



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL

Jônatas Macêdo de Souza

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO PRODUZIDOS COM MANIPUEIRA EM
SUBSTITUIÇÃO À ÁGUA

Natal

2019

Jônatas Macêdo de Souza

**TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO PRODUZIDOS COM MANIPUEIRA EM
SUBSTITUIÇÃO À ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Acchar

Coorientadora: Prof^a. Dra. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena

Natal

2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Souza, Jônatas Macêdo de.

Tijolos de solo-cimento produzidos com manipueira em substituição à água / Jônatas Macêdo de Souza. - 2019. 80f.: il.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019.

Orientador: Dr. Wilson Acchar.

Coorientadora: Dra. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena.

1. Resíduo agrícola - Dissertação. 2. Tijolo maciço - Dissertação. 3. Reuso - Dissertação. 4. Sustentabilidade - Dissertação. I. Acchar, Wilson. II. Lucena, Luciana de Figueiredo Lopes. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

JÔNATAS MACÊDO DE SOUZA

**TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO PRODUZIDOS COM MANIPUEIRA EM
SUBSTITUIÇÃO À ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

– Prof. Dr. Wilson Acchar, UFRN

– Prof^a. Dr^a. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena, UFRN

– Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral, UFRSA

– Prof. Dr. Vamberto Monteiro Da Silva, IFPB

Natal, 11 de março de 2019.

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO PRODUZIDOS COM MANIPUEIRA EM SUBSTITUIÇÃO À ÁGUA

Jônatas Macêdo de Souza

Orientador: Prof. Dr. Wilson Acchar

Coorientadora: Prof. Dra. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena

RESUMO

A indústria da construção civil é reconhecidamente uma das maiores consumidoras dos recursos naturais existentes no planeta. A quantidade de trabalhos que visam a redução dos impactos causados pelo setor, tem crescido consideravelmente nos últimos anos. O desenvolvimento de novos materiais de construção, que contribuam para a redução dos impactos ambientais no setor, ao mesmo tempo que atendam as normas vigentes tem sido um ponto debatido e estudado por pesquisadores. Um desses materiais é o tijolo de solo-cimento, considerado um tijolo ecológico e que tem apresentado um enorme potencial para incorporação de resíduos de diversas indústrias, que precisam de estudos para tratamento e/ou reutilização como, resíduos cerâmicos, casca de arroz, resíduo de garrafa PET, etc. Um passivo ambiental que necessita de pesquisas para que seja reaproveitado, é a manipueira, um subproduto industrial (efluente), proveniente da prensagem de mandioca em casas de farinha e feculares, altamente poluidor, devido a sua toxicidade e concentração de matéria orgânica. Alguns autores têm proposto soluções alternativas para tratamento ou destinação desse resíduo, sendo a produção de tijolos uma delas. Diante disso, essa pesquisa teve como objetivo avaliar as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de tijolos maciços de solo-cimento, produzidos com manipueira em substituição à água. Após a caracterização dos materiais que compõem as formulações de solo-cimento, 3 planejamentos experimentais fatoriais completos 2^k , com 3 repetições no ponto central, foram elaborados a fim de reduzir a quantidade de amostras fabricadas. As faixas dos materiais utilizados foram definidas em 6%, 9% e 12% de cimento, 0%, 50% e 100% de manipueira em substituição à água. Assim, foram produzidas 5 formulações. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7, 28 e 49 dias. Os ensaios de absorção de água e Durabilidade modificado, foram realizados aos 7 dias. Em idade posterior a microestrutura dos tijolos com 12% de cimento e 0% e 100% de manipueira e 9% de cimento e 50% de manipueira, foi estudada por meio de ensaios de difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Todas as formulações apresentaram resultados de resistência à compressão acima de 1MPa. No

ensaio de absorção de água, todas as amostras obtiveram resultados abaixo de 20%. Em relação ao ensaio de durabilidade modificado, todas as composições apresentaram perda de massa abaixo de 1%. Nos ensaios de difração de raios-X foi possível identificar as fases caulinita, quartzo, calcita, CASH (silicato aluminato de cálcio hidratado) e CSH (silicato de cálcio hidratado) em todas as amostras analisadas. No MEV, foi possível verificar as partículas de solo e estruturas típicas do CSH. Vale ressaltar que os tijolos produzidos com manipueira apresentaram resultados semelhantes àqueles aferidos nas formulações que não utilizaram o resíduo. É possível concluir que, os resultados demonstram a viabilidade técnica da utilização de manipueira em substituição à água na produção de tijolos de solo-cimento, para utilização em alvenarias sem função estrutural.

Palavras-chave: Resíduo agrícola, tijolo maciço, reuso, sustentabilidade.

