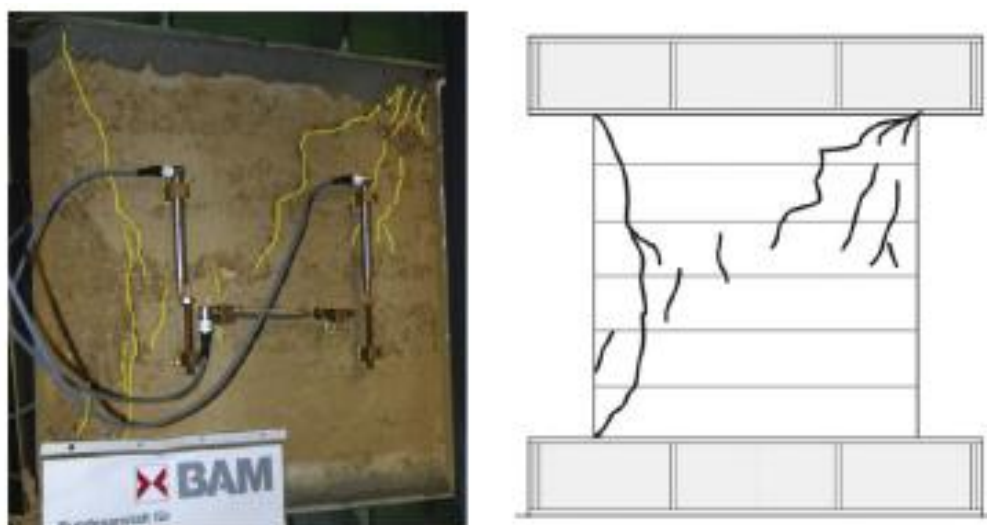
Fonte: Pacheco-Torgal; Eires e Jalali (2009).

3.2 Comportamento mecânico de paredes de terra

Apesar de ser utilizada desde os tempos antigos, a investigação e o conhecimento científico acerca da terra são relativamente escassos devido ao atual desuso do material, comparado aos produtos industrializados. Dessa forma, o comportamento mecânico do material e das suas construções, tais como as alvenarias e paredes monolíticas, ainda não é totalmente compreendido, como citam Reddy, Suresh e Rao (2017) e Miccoli *et al.* (2015).

Miccoli, Müller e Fontana (2014) realizaram ensaios de compressão em paredes reduzidas (dimensões de 500 x 500 x 110 mm³) a fim de avaliar o comportamento mecânico para diferentes técnicas construtivas de paredes de terra: alvenaria com blocos de terra, taipa de pilão e cob. A taipa de pilão obteve uma resistência média de 3,73 MPa, a maior entre os três tipos, além de uma deformação vertical média de 0,031%. Após atingir o pico de carga, a ruptura foi abrupta tendo fissuras num padrão de cone, como mostra a Figura 9.

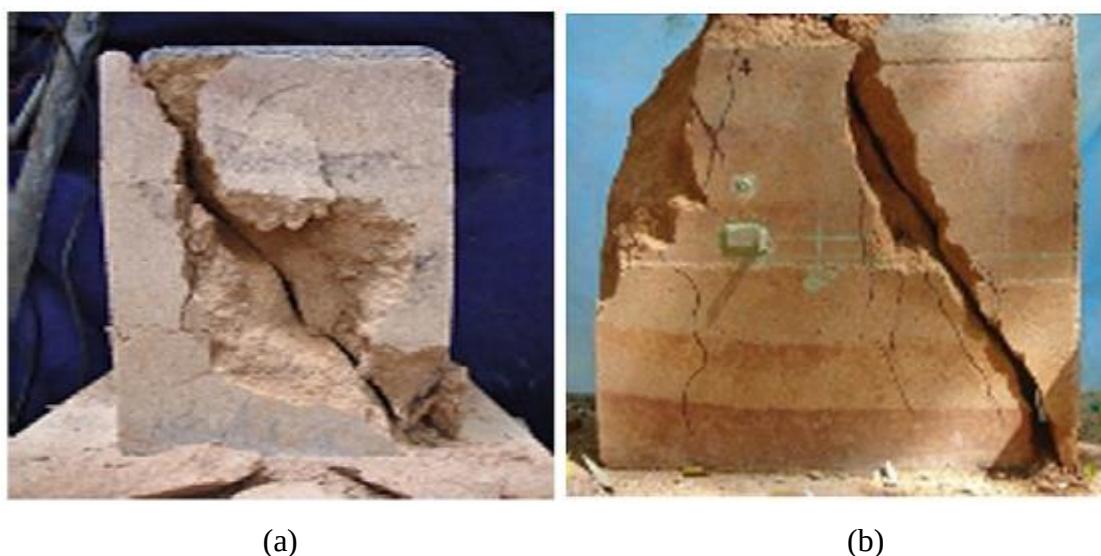
Figura 8 – Mapa de fissuras da taipa de pilão.



Fonte: Miccoli, Müller e Fontana (2014).

Reddy e Kumar (2011) testaram três dimensões diferentes para paredes de taipa de pilão com 8% de teor de cimento: prismas (150 x 150 x 300 mm), paredes reduzidas (600 x 155 x 720 mm) e paredes em tamanho real (750 x 152 x 3000 mm). As resistências médias obtidas foram de 6,50 MPa para os prismas, 5,47 MPa para as paredes menores e 3,91 MPa para as paredes em tamanho real. A ruptura da parede maior se deu inicialmente por fissuras verticais e inclinadas há 1,20 m abaixo do carregamento, que cresceram e se estenderam ao longo de toda parede. Além disso, fissuras com aproximadamente 45° foram presentes nos três tamanhos avaliados, como ilustra a Figura 10.

Figura 9 – Modo de ruptura (a) Prisma; (b) Parede reduzida.



Sobre padrões de ruptura, Reddy, Suresh e Rao (2017), citam que para taipa de pilão se dá principalmente por cisalhamento, diferente das alvenarias ou prismas com blocos de terra que a ruptura se dá por meio de fissuras verticais ao longo da parede.

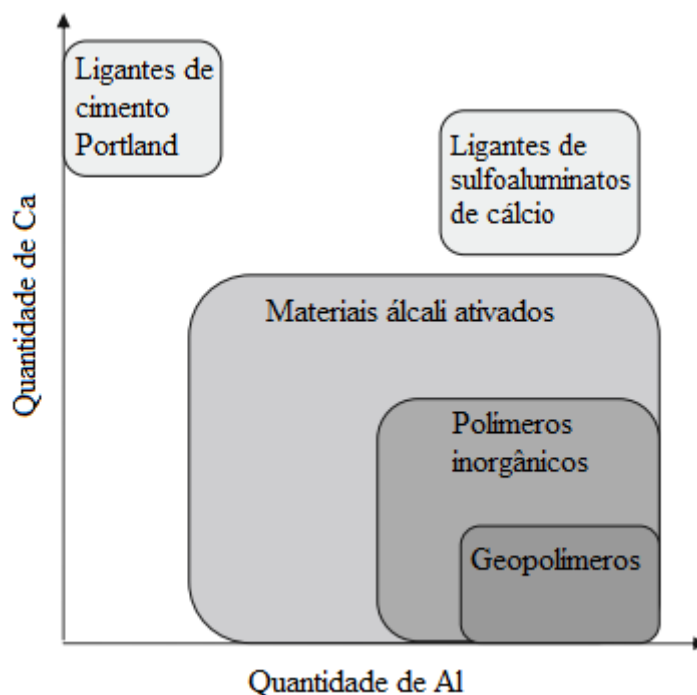
3.3 Ativação alcalina

Provis (2018) trata a ativação alcalina como um termo relacionado à produção de ligantes a partir da reação de uma fonte de aluminossilicatos, denominada de precursor, em um ambiente alcalino, propiciado pela solução ativadora. Reações químicas provocam um rearranjo nas moléculas, criando produtos com estruturas tridimensionais que dão resistência e estabilidade para o material.

Com o aumento das pesquisas nesse tipo de material, houve também confusão acerca de algumas terminologias, confundindo-se, por exemplo, as definições de geopolímero e materiais ativados alcalinamente. Van Deventer *et al.* (2010) mostram as diferenças entre as nomenclaturas que surgem normalmente na bibliografia, explicando que a definição do material depende de variáveis como a composição química do precursor e o teor de álcalis na sua dosagem, propriedades que influenciam diretamente nas reações químicas e nos produtos finais de cada material.

A Figura 10 traz uma simplificação acerca dos materiais ativados alcalinamente em comparação com outros ligantes, relacionando-os com o cálcio e o alumínio presentes na mistura; além disso, insere o teor de álcalis, correspondente às concentrações de sódio e/ou potássio, a partir do sombreamento das áreas correspondentes.

Figura 10 – Classificação de materiais ativados alcalinamente e comparação com outros ligantes.



Fonte: Adaptado de Van Deventer *et al.* (2010).

Para os geopolímeros, as relações molares entre os principais componentes das reações (Si/Al, Na/Si e Na/Al) são muito importantes devido sua influência nas ligações químicas formadas e estrutura final do compósito, como cita Costa (2020). Na literatura são encontrados trabalhos que sintetizam relações molares ideais para a produção desses materiais, mostrados na Tabela 2 (DAVIDOVITS; DAVIDOVICS; DAVIDOVITS, 1994; KHALE; CHAUDHARY, 2007; SANTOS, 2017).

Tabela 2 – Relações molares para ativações alcalinas.

Relações Molares	
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3,30 – 4,50
$\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,20 – 0,48
$\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$	15,00 – 25,00
$\text{M}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,8 – 1,6

Em que M = Na ou K

Os precursores mais utilizados são pozolanas já estabelecidas no contexto da engenharia civil, tais como a cinza volante, o metacaulim e a escória de alto forno. Além disso, diversos subprodutos industriais e resíduos também são utilizados na ativação alcalina: pó de resíduos cerâmica (HUSEIEN et al., 2020), cinza do bagaço de cana de açúcar (PEREIRA et al., 2015), resíduos de corte de rochas (SIMÃO et al., 2020), cinza da casca de arroz (LIANG et al., 2019).

De acordo com Demie, Nuruddin e Shafiq (2013), nos últimos anos tem-se pressionado as grandes indústrias para a diminuição dos impactos ambientais causados. A indústria cimentícia, representa 5% da geração mundial de CO₂ para a atmosfera. Dependendo do processo de manufatura, cada tonelada de cimento produzida pode liberar cerca de uma tonelada de CO₂ na atmosfera.

A utilização de resíduos e a necessidade de produtos menos agressivos ao meio ambiente inserem os geopolímeros como uma alternativa aos produtos de cimento Portland para amenizar o quadro ambiental, como coloca Singh e Middendorf (2020).

Habert e Ouellet-Plamondon (2016) analisam que, apesar dos diferentes critérios utilizados para avaliar os impactos ambientais e os diversos contextos que os materiais ativados alcalinamente podem estar inseridos, eles são uma possível solução para auxiliar o contexto da mudança climática, podendo reduzir em até ¼ da emissão de CO₂, quando associado à produção de concreto.

Em termos de desempenho mecânico a ativação alcalina tem se mostrado pelo menos equivalente aos compósitos de cimento Portland. Farhan, Sheikh e Hadi (2019) comparou a ativação alcalina da escória e da cinza volante, com uma dosagem de cimento Portland convencional e constatou que as principais propriedades mecânicas, desde a densidade seca do material até a resistência à flexão, entre os materiais foram bastante próximas. Os autores avaliaram dosagens para resistência de 35 MPa e 65 MPa.

Ding, Shi e Li (2018) conseguiram compósitos ativados alcalinamente que atingiram cerca de 75 MPa aos 90 dias; além disso, aos 3 dias de cura em temperatura ambiente, o material já atingia aproximadamente 38 MPa, demonstrando um rápido desenvolvimento de resistência. Isso mostra que tais materiais cobrem tanto as resistências do concreto de classes mais usuais como as de alta exigência mecânica, com desempenho acima dos 50 MPa.

Frequentemente na literatura a cura térmica é citada como forma de melhorar as propriedades mecânicas da ativação alcalina, já que a temperatura atua como catalisador de reações químicas. Esses resultados são comprovados por Muñiz-Villarreal *et al.* (2011) em que a resistência pode mais que dobrar dependendo da temperatura de cura. Os trabalhos de

Aredes *et al.* (2015) e Görhan; Aslaner e Şinik (2016) avaliam que 1 ou 2 horas de cura térmica de 60° são suficientes para melhorar a resistência à compressão dos materiais analisados. Até mesmo curas de poucos minutos no microondas estão sendo avaliadas com resultados positivos, como mostrado no trabalho de Do; Ngo e Nguyen (2020).

Sobre a durabilidade, Albitar *et al.* (2017) testaram concretos convencionais e álcali ativados através da imersão em soluções químicas de sulfato de sódio, cloreto de sódio, sulfato de sódio com sulfato de magnésio e ácido sulfúrico. Além disso, os autores avaliaram a variação na massa e na resistência ao realizar ciclos de secagem/molhagem e aquecimento/resfriamento. Os resultados mostraram que, apesar da superioridade do concreto convencional em relação à capilaridade, limitando a entrada de agentes agressivos ao material, o concreto ativado alcalinamente se mostrou mais durável em relação aos ataques químicos, muito em função da estabilidade química da sua matriz.

O estudo de Džunuzović *et al.* (2017) compara a durabilidade de um compósito de cinza volante e escória ativado alcalinamente com uma argamassa de controle de cimento Portland convencional, a partir do ataque externo de sulfatos. Apesar de utilizar um tempo de análise de 180 dias, um pouco menor que o de Albitar *et al.* (2017), os resultados são concordantes, demonstrando que o material álcali ativado teve um desempenho levemente superior à mistura de controle.

Outro ponto é sobre as reações álcali-agregado, que são danosas ao concreto devido a seu caráter expansivo, algumas dosagens de concretos ativados alcalinamente se mostraram menos suscetíveis aos seus danos em relação aos concretos de cimento Portland, como visto nos estudos de Pouhet e Cyr (2015) e Yang, Paudel e Asa (2020).

Em contrapartida, as dosagens de concretos ativados alcalinamente não seguem um padrão como as do cimento Portland, a variedade de precursores e ativadores faz com que cada composição tenha características próprias, além da necessidade de caracterizações químicas para regular relações molares dos precursores e do ativador, dificultando a popularização do produto.

Outra problemática é de segurança para o manejo do produto devido ao pH alto da solução ativadora. Como elucidado por Narayanaswamy *et al.* (2020), há 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.

O desenvolvimento e pesquisa dos chamados “*one-part alkali-activated materials*”, em tradução livre materiais ativados alcalinamente em uma etapa, que são materiais que só

necessitam da adição de água para gerar reações de ativação alcalina, mecanismo semelhante às argamassas industrializadas, podem solucionar boa parte dos problemas em relação a esse tipo de material (LUUKKONEN et al., 2018).

3.3.1 Uso da ativação alcalina na terra

Como alternativa ao cimento Portland, a ativação alcalina também está sendo utilizada para estabilizar a terra. Ghadir e Ranjbar (2018) compararam a estabilização de um solo utilizando cimento Portland convencional e a ativação alcalina; em condições de cura seca, o solo com ativação alcalina atingiu mais que o dobro da resistência do solo-cimento convencional.

Rios *et al.* (2016) também avaliaram solos estabilizados por ativação alcalina de cinza volante, e destacam que a grande vantagem em comparação ao cimento Portland é a não geração de CO₂ para obter o precursor. Os autores citaram que ambos os processos de estabilização melhoram a resistência do solo, mas o desenvolvimento de resistência da ativação alcalina se mostrou mais lento.

Silva *et al.* (2015) produziram blocos comprimidos utilizando ativação alcalina da cinza volante como estabilizador, como alternativa ao cimento Portland. Os blocos chegaram a atingir 12,0 N/mm² de resistência à compressão, valor bastante superior ao exigidos por diversas normas internacionais. No entanto, o autor cita que alguns cuidados devem ser tomados quando se refere ao desempenho mecânico em prismas de alvenaria. Por fim o autor destaca o grande potencial que esse método tem para ser otimizado e aplicado em materiais de terra. Outros estudos também obtiveram resultados satisfatórios usando a geopolimerização em blocos de terra (PALANISAMY; KUMAR, 2018; UDAWATTHA; HALWATURA, 2018).

Elert; Pardo e Rodriguez-Navarro (2015) também trazem a ativação alcalina como um tratamento alternativo de manutenção *in loco* para as estruturas de terra, principalmente em edifícios antigos, onde muitas vezes os métodos convencionais não são compatíveis para resolver o problema desses locais.

3.4 Estado da arte para matrizes de solo autoadensável

Para avaliar o estado da arte foram realizadas buscas por artigos na base de dados Scopus⁴ para trabalhos internacionais, utilizando como código de busca “*self-compacting*

⁴ Disponível em: <www.scopus.com>. Acesso em: 05 de setembro de 2021.

earth” ou “*self-compacting soil*”, estando no título, resumo ou nas palavras chaves, resultando em 149 trabalhos. Para trabalhos nacionais foram feitas pesquisas na base de dados SciELO⁵, utilizando “solo autoadensável” ou “terra autoadensável” como descrição da busca, na opção de procurar em todos os índices, encontrando 3 trabalhos.

Realizou-se uma triagem a partir do título, resumo e conteúdo dos artigos encontrados para correlacioná-los com o estudo da dissertação, sendo aproveitados 13 artigos da base de dados Scopus e 3 artigos da base SciELO, sendo um resultado comum às duas bases.

O trabalho mais antigo filtrado dessa pesquisa foi o de Cristelo *et al.* (2012), o qual objetivou produzir misturas de solo estabilizado com cinza volante ativados alcalinamente para o uso em taipa de pilão. Os autores investigaram as relações entre a resistência à compressão do compósito e diferentes propriedades: tamanho máximo do grão presente na mistura, inserção de hidróxido de cálcio, cloreto de sódio e superplastificante para concretos, a concentração molar do ativador, o efeito das razões líquido:sólido e Na₂O:cinza. Os resultados de resistência foram bastante satisfatórios, atingindo valores superiores a 20 MPa, mas em relação à autoadensabilidade da mistura não foi nada testado, sendo somente remetida pelo termo “*slurry consistency*”, destacando que ainda houve vibração da mistura após a moldagem, o que entra em discordância com a definição de autoadensabilidade.

A pesquisa de Udawattha e Halwatura (2018) procura um método alternativo ao cimento de estabilização utilizando a cinza volante, utilizando da ativação alcalina para isso. Os autores desenvolveram uma dosagem para a fabricação de blocos de alvenaria de terra autoadensável, conseguindo resultados de resistência à compressão próximos a 10 MPa para a mistura sugerida e a trabalhabilidade foi medida pelo ensaio de “*slump*”. Vale salientar que a fração de agregado graúdo, pertencente ao próprio solo, entrou no estudo de dosagem, de forma que o material é tratado como um concreto de terra.

Martins, Silva e Toledo Filho (2015) desenvolveram uma matriz de solo-cimento autoadensável a partir do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) e a incorporação de fibra de sisal. A reologia da mistura foi ajustada para um valor de espalhamento do teste “*slump*” de 600 mm, e as resistências mecânicas foram de 3,33 MPa aos 28 dias, atingindo 7,52 MPa aos 240 dias de cura. Também foi avaliada a resistência à tração na flexão que obteve resultados no intervalo de 1,32 até 1,78 MPa. A inserção das fibras ocasionou uma redução na trabalhabilidade da mistura, sendo necessário um aumento na dosagem do

⁵ Disponível em: <scielo.org>. Acesso em: 05 de setembro de 2021.

superplastificante, enquanto que no comportamento mecânico houve um aumento de resistência na flexão; já na compressão só modificou a tendência do material pós-pico devido à ductilidade provida pela fibra.

Milani e Barboza (2016) realizaram misturas autoadensáveis com razões em massa de cimento:solo de 1:8 e 1:12, direcionando-as à construção de paredes monolíticas. Foi observado a necessidade de superplastificante para a obtenção da fluidez necessária para a autoadensabilidade, sendo obtida uma resistência à compressão máxima de 1,79 MPa, avaliada em corpos de prova 100 x 200 mm. Os autores obtiveram alguns parâmetros físicos e dão ênfase para a retração e a possibilidade de ocorrência de fissuras no processo de endurecimento da matriz.