SOIL-CEMENT BRICKS MANUFACTURED WITH CASSAVA WASTEWATER INSTEAD OF WATER

Jônatas Macêdo de Souza

Advisor: Prof. Dr. Wilson Acchar

Co-advisor: Prof. Dra. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena

ABSTRACT

The construction industry is recognized as one of the largest consumers of natural resources on the planet. The number of researches aimed at reducing the impacts caused by the sector has grown considerably in recent years. The development of new construction materials, which contribute to reducing environmental impacts, satisfying current standards, has been debated and studied by researchers. One of these materials is the soil-cement brick which is considered to be ecological and presents a great potential of incorporation of residues of several industries that need studies for treatment and/or reuse, such as ceramic waste, rice husks, bottle waste PET, etc. An environmental liability that requires research to be reused is cassava water, an industrial byproduct (effluent), from the pressing of cassava in flour house, highly polluting, due to its toxicity and concentration of organic matter. Some authors have proposed alternative solutions for treatment or disposal of this waste, and the production of bricks is one of them. Thus, this study aimed to evaluate the physical, mechanical, and microstructural properties of solid bricks soil-cement produced with cassava instead of water. After characterization of the raw materials of the soil-cement formulations, 3 complete 2k factorial experimental designs with 3 replicates at the central point were elaborated to reduce the number of samples. The cement was used in the proportions 6%, 9%, and 12%, and the cassava wastewater 0%, 50% and 100% instead of water. Thus, 5 formulations were produced. The compressive strength tests were performed at 7, 28, and 49 days. The water absorption and modified durability tests were performed at 7 days. Subsequently, the microstructure of the bricks with 12% cement and 0% and 100% of cassava wastewater and 9% of cement and 50% of cassava wastewater was studied by means of X-ray diffraction and scanning electron microscopy (SEM). All formulations showed results of compressive strength above 1MPa. In the water absorption test, all the samples obtained results below 20%. And in the modified durability test, all compositions showed mass loss below 1%. In the X-ray diffraction tests the kaolinite, quartz, calcite, CASH

(calcium aluminate silicate hydrated) and CSH (calcium silicate hydrated) phases were identified in all samples analyzed. In the SEM, it was possible to verify the soil particles and typical structures of the CSH. It is worth mentioning that the bricks produced with cassava wastewater presented similar results to those obtained in the formulations that did not use the waste. It is possible to conclude that the results demonstrate the technical feasibility of using cassava waste water instead of water in the production of soil-cement bricks for use in masonry without structural function.

Keywords: *Agricultural waste, solid brick, reuse, sustainability.*

“Elevo os meus olhos para os montes: de onde me virá o socorro? O meu socorro vem do Senhor, que fez o céu e a terra”.

Salmo 121:1-2

“Não são os grandes homens que transformam o mundo, mas sim os fracos, nas mãos de um grande Deus”.

(Irmão Yun – O homem do Céu)

Dedico esse trabalho aos meus pais, José Ermivaldo de Souza e Sandra Souza Macêdo, que sempre acreditaram em mim e me ajudaram nessa caminhada. A eles devo honra, o primeiro mandamento do Senhor como promessa!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por sua graça ter me alcançado e por não desistir de mim, mesmo quando estou fraco.

A minha mãe por ser a terra do meu chão e a luz do meu escuro. Ao meu pai que sempre acreditou, e incentivou. E aos meus irmãos, Cleyton, Laís, Marcia e Marta, que sempre apoiaram minhas escolhas e torcem pelo meu sucesso.

A família do senhor Silerino Epifânio de Almeida, a qual tenho um imenso carinho, uma verdadeira família para mim, sem o apoio inicial deles, não estaria hoje aqui.

A toda minha família, em especial a minha avó Josenice Souza Macêdo e ao meu avô Sindoval de Oliveira Macêdo, exemplos de vida que me sustentam em oração, e aos tios que sempre estiveram presentes. Ao meu tio Ildeni da Silva Lemos *in memoriam*, grande homem que muito me inspira. Meu padrao Claudomiro, obrigado pelas orações e incentivos que sempre me deu.

A minha noiva Maria Aparecida de Almeida, meu grande amor e futura esposa, por nunca ter desistido de nós, e ter esperado com paciência.

Aos amigos do peito em especial, Marlon, Daniel, Edmar, Wésio, Marilton, Ricardo, Hiago, Yan, Carlúcio, Gabriel, Laurinda, Klichá, Ellen, Alessandra, Wellington, Leandro, Danilo, Marcos, Rafael, Wenysson, Allana, Géssyca, Bia, João Paulo, Márcio e Ronney. Eles sabem o que representam para mim.

A toda minha congregação em Neópolis, em especial a família, Everaldo, Andréa, Erick e Allana que me adotou como filho, e a toda mocidade que é uma família para mim.

Ao meu professor João Neto, por quem tenho imensa admiração e respeito.

Ao meu orientador Dr. Wilson Acchar e minha coorientadora Dr^a Luciana Lucena, pela oportunidade, ensinamentos, apoio e cobrança.

Ao professor Dr. Vamberto Silva, pelo apoio e ensinamentos. Aos colegas do Lapfimic, em especial, Me. Ricardo e Me. Batista pela ajuda e companheirismo. E também ao amigo Sandro pela paciência e apoio na realização dos ensaios.