Ma, Chen e Chen (2016a;2016b;2016c) publicaram trabalhos voltados à elaboração de modelos preditivos de resistência à compressão para solos estabilizados de argila orgânica. Essas argilas são utilizadas para misturas autoadensáveis e os trabalhos procuraram avaliar os efeitos de diferentes materiais no compósito, desde a quantidade de material orgânico no solo, adição de cinza volante, quantidade total de cimento, até o tempo de cura. Os modelos preditivos se mostraram coerentes, tendo um valor experimental variando em até 10% do valor predeterminado, porém os valores de resistência obtidos nos trabalhos não superaram 1 MPa, muito também em função do tipo de solo utilizado, que tem cerca de 80% dos grãos menores que 75 µm.

Landrou *et al.* (2016) testaram aditivos inorgânicos como defloculantes ou floculantes no solo, de modo a permitir trabalhar com a reologia do solo e a possibilitar incorporar a terra em concretos autoadensáveis. Um dos produtos, com ótimos resultados na reologia do estado fresco do material, utilizado como defloculante é o silicato de sódio, que geralmente também é utilizado na ativação alcalina, surgindo aí um ponto em comum para a união da terra com a ativação alcalina e a autoadensabilidade. Por outro lado, o superplastificante baseado em éter policarboxilato, comumente utilizado em concretos, não forneceu bons resultados; pelo contrário, aumentou a tensão de escoamento da mistura, dificultando sua trabalhabilidade.

Já no trabalho de Ouellet-Plamondon e Habert (2016), o superplastificante melhorou um pouco a trabalhabilidade do solo, mas foi muito mais eficiente a partir da adição do cimento, mostrando ser um produto direcionado para tal ligante. Os autores conseguiram definir alguns dos limites iniciais para o concreto baseado em terra proposto por eles no que se refere à dosagem da água, do cimento e do superplastificante. O material foi balizado a

partir das suas propriedades no estado fresco e com apenas 5% de cimento, em relação à quantidade de terra utilizada, obteve resistência superior à 8 MPa.

Alcantara *et al.* (2017) relacionam parâmetros de dosagem de solo-cimento autoadensável com resultados de ensaios de espalhamento e de escoamento em funil V, além de avaliar parâmetros físicos e mecânicos da mistura. Foi utilizado entre 20 e 30% de cimento, em relação à massa de terra utilizada, e a resistência à compressão, aos 28 dias, variou de 2,704 a 6,492 MPa. Observou-se a importância do superplastificante atuando junto ao cimento, conferindo autoadensabilidade à mistura, como também a suscetibilidade à pequenas mudanças, seja na quantidade de água ou do próprio superplastificante.

Gu e Chen (2020) avaliaram diversos materiais para a estabilização de argila para utilização como taipa autoadensável e a influência deles na resistência à compressão. Foi realizada uma dosagem ortogonal de 3 fatores e 4 níveis, em que foi avaliada a variação das adições de fosfogesso (3, 5, 8 e 10%), cal hidratada (2, 4, 6 e 8%) e cinza volante (5, 10, 15 e 20%), além de que se manteve constante a adição de 10% de cimento e a relação de 0,3 água/argila. Na mistura com melhor desempenho mecânico o material estabilizante atingiu 41% da dosagem. Os autores avaliaram a resistência à compressão e à flexão para as misturas, obtendo resultados entre 1 e 24 MPa para aquela e entre 0,1 e 1,5 MPa para esta. Os autores ainda destacam que a temperatura de cura é um fator bastante influente para o ganho de resistência, de forma que seu aumento, de 15 °C para 85 °C, melhorou de 4,44 MPa a 23,72 MPa a resistência à compressão.

O estudo de Clausell *et al.* (2021) procurou determinar a sustentabilidade de um concreto autoadensável, à base de argila, utilizando superplastificante natural. O material não utiliza cimento, sendo a argila o material ligante, e tem o ácido gálico, obtido a partir da extração em plantas, como superplastificante. Sobre a resposta mecânica do compósito, a resistência à compressão atingiu 6,3 MPa, enquanto que a resistência à flexão foi de 1,43 MPa. Os autores destacam que, comparando o concreto proposto no estudo com as técnicas construtivas com terra análogas, o objeto do estudo mostrou uma resistência relativamente aceitável e ainda melhorou o tempo de pega, a velocidade de instalação e a ausência de retração ou fissuras quando utilizado em elementos lineares como lajes. Além disso, o concreto à base de argila diminui 90% das emissões de carbono e tem um impacto ambiental 80% menor que o concreto convencional.

Desse modo, podemos reafirmar que a construção com terra tem sido uma das alternativas para uma indústria da construção menos degradante ao meio ambiente. Devido às obras com terra terem um intervalo de relativo desuso ao longo do tempo, as técnicas

permaneceram as mesmas durante bastante tempo e as misturas de terra autoadensáveis, como objeto de estudos recentes, tem sido uma das formas de aprimorar e ampliar as técnicas construtivas do material.

3.5 Conclusões da Revisão Bibliográfica

Com o que foi visto na bibliografia, podemos perceber que as investigações sobre a terra como material de construção estão sendo retomadas, mas ainda são escassas; vê-se também a falta de normatização para esse tipo de material, dificultando a análise e correlação de resultados devido a metodologias variadas nas pesquisas.

Para o caso de compósitos de terra autoadensáveis junto com a ativação alcalina isso fica ainda mais claro. As primeiras avaliações desse material são recentes, tendo ainda algumas definições a serem esclarecidas como a análise do material no estado fresco, análises estruturais e de durabilidade.

Com isso observou-se a lacuna para o tema acerca de compósitos de terra autoadensáveis empregando ativação alcalina, além da ausência de ensaios em paredes construídas com esse material. Para isso, o metacaulim foi escolhido como precursor da ativação alcalina visto sua disponibilidade no mercado local e também a sua comum utilização nesse processo.

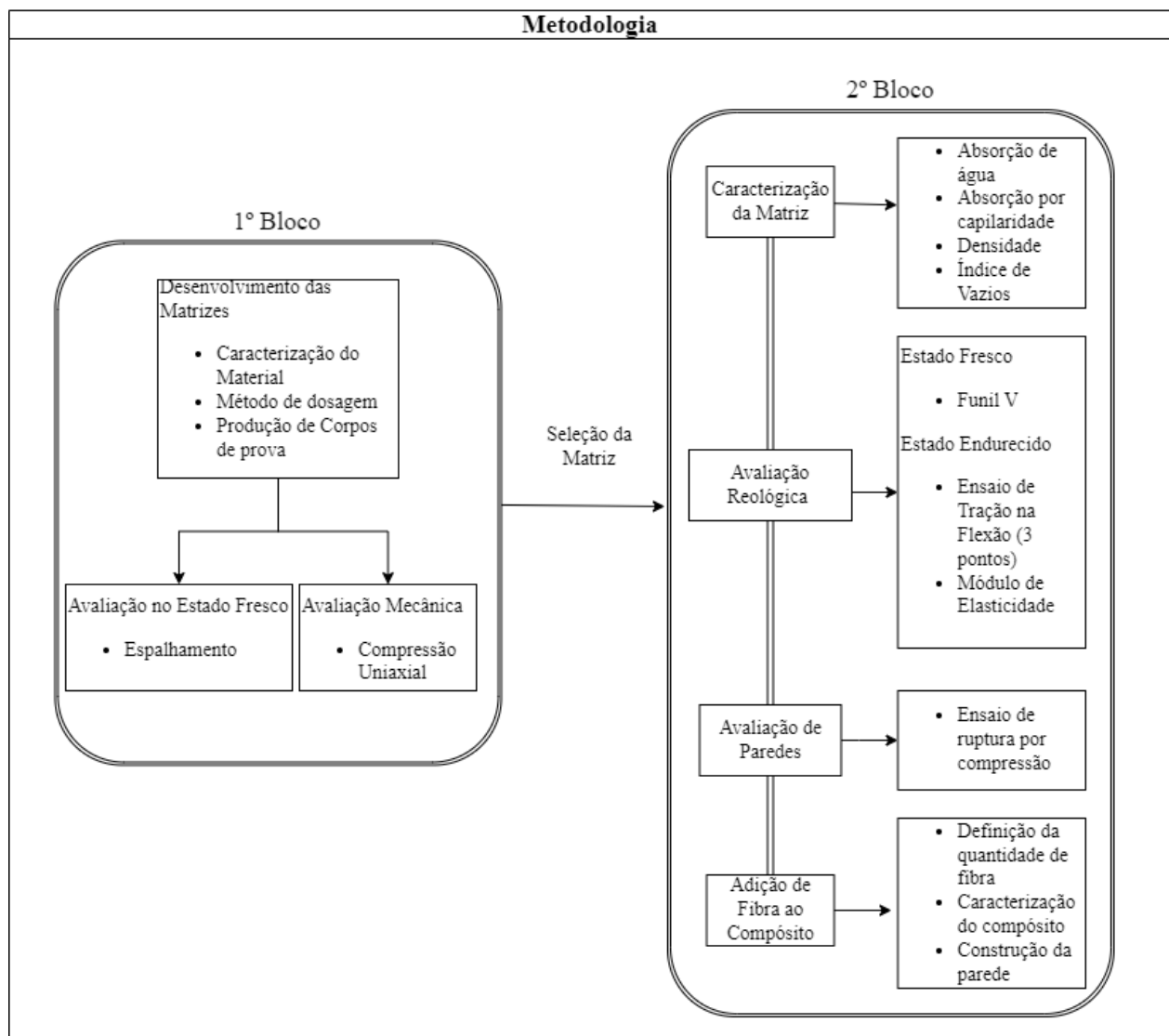
Desse modo, já que não há normatização ou ensaios padronizados para o compósito proposto, foi adotada a metodologia de Okamura e Ouchi (2003) para avaliação do material no estado fresco, em que misturas autoadensáveis a partir de argamassa se aproximam mais da matriz proposta.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Planejamento Experimental

A metodologia adotada para a dissertação será dividida em dois blocos, em que no primeiro será feito o estudo de dosagem e avaliação de matrizes de acordo com os parâmetros necessários para as pretensões do trabalho (autoadensabilidade e resistência). No segundo bloco, com a matriz otimizada e selecionada, serão realizados ensaios para a caracterização física do material, além do ensaio de ruptura da parede. Ensaio adicionais de avaliação mecânica e reológica serão realizados com a dosagem selecionada para complementar os resultados já obtidos na seleção da matriz. A Figura 11 elenca as fases e os ensaios que foram empregados na pesquisa

Figura 11 - Organograma de Metodologia.



4.2 Materiais

4.2.1 Solo, Areia e Metacaulim

O solo foi obtido através de depósitos de materiais de construção na cidade de João Pessoa – PB. Para a caracterização do solo foram realizados os ensaios de granulometria, de acordo com a norma NBR 7181/88, e a definição dos limites de Atterberg, segundo as normas NBR 7180/16 e NBR 6459/16. O material foi estocado em baldes e peneirado numa malha de 4,8 mm antes da sua utilização.

A areia é do tipo quartzosa, comumente utilizada como agregado miúdo na fabricação de concretos da região de João Pessoa, e teve sua granulometria caracterizada de acordo com a norma NBR 7211/09; além disso, a areia foi peneirada a fim de utilizar somente a parcela de agregado miúdo ($> 4,75$ mm). Esse material foi utilizado substituindo parte da terra no traço a fim de diminuir a quantidade de água necessária para atingir a consistência desejada, além de auxiliar na estabilização da terra, como colocado por Barbosa e Ghavami (2014). Foram utilizados dois lotes diferentes de areia, um para os traços sem fibra e outro para as com fibra, denominadas areias 1 e 2, respectivamente.

A Tabela 3 traz a classificação granulométrica, baseada na NBR 6502/95, e os Limites de Atterberg da terra juntamente com as granulometrias das areias, enquanto a Figura 12 ilustra as curvas granulométricas obtidas dos materiais. A Figura 13 traz o DRX do solo utilizado.

Tabela 3 - Caracterização da terra e das areias.

Caracterização da terra			Granulometria das areias		
Granulometria		%		Areia 1	Areia 2
Pedregulho	$d > 2,00$ mm	3,73	Diâmetro (mm)	Pass. Ac. %	
Areia	$0,074$ mm $< d \leq 2$ mm	75,03	4,750	97,15	97,55
Silte + Argila	$d \leq 0,074$ mm	21,24	2,400	91,72	94,41
			1,180	76,31	76,78
			0,600	41,43	23,72
Limites de Atterberg		%	0,300	15,78	4,67
Liquidez		30,90	0,150	1,84	0,80
Plasticidade		20,90	0,075	0,61	0,16
Índice de Plasticidade		10,00	Fundo	0,00	0,00

Figura 12 - Granulometria da terra e da areia.

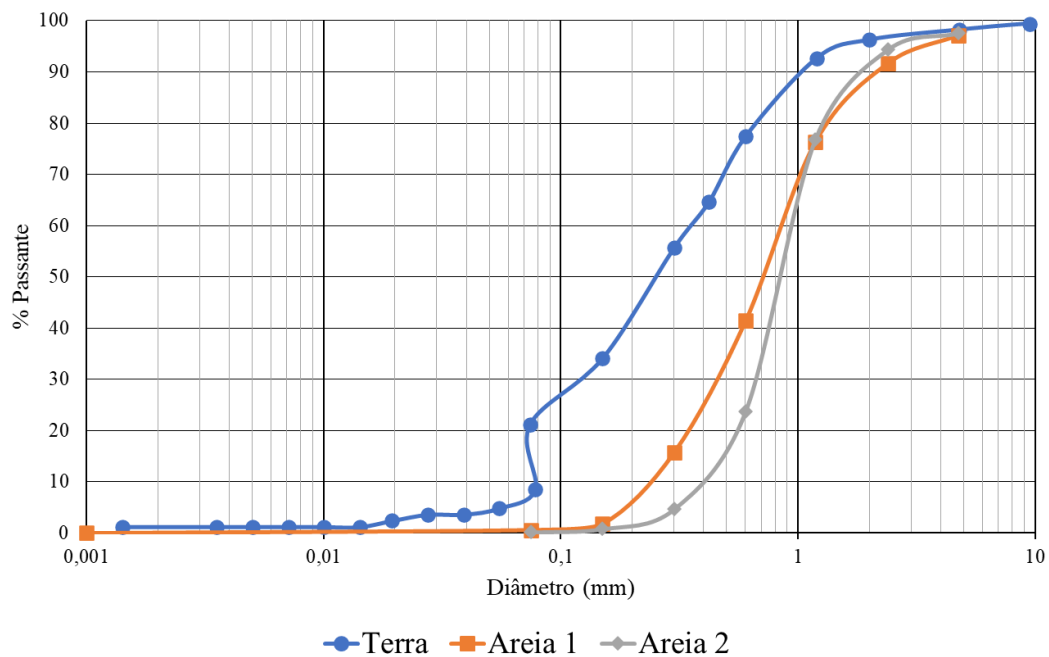
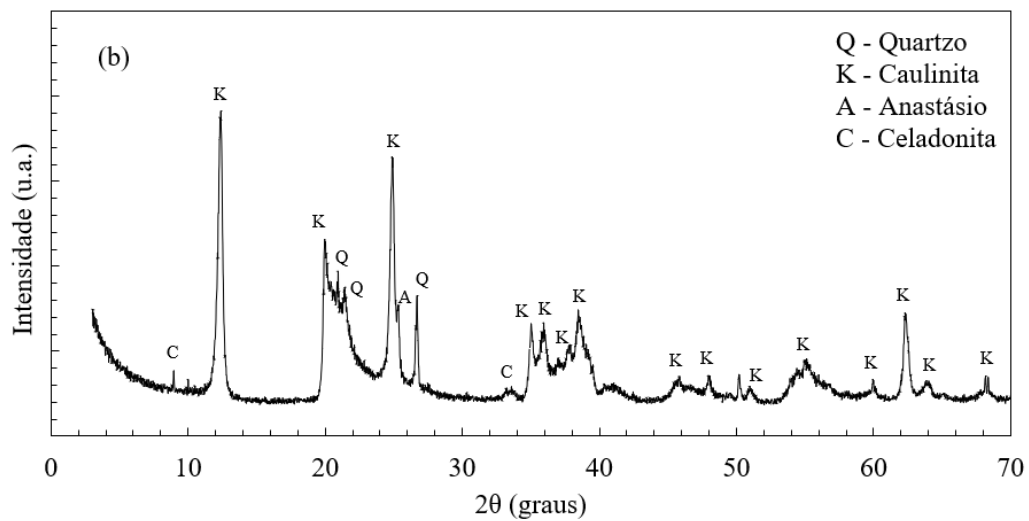


Figura 13 – DRX do solo

DRX Solo



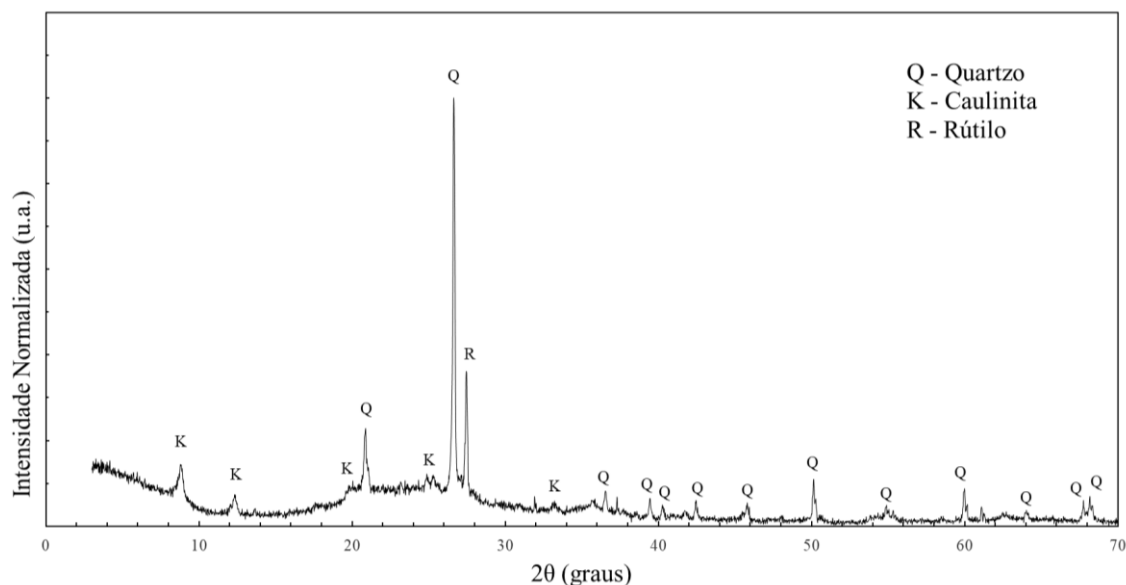
A partir dos dados obtidos na classificação granulométrica, podemos classificar o solo como areno-siltoso. Já no DRX podemos ver a predominância da caulinita, indicando a presença desse tipo de argila no solo, e também do quartzo relativo à areia. O anastásio, relativo ao dióxido de titânio, e a celadonita, mineral do grupo da mica, podem indicar algumas impurezas encontradas no solo.

O metacaulim foi escolhido como precursor da reação ativação alcalina, devido melhor disponibilidade no comércio regional. Sua caracterização se deu através do ensaio de FRX e DRX, com o primeiro utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-x em um equipamento SHIMADZU, modelo XRF-1800. O DRX foi obtido com um difratômetro da marca SHIMADZU, modelo Lab X/XRD-6000, com potência de 2 kVA, voltagem de 30 kV e corrente de 30 mA e utilizando a radiação $K\alpha$ do cobre como fonte de radiação monocromática. Foram feitas varreduras no intervalo 2θ entre 3 e 70°, com um passo de 0,02° e velocidade de 0,5° min⁻¹. O resultado do FRX está disposto na Tabela 4 e o DRX na Figura 14.

Tabela 4 - Composição química do metacaulim.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	CaO	SO ₃	Outros
%	49,867	43,170	2,887	2,102	0,767	0,724	0,160	0,138	0,185

Figura 14 – DRX Metacaulim



Podemos perceber a aparição do halo de 20° à 30° no DRX da Figura 14, característico dos metacaulins, e indicador da presença material amorfo e reatividade do produto.

Para avaliação de adição de fibra no compósito, foi necessário comprar metacaulim de um novo lote e acabou ocorrendo um problema de reatividade desse produto, apesar de

ser do mesmo fabricante e adquirido no mesmo local que o material de partida, utilizado com sucesso na confecção das misturas sem a fibra.

4.2.2 Ativador Alcalino

Uma solução de silicato de sódio e hidróxido de sódio foi utilizada como ativador alcalino. O hidróxido de sódio foi adquirido comercialmente na forma de escamas, com 99% de pureza. O silicato de sódio foi adquirido na Pernambuco Química S/A e está descrito de acordo com o fabricante na Tabela 5.