Por fim a UFRN e ao PEC por permitirem a realização de um sonho. E a todos aqueles que sempre acreditaram em mim, como forma de agradecimento gostaria de dizer que vocês são o meu combustível nessa estrada, e toda vez que penso em desistir, lembro que tem alguém acreditando e esperando mais de mim.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	3
1.1.1 Objetivo geral	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2	4
Revisão da Literatura	4
2.1 SOLO	4
2.2 O SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	6
2.3 CIMENTO PORTLAND	7
2.4 SOLO-CIMENTO	9
2.4.1 Dosagem de solo-cimento no Brasil	10
2.4.2 Fatores que influenciam na qualidade do solo-cimento	12
2.5 TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO	13
2.6 MANIPUEIRA	15
2.6.1 Tijolos com uso de manipueira	18
2.7 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	19
CAPÍTULO 3	21
Materiais e Métodos	21
3.1 MATERIAIS	21
3.1.1 Solo	21
3.1.2 Cimento	21
3.1.3 Água	22
3.1.4 Manipueira	22
3.2 MÉTODOS	22
3.2.1 Caracterização dos materiais	23
3.2.1.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	23
3.2.1.1.1 Análise granulométrica	23
3.2.1.1.2 Ensaio de compactação	24
3.2.1.1.3 Limites de Atterberg (LL e LP)	24
3.2.1.1.4 Teor de matéria orgânica	24

3.2.1.2	CARACTERIZAÇÃO DA MANIPUEIRA.....	25
3.2.1.3	ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS MATERIAIS.....	25
3.2.2	Planejamento experimental.....	25
3.2.3	Definição das composições.....	26
3.2.4	Moldagem e cura dos corpos de prova.....	27
3.2.5	Ensaio tecnológicos.....	27
3.2.5.1	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	28
3.2.5.2	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	28
3.2.5.3	ENSAIO DE DURABILIDADE POR IMERSÃO E SECAGEM.....	28
3.2.5.4	ANÁLISE MINERALÓGICA DAS COMPOSIÇÕES.....	28
3.2.5.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	29
CAPÍTULO 4.....	30	
Resultados e Discussões.....	30	
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	30	
4.1.1 Caracterização do solo.....	30	
4.1.1.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	30
4.1.1.2	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	31
4.1.1.3	LIMITES DE ATTERBERG (LL E LP) E MATÉRIA ORGÂNICA.....	32
4.1.2 Caracterização da manipueira.....	32	
4.1.3 Análise química e mineralógica das matérias primas.....	33	
4.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....	35	
4.2.1 Resistência à compressão simples.....	35	
4.2.2 Absorção de água.....	41	
4.2.3 Durabilidade modificado.....	45	
4.2.4 Análise mineralógica das composições de solo cimento.....	49	
4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das composições de solo cimento.....	52	
CAPÍTULO 5.....	55	
Conclusão.....	55	
Sugestões para trabalhos futuros.....	56	
Referências.....	57	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical.....	5
Figura 2 – Micrografias de um solo Laterítico e Não-Laterítico respectivamente	6
Figura 3 - Silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio	8
Figura 4 - Exemplo de tijolos fabricados com solo-cimento	14
Figura 5 – Manipueira armazenada em tanques	15
Figura 6 - Fluxograma do processo de fabricação de farinha	16
Figura 7 – Metodologia da pesquisa	23
Figura 8 – Curva granulométrica do solo	30
Figura 9 – Curvas de compactação do solo	31
Figura 10 – DRX do solo estudado	35
Figura 11 – Resistência à compressão	37
Figura 12 – Diagrama de Pareto para a resistência à compressão.....	39
Figura 13 – Valores observados e preditos para a resistência à compressão .	39
Figura 14 – Valores observados e preditos para a resistência à compressão com curvatura.....	41
Figura 15 – Absorção de Água.....	43
Figura 16 – Valores observados e preditos para a absorção de água	44
Figura 17 – Perda de massa	46
Figura 18 – Diagrama de Pareto para a perda de massa	47
Figura 19 – Valores observados e preditos para a perda de massa	48
Figura 20 – Valores observados e preditos para a perda de massa com curvatura	49
Figura 21 – DRX da formulação 12C0M aos 49 dias	50
Figura 22 – DRX da formulação 12C100M aos 49 dias	51
Figura 23 – DRX da formulação 9C50M aos 28 dias	51
Figura 24 – MEV da formulação 12C0M aos 49 dias	52
Figura 25 – MEV da formulação 12C100M aos 49 dias	53
Figura 26 – MEV da formulação 9C50M aos 28 dias	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da manipueira.....	17
Tabela 2 – Fatores e níveis das variáveis utilizadas nas composições.....	26
Tabela 3 – Composição das formulações dos tijolos de solo-cimento	27
Tabela 4 – Limites de Atterberg e teor de matéria orgânica do solo	32
Tabela 5 – Composição da manipueira líquida	33
Tabela 6 – Composição química dos materiais.....	34
Tabela 7 – Matriz do planejamento experimental da resistência à compressão	36
Tabela 8 – ANOVA do planejamento exp. para a resistência à compressão ...	38
Tabela 9 – ANOVA do planejamento exp. para a resistência à compressão com curvatura	40
Tabela 10 – Matriz do planejamento experimental da absorção de água	42
Tabela 11 – ANOVA do planejamento exp. para a absorção de água	43
Tabela 12 – Matriz do planejamento experimental da perda de massa	45
Tabela 13 – ANOVA do planejamento exp. para a perda de massa	46
Tabela 14 – ANOVA do planejamento exp. para a perda de massa com curvatura	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Normas brasileiras para solo-cimento	10
---	----