A água utilizada, tanto na solução quanto na mistura, foi da rede pública da cidade de João Pessoa. A confecção do ativador alcalino se deu, inicialmente, dissolvendo uma massa definida de hidróxido de sódio em água, a solução foi deixada em repouso por pelo menos 24 horas, para atingir o equilíbrio térmico com o ambiente, e então o silicato de sódio é adicionado, homogeneizando a solução por cerca de 5 minutos.

Tabela 5 – Caracterização do silicato de sódio.

Fórmula	Na ₂ O.nSiO ₂
Aspecto	Líquido viscoso levemente turvo
Cor	Incolor a levemente amarelado
Alcalinidade com Na ₂ O (em %)	16,0% - 19,0%
Sílica com SiO ₂ (em %)	33,0% - 38,0%
Solubilidade	Solúvel em água
Relação SiO ₂ /Na ₂ O	1,74 – 2,37
Ph	12,0 – 14,0 (solução a 1%)
Densidade (g/ml) a 20°C	1,63 g/ml – 1,67 g/ml
Viscosidade (Brookfield) a 20°C	>5000 cps
Ferro (ppm)	<100
Sólidos Totais (em %)	49,00% - 57,00%

Fonte: Pernambuco Química.

4.2.3 Fibra

Foi utilizada a fibra de polipropileno do tipo FibroMac[®] 24 cedida pela empresa Maccaferri, indicada em reforços de concreto e argamassas para gerar um composto homogêneo, controlar a fissuração por retração e melhorar o comportamento frente ao fogo. A Figura 15 a seguir mostra as propriedades físicas e mecânicas da fibra.

Figura 15 – Propriedades físicas e mecânicas da FibroMac® 24.

Propriedades físicas		
Diâmetro	µm	18
Seção		Circular
Comprimento	mm	24
Alargamento	%	80
Matéria-prima		Polipropileno
Peso Específico	g/cm³	0,91
Propriedades mecânicas		
Temperatura de fusão	°C	160
Temperatura de ignição	°C	365
Resistencia a la tración	Mpa (N/mm²)	300
Módulo de Yang	MPa	3000

Fonte: Maccaferri.

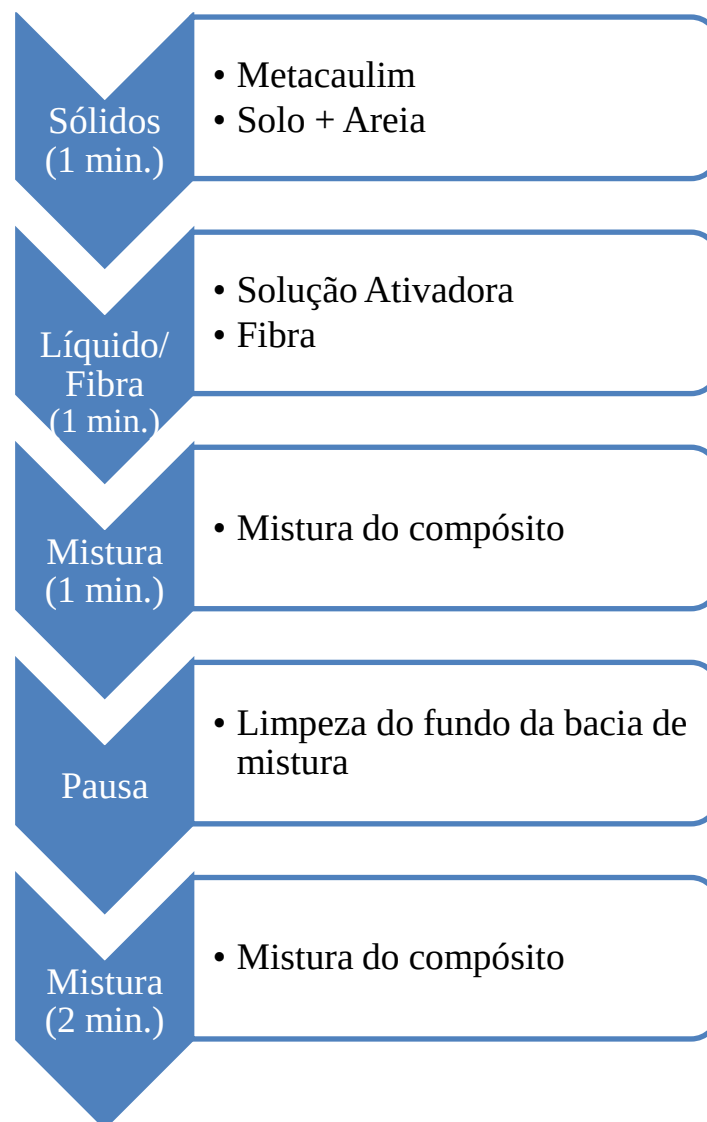
Optou-se por uma fibra sintética devido as fibras naturais, geralmente utilizadas em misturas com terra, não ter compatibilidade com a ativação alcalina. O fator de forma da fibra é de 1333,33.

4.3 Métodos

4.3.1 Mistura e Moldagem

Todas as dosagens, exceto a mistura feita para a fabricação da parede, foram realizadas no misturador mecânico, de maneira padronizada, cuja cuba tem capacidade de 5 L e na velocidade lenta, aproximadamente 62 rpm de movimento planetário e 140 rpm no eixo da espátula. O processo de mistura seguiu os seguintes passos mostrados na Figura 16 a seguir.

Figura 16 – Processo de mistura do compósito.



A mistura dos materiais para a produção da parede monolítica foi feita de forma análoga, mas em uma betoneira comumente usada para concretos, a única alteração é que não houve pausa para a limpeza, sendo o tambor da betoneira previamente umedecido a fim de que não haja a perda de água da mistura. Quando foi utilizada fibra no processo, ela foi previamente saturada, pressionada para expulsar o excesso de água e adicionada aos poucos logo após a solução ativadora.

Terminado o processo de mistura, foi realizada a avaliação correspondente do compósito no estado fresco e então foram moldados corpos de prova para 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, ilustrada na Figura 17 (a) a cura de todas as misturas foram feitas em temperatura ambiente. Tanto no momento da moldagem quanto no desmolde, o corpo de prova é vedado com plástico filme até a idade do ensaio, evitando perda excessiva de água, como mostra a Figura 17 (b).

Figura 17 – (a) Molde para parede; (b) Corpos de prova cilíndricos.



(a)



(b)

4.3.2 1º Bloco da Metodologia

4.3.2.1 Testes Preliminares

Inicialmente, foram realizados alguns testes preliminares para avaliar respostas de variáveis das misturas e balizar a dosagem principal do estudo, realizada utilizando planejamento fatorial. Para formulação das primeiras dosagens foram feitos testes de forma empírica, baseado em valores extraídos da literatura, como os de Araújo (2018), Claverie (2015) e Demie; Nuruddin e Shafiq (2013).

Adotou-se o diâmetro médio, entre os dois maiores diâmetros perpendiculares, de espalhamento do material obtido com o levantamento do cone do ensaio de “*flow table*” para ter uma quantificação do comportamento do material no estado fresco, além da observação

visual da coesão da mistura; e a resistência à compressão como resposta mecânica no estado endurecido.

Na primeira bateria, foi inicialmente utilizado relação de um para um, do metacaulim com os materiais sólidos, para aferir o comportamento da ativação alcalina com as concentrações propostas e, com o considerável ganho de resistência da primeira mistura, foram realizados testes utilizando a substituição parcial de 50% da terra por areia. A solução ativadora foi baseada no trabalho de Araújo (2018), por ter utilizado materiais semelhantes em sua pesquisa. A água adicional foi utilizada para melhorar a trabalhabilidade no primeiro traço e no último, enquanto que no segundo e no terceiro a água foi mantida de acordo com a relação água/metacaulim utilizada no primeiro traço.

A bateria 2 foi planejada para avaliar o efeito da variação da quantidade de solução ativadora. A fim de aproximar a mistura do padrão mostrado na literatura, o ativador foi produzido a partir de uma solução de 12,5 mol/l de hidróxido de sódio com silicato de sódio, numa relação de 1:3 em massa respectivamente entre os dois, valores próximos aos já utilizados na primeira bateria. As dosagens foram feitas com teores mais baixos de metacaulim e utilizando 20% de substituição da terra por areia, exceto no segundo traço em que houve um aumento para 30% na quantidade de areia e de metacaulim, induzido pelas respostas obtidas com o primeiro. No terceiro traço procurou-se um equilíbrio entre o primeiro e o segundo.

Por fim, na bateria 3, realizaram-se testes com a variação da concentração da solução de hidróxido na solução ativadora, obedecendo ao padrão de produção da bateria 2. As misturas foram feitas com 25% de metacaulim em relação aos materiais secos (terra e areia), substituição de 20% da terra por areia. A água foi utilizada para manter a trabalhabilidade de modo que o espalhamento permanecesse num intervalo de 240 ± 10 mm. A Tabela 6 detalha as dosagens citadas a partir dos traços em massa.

Tabela 6 – Traços em massa dos testes.

Traço								Resultados		
Bateria 1	Nome	Terra	Areia	MK	Ativador			Água Extra	D (mm)	Fc (MPa)
					Silicato	NaOH	Água			
	T1	1,00	0,00	1,00	0,80	0,12	0,25	0,17	188,00	11,3 (1 dia) 20,7 (14 dias)
	T2	1,00	1,00	2,00	1,60	0,24	0,50		240,00	13,0 (1 dia) 23,8 (14 dias)
	T3	1,00	0,00	0,50	0,40	0,06	0,13	0,08	101,00	10,0 (1 dia) 16,4 (7 dias)
	T4	1,00	0,25	0,25	0,40	0,06	0,13		221,00	0,5 (1 dia) 3,5 (7 dias)
	Bateria 2	T5	1,00	0,25	0,31	1,13			0,00	295,17
T6		1,00	0,43	0,43	0,51			0,65	185,13	5,1 (3 dias) 7,3 (7 dias)
T7		1,00	0,25	0,31	0,88			0,00	245,80	3,7 (3 dias) 3,4 (7 dias)
Bateria 3	T8 (5 mol/l)	1,00	0,25	0,31	0,88			0,10	240,02	1,89 (7 dias)
	T9 (7,5 mol/l)	1,00	0,25	0,31	0,88			0,20	231,48	2,09 (7 dias)
	T10 (10 mol/l)	1,00	0,25	0,31	0,88			0,21	237,07	2,42 (7 dias)
	T11 (12,5 mol/l)	1,00	0,25	0,31	0,88			0,31	239,13	1,60 (7 dias)
	T12 (15 mol/l)	1,00	0,25	0,31	0,88			0,42	236,26	0,96 (7 dias)

Com os comportamentos observados nos testes preliminares, dispostos na Tabela 6, adotou-se para o planejamento fatorial: uma concentração de solução de hidróxido de sódio com 10 Mol/l para o ativador; optou-se pela fixação da relação entre a solução ativadora e sólidos (terra, areia e metacaulim) de 0,55. Além disso, utilizou-se os seguintes intervalos como as variáveis independentes do planejamento: 20 a 30% da massa base de terra como quantidade de Metacaulim; 20 a 50% de substituição da massa de terra base por areia; e de 1 a 3 a relação entre o silicato e o hidróxido de sódio na solução ativadora. As variáveis dependentes foram o espalhamento relativo, baseado na metodologia de Okamura e Ouchi (2003), e a resistência à compressão aos 7 dias.

4.3.2.2 Planejamento Fatorial

O planejamento fatorial foi definido no modelo 2^k , avaliando três fatores: a quantidade de precursor utilizado, a quantidade de areia substituindo a terra e a relação de

massa silicato/hidróxido na solução ativadora. Além disso, avaliou-se três pontos centrais, resultando num planejamento da forma 2^3+3 , totalizando 11 dosagens.

Foram produzidos quatro corpos de prova para cada nível, referente ao ensaio de resistência à compressão simples como sugere a NBR 7215/96, e avaliado os diâmetros de espalhamento, baseado na metodologia de Okamura e Ouchi (2003) para argamassas de concretos autoadensáveis, mostrado no item 4.3.2.3. As respostas desses dois ensaios foram colocadas como as variáveis dependentes do planejamento.

A partir dos resultados obtidos do planejamento fatorial foi selecionado o traço que tenha boa trabalhabilidade e a maior resistência possível. A dosagem selecionada foi avaliada quanto à otimização da relação entre água e a solução ativadora. Com a dosagem totalmente otimizada, foram realizados os ensaios de caracterização complementares e a construção da parede. A Tabela 7 a seguir detalha os traços obtidos do planejamento.

Tabela 7 – Traços em massa do planejamento fatorial.

Planejamento Experimental		Terra	Areia	MK	Ativador (AA)	
					NaOH (10 Mol/l)	Silicato
	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	
	T8	1,00	1,00	0,60	0,358	1,073
					1,430	
	T9 (C)	1,00	0,54	0,38	0,353	0,705
					1,058	
	T10 (C)	1,00	0,54	0,38	0,353	0,705
					1,058	
	T11 (C)	1,00	0,54	0,38	0,353	0,705
					1,058	

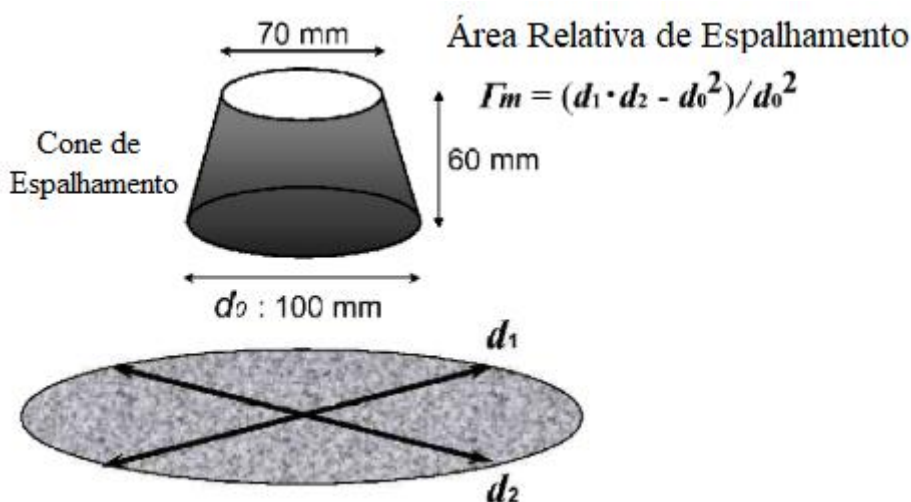
4.3.2.3 Ensaio de Espalhamento

No ensaio de espalhamento adotado por Okamura e Ouchi (2003) é utilizado um tronco de cone, o qual é completamente preenchido e então levantado para que a argamassa esco. De acordo com os dois maiores diâmetros perpendiculares obtidos, é calculado o índice G_m , conforme a Equação 1. O esquema do ensaio está mostrado na Figura 18.

$$G_m = \frac{(d_1 \times d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad (1)$$

Em que: G_m é o índice de espalhamento relativo; d_1 é o primeiro diâmetro medido do espalhamento; d_2 é o segundo diâmetro medido; e d_0 é o diâmetro da base do tronco de cone utilizado.

Figura 18 – Ensaio de espalhamento.



Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

4.3.2.4 Resistência à Compressão

No estado endurecido, o compósito foi avaliado acerca da sua resistência à compressão. Os ensaios foram realizados com base na NBR 7215/1996, sendo confeccionados 4 corpos de prova por idade. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de dimensões 5 cm de diâmetro de base e 10 cm de altura.

4.3.3 2º Bloco da Metodologia

Para otimizar a relação água e solução ativadora, foram testadas as substituições percentuais de 20, 40 e 60% da solução por água. Com esses resultados a dosagem ótima foi selecionada para realizar os ensaios e as caracterizações complementares.

4.3.3.1 Caracterização da Matriz

Para a caracterização física da matriz, foram aferidas as seguintes propriedades: absorção de água, massa específica, índice de vazios e absorção por capilaridade. Para caráter de comparação, a absorção foi avaliada tanto de acordo com a NBR 13555/12, que é direcionada para solo cimento, quanto pela NBR 9778/05 que traz as diretrizes para os cálculos do índice de absorção, índice de vazios e massa específica para argamassas e concretos. Além disso, foram realizados ensaios de DRX e Infravermelho.

De acordo com a NBR 9778/05, os corpos de prova devem ser secos em estufa durante 72 h para determinar a massa seca da amostra. Após a secagem, os corpos de prova devem ser saturados com água em temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por 72 h e então levada a um recipiente com água, a qual deve ser levada progressivamente à ebulição e ser mantida por 5 h e então deixar a água esfriar naturalmente até a temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Após esse processo, determina-se a massa da amostra em balança hidrostática como também sua massa saturada. As propriedades são determinadas a partir das seguintes equações:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (4)$$

Em que: A é a absorção; I_v é o índice de vazios; ρ_s é a massa específica seca; m_{sat} é a massa saturada; m_s é a massa seca; e m_i é a massa hidrostática.

Já a NBR 13555/12 determina que os corpos de prova, após uma cura de 7 dias, sejam secos em estufa até atingir massa constante, obtendo-se a massa seca, e então saturar os

corpos de prova por imersão por 24 h, aferindo a massa saturada após o período. A absorção será definida a partir da Equação 5.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (5)$$

Em que: A é a absorção; I_v é o índice de vazios; ρ_s é a massa específica seca; m_{sat} é a massa saturada; m_s é a massa seca; e m_i é a massa hidrostática.

O DRX foi obtido utilizando o mesmo equipamento usado para o metacaulim, exposto no item 4.2.1. Os espectros na região do infravermelho foram obtidos com o uso de um espectrofotômetro da marca SHIMADZU, modelo IRPrestige-21. Os espectros foram registrados na região de 2000 a 400 cm^{-1} , na proporção KBr e amostra (100:1).

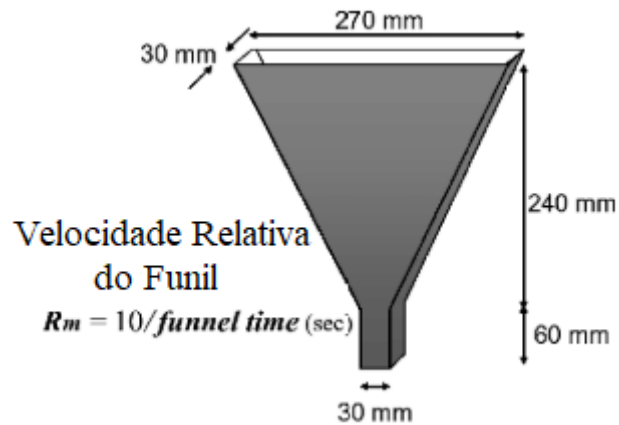
4.3.3.2 Ensaio de Funil V

Na metodologia de Okamura e Ouchi (2003), enquanto o ensaio de espalhamento afere a fluidez do material, o funil V é utilizado para medir a sua viscosidade. Neste ensaio, um funil prismático em forma de V é preenchido completamente com o material e então é o fluxo do funil é aberto, mede-se o tempo até que o material escoe completamente. Com o tempo obtido pode-se calcular o índice R_m , como mostra a Equação 7. O aparato do ensaio é esquematizado na Figura 19.

$$R_m = \frac{10}{\text{Tempo de escoamento (s)}} \quad (7)$$

Em que: R_m é o escoamento relativo.

Figura 19 – Ensaio do Funil V

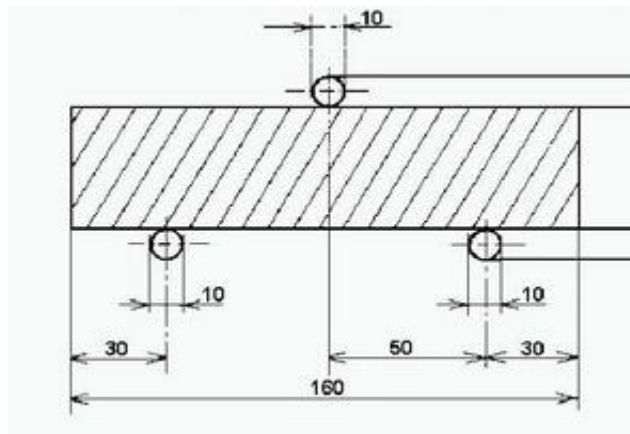


Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

4.3.3.3 Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração do material foi aferida com base na NBR 13279/05, por meio do ensaio de tração na flexão em 3 pontos. Foram avaliadas as resistências nas idades de 7 e 28 dias, com um grupo de 4 corpos de prova para cada idade. Os corpos de prova foram do tipo prismáticos, de 4 x 4 x 16 cm, e foram dispostos para o ensaio de acordo com a Figura 20.