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABPC – Associação Brasileira de Produtores de Cal

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Bahia

CSH – Silicato de cálcio hidratado

CASH – Silicato aluminato de cálcio hidratado

FAOSTAT – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

FJP – Fundação João Pinheiro

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

OSHA – *Occupational Safety and Health Administration*

PCA – *Portland Cement Association*

CAPÍTULO 1

Introdução

A indústria da construção civil ocupa posição de destaque na economia de vários países. Por outro lado, é conhecida como uma das maiores consumidoras de recursos naturais. Diante da preocupação com as questões ambientais, o número de pesquisas que visam a minimização dos impactos causados pelo setor, tem aumentado nos últimos anos.

Um grande desafio enfrentado pelos pesquisadores é o desenvolvimento de novos materiais, sustentáveis, que reduzam os danos causados pela construção civil ao meio ambiente, ao passo que atendam às exigências requeridas por normas técnicas. Diante disso, vários trabalhos têm sido desenvolvidos, com a utilização de resíduos em materiais de construção. Azevedo et al. (2017), estudaram o uso de resíduo de vidro em argamassa; Pacheco-Torgal e Jalali (2010), avaliaram a incorporação de resíduo cerâmico em concreto; e Siqueira et al. (2016), verificaram o comportamento de tijolos de solo-cimento com resíduo de casca de ovo e escória.

Dentre os materiais mencionados, o tijolo de solo-cimento é considerado ecológico e tem ganhado visibilidade do ponto de vista ambiental, pois ao contrário do tijolo cerâmico tradicional, não necessita de queima durante o processo de fabricação, o que reduz a emissão de gases do efeito estufa na atmosfera. Além disso, o tijolo de solo-cimento tem apresentado um enorme potencial para incorporação de resíduos de diversas indústrias, fato atestado por vários trabalhos que utilizaram diferentes resíduos e conseguiram resultados satisfatórios, como, Silva et al. (2014), que incorporaram resíduo cerâmico em tijolos de solo-cimento; Ashour et al. (2015), utilizaram fibras naturais de palha de trigo e palha de cevada nas formulações; Ferreira e Cunha (2017), substituíram parcialmente o cimento por resíduo de casca de arroz em tijolos de solo-cimento; Leonel et al. (2017), investigaram a

possibilidade de inserção de areia de fundição nas composições dos tijolos; Eko et al. (2012), inseriram fibras de aço de pneu; e Paschoali Filho, Storopoli e Dias (2016), estudaram tijolos de solo-cimento com a incorporação de resíduo de garrafas PET.

Os bons resultados obtidos nos estudos de incorporação de resíduos em tijolos de solo-cimento demonstram que o material é uma solução alternativa para uma correta destinação de passivos ambientais que não prejudiquem as propriedades técnicas do material. Com isso, sabe-se que alguns rejeitos ainda necessitam de estudos para uma correta destinação ou reutilização, como é o caso da manipueira, um líquido amarelado, gerado no processamento de raízes de mandioca em casas de farinha e fecularias, altamente poluidor, devido à elevada quantidade de cianeto e matéria orgânica em sua composição.

Madeira et al. (2017) afirmam que, no Brasil, a toxidade desse efluente representa um grande problema ambiental, pois, geralmente não é tratado antes de ser descartado. Estima-se que a cada tonelada de mandioca processada, sejam gerados de 300 a 600 litros de manipueira (RIBAS, CEREDA E BÔAS, 2010; CARVALHO et al., 2017). Considerando o processamento de 70% da produção nacional média, de 22,5 milhões de toneladas/ano e uma geração de manipueira de 300 litros por tonelada, pode-se considerar que apenas no Brasil são gerados aproximadamente 4,73 bilhões de litros do efluente. Isso demonstra a necessidade de alternativas para uma correta destinação desse resíduo.

Diante da problemática, alguns autores vêm estudando meios para aproveitar o resíduo, de forma a garantir uma destinação adequada, agregando-lhe valor. Segundo Silva (2008), o efluente possui diversos usos, podendo ser aproveitado das seguintes formas: uso como fertilizante natural; defensivo agrícola; na produção de vinagre de uso doméstico e comercial; para produzir sabão; ou ainda na fabricação de tijolos ecológicos que não necessitam passar pela etapa de queima.

Araújo et. al (2015a) e (2015b), por exemplo, estudaram tijolos de solo com a substituição da água por manipueira, e afirmaram que o líquido possui

propriedades ligantes. No entanto, nas pesquisas não foram realizados ensaios que comprovem que o efluente pode ser utilizado como estabilizante em tijolos, nem ensaios técnicos que demonstrem a viabilidade técnica do material produzido. Este fato mostra que o estudo do uso da manipueira na produção de tijolos deve ser aprofundado.