Figura 20 – Ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: NBR 13279/05.

A resistência à tração é calculada com a seguinte equação:

$$R_t = \frac{1,5 F_t L}{40^3} \quad (8)$$

Em que: R_t é a resistência à tração (MPa); F_t é a força aplicada verticalmente no centro do corpo de prova (N); e L é a distância entre os suportes (mm).

4.3.3.4 Módulo de Elasticidade

Para a aferição do módulo de elasticidade foi utilizado um método não destrutivo através do equipamento Sonelastic®, que determina propriedades como módulos elásticos e amortecimento de diversos materiais a partir da técnica de excitação por impulso. O aparelho está embasado nas normas ASTM E 1876:2007, ASTM C 1259:1998, ASTM C 215:2008 e correlatas e utiliza um microfone direcional para captar o impulso no material e correlacionar com suas propriedades, a Figura 21 ilustra o esquema de ensaio.

Figura 21 – Sistema de aquisição de dados do Sonelastic®.



Para a realização do ensaio, o corpo de prova é posicionado nos apoios de acordo com suas dimensões e então o microfone é posicionado de acordo com a propriedade a ser avaliada. Com a aparelhagem pronta, é emitido uma excitação por impacto, com uma haste própria do equipamento, e então é captado pelo software e transformado em informações sobre o material ensaiado. Geralmente são feitas de uma a três repetições para garantir que o sinal captado não apresenta ruídos externos ou se houve qualquer outra interferência.

Além disso, após a medição no Sonelastic®, os corpos de prova foram rompidos à compressão em uma prensa universal e com o gráfico de Tensão (MPa) x Deslocamento do pistão (mm) resultante do ensaio, foram selecionados manualmente dois pontos do primeiro

trecho com o aspecto aproximadamente retilíneo, correspondente ao trecho com deformações elásticas, e com os intervalos foram calculados os módulos de elasticidade.

4.3.4 Parede Monolítica

Com a dosagem otimizada, foi fabricada uma parede de 1 x 1 x 0,15 m para avaliação da resistência à compressão e seu desempenho estrutural. A parede foi pintada com cal para facilitar a verificação das fissuras. Foram definidos os lados 1 e 2 da parede, além de ser instrumentada utilizados os seguintes equipamentos: dois LVDT's, para medir deslocamento vertical no centro da parede; dois relógios comparadores para mensurar deslocamentos verticais no terço central; um relógio comparador para o deslocamento horizontal, na lateral maior da parede, numa altura de 45 cm da sua base; e um relógio comparador para o deslocamento lateral da parede. As Figuras 22 e 23 esquematizam a parede instrumentalizada.

Figura 22 – Esquema de ensaio para o lado 1 da parede.

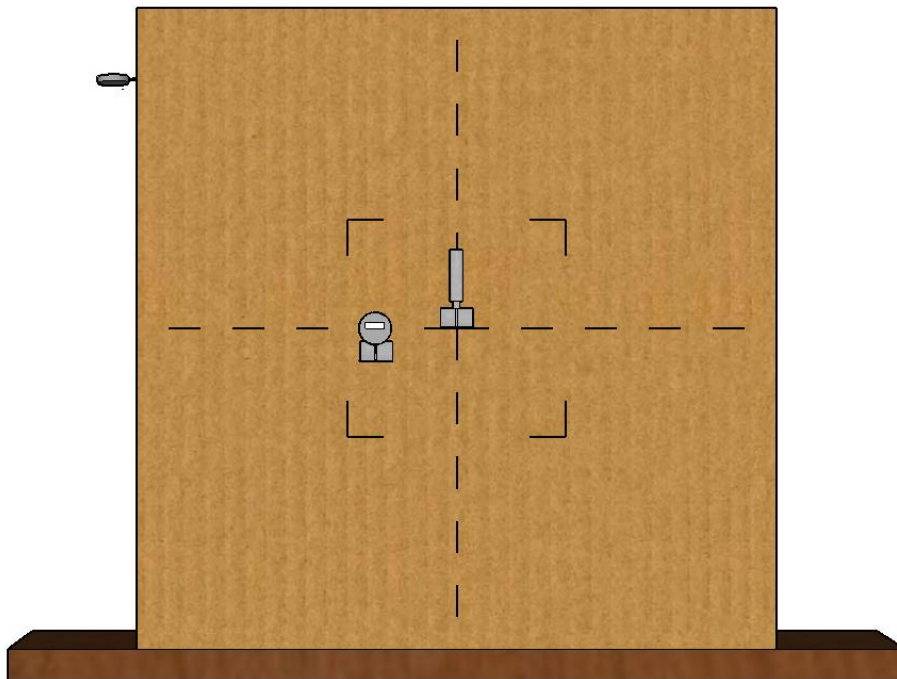
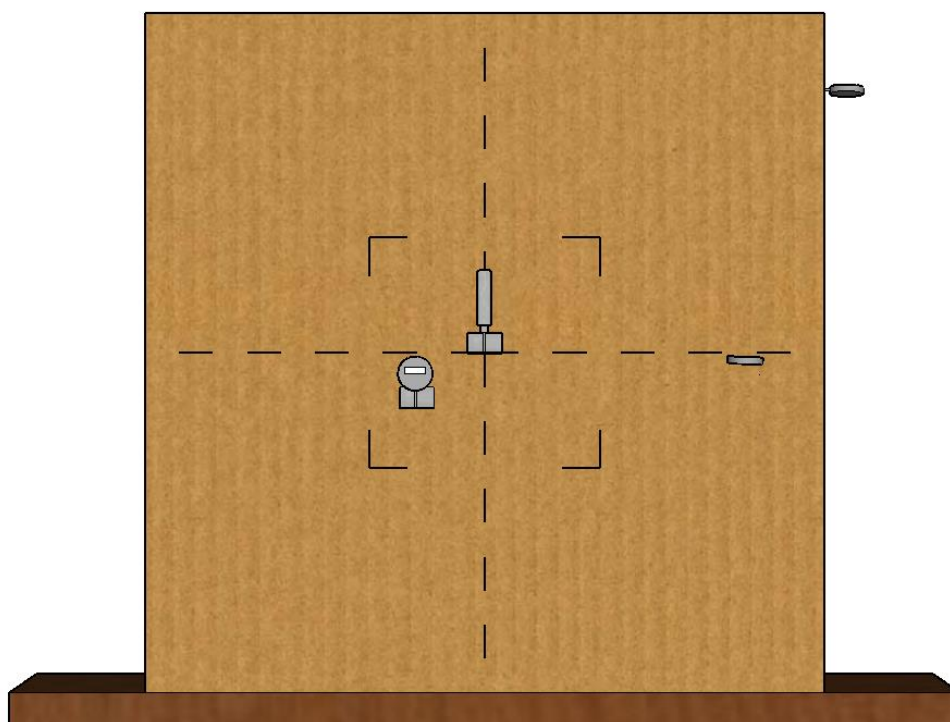


Figura 23 – Esquema de ensaio para o lado 2 da parede.



Além disso, foram feitos corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm e 10 x 20 cm para verificar a relação da resistência à compressão entre eles e a parede, além de avaliar como as dimensões dos corpos de prova interferem nessa propriedade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados dos Testes Preliminares

Por se tratar de estudos preliminares, a interpretação dos resultados de espalhamento do compósito foi baseada na análise da metodologia de Okamura e Ouchi (2003), mesmo sendo realizado com o tronco de cone do ensaio de índice de consistência para argamassas. A partir do planejamento fatorial foi utilizado o tronco de cone específico para argamassas de Okamura e Ouchi (2003).

Apesar de diversas pesquisas já terem utilizado tal metodologia, não há um consenso sobre seus valores aceitáveis ou limitantes para os índices propostos por Okamura e Ouchi (2003), de modo que diversos autores adotam suas faixas ótimas, como coloca Santos *et al.* (2019). Esses valores podem variar muito em função do tipo de material que se está trabalhando e do nível de autoadensabilidade exigido por cada um.

Em função dos números expostos no trabalho de Santos *et al.* (2019) e na observação do comportamento do próprio compósito, o espalhamento ótimo foi admitido como 240 ± 20 mm ($3,84 \leq G_m \leq 5,76$), enquanto que o aceitável está entre 200 e 280 mm ($3,00 \leq G_m \leq 6,84$). Sobre a resistência à compressão, a NBR 13553 cita que a resistência mínima para paredes monolíticas de vedação é de 1 MPa, sendo definido o intervalo entre 1 e 2 MPa como o mínimo aceitável, acima disso é considerado bom. Os resultados observados dos testes preliminares estão dispostos na Tabela 8.

Da primeira bateria de testes, podemos retirar a influência da areia a partir das misturas T1 e T2. O agregado miúdo trouxe benefícios tanto para as propriedades no estado fresco quanto no desempenho mecânico do compósito. As misturas T3 e T4 explicitam a importância do teor de metacaulim para a resistência final do produto no estado endurecido. Nas misturas T3 e T4 observou-se ainda a necessidade de aumento de fase líquida na mistura, mesmo com a redução da quantidade de metacaulim, utilizando uma quantidade maior de água extra na última mistura para se atingir uma consistência adequada ao objetivo do trabalho.

Na segunda fase de testes temos a avaliação da quantidade de ativador utilizado em misturas com teores próximos aos indicados pela literatura. O aumento da solução ativadora se faz necessário para que se obtenha uma mistura com um espalhamento suficiente e com condições adequadas para as reações de ativação do metacaulim, porém há um limite de saturação que não permite o ganho de resistência da mistura, como observado em T5.

Tabela 8 - Resultados das dosagens piloto.

Traço									Relações		Resultados	
Bateria 1	Nome	Terra (1)	Areia (2)	MK (3)	Ativador (4)			Água Extra	(3)/(1+2)	(4)/(3)	D (mm)	Fc (MPa)
					Silicato	NaOH	Água					
	T1	1,00	0,00	1,00	0,80	0,12	0,25	0,17	1,00	1,17	188,00	11,3 (1 dia) 20,7 (14 dias)
	T2	1,00	1,00	2,00	1,60	0,24	0,50	0,34	1,00	1,17	240,00	13,0 (1 dia) 23,8 (14 dias)
					2,34							
	T3	1,00	0,00	0,50	0,40	0,06	0,13	0,08	0,50	1,17	101,00	10,0 (1 dia) 16,4 (7 dias)
					0,59							
	T4	1,00	0,25	0,25	0,40	0,06	0,13	0,25	0,20	2,34	221,00	0,5 (1 dia) 3,5 (7 dias)
0,59												
Bateria 2	T5	1,00	0,25	0,31	1,13			0,00	0,25	3,60	295,17	- -
	T6	1,00	0,43	0,43	0,51			0,65	0,30	1,20	185,13	5,1 (3 dias) 7,3 (7 dias)
	T7	1,00	0,25	0,31	0,88			0,00	0,25	2,80	245,80	3,7 (3 dias) 3,4 (7 dias)
Bateria 3	T8 (5 mol/l)	1,00	0,25	0,31	0,88			0,10	0,25	2,80	240,02	1,89 (7 dias)
	T9 (7,5 mol/l)	1,00	0,25	0,31	0,88			0,20	0,25	2,80	231,48	2,09 (7 dias)
	T10 (10 mol/l)	1,00	0,25	0,31	0,88			0,21	0,25	2,80	237,07	2,42 (7 dias)
	T11 (12,5 mol/l)	1,00	0,25	0,31	0,88			0,31	0,25	2,80	239,13	1,60 (7 dias)
	T12 (15 mol/l)	1,00	0,25	0,31	0,88			0,42	0,25	2,80	236,26	0,96 (7 dias)

Legenda

	Bom ($F_{c7} \leq 2 \text{ MPa}$ / $220 \text{ mm} \leq D < 260 \text{ mm}$)
	Aceitável ($1 \text{ MPa} \leq F_{c7} < 2 \text{ MPa}$ / $200 \text{ mm} \leq D < 280 \text{ mm}$)
	Ruim ($F_{c7} < 1$ / $200 \text{ mm} > D \geq 280 \text{ mm}$)

Alguns resultados na literatura trazem o aumento da concentração de NaOH na solução ativadora como benéfico para o desempenho mecânico, como em Perez-Cortes; Escalante-Garcia (2020), porém podemos observar na bateria 3 que, nesse caso, o fenômeno não foi observado, pois a maior concentração de NaOH acaba ocasionando uma demanda adicional de água para manter a consistência satisfatória, afetando negativamente a resistência à compressão das misturas.

5.2 Resultado do Planejamento Fatorial

Os critérios de análise para os ensaios de espalhamentos e resistência à compressão para o planejamento fatorial foram mantidos semelhantes aos dos testes preliminares. Com os resultados expostos na Tabela 9, o traço 7 (T7) obteve ótimas respostas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, sendo selecionado para ser otimizado e utilizado no segundo bloco da metodologia.

Das variáveis independentes, a areia se mostrou importante à consistência do material no estado fresco, porém há um limite que começa a interferir na resistência do material. O metacaulim, como esperado, governa a resistência do compósito no estado endurecido tendo pouca influência no espalhamento da mistura no estado fresco de acordo com a variação proposta. Além disso, a relação silicato/ hidróxido de sódio se mostrou muito importante para as dois estados avaliados, que ocorre devido ao silicato fornecer uma fonte de sílica adicional e elevar o grau de polimerização devido sua reatividade, como citado por Costa (2020), possibilitando ganho de resistência, e também funcionar como defloculante em argilas e dispersões de caulim, como citado por Landrou *et al.* (2016).

A Tabela 10 traz as relações molares para as misturas do planejamento. Mesmo a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sendo o principal indicativo das ligações químicas referentes ao endurecimento das ativações alcalinas, como mostra Silva (2019), podemos perceber que é com o aumento do silicato de sódio que começa a ocorrer o ganho de resistência, comprovando o incremento de polimerização e reatividade citado anteriormente.

Tabela 9 - Resultados do Planejamento Fatorial

Planejamento Experimental		Terra	Areia	MK	Ativador (AA)			D (mm)		Fc7 (MPa)			
					NaOH (10 Mol/l)	Silicato							
	T1	1,00	0,25	0,25	0,413	0,413		185,00	182,49	0,84	0,74	0,70	0,85
					0,825		Gm	2,38		0,78			
	T2	1,00	1,00	0,40	0,660	0,660		240,78	246,68	0,34	0,34	0,35	0,37
					1,320		Gm	4,94		0,35			
	T3	1,00	0,25	0,38	0,447	0,447		191,57	188,01	2,11	1,75	2,10	1,83
					0,894		Gm	2,60		1,95			
	T4	1,00	1,00	0,60	0,715	0,715		232,67	226,95	1,86	1,81	1,77	1,79
					1,430		Gm	4,28		1,81			
	T5	1,00	0,25	0,25	0,206	0,619		232,27	230,05	3,71	4,03	4,09	3,80
					0,825		Gm	4,34		3,91			
T6	1,00	1,00	0,40	0,330	0,990		276,30	294,64	3,72	3,71	3,53	3,03	
				1,320		Gm	7,14		3,50				
T7	1,00	0,25	0,38	0,223	0,670		228,92	228,77	7,55	7,44	7,82	7,13	
				0,894		Gm	4,24		7,49				
T8	1,00	1,00	0,60	0,358	1,073		248,00	245,68	4,28	5,51	6,36	6,42	
				1,430		Gm	5,09		5,64				
T9 (C)	1,00	0,54	0,38	0,353	0,705		207,32	214,98	2,79	3,05	3,16	-	
				1,058		Gm	3,46		3,00				
T10 (C)	1,00	0,54	0,38	0,353	0,705		212,36	211,48	2,86	3,52	4,17	3,26	
				1,058		Gm	3,49		3,45				
T11 (C)	1,00	0,54	0,38	0,353	0,705		215,97	208,39	3,97	3,95	3,55	3,73	
				1,058		Gm	3,50		3,80				

Legenda

Bom ($Fc7 \geq 2$ MPa / $220 \text{ mm} \leq D < 260 \text{ mm}$ ou $3,84 \leq Gm < 5,76$)

Aceitável ($1 \text{ MPa} \leq Fc7 < 2 \text{ MPa}$ / $200 \text{ mm} \leq D < 280 \text{ mm}$ ou $3,00 \leq Gm < 6,84$)

Ruim ($Fc7 < 1$ / $200 \text{ mm} > D \geq 280 \text{ mm}$ ou $3,00 > Gm \geq 6,84$)

Tabela 10 – Relações Molares dos Traços

Planejamento Experimental			D (mm)		Fc7 (MPa)				Relações Molares			
									SiO ₂ /Al ₂ O ₃	NaO ₂ /SiO ₂	H ₂ O/NaO ₂	NaO ₂ /Al ₂ O ₃
	T1		185,00	182,49	0,84	0,74	0,70	0,85	4,26	0,62	9,49	2,64
		Gm	2,38		0,78							
	T2		240,78	246,68	0,34	0,34	0,35	0,37	4,26	0,62	9,49	2,64
		Gm	4,94		0,35							
	T3		191,57	188,01	2,11	1,75	2,10	1,83	3,62	0,53	9,49	1,90
		Gm	2,60		1,95							
	T4		232,67	226,95	1,86	1,81	1,77	1,79	3,62	0,53	9,49	1,90
		Gm	4,28		1,81							
	T5		232,27	230,05	3,71	4,03	4,09	3,80	5,41	0,45	9,38	2,42
		Gm	4,34		3,91							
T6		276,30	294,64	3,72	3,71	3,53	3,03	5,41	0,45	9,38	2,42	
	Gm	7,14		3,50								
T7		228,92	228,77	7,55	7,44	7,82	7,13	4,45	0,39	9,38	1,75	
	Gm	4,24		7,49								
T8		248,00	245,68	4,28	5,51	6,36	6,42	4,45	0,39	9,38	1,75	
	Gm	5,09		5,64								
T9 (C)		207,32	214,98	2,79	3,05	3,16	-	4,52	0,46	9,42	2,08	
	Gm	3,46		3,00								
T10 (C)		212,36	211,48	2,86	3,52	4,17	3,26	4,52	0,46	9,42	2,08	
	Gm	3,49		3,45								
T11 (C)		215,97	208,39	3,97	3,95	3,55	3,73	4,52	0,46	9,42	2,08	
	Gm	3,50		3,80								

Com as relações de $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ e $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ superiores às apresentadas no Item 3.2, quando o material é exposto à atmosfera, o sódio livre não utilizado nas reações químicas se combina com o carbono do ar, ocasionando pequenas cristalizações de carbonato de sódio como ilustrado na Figura 23. Essa carbonatação em excesso pode vir a colmatar os poros superficiais o que modifica a permeabilidade do material e por consequência as propriedades de higroscopicidade e durabilidade, mas não foi realizada nenhuma investigação acerca disso.

Figura 24 – Cristalização de carbonato de sódio.



A relação de $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ está abaixo pelo fato de ter evitado adicionar água na mistura, utilizando somente a solução ativadora como parte líquida no processo. Isso também esclarece os valores das $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ e $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, já que se optou pela não utilização da água, houve um aumento da quantidade de solução ativadora para atingir os níveis de espalhamento desejado e um consequente aumento dos óxidos de sódio e da sílica.

5.2.1 Análise Estatística do Planejamento Fatorial

Para o embasamento das observações, os resultados foram avaliados estatisticamente com o auxílio do software STATISTICA. No processamento de dados, a variável Areia corresponde ao percentual de substituição de terra por areia, MK a porcentagem de metacaulim utilizado na mistura e S/H a relação em massa de silicato e hidróxido utilizado na solução ativadora.

A Tabela 11 traz a ANOVA e a Tabela 12 o teste de Fisher do modelo proposto para a resposta de resistência à compressão com 7 dias. Podemos perceber que as variáveis

significativas (destacadas em vermelho) são o metacaulim e a relação silicato/hidróxido, o que faz total sentido devido a ambos influenciarem 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 , mostrando que o modelo explica 98% da variação dos dados observados, estando ajustado ao que se propõe. Além disso, através das relações do teste de Fisher, podemos confirmar que o modelo é estatisticamente significativo e que não precisa de ajuste.

Tabela 11 – ANOVA para a resistência à compressão com 7 dias.

ANOVA; Var.:Fc7; R-sqr=,98089; Adj.:95222 2**(3-0) design; MS Pure Error=,1608333 DV: Fc7					
Factor	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 by 2	0,16531	1	0,16531	1,0278	0,417364
1 by 3	0,35701	1	0,35701	2,2198	0,274714
2 by 3	1,19351	1	1,19351	7,4208	0,112473
Lack of Fit	0,49761	2	0,24881	1,5470	0,392621
Pure Error	0,32167	2	0,16083		
Total SS	42,86685	10			

Tabela 12 – Teste de Fisher para a resistência à compressão.

Teste de Fisher						
	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalc	Ftab	Teste F
Regressão	42,04757	6	7,00793	34,2151	6,16	5,55439
Resíduo	0,81928	4	0,20482			
Falta de Ajuste	0,49761	2	0,24881	1,54696	19,00	0,08142
Erro Puro	0,32167	2	0,16084			
Total	42,86685	8				

A Tabela 13 traz a ANOVA e a Tabela 14 o teste de Fisher para a resposta do índice de espalhamento das misturas. Observa-se que todas as linhas estão destacadas como significativas estatisticamente, inclusive a falta de ajuste (“*Lack of Fit*”) e um erro puro

baixo, mesmo assim o R^2 foi de 89,16%, o que é suficiente para os resultados esperados. Através do gráfico de Pareto, Figura 25, podemos visualizar que as variáveis mais significativas para o espalhamento da mistura é a areia e a relação silicato/hidróxido, corroborando com o que foi citado anteriormente no Item 5.2. As considerações citadas 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.

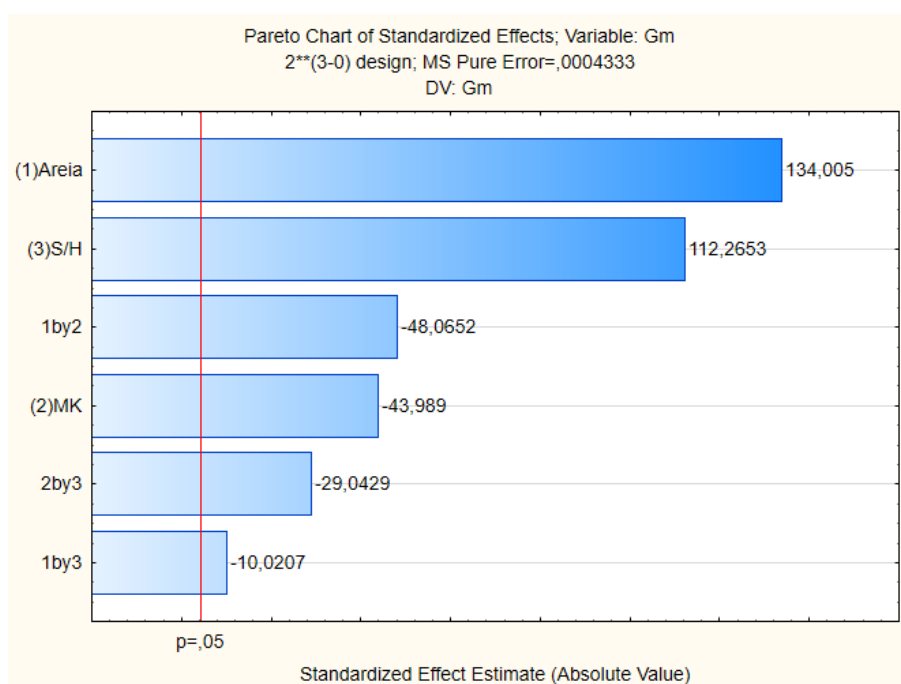
Tabela 13 - ANOVA para o índice de espalhamento.

ANOVA; Var.:Gm; R-sqr=,8916; Adj.,72899 (3-2)**(3-0) design; MS Pure Error=,0004333 DV: Gm					
Factor	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 by 2	1,00111	1	1,001113	2310,26	0,000433
1 by 3	0,04351	1	0,043513	100,41	0,009812
2 by 3	0,36551	1	0,365512	843,49	0,001183
Lack of Fit	1,88268	2	0,941338	2172,32	0,000460
Pure Error	0,00087	2	0,000433		
Total SS	17,37522	10			

Tabela 14 – Teste de Fisher para o índice de espalhamento.

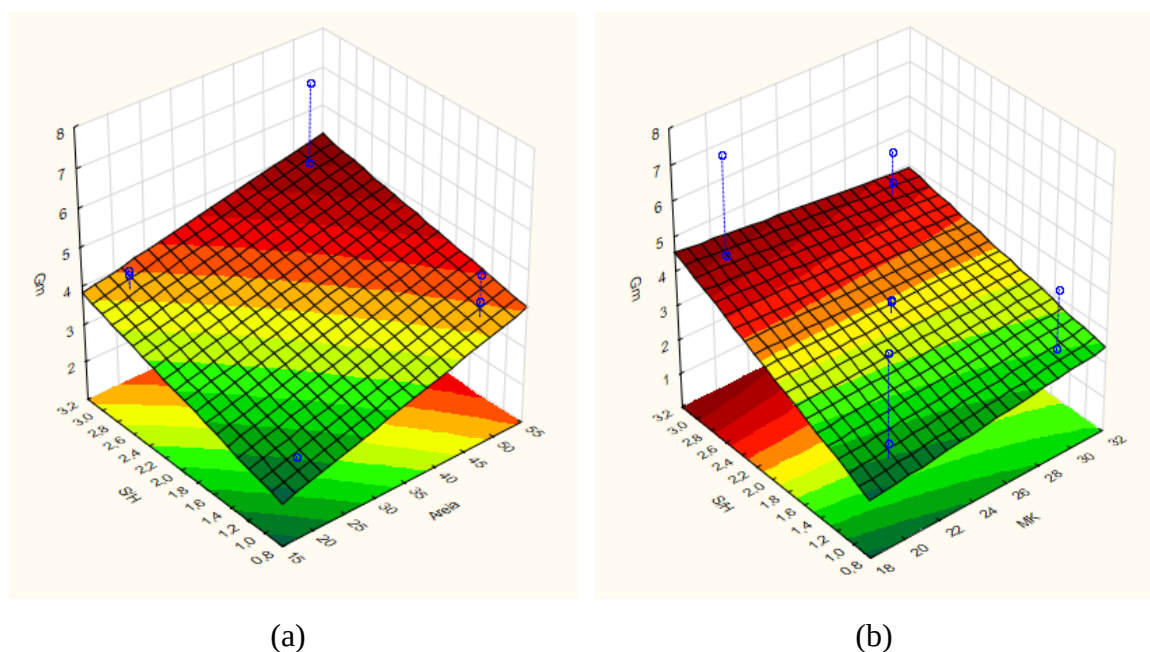
Teste de Fisher						
	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalc	Ftab	Teste F
Regressão	40,98330	6	6,83055	14,5057	6,16	2,35482
Resíduo	1,88355	4	0,47089			
Falta de Ajuste	1,88268	2	0,94134	2164	19,00	113,895
Erro Puro	0,00087	2	0,00044			
Total	42,86685	8				

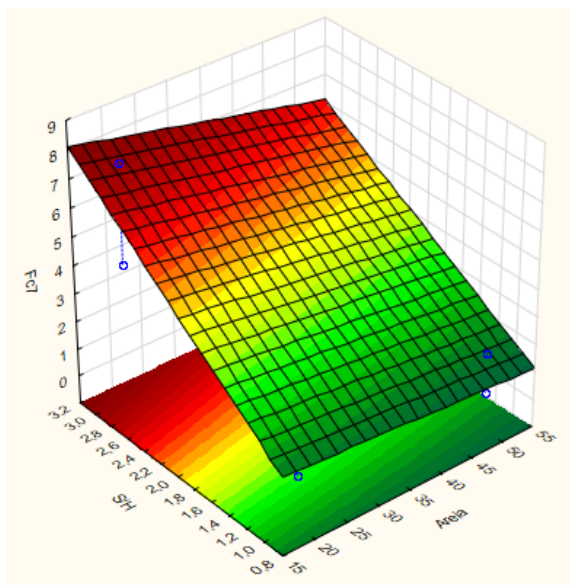
Figura 25 – Gráfico de Pareto para o índice de espalhamento.



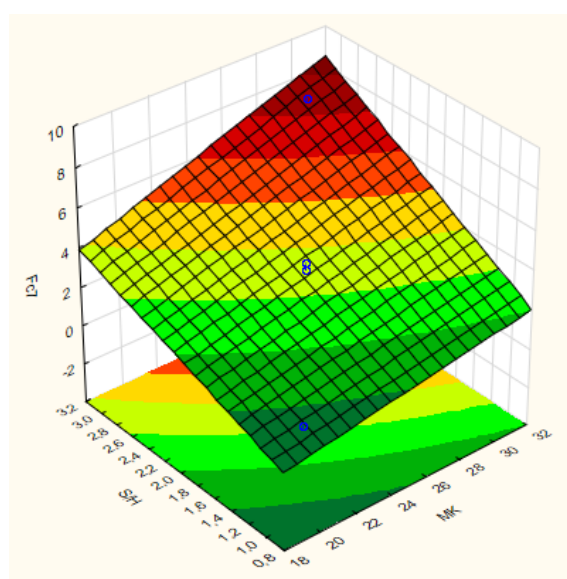
A superfícies de resposta mostradas na Figura 26 (a) e (b) mostram as tendências do índice de espalhamento observadas em função das variáveis propostas, analogamente a Figura 26 (c) e (d) para a resistência à compressão aos 7 dias.

Figura 26 – Superfícies de resposta (a) Gm x S/H x Areia; (b) Gm x S/H x MK; (c) Fc7 x S/H x Areia; e (d) Fc7 x S/H x MK.





(c)



(d)

5.2.2 Otimização de Solução Ativadora

Para a otimização da quantidade de água utilizada com a solução ativadora, foi avaliado um teor de substituição da solução por água, visando uma menor utilização do silicato e do hidróxido. A Tabela 15 traz os resultados obtidos.

Tabela 15 – Otimização da solução ativadora.

Otimização de Água na Solução Ativadora								
TS	D (mm)		Fc7 (MPa)				Fcm (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

TS: Teor de substituição;

D: Diâmetro de espalhamento;

Percebeu-se que, para o espalhamento da mistura, a utilização da água não segue um comportamento linear. É possível que até 20% de substituição o efeito dispersor do silicato de sódio supere a plasticidade oferecida pela quantidade de água no solo, enquanto que ao atingir o teor de substituição de 40% o solo fica mais plástico aumentando sua coesão e diminuindo o espalhamento. Nos 60% o aumento expressivo do espalhamento que pode ter

ocorrido devido a ter atingido o limite de liquidez do solo. De qualquer forma, somente a partir do teor de 60% se observa uma melhora na reologia do estado fresco da 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, sendo que no teor de 40% a resistência se mostrou muito abaixo da mistura de controle e em 60% não houve ganho de resistência significativo. Esse efeito é explicado tanto pela diminuição da disponibilidade de solução ativadora, o que deteriora a formação dos compostos que dão resistência ao compósito, quanto pelo aumento da porosidade 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.

5.3 Caracterização da Matriz

5.3.1 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. Os resultados se encontram na Tabela 16.

Tabela 16 – Propriedades do material final.

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%
Ind. 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

Para quesito comparativo, também foi realizado o ensaio de absorção baseado na norma direcionada para solo cimento, exposto na Tabela 17. Os valores foram relativamente próximos e ambos foram menores que 20%, valor limite da NBR 13553 que demonstra requisito para os materiais empregados em paredes monolíticas sem função estrutural.

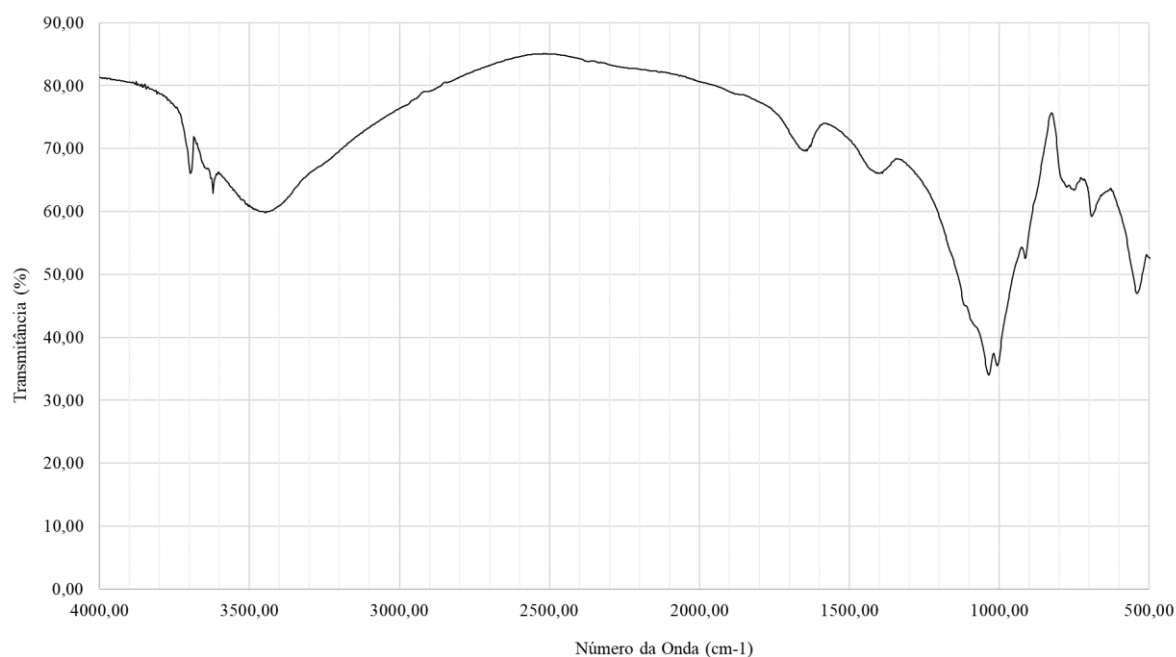
Tabela 17 – Absorção da água.

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

5.3.2 Espectroscopia Infravermelho

O resultado do ensaio de espectroscopia infravermelho para o compósito final está exibido na Figura 27.

Figura 27 – Espectrograma do material final.



De acordo com Gonçalves *et al.* (2022); Apolonio *et al.* (2020), Azevedo; Strecker e Lombardi (2018) e Santa (2016), podemos inferir que o pico obtido na região de 1000 cm^{-1} indica a geopolimerização, sendo bandas características de ligações Si-O-Si e Si-O-Al. Em materiais não ativados o pico se dá 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} na direção de bandas mais baixas. Os picos da região de 3450 cm^{-1} e 1650 cm^{-1} mostram a presença das bandas de O-H e H-O-H, podendo ser associadas à água adsorvida ou à solução ativadora. O pico da região entre as bandas de 1400-1500 cm^{-1} está relacionado com a carbonatação do sódio

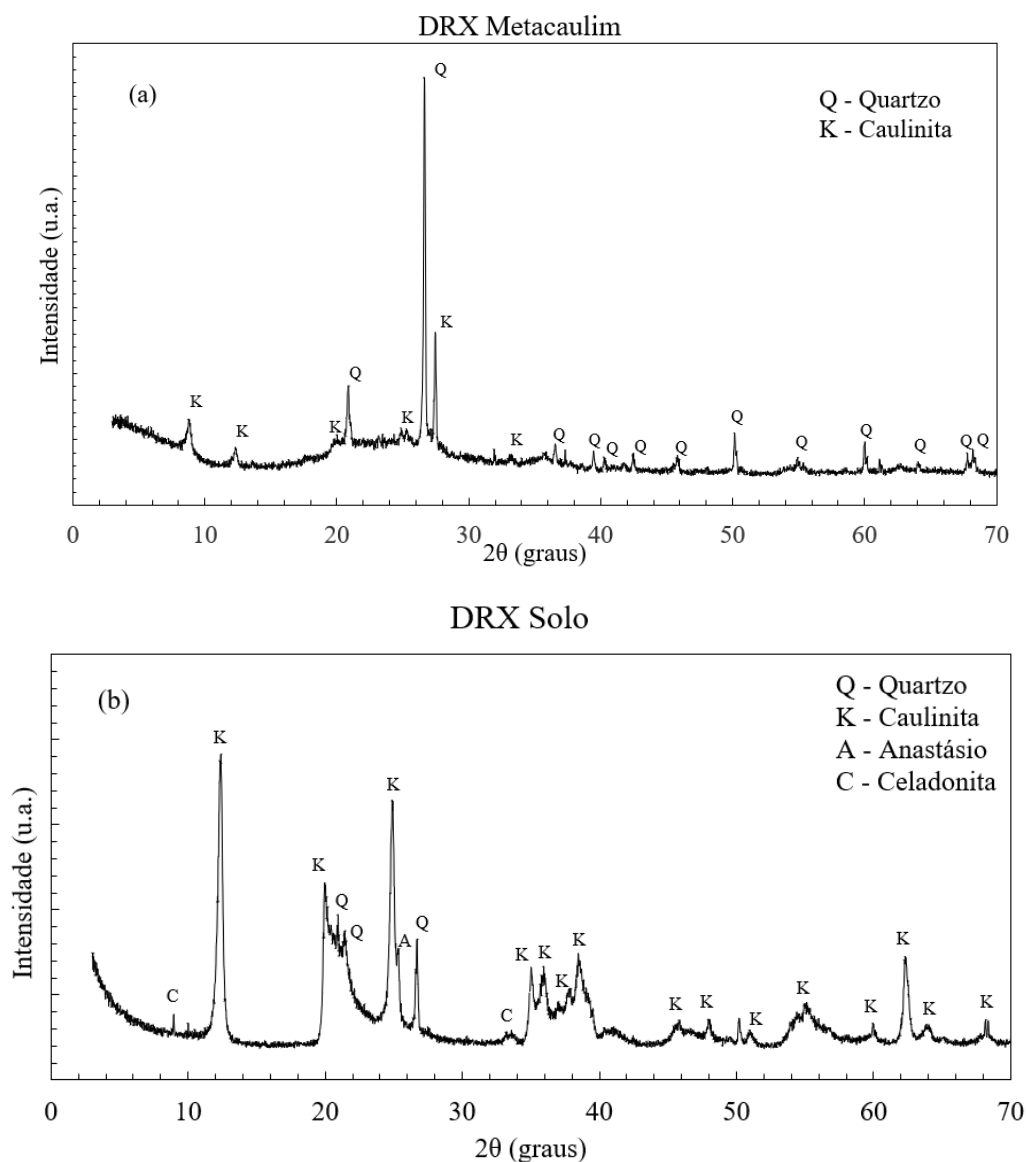
excedente da solução ativadora. Picos na região entre 700-800 cm^{-1} estão associados à formação dos tetraedros da cadeia dos geopolímeros. Bandas mais baixas, na faixa de 500 cm^{-1} estão ligadas às formações cristalinas de Si-O e Al-O.

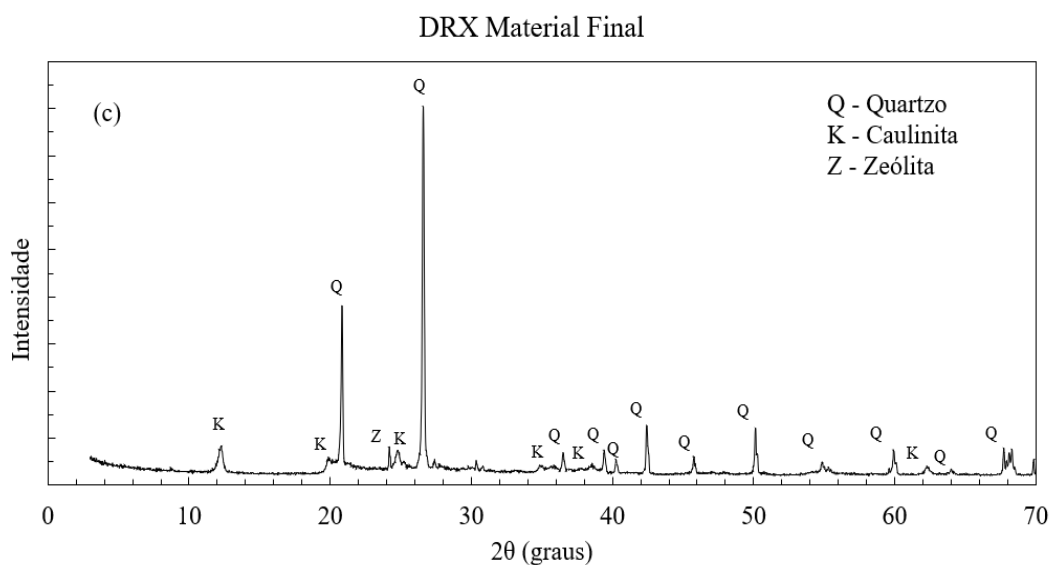
Assim podemos observar que o houve a ativação alcalina do metacaulim, criando compostos característicos da geopolimerização e fornecendo uma estrutura resistente para a mistura de solo e areia.