Ao realizar uma pesquisa sistemática em seis bases de dados, não foram identificados trabalhos com a incorporação de manipueira em tijolos de solo-cimento. Portanto, para preencher essa lacuna do conhecimento, nessa pesquisa foram fabricados tijolos de solo-cimento, com o uso da manipueira, os quais tiveram suas propriedades técnicas analisadas.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade técnica da utilização de manipueira em substituição à água, em formulações de tijolos de solo-cimento maciços, sem função estrutural.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as matérias-primas, em função de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas.
- Avaliar o comportamento físico e mecânico dos tijolos produzidos, considerando suas propriedades de absorção de água e resistência à compressão.
- Estudar a durabilidade dos tijolos produzidos.
- Avaliar a microestrutura das melhores composições, por meio da realização de ensaios de Difração de raios-X (DRX) e Microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- Comparar os resultados obtidos pelos tijolos de solo-cimento fabricados com manipueira com aqueles fabricados com água.

CAPÍTULO 2

Revisão da Literatura

No presente capítulo, é apresentada uma breve revisão sobre os conceitos e aspectos técnicos dos materiais utilizados no trabalho. De modo geral, uma discussão sobre o solo, cimento e a manipueira é apresentada. Por fim uma breve apresentação sobre planejamento experimental também é exposta.

2.1 SOLO

A definição do termo solo depende da área de estudo em questão. De maneira generalizada, o solo como todo material na superfície da terra, é resultante da desintegração mecânica e da decomposição química das rochas por meio da ação do intemperismo, tendo em sua composição um sistema ternário formado por partículas minerais agregadas, água e ar (CAPUTO, 2011).

Pinto (2006) corrobora dizendo que a decomposição das rochas é decorrente do intemperismo causado por agentes físicos e químicos, como, variações de temperatura, chuva, a presença de fauna e flora, etc. O autor ainda afirma que a atuação desses fatores em conjunto é o que leva à formação dos solos.

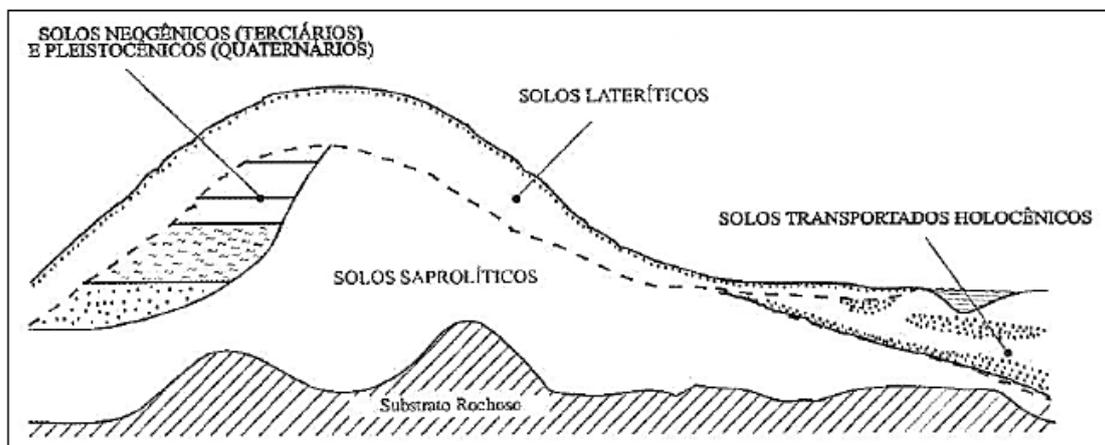
Para Ortigão (2007), o intemperismo químico está relacionado com a formação do solo por um processo que consiste na ação química de agentes que promovem a alteração, solubilização e deposição dos minerais de rocha, sendo um processo mais comum em regiões de clima quente e úmido. No intemperismo físico, o solo é formado pela ação de agentes como a água, vento e variações térmicas, que exercem uma ação mecânica de desagregação das rochas.

O Brasil se encontra em uma região de clima tropical, logo, grande parte do seu território é composto por regiões de clima quente e úmido. Para Dutra

(2014), nessas regiões, existem condições favoráveis para intensificação do intemperismo químico, logo, há a formação de solos residuais tropicais, que possuem em sua composição mineralógica, minerais argilosos, minerais silicatados, óxidos metálicos hidratados, quartzo e SiO_2 , com proporções que variam de acordo com a intensidade do intemperismo e o avanço do processo de degradação.

Em regiões tropicais são encontrados solos lateríticos, saprolíticos e transportados (Figura 1). Dentre esses solos, duas grandes classes se destacam nos solos tropicais: os solos lateríticos e os saprolíticos. Os solos lateríticos são resultantes da ação do intemperismo, que transforma a parte superior do subsolo, por processo de laterização, comum em regiões tropicais úmidas bem drenadas, enquanto os solos saprolíticos são solos residuais, resultantes da decomposição e/ou desagregação no local da rocha matriz, ocasionada pela ação de intempéries, sendo possível observar de maneira nítida, a estrutura da rocha de origem (VILLIBOR et al., 2009).