5.3.3 Difratorômetro de Raios X

Os DRX's do solo utilizado, do metacaulim e do compósito final estão apresentados na Figura 28.

Figura 28 – Resultados do DRX: (a) Metacaulim; (b) Solo e (c) Material Final





Podemos observar que no material final não apresentou sinal de material amorfo, tendo os picos de quartzo sobressaído sobre os de caulinita, o que pode ser explicado devido as fases presentes tanto no metacaulim como na areia utilizada junto ao solo na mistura. Além disso, o surgimento de um pico de zeólita representa a formação do gel geopolimérico.

5.4 Funil V

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. Esse resultado pode ser elucidado devido à alta viscosidade da parte líquida da mistura (solução ativadora), principalmente pelo silicato de sódio, em relação à água que geralmente governa a reologia da parte fresca nas argamassas convencionais. A Figura 29 mostra o momento do escoamento do material no ensaio do funil V.

Figura 29 – Ensaio do Funil V.



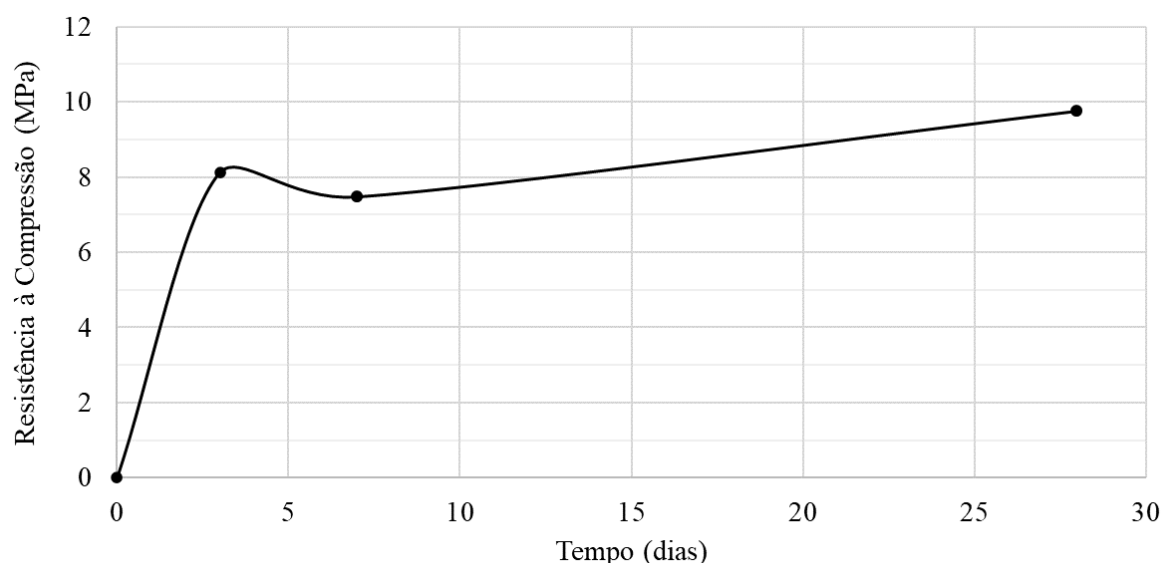
5.5 Resistência à Compressão

Foram avaliadas as resistências à compressão para as idades de 3, 7 e 28 dias. Os resultados estão apresentados na Tabela 18 e na Figura 30.

Tabela 18 – Resistência à compressão do compósito sem fibra.

Sem Fibra								
CP Tensão (MPa)			CP Tensão (MPa)			CP Tensão (MPa)		
3 dias	1	7,63	7 dias	1	7,55	28 dias	1	10,42
	2	8,53		2	7,44		2	10,07
	3	8,52		3	7,82		3	8,76
	4	7,82		4	7,13		4	-
Média		8,12	Média		7,49	Média		9,75
σ		0,47	σ		0,29	σ		0,88

Figura 30 – Resistência à compressão do compósito.



Podemos 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 3 primeiros, o que pode agilizar a logística de uso de fôrmas para o material. Além disso, os valores obtidos são bastante satisfatórios a luz da bibliografia consultada.

Relacionando com a bibliografia consultada, temos que os valores encontrados na pesquisa foram superiores a alguns trabalhos que utilizaram o cimento como estabilizante, como de Martins, Silva e Toledo Filho (2015), 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, equiparáveis aos resultados obtidos com o compósito proposto aos 28 dias.

Os trabalhos de Cristelo *et al.* (2012) e Gu e Chen (2020) atingiram valores de resistência acima dos 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*”, de modo que essa condição do estado fresco interfere nas propriedades de resistência do compósito, e fica mais difícil uma comparação direta com os resultados obtidos. Enquanto Gu e Chen (2020) avaliaram diversas condições, como a cura térmica e a utilização de até 4 estabilizantes, de modo que também foge um

pouco do que foi realizado no trabalho. Porém, esses valores mostram que há espaço para evolução e obtenção de compósitos de terra autoadensáveis mais resistentes.

5.6 Resistência à Tração na Flexão

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão estão na Tabela 19.

Tabela 19 – Resistência à tração na flexão.

Ensaio de Flexão					
	CP Tensão (MPa)			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

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) atingiu 1,43 MPa. Aos 28 dias a resistência à flexão obteve valor levemente superior aos citados.

5.7 Módulo de Elasticidade

Os valores resultantes dos ensaios de módulo de elasticidade estão na Tabela 20 para o Sonelastic e na Tabelas 21 para a prensa universal.

Tabela 20 – Módulo de elasticidade obtido no Sonelastic.

Sonelastic			
CP	Massa (g)	ρ (g/cm ³)	E (Gpa)
SF 1	3030,2	1,93	3,80
SF 2	3025,1	1,93	3,69
SF 3	3023,7	1,92	3,79
SF 4	3028,8	1,93	3,77
SF 5	3015	1,92	3,80
Média			3,77

Tabela 21 – Módulo de elasticidade obtido na prensa universal.

Prensa Universal								
CP	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	Δd (mm)	$\Delta\epsilon$ (‰)	E (MPa)
SF 1	1,600	3,127	1,527	2,664	3,069	0,405	2,025	754,07
SF 2	2,153	3,589	1,436	2,548	2,978	0,430	2,150	667,91
SF 3	1,468	3,159	1,691	2,533	3,009	0,476	2,380	710,50
SF 4	2,161	3,454	1,293	2,713	3,020	0,307	1,535	842,35
SF 5	3,971	4,990	1,019	3,409	3,624	0,215	1,075	947,91
Média								784,55

Podemos perceber que houve uma grande redução de um tipo de aquisição para outro, que pode ser elucidado devido ter sido usado o deslocamento do pistão da prensa como medida de deformação e não a deformação no terço central do corpo de prova.

Na literatura são encontrados valores variados para esse parâmetro, Miccoli, Müller e Fontana (2014) trazem em sua revisão valores para módulos de elasticidade de taipa de pilão que variam de 60 até 750 MPa, e no ensaio dos próprios autores foi obtido um módulo de elasticidade de 4,143 GPa para a parede reduzida de taipa de pilão. Islam *et al.* (2020) encontraram valores entre 1,22 e 4,53 GPa para taipa de pilão. Enquanto que Jayasinghe e Kamaladasa (2007) encontraram valores próximos à 500 MPa e citaram que a norma da Nova Zelândia NZS 4297 recomenda que o valor do módulo de elasticidade seja $300 \cdot f_c$ (300 vezes a resistência à compressão).

5.8 Parede Monolítica

Ao ser desmoldada, aos 28 dias de cura, pôde-se notar algumas fissuras de retração nos lados menores e na base da parede, não houve nenhuma na sua parte central, além disso tais fissuras não comprometeram a estabilidade da parede. A parede não apresentou nenhum nicho ou falha na acomodação do material na fôrma, apresentou uma superfície bastante uniforme e um topo relativamente nivelado, comprovando na prática a autoadensabilidade da matriz produzida. As Figuras 31 e 32 mostram o aspecto da parede após o desmolde e as fissuras apresentadas.

Figura 31 – Parede monolítica.



Figura 32 – Fissuras na parede.



(a)



(b)



(c)



(d)

5.8.1 Ensaio de Compressão

Para o ensaio a parede foi pintada de branco para destacar melhor as fissuras formadas com a aplicação da força; além disso as fissuras de retração pré-existent foram demarcadas em cor diferenciada para haver distinção entre elas e as rachaduras provenientes do ensaio.

Foi distribuído gesso em pó ao longo do topo da parede, a fim de diminuir as imperfeições e irregularidades da superfície, e sobre essa camada foi posicionada uma viga metálica para a distribuição uniforme da carga. O aparato para medição dos deslocamentos já foi ilustrado nas Figura 22 e 23. A Figura 33 mostra como ficou a parede pronta para o ensaio.

No decorrer do ensaio, aos 280 kN, a cantoneira base do LVDT 2 caiu 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.

Figura 33 – Parede posicionada para o ensaio de compressão.



No ensaio de compressão a parede conseguiu suportar uma carga máxima de 494,40 kN, correspondendo a uma tensão de 3,30 MPa. Os corpos de prova referentes à parede foram rompidos com a mesma idade e apresentaram resistências médias bem próximas, de 10,68 MPa para os de medida 5 x 10 cm e 10,49 MPa para os cilindros de 10 x 20 cm, como mostra a Tabela 22.

Tabela 22 – Resistência à compressão dos CP's relativos à parede.

Ensaio de Compressão					
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

Podemos perceber 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.

Nunes (2017), avaliou pequenas alvenarias estruturais com blocos de concreto com metodologia semelhante ao presente trabalho e obteve uma carga máxima de 439,70 kN para paredes com dimensões 1,20 x 1,20 m, correspondendo a uma tensão de 2,57 MPa. Dessa forma podemos inferir que a terra autoadensável estabilizada alcalinamente pode atender a 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, portanto, o valor de 3,30 MPa bem próximo. Enquanto que as paredes reduzidas de taipa de pilão de Reddy e Kumar (2011) alcançaram 5,47 MPa, um valor superior aos citados.

Acerca do 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 ilustra a Figura 34, com 340 kN obteve-se no máximo 3,22 mm de deslocamento, porém é importante salientar 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. A Figura 35 e a Figura 36 mostram o deslocamento referente à linha de flexão da parede e o deslocamento lateral, respectivamente.

Figura 34 – Deslocamento vertical da parede.

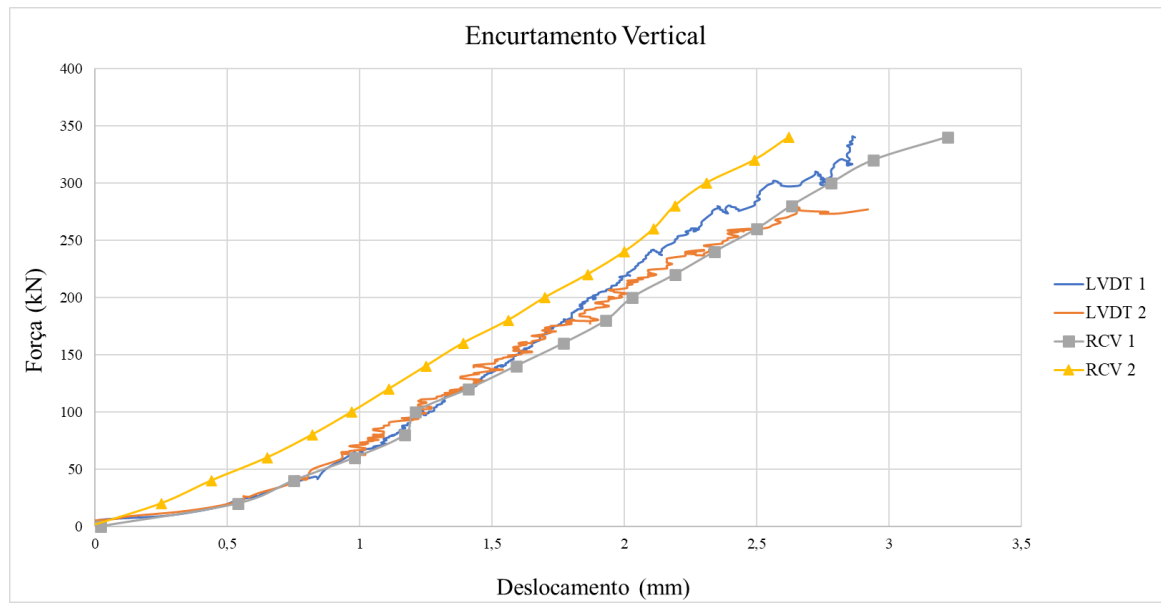
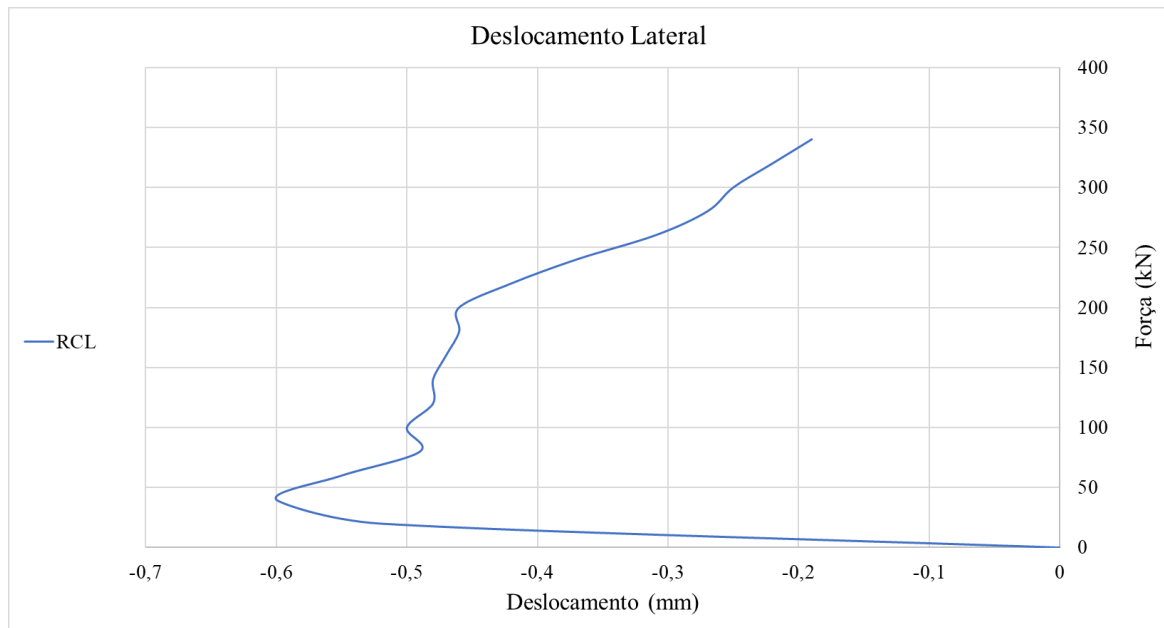


Figura 35 – Deslocamento de flexão.



Figura 36 – Deslocamento lateral.



Na ruptura da parede, inicialmente houve o esmagamento do material próximo à base e logo em seguida com o reajuste da parede ocorreu um esmagamento mais próximo ao topo, em lados invertidos, como mostra a Figura 37. Foram se formando fissuras características à 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 as rachaduras salientes de retração no início do ensaio, elas não foram responsáveis pela formação de planos de fragilidade e não tiveram grande interferência no resultado final.

Figura 37 – Modo de ruptura da parede.



Apesar das fissuras de retração não interferirem diretamente na ruptura da parede, optou-se por testar a adição de fibras na mistura a fim de evitar, ou pelo menos mitigar, a formação dessas rachaduras.

5.9 Compósito com Fibra

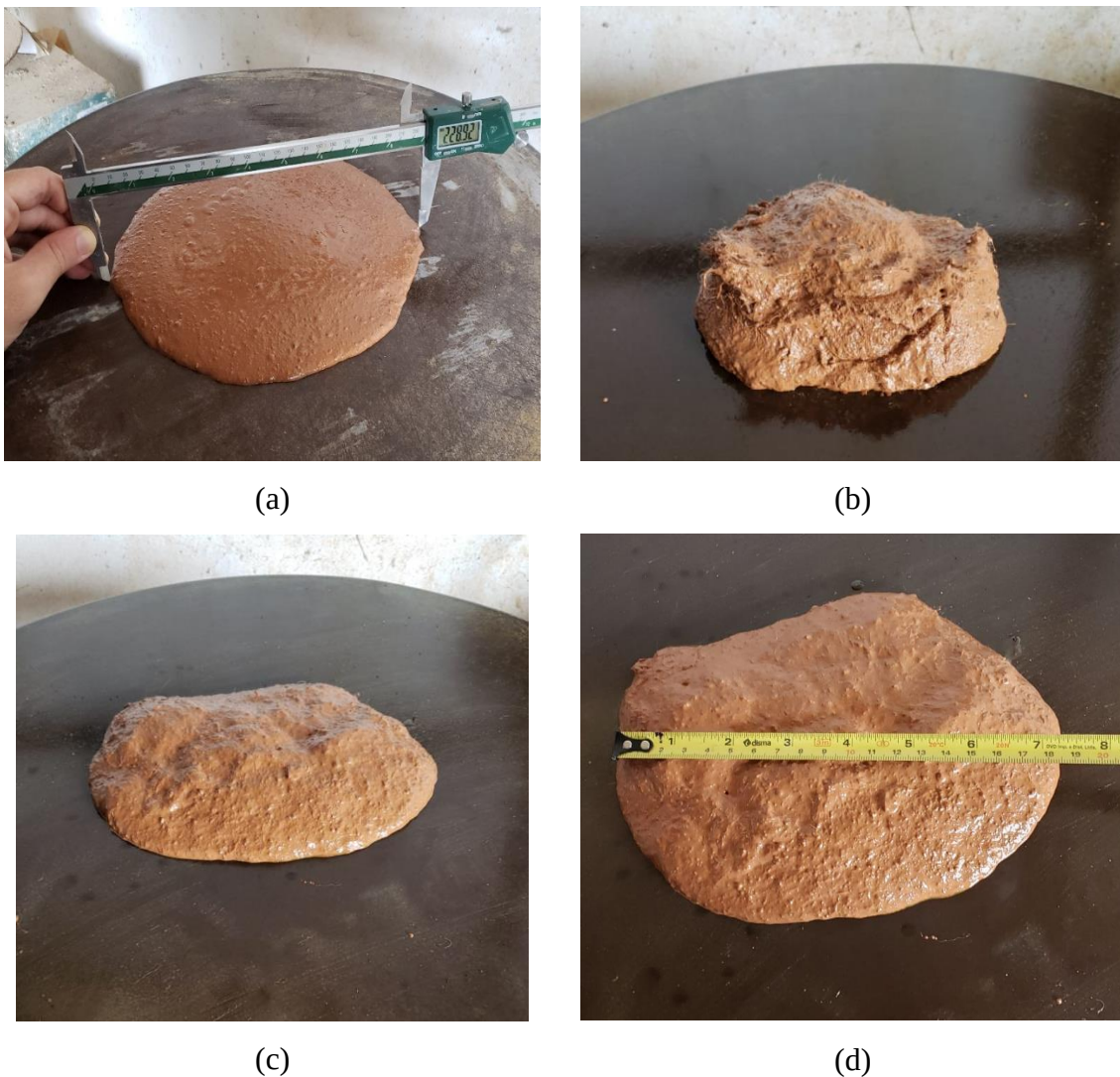
5.9.1 Dosagem

Para a adição de fibras na mistura, foram avaliadas modificações a partir do traço base utilizado, tendo como parâmetros a resistência aos 7 dias e, principalmente, o espalhamento que é o aspecto mais prejudicado pela inserção desse material no compósito. Não foi objetivo do trabalho avaliar diferentes tipos de fibras ou diferentes tamanhos da mesma, de modo que foi utilizada somente a fibra do tipo FibroMac[®] 24, caracterizada no item 4.2.3.

Os teores de fibras foram tomados em relação a massa de sólidos inertes (terra + areia), sendo inicialmente testados os teores de 1% e 0,5%. Para o primeiro teor não houve

praticamente espalhamento nenhum após retirar o tronco de cone, percebendo-se que seria necessário alterações no traço para ter proximidade com a autoadensabilidade. No teor de 0,5% foi realizado o umedecimento prévio das fibras e o aumento de 20% para 40% de substituição da terra por areia, mas mesmo assim o espalhamento atingiu no máximo um diâmetro de 185 mm, evidenciando o fato das fibras prejudicarem bastante o aspecto fresco da mistura. A Figura 38 mostra como o espalhamento com as fibras foram afetados em relação ao espalhamento da mistura de referência.