Figura 1 – Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical



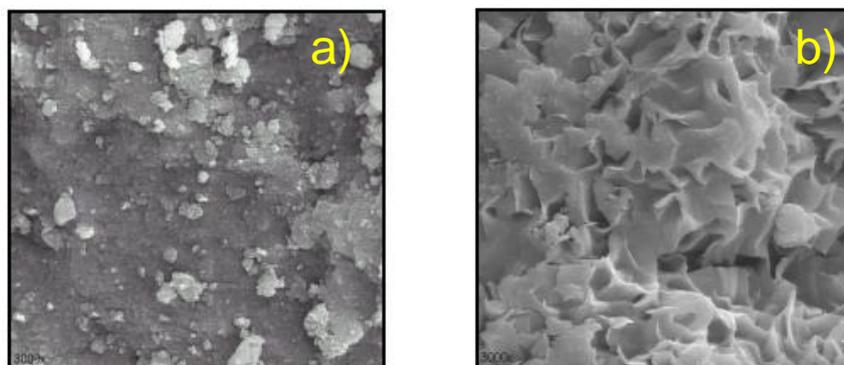
Fonte: Villibor et al. (2009)

De acordo com Villibor et al. (2009), no processo de laterização, existem várias especificidades, sobretudo do ponto de vista tecnológico as mais importantes são o enriquecimento no solo de óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio e a predominância da caulinita como argilomineral quase sempre exclusivo. Os autores ressaltam ainda que, a coloração típica, vermelho, amarelo, marrom e alaranjado dos solos de comportamento laterítico, é atribuída à presença desses minerais.

A combinação de argilominerais do grupo das caulinitas e de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio, é responsável pela formação de agregações estáveis em presença de água. Neste processo os hidróxidos e óxidos hidratados, cobrem os argilominerais reduzindo a capacidade de adsorção de água desses e promovem a cimentação natural das partículas (SANTOS E PEREIRA, 2015).

Pode-se observar na Figura 2(a) a micrografia de um solo laterítico e na Figura 2(b) a micrografia de um não laterítico, ambos com um aumento de 3000x. É possível constatar, que o solo laterítico apresenta um aspecto cimentado, e que nesse, os grãos mais finos estão agregados.

Figura 2 – Micrografias de um solo Laterítico e Não-Laterítico respectivamente



Fonte: Takeda (2006)

Conforme Pinto (2006), os solos lateríticos no estado natural, são geralmente, não saturados, com elevado índice de vazios e por isso possuem baixa capacidade de suporte. No entanto, quando é compactado a capacidade de suporte é elevada e o solo apresenta contração se o teor de água for reduzido, mas não sofre expansão na presença de água.

2.20 SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

Desde a antiguidade a terra vem sendo utilizada como material de construção em obras de engenharia civil. Segundo Seco et al. (2017), há mais de 9000 anos, a técnica mundial de construção de edificações com materiais a base de terra é conhecida, sendo esta ainda usada na maioria dos países em desenvolvimento na atualidade.

O sucesso desses materiais está atrelado a grande quantidade de matéria-prima disponível, simplicidade de execução da técnica, economia, boas propriedades térmicas e acústicas e após o final do ciclo de vida das obras, esses podem ser facilmente reutilizados com uma simples moagem e molhagem, ou retornar as condições naturais sem trazer danos ao meio (OTI; KINUTHIA; BAI, 2009 e 2010). Dessa forma, estes materiais possuem um enorme potencial de uso, principalmente em regiões interioranas do Brasil, onde há uma enorme dificuldade de acesso a materiais de construção.

Nas últimas décadas, esta técnica milenar de construção em solo tem sido resgatada, devido ao baixo consumo energético exigido, pois não necessita de tratamento térmico como outros materiais de construção convencionais. Barbosa e Ghavami (2010) corroboram afirmando que, quando possível, o uso desse material nas construções em suas diversas formas, seria vantajoso para o futuro da humanidade.

Além da sustentabilidade, a habitação, é uma questão que também merece atenção, por ser uma das necessidades básicas da humanidade. O resgate de técnicas tradicionais de construção com solo é de extrema importância para ajudar a sanar problemas relacionados à falta de moradia, principalmente por pessoas menos favorecidas. No Brasil, a Fundação João Pinheiro - FJP (2017) estima que o déficit habitacional seja aproximadamente de seis milhões de moradias. Tijolos de terra não cozidos são uma alternativa econômica para auxiliar na construção de casas para suprir o déficit. Oti, Kinuthia e Bai (2009), relatam que estes materiais fornecem uma estrutura com custos reduzidos em todo o ciclo de vida, pois geralmente não exigem pintura e um único elemento pode exercer várias funções como: boa integridade estrutural, transmitância térmica, e excelente durabilidade.

2.3 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, isto é, um pó fino, que quando entra em contato com a água, dá origem a uma pasta que endurece devido a reações de hidratação. Após o endurecimento a pasta permanece estável mesmo em contato com a água. Isto mostra que o cimento Portland

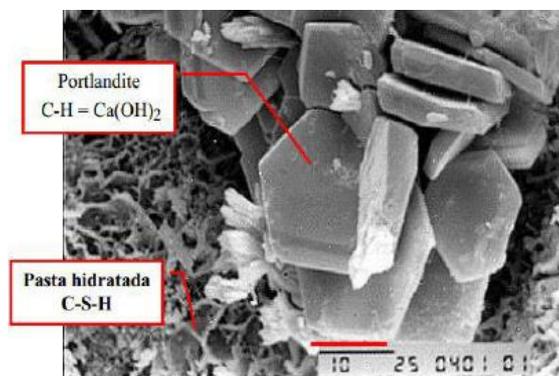
funciona tanto como ligante quanto como estabilizante nos compósitos em que é adicionado.

Os principais constituintes do cimento Portland são: os silicatos, tricálcico ($C_3S \rightarrow 3CaO.SiO_2$) e dicálcico ($C_2S \rightarrow 2CaO.SiO_2$); o aluminato tricálcico ($C_3A \rightarrow 3CaO.Al_2O_3$); e o aluminoferrito tetracálcico ($C_4AF \rightarrow 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O$). Na presença de água dá-se início ao processo de hidratação do cimento e são produzidos compostos hidratados como, o silicato de cálcio hidratado (CSH), hidróxido de cálcio (CH) e o sulfoaluminato de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para Fonsêca (2018), o CSH é a principal fase sólida de uma pasta de cimento Portland, por esse ser o maior responsável pelo ganho de resistência mecânica e durabilidade dos materiais cimentícios. Essa ligação do CSH com a resistência dos compósitos cimentícios e conseqüentemente sua durabilidade, está diretamente ligada ao fato de o CSH possuir uma morfologia em camadas que resulta em uma área superficial elevada (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Conhecer as fases que se formam durante o processo de hidratação do cimento Portland permite a melhor compreensão das propriedades da pasta formada, desde o estado fresco até o seu endurecimento, principalmente nas idades que se seguem. As técnicas microestruturais têm auxiliado nesse sentido, com destaque para o uso do Microscópio Eletrônico de Varredura, que permite a obtenção de imagens ampliadas da superfície do material. Na Figura 3, pode-se observar a presença de CSH e CH em uma pasta hidratada.

Figura 3 - Silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014)

2.4 SOLO-CIMENTO

O solo-cimento é obtido a partir da mistura de solo e cimento Portland, compactada com um teor ótimo de água. A Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2004) define esse material como o produto endurecido que resultou de uma íntima mistura compactada de solo, cimento e água, com proporções definidas por meio de dosagem racional, e executada conforme normas cabíveis ao solo em estudo. Vale ressaltar que o solo é o material utilizado em maior proporção nessa formulação.

O solo-cimento aparece como uma das soluções para um problema recorrente em construções com terra crua, que, apesar de todas as vantagens anteriormente apresentadas, têm como principal desvantagem a alta susceptibilidade a água (AUBERT et al., 2013; OTI; KINUTHIA; BAI, 2009). A água provoca deterioração e isso diminui as propriedades resistentes, impactando diretamente a durabilidade do material. De acordo com Seco et al. (2017), tal problema, pode ser tradicionalmente solucionado ao utilizar aditivos cimentícios, ou uma alta energia de compactação, ou pela modificação da granulometria do solo. Estas técnicas são conhecidas como estabilização do solo.

Com a estabilização, as características do solo, são melhoradas. Eko et al. (2012), afirmam que as alvenarias com solo estabilizado, passam a suportar um carregamento maior e têm um melhor desempenho frente a elementos naturais prejudiciais. Conseqüentemente, o solo apresenta uma menor absorção de água e tem sua durabilidade aumentada.

A estabilização pode ser alcançada, por processos mecânicos, físicos e químicos. A estabilização mecânica ocorre quando o solo é compactado tornando-se mais denso. Na estabilização física as propriedades do solo são modificadas com o uso de técnicas que melhoram a textura do mesmo, sendo a mais conhecida a queima. Por fim, na estabilização química, as propriedades do solo são modificadas pela mistura com aditivos químicos como o cimento ou outro material estabilizador.

No que diz respeito à normalização do solo-cimento no Brasil, a quantidade de normas é relativamente expressiva. Pinto (2016), afirma que na

década de 1980, a primeira edição destas normas foi elaborada e aprovada, com uma grande contribuição da ABCP e o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Bahia - CEPED, que atualmente está vinculado à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do governo do Estado da Bahia. A revisão destas normas foi concluída apenas em 2012 pela ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas. As normas incluem tijolos, blocos e materiais para pavimentação. Essas são exibidas no Quadro 1.

Quadro 1 - Normas brasileiras para solo-cimento

Nº	Norma ABNT	Título	Ano
1	NBR 8491	Tijolo de solo-cimento – Requisitos	2012
2	NBR 8492	Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio	2012
3	NBR 10833	Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento	2012
4	NBR 10834	Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos	2012
5	NBR 10836	Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água	2013
6	NBR 11798	Materiais para base de solo-cimento – Requisitos	2012
7	NBR 12023	Solo-cimento - Ensaio de compactação	2012
8	NBR 12024	Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimento	2012
9	NBR 12025	Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio	2012
10	NBR 12253	Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento	2012
11	NBR 13553	Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos	2012
12	NBR 13554	Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - Método de ensaio	2012
13	NBR 13555	Solo-cimento - Determinação da absorção de água - Método de ensaio	2012
14	NBR 16096	Solo-cimento - Determinação do grau de pulverização - Método de ensaio	2012

Fonte: Autoria própria

2.4.1 Dosagem de solo-cimento no Brasil

De modo geral, o processo de dosagem é feito de forma experimental e, tem por finalidade, encontrar a proporção ideal de solo, cimento e água que atenda de maneira econômica as propriedades técnicas desejadas. No Brasil, a

ABCP (2004), por meio do Estudo Técnico ET-35, traz uma descrição completa das normas (geral e simplificada) de dosagem de solo-cimento estabelecidas pela *Portland Cement Association* (PCA).