Figura 38– Espalhamentos (a) Referência; (b) 1% de fibra; (c) e (d) 0,5% de fibra.



Dessa forma, foi testado o teor de 0,25% de fibra com os 40% de substituição de terra por areia sendo obtido diâmetros de 235,20 mm e 161,56 mm, havendo assim um espalhamento não uniforme, mas com pelo menos um dos valores próximo aos valores da

mistura de referência. O índice de espalhamento relativo (Gm) foi de 2,79, que é menor que os valores citados na discussão do Item 5.1, mas o aspecto visual da mistura e a moldagem dos CP's se mostraram satisfatórios. Além disso, evitou-se alterar a quantidade da solução ativadora, visto que impossibilitaria a comparação direta com a mistura de referência, dada a sua importância no processo de ativação do precursor. A Figura 39 mostra o aspecto do estado fresco da mistura citada.

Figura 39 – Espalhamento 0,25% de fibra.



A resistência aos 7 dias da mistura com 0,25% foi de 6,9 MPa e mostrou uma boa deformabilidade mesmo com um teor relativamente baixo de fibra. Dessa forma, essa dosagem foi escolhida para a análise dos parâmetros propostos à mistura de referência e a fabricação de uma nova parede para a verificação de formação das fissuras. A Tabela 23 traz o traço base utilizado.

Tabela 23 – Traço com fibra em massa.

	Terra	Areia	MK	Ativador (AA)		Fibra
				NaOH (10 Mol/l)	Silicato	
T7	1,00	0,67	0,50	0,298	0,894	0,004167
				1,192		

Os testes de dosagens foram feitos com os materiais utilizados nas misturas sem fibra, porém para a fabricação da parede foi necessário a aquisição de um novo lote areia e metacaulim. A primeira, já foi caracterizada como Areia 2 no Item 4.2.1, tendo alterações

sutis em relação à areia utilizada na primeira parte da metodologia. Já o metacaulim do novo lote, como já citado, não apresentou reatividade e por isso todos os testes foram avaliados com os dois “tipos” de metacaulim, exceto a tração na flexão, que foi testada somente com o metacaulim reativo, e a parede que foi feita com o metacaulim não reativo. Os resultados das misturas feitas com o metacaulim não reativo estarão com um ‘*’ nos respectivos títulos.

5.9.2 Caracterização da Matriz

5.9.2.1 Absorção, Massa Específica e Índice de Vazios

Os ensaios foram realizados analogamente aos do compósito sem fibra, a Tabela 24 traz os resultados obtidos.

Tabela 24 – Propriedades do compósito com fibra.

CP	Fibra				Média	σ
	1	2	3	4		
Massa Seca (g)	312,6	309,3	312,0	312,4	-	-
Massa Imersa em Água (g)	174,5	172,2	174,3	174,0	-	-
Massa Saturada (g)	357,9	358,1	360,2	359,8	-	-
Absorção	14,49%	15,78%	15,45%	15,17%	15,22%	0,55%
Ind. de Vazios	24,70%	26,25%	25,93%	25,51%	25,60%	0,67%
Massa Específica Seca (g/cm ³)	1,70	1,66	1,68	1,68	1,68	0,02

CP	Fibra*				Média	σ
	1	2	3	4		
Massa Seca (g)	306,0	304,7	303,9	303,7	-	-
Massa Imersa em Água (g)	167,6	171,5	166,7	172,9	-	-
Massa Saturada (g)	357,7	361,3	355,4	359,8	-	-
Absorção	16,90%	18,58%	16,95%	18,47%	17,72%	0,93%
Ind. de Vazios	27,20%	29,82%	27,29%	30,02%	28,58%	1,55%
Massa Específica Seca (g/cm ³)	1,61	1,61	1,61	1,62	1,61	0,01

A Tabela 25 traz o ensaio de absorção de acordo com a NBR 13555.

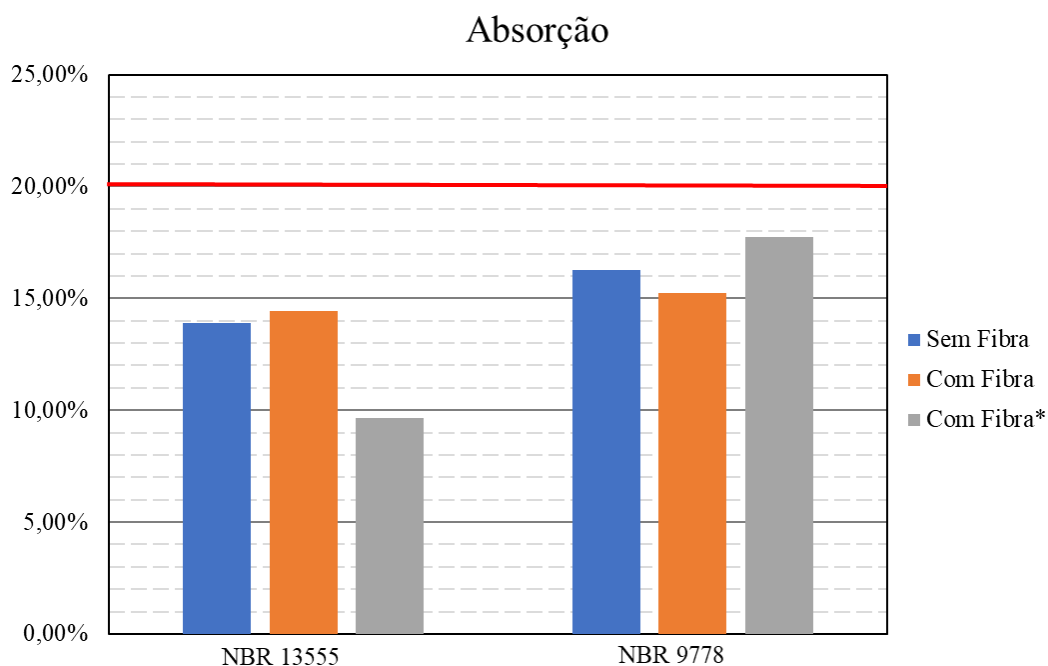
Tabela 25 – Resultados de absorção.

CP	Fibra					Média	σ
	1	2	3	4	5		
Massa Seca (g)	306,2	307,9	310,6	310,5	307,6	-	-
Massa Úmida (g)	350,5	352,7	355,3	354,7	352,4	-	-
Absorção	14,47%	14,55%	14,39%	14,24%	14,56%	14,44%	0,13%

CP	Fibra*					Média	σ
	1	2	3	4	5		
Massa Seca (g)	308,0	309,2	315,1	310,9	307,2	-	-
Massa Úmida (g)	340,8	340,6	344,7	338,8	335,1	-	-
Absorção	10,65%	10,16%	9,39%	8,97%	9,08%	9,65%	0,72%

Para comparação, a Figura 40 traz os resultados de absorção para os compósitos feitos na dissertação, tanto pela NBR 13555 quanto pela NBR 9778.

Figura 40 - Gráfico comparativo de absorção.



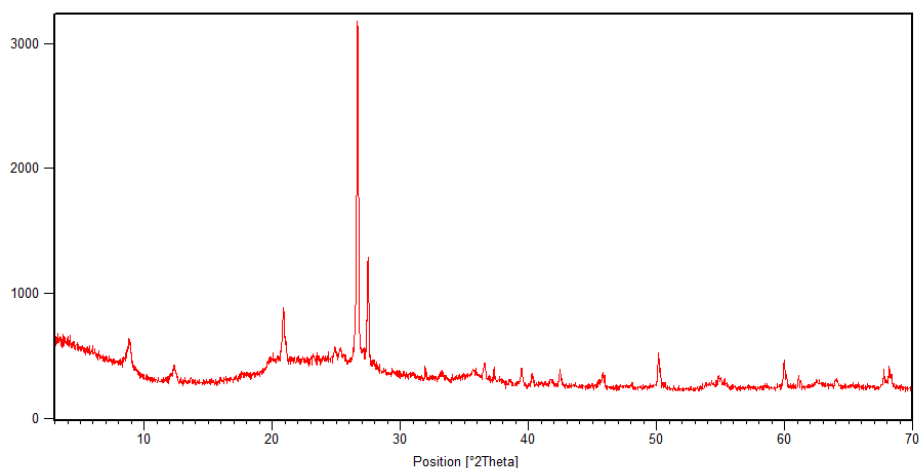
Podemos perceber que a absorção das misturas com o metacaulim reativo ficaram praticamente no mesmo patamar. Enquanto a absorção com o metacaulim não reativo ficou bem abaixo no caso da NBR 13555 e levemente superior para a NBR 9778, o primeiro fato ocorreu devido a uma visível perda de massa durante o período de saturação dos corpos de prova que disfarçaram o resultado com uma baixa absorção, já para o segundo caso podemos

justificar com a não reatividade do precursor, reduzindo a fração de material ativado alcalinamente e aumentando os espaços para a entrada de água. Pelos índices de vazios mostrados nas Tabelas 16 e 24, podemos perceber uma tendência de diminuição quando comparamos as misturas com e sem fibra, justamente devido a adição de um material na mistura, porém isso não ocorre no caso do metacaulim não reativo.

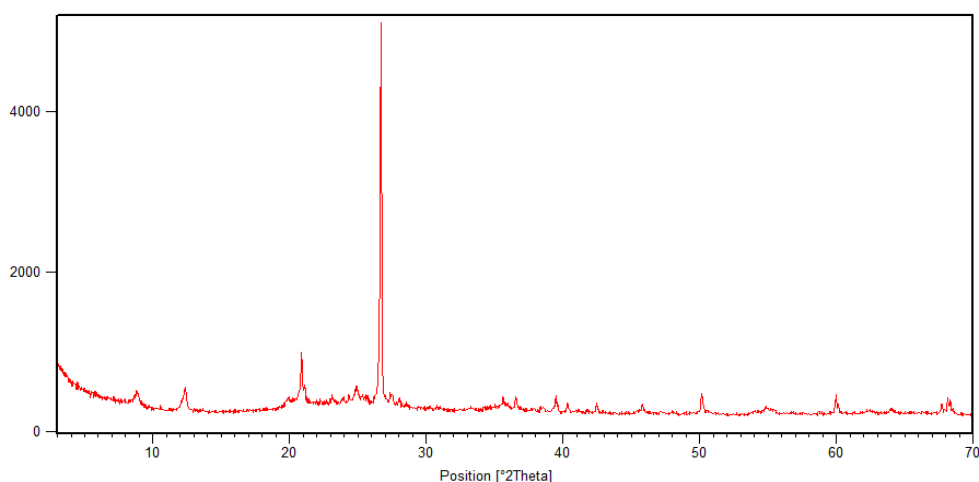
5.9.2.2 Difratorômetro de Raios X

Na tentativa de se entender o fenômeno da não reatividade do metacaulim utilizado para a parede com fibra, foi feito um novo DRX no material, mas não foi constatado nenhuma grande alteração a partir desse ensaio. A Figura 41 mostra o DRX para ambos os materiais.

Figura 41 – DRX do metacaulim (a) reativo (b) não reativo.



(a)



(b)

Apesar de camuflado pela escala de intensidades, há um halo amorfo no DRX do metacaulim não reativo, análogo ao do metacaulim reativo. Havendo dessa forma um problema específico de reatividade que pode ser melhor elucidado com estudos mais direcionados.

5.9.3 Funil V

O resultado do ensaio de funil V para o material com fibra foi análogo ao sem fibra. A duração para a vazão do material durou 15,62 segundos, correspondendo a um valor de escoamento relativo de 0,64, que também é menor que 1. Um resultado já esperado devido a adição de fibra dificultar a movimentação do material, tornando-o ainda mais viscoso.

5.9.4 Resistência à Compressão

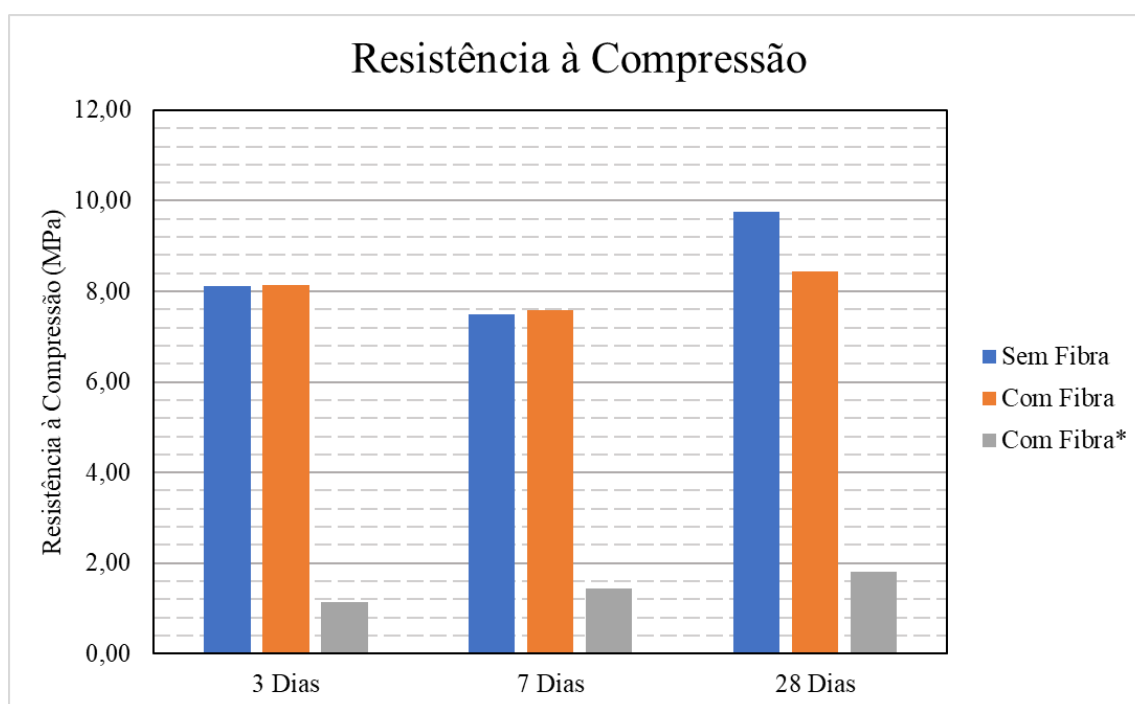
A Tabela 26 traz os resultados para a mistura com fibra para ambos os tipos de metacaulim e a Figura 42 traz os resultados comparando com a mistura de referência.

Tabela 26 – Resistência à compressão do compósito com fibra.

Fibra								
CP Tensão (MPa)			CP Tensão (MPa)			CP Tensão (MPa)		
3 dias	1	8,29	7 dias	1	6,54	28 dias	1	9,27
	2	7,95		2	8,07		2	8,50
	3	8,86		3	7,08		3	7,34
	4	7,47		4	8,63		4	8,63
Média		8,14	Média		7,58	Média		8,44
σ		0,58	σ		0,95	σ		0,80

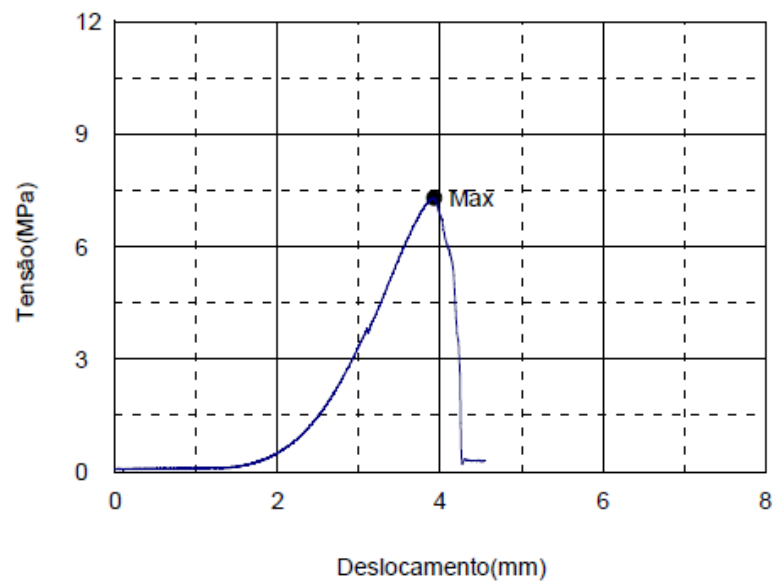
Fibra*								
CP Tensão (MPa)			CP Tensão (MPa)			CP Tensão (MPa)		
3 dias	1	1,12	7 dias	1	1,45	28 dias	1	1,80
	2	1,14		2	1,38		2	1,76
	3	1,11		3	1,45		3	1,87
	4	1,14		4	1,47		4	1,79
Média		1,13	Média		1,44	Média		1,81
σ		0,01	σ		0,04	σ		0,06

Figura 42 - Resistência à compressão de todas as misturas.

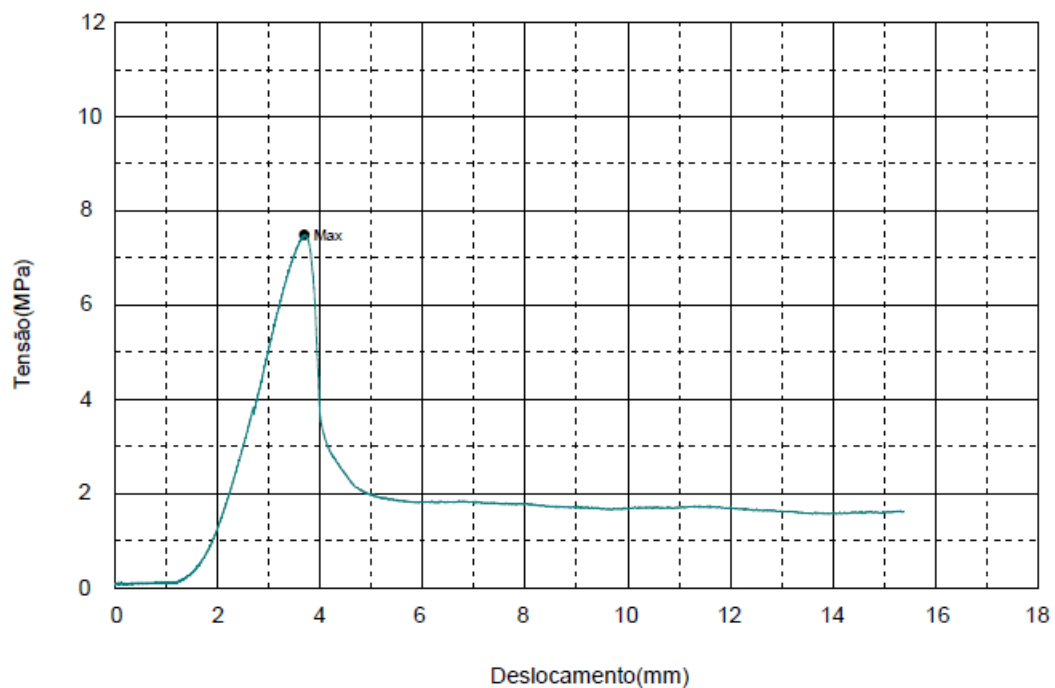


Podemos perceber que, com a adição das fibras, a resistência à compressão não foi abruptamente modificada. Nas idades iniciais ela se manteve praticamente igual e aos 28 dias que ocorreu uma diminuição em relação à mistura referência, podendo ser elucidada pelo aumento da porosidade com a inserção das fibras como cita Martins (2014). Também foi observado a mudança no comportamento pós pico de carga do material, característico de compósitos fibrosos, como ilustra a Figura 43.

Figura 43 – Gráficos de tensão x deslocamento para os compósitos (a) sem fibra e (b) com fibra.



(a)



(b)

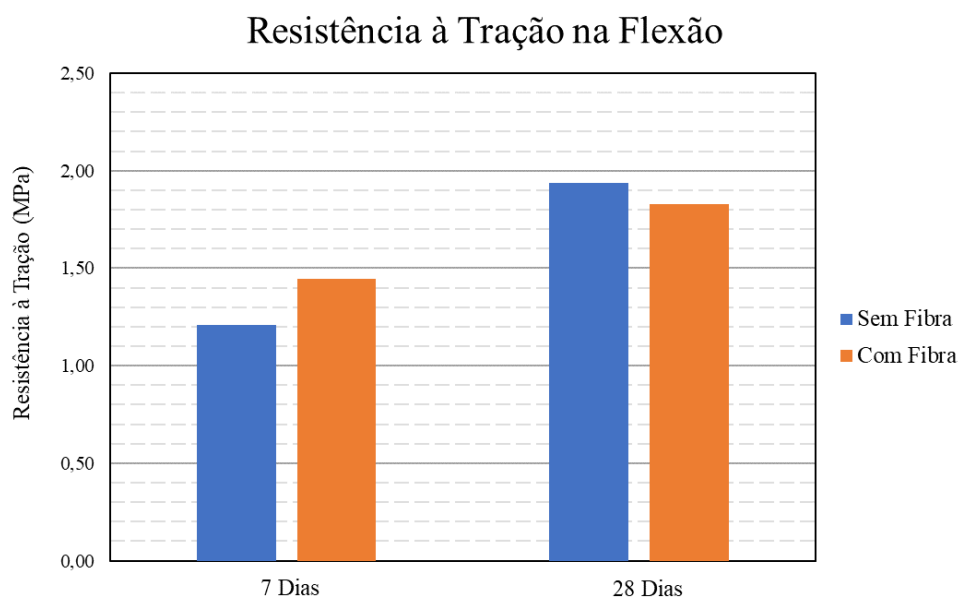
5.9.5 Resistência à Tração na Flexão

Os resultados de resistência à tração na flexão para os compósitos com fibra estão na Tabela 27. Para efeito de comparação, a Figura 44 traz os gráficos com os resultados obtidos para o material com e sem fibra.

Tabela 27 – Resistência à tração na flexão.

Fibra					
CP Tensão (MPa)			CP Tensão (MPa)		
7 dias	1	1,64	28 dias	1	2,04
	2	1,43		2	1,85
	3	1,24		3	1,78
	4	1,47		4	1,64
Média		1,44	Média		1,83
σ		0,17	σ		0,17

Figura 44 – Gráfico comparativo da resistência à tração na flexão.



Podemos perceber que na idade de 7 dias a mistura com fibra mostra uma resistência maior que a de referência, fruto da adição das próprias fibras ao material, proporcionando uma maior resistência ao esforço de tração. Enquanto que aos 28 dias, o cenário se inverte, que pode ser justificado pelo maior percentual de substituição da terra por areia, um material menos coeso, no compósito com fibra.

5.9.6 Módulo de Elasticidade

Os resultados do módulo de elasticidade para as misturas com fibra estão nas Tabelas 28 e 29.

Tabela 28 – Módulo de elasticidade obtidos no Sonelastic para as misturas com fibras.

Sonelastic			
CP	Massa (g)	ρ (g/cm ³)	E (Gpa)
CF 1	3029,4	1,93	3,57
CF 2	3045,9	1,94	3,67
CF 3	3012,7	1,92	3,61
CF 4	3035,5	1,93	3,61
CF 5	3004,2	1,91	3,63
Média			3,62
CF* 1	3066,1	1,95	0,49
CF* 2	3047,6	1,94	0,52
Média			0,51

Tabela 29 - Módulo de elasticidade obtidos na prensa universal para as misturas com fibras.

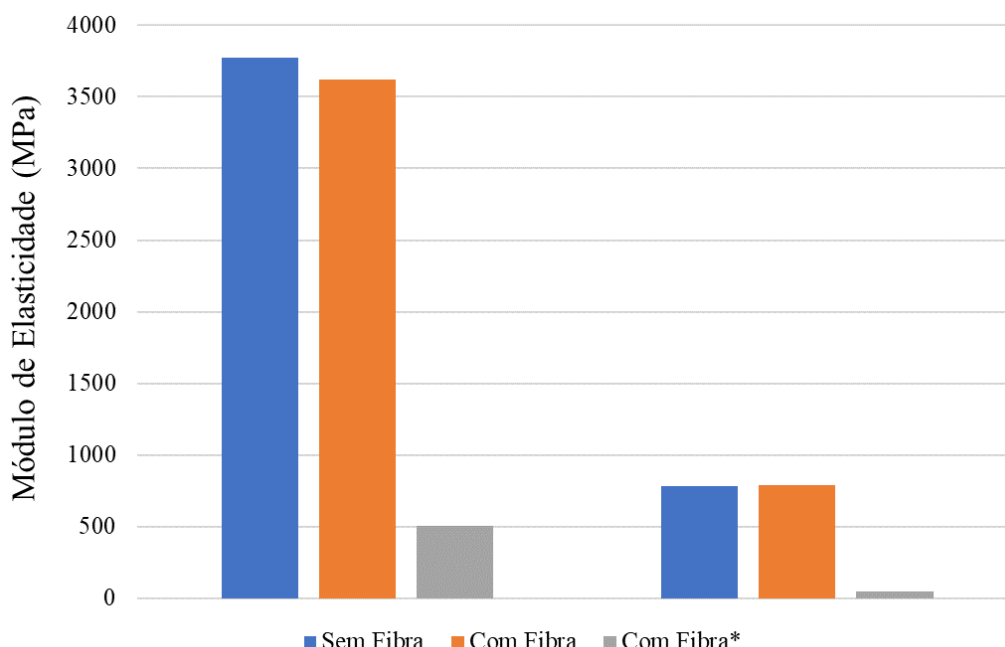
Prensa Universal								
CP	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	Δd (mm)	$\Delta\epsilon$ (‰)	E (MPa)
CF 1	1,317	3,577	2,260	2,022	2,639	0,617	3,085	732,58
CF 2	2,093	3,446	1,353	2,358	2,709	0,351	1,755	770,94
CF 3	4,357	6,498	2,141	3,344	3,758	0,414	2,070	1034,30
CF 4	2,017	3,593	1,576	2,151	2,875	0,724	3,620	435,36
CF 5	4,210	5,765	1,555	2,915	3,238	0,323	1,615	962,85
Média								787,20
CF* 1	0,167	0,557	0,390	2,046	3,723	1,677	8,385	46,51
CF* 2	0,211	0,549	0,338	2,185	3,489	1,304	6,520	51,84
Média								49,18

Aqui podemos destacar novamente a queda no valor dos módulos de elasticidade entre os dois métodos de ensaio, como ocorreu na mistura de referência. Além disso, houve um ligeiro decréscimo entre o módulo de elasticidade da mistura sem fibra e com fibra, comportamento semelhante ao de Martins (2014), em que a matriz de solo cimento autoadensável sem fibra atingiu 3,15 GPa e com a adição de 0,5% de fibra caiu para 2,01 GPa.

Para as misturas com o metacaulim não reativo o módulo atingiu valores muito abaixo do normal, justamente devido à falta de resistência. A Figura 45 sumariza os módulos

médios encontrados para as misturas estudadas para a Sonelastic (esquerda) e na prensa (direita).

Figura 45 – Gráfico comparativo dos módulos de elasticidade médios das misturas.



5.9.7 Parede com Fibra

O ensaio de compressão na parede com fibra não pôde ser realizado devido problemas técnicos na estrutura de ensaio do laboratório, impossibilitando a aquisição dos dados. Apesar disso, esperava-se que o resultado não fosse satisfatório pelo fato de a parede ter sido construída com o metacaulim não reativo. Corroborando com isso, a Tabela 30 mostra os resultados obtidos para os CP's referentes ao traço da parede com fibra com uma idade de 61 dias.

Tabela 30 – Resistência à compressão dos CP's da parede com fibra.

Ensaio de Compressão					
Tipo	CP	Tensão (MPa)	Tipo	CP	Tensão (MPa)
50 x 100 mm	1	1,27	100 x 200 mm	1	0,60
	2	1,34		2	0,62
	3	1,33		3	0,74
	4	1,37		4	0,64
	Média	1,33		Média	0,65
	σ	0,04		σ	0,06

Os valores de resistência demonstram que a parede não alcançaria um nível de resistência satisfatório, de modo que se o coeficiente de redução de resistência entre os CP's e a parede se mantivesse em cerca de 3, como no traço de referência, a parede não suportaria nem 1 MPa, valor insuficiente até mesmo para paredes de vedação.

Com o desmolde da parede, novamente foram verificadas algumas fissuras de retração similares às observadas na primeira parede, mesmo com a adição da fibra, porém com abertura menor. Vale salientar que, como colocado anteriormente, o material não atingiu uma resistência significativa, o que altera as condições para a formação dessas rachaduras. As Figuras 46 (a) e (b) comparam as principais fissuras encontradas nas paredes ao desmolde, enquanto que a Figura 47 ilustra o aspecto visual das paredes.

Figura 46 – (a) Fissuração da parede sem fibra; e (b) Fissuração da parede com fibra.



(a)



(b)

Figura 47 – Aspecto visual das paredes (a) Sem fibra; e (b) com fibra.



(a)



(b)

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou unir as propriedades autoadensáveis e a ativação alcalina com a terra com o objetivo de construir paredes monolíticas com um material resistente e com possibilidades estruturais. A tentativa se dá em busca de modernizar as técnicas construtivas com terra e trazendo mais opções para uma engenharia mais sustentável.

Inicialmente foi feito um estudo de dosagem para selecionar a melhor composição. A dosagem escolhida mostrou um espalhamento médio aproximado de 228 mm, com espalhamento relativo de 4,24 o que é aceitável dentro dos valores citados da literatura, e uma resistência que atingiu 9,75 MPa com 28 dias. Além disso obteve módulo de elasticidade médio de 3,77 GPa, obtido através do Sonelastic, e 784,55 MPa com os valores obtidos da prensa universal.

A tentativa de substituir a solução por água demonstrou que isso pode prejudicar tanto no aspecto fresco como no endurecido do compósito, sendo a melhor situação utilizar unicamente a solução ativadora como fase líquida da mistura.

A caracterização da matriz se mostrou condizente com os materiais terrosos e conseguiu atingir uma absorção menor que 20%, exigida pela norma, evitando complicações maiores com um dos maiores problemas de durabilidade desse tipo de material que é o contato com a água.

Os resultados da resistência à tração na flexão se mostraram equivalentes ao material solo-cimento convencional, devendo ser analisada como ponto de fragilidade, principalmente sob a ótica de se evitar fissuras de retração, características para materiais com terra.

A construção das paredes demonstrou a autoadensabilidade da mistura no âmbito prático e a possibilidade de uso estrutural do compósito proposto. Chegando a suportar uma carga de 494,4, sendo uma tensão de 3,3 MPa, mostrou-se com resistência similar às alvenarias estruturais de concreto.

A adição de fibras, em 0,25% do teor de sólidos inertes, mostrou-se uma melhora sutil na resistência à tração, podendo ser visualizada na resistência à tração aos 7 dias, enquanto que na resistência à compressão houve um pequeno decréscimo aos 28 dias em relação à mistura sem fibra, atingindo 8,44 MPa, e uma grande alteração no comportamento pós-pico no ensaio de compressão. O módulo de elasticidade sofreu uma pequena queda para 3,62 GPa, para o Sonelastic, e na prensa universal se manteve próximo ao de referência com 787,2 MPa. No aspecto de caracterização física não houve grandes alterações, até devido o

teor de adição ser relativamente baixo. Mesmo com a adição das fibras, houve fissuração por retração na parede, porém com redução na quantidade e na dimensão de abertura.

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. Esse tipo de material ainda carece de estudos mais amplos de modo que sua aplicabilidade seja comprovada cientificamente tanto acerca da segurança quanto da resistência e durabilidade do material.

6.1 Sugestões para Futuros Trabalhos

Para trabalhos futuros ficam sugeridos os seguintes tópicos de estudo:

- Utilização de outros precursores da ativação alcalina para a produção do compósito e sua influência no estado fresco e endurecido;
- Avaliar alterações na dosagem/utilização de adições ou aditivos para evitar a fissuração das paredes por retração;
- Avaliação de resistência de paredes em tamanhos próximos dos encontrados nas construções;
- Otimização da utilização do material para a produção de blocos de grande porte (cerca de 60 cm de altura e 40 cm de comprimento) para a construção de alvenarias;
- Avaliar a influência de fibras com diferentes fatores de forma nas propriedades do estado fresco e endurecido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBITAR, M. et al. Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 374–385, 2017.

ALCANTARA, M. A. M.; NUNES, S. C. B.; RIO, J. F. M. E. Estudo do solo-cimento-autoadensável produzido com solos da região do Porto-PT. PARTE I: caracterização de propriedades mecânicas. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 9, n. 1, 2014.

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.

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.

ARAÚJO, L. G. C. DE A. E. **Caracterização Destrutiva e Não Destrutiva de Concreto Geopolimérico Álcali-Ativado com Base em Metacaulim**. [s.l.] Universidade Federal da Paraíba, 2018.

AREDES, F. G. M. et al. Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer. **Ceramics International**, v. 41, n. 6, p. 7302–7311, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

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, 2005.

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, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13553: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13555: Solo-Cimento, Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2012.

ASTM. C215-14, *Standart Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens.* 2014

ASTM, C 1259-98, *Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration.* 1998.

ASTM, E 1876-07, *Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, West Conshohocken.* 2007.

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.

BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. Earth construction and sustainability. **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 433–446, 2015.

CID, J.; MAZARRÓN, F. R.; CAÑAS, I. Las normativas de construcción con tierra en el mundo. **Informes de la Construcción**, v. 63, n. 523, p. 159–169, 2011.

CLAVERIE, J. **Estudo da influência da cinza de casca de arroz e da cal nas propriedades do solo-cimento autoadensável**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2015.

CONSOLI, N. C. et al. Studies on the Dosage of Fiber-Reinforced Cemented Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 12, p. 1624–1632, dez. 2011.

COSTA, L. M. **Influência da pozolanicidade na ativação alcalina**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 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, 2012.

DAVIDOVITS, J.; DAVIDOVICS, M.; DAVIDOVITS, N. **Process for Obtaining a Geopolymeric Alumino-Silicate and Products thus Obtained** United States, 1994.

DE LEANDRO SANTOS, O. et al. Stabilization of raw earth through alkaline activation. **Key Engineering Materials**, v. 600, p. 215–224, 2014.

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.

DING, Y.; SHI, C. J.; LI, N. Fracture properties of slag/fly ash-based geopolymer concrete cured in ambient temperature. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 787–795, 2018.

DO, Q. M.; NGO, P. M.; NGUYEN, H. T. Characteristics of a fly ash-based geopolymer cured in microwave oven. **Key Engineering Materials**, v. 850 KEM, p. 63–69, 2020.

DŽUNUZOVIĆ, N. et al. External sulfate attack on alkali-activated fly ash-blast furnace slag composite. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 737–747, 2017.

ELERT, K.; PARDO, E. S.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C. Alkaline activation as an alternative method for the consolidation of earthen architecture. **Journal of Cultural Heritage**, v. 16, n. 4, p. 461–469, 2015.

FARHAN, N. A.; SHEIKH, M. N.; HADI, M. N. S. Investigation of engineering properties of normal and high strength fly ash based geopolymer and alkali-activated slag concrete compared to ordinary Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 196, p. 26–42, 2019.

FÉLIX, A. DA S. **Ativação alcalina de blocos de terra crua**. [s.l.] Universidade Federal da Paraíba, 2016.

FOUCHAL, F. et al. Experimental evaluation of hydric performances of masonry walls made of earth bricks, geopolymer and wooden frame. **Building and Environment**, v. 87, p. 234–243, 2015.

GHADIR, P.; RANJBAR, N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 361–371, 2018.

GIUFFRIDA, G.; CAPONETTO, R.; NOCERA, F. Hygrothermal properties of raw earth materials: A literature review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 19, 2019.

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.

GÖRHAN, G.; ASLANER, R.; ŞINIK, O. The effect of curing on the properties of metakaolin and fly ash-based geopolymer paste. **Composites Part B: Engineering**, v. 97, p. 329–335, 2016.

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.

HABERT, G.; OUELLET-PLAMONDON, C. Recent update on the environmental impact of geopolymers. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 17, 2016.

HUSEIEN, G. F. et al. Effects of ceramic tile powder waste on properties of self-compacted alkali-activated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117574, 2020.

ISLAM, M. S. et al. Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction. **Construction and Building Materials**, v. 255, p. 119392, 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.

KEEFE, L. **Earth Building: Methods and Materials, Repair and Conservation**. 1. ed. USA & Canada: Routledge, 2005.

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, 1 fev. 2007.

LABOREL-PRÉNERON, A.; MAGNIONT, C.; AUBERT, J. E. Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. **Energy and Buildings**, v. 178, p. 265–278, 2018.

LANDROU, G. et al. Lime as an Anti-Plasticizer for Self-Compacting Clay Concrete. **Materials**, v. 9, n. 5, p. 330, 29 abr. 2016.

LEITÃO, D. et al. Thermal performance assessment of masonry made of ICEB's stabilised with alkali-activated fly ash. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 44–52, 2017.

LIANG, G. et al. Investigation of the waterproof property of alkali-activated metakaolin

geopolymer added with rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 603–612, 2019.

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 dolo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal**. [s.l.] Universidade Federal do 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.

MICCOLI, L. et al. Experimental testing and finite element modelling of earth block masonry. **Engineering Structures**, v. 104, p. 80–94, dez. 2015.

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**, v. 16, n. 4, p. 143–153, 2016.

MINKE, G. **Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture**. Basel - Berlin - Boston: Birkhäuser - Publishers for Architecture, 2006.

MUÑIZ-VILLARREAL, M. S. et al. The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. **Materials Letters**, v. 65, n. 6, p. 995–998, 2011.

NARAYANASWAMY, A. H. et al. Mechanical and thermal properties, and comparative life-cycle impacts, of stabilised earth building products. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118096, 2020.

NUNES, K. K. F. **Estudo Experimental Comparativo Acerca da Resistência à Compressão Axial entre Paredes de Light Steel Frame e Alvenaria Estrutural**. [s.l.] Universidade Federal da Paraíba, 2017.

NZS 4297: 1998, New Zealand Standards, Engineering design of earth buildings, Standard New Zealand, Wellington, New Zealand.

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)**. [s.l.] Universidade Federal da Paraíba, 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.

PALANISAMY, P.; KUMAR, P. S. Effect of molarity in geo polymer earth brick reinforced with fibrous coir wastes using sandy soil and quarry dust as fine aggregate. (Case study). **Case Studies in Construction Materials**, v. 8, n. September 2017, p. 347–358, 2018.

PEREIRA, A. et al. Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. **Ceramics International**, v. 41, n. 10, p. 13012–13024, 2015.

PEREZ-CORTES, P.; ESCALANTE-GARCIA, J. I. Design and optimization of alkaline binders of limestone-metakaolin – A comparison of strength, microstructure and sustainability with portland cement and geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 123118, 2020.

POUHET, R.; CYR, M. Alkali–silica reaction in metakaolin-based geopolymer mortar. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 48, n. 3, p. 571–583, 2014.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 40–48, 2018.

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.

REDDY, B. V. V.; SURESH, V.; RAO, K. S. N. Characteristic Compressive Strength of Cement-Stabilized Rammed Earth. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 2, p. 04016203, fev. 2017.

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.

ROMERO CLAUSELL, J. et al. Environmental evaluation of a self-compacted clay based concrete with natural superplasticizers. **Materials and Structures**, v. 54, n. 1, p. 20, 12 fev. 2021.

SABBÀ, M. F. et al. Rammed Earth with Straw Fibers and Earth Mortar: Mix Design and Mechanical Characteristics Determination. **Fibers**, v. 9, n. 5, p. 30, 4 maio 2021.

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**. [s.l.] UFSC, 2016.

SANTOS, F. A. DOS. **Estudo da Variação da Relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ na Produção de Geopolímeros para Imobilizar Contaminantes**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

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. 2019.

SHUKLA, A.; TIWARI, G. N.; SODHA, M. S. Embodied energy analysis of adobe house. **Renewable Energy**, v. 34, n. 3, p. 755–761, 2009.

SILVA, J. V. E. **Síntese e caracterização de geopolímeros macroporosos com uso de peróxido de hidrógeno**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

SILVA, R. A. et al. Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 349–358, 2015.

SIMÃO, L. et al. Development of new geopolymers based on stone cutting waste. **Construction and Building Materials**, v. 257, 2020.

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

TORGAL, P.; EIRES, R.; JALALI, S. **Construção em Terra**. [s.l: s.n.].

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

VAN DAMME, H.; HOUBEN, H. Earth concrete. Stabilization revisited. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 90–102, 2018.

VAN DEVENTER, J. S. J. et al. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 145–155, 2010.

YANG, M.; PAUDEL, S. R.; ASA, E. Comparison of pore structure in alkali activated fly ash geopolymer and ordinary concrete due to alkali-silica reaction using micro-computed tomography. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117524, 2020.