A dosagem do solo-cimento, realizada pela norma geral, possui como grande desvantagem prática, o tempo de duração dos ensaios, especialmente os de durabilidade que levam cerca de 35 dias (ABCP, 2004). Segundo a ABCP (2004), a norma geral é resumida nos seguintes passos:

- a)** identificação e classificação do solo;
- b)** escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação;
- c)** execução do ensaio de compactação;
- d)** escolha dos teores de cimento para o ensaio de durabilidade;
- e)** moldagem de corpos de prova para o ensaio de durabilidade;
- f)** execução do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem;
- g)** escolha do teor de cimento adequado em função dos resultados do ensaio.

Para simplificar e encurtar o tempo gasto na dosagem, a PCA procurou, então, correlacionar os resultados do ensaio de durabilidade com outro de execução mais rápida. Dessa forma, baseada na correlação estatística entre os ensaios de durabilidade e de resistência à compressão simples realizados em 2438 solos arenosos aos 7 dias, a PCA apresentou um método simplificado para a dosagem de solo-cimento (ABCP, 2004). De acordo com a ABCP (2004), este método é a norma resumida e consiste nos seguintes passos:

- a)** ensaios preliminares do solo;
- b)** ensaio de compactação do solo-cimento;
- c)** determinação da resistência à compressão simples aos sete dias;
- d)** comparação entre a resistência média obtida aos sete dias e a resistência admissível para o solo-cimento produzido com o solo em estudo.

A ABCP (2004), ressalta, que o método de dosagem de solo-cimento da norma resumida, é restrito aos solos que contenham no máximo 50% de partículas com diâmetro inferior a 0,05 mm (silte mais argila) e no máximo 20% de partículas com diâmetro inferior a 0,005mm (argila).

2.4.2 Fatores que influenciam na qualidade do solo-cimento

Vários fatores influenciam na qualidade final do solo-cimento, entre os quais destacam-se o tipo de solo e a quantidade de cimento na formulação. Para Buriol (2002), por exemplo, quando não há argila no solo, a ação cimentante acontece por meio da hidratação do cimento e varia de acordo com a granulometria e uniformidade do solo, sendo que, para solos com granulometria uniforme, uma maior quantidade de cimento é requerida na estabilização. Marques (2015), afirma que solos com uma maior proporção de areia na composição, na maior parte dos casos, proporcionam uma maior resistência do solo-cimento e, ressalta que outras características do solo como os limites de consistência, distribuição granulométrica e os tipos de argilominerais presentes neste, também devem ser consideradas. Outro fator a ser levado em consideração no solo é o teor de matéria orgânica, pois este, devido à presença de açúcares e ácido húmico, pode influenciar na qualidade do solo-cimento. Para Blucher (1951), o teor máximo de matéria orgânica permitido é de 2%, no entanto existem casos em que a estabilização com solos contendo até 5% foi bem-sucedida.

A qualidade do solo-cimento também é afetada pela maneira como a mistura é preparada, o teor de umidade que é utilizado, a energia de compactação empregada, e o tempo de cura do produto final. Para Castro (2008), no processo de mistura, com a utilização de aglomerantes hidráulicos, uma homogeneização preliminar a seco deve ser realizada antes da hidratação do composto. Isso pode ser justificado pelo fato desses aglomerantes iniciarem as reações químicas logo após entrarem em contato com a água.

O teor de umidade ótima a ser utilizado na mistura, é definido em função da densidade máxima encontrada na realização do ensaio de compactação regido pela NBR 12023 (ABNT, 2012). De acordo com Lopes (2002), o teor de umidade de moldagem tem efeito sobre a resistência à compressão simples das misturas de solo-cimento, pois, à resistência máxima é alcançada e decresce semelhante a curva de compactação.

Devem-se tomar alguns cuidados com a compactação. Castro (2008), diz que grandes acréscimos na energia de compactação nem sempre irá

incrementar resistência mecânica no solo-cimento e, além disso, pode induzir ao fenômeno denominado "laminação", ocorrendo a distribuição linear de água e ar ao longo da maior dimensão da estrutura, resultando na estratificação em camadas do composto, que por sua vez tendem a se desagregar.

O processo de cura também merece atenção. Para solos estabilizados com aglomerantes hidráulicos, a cura deve ser semelhante à cura do concreto e, no caso de tijolos, esses devem ser umedecidos durante uma semana, garantindo assim que as reações químicas devidas à hidratação do aglomerante ocorram normalmente (CASTRO, 2008).

2.5 TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Na composição do tijolo de solo-cimento, o solo é o material usado em maior proporção. O agente estabilizador, o cimento, na literatura, possui teor variando de 4% a 30% em massa (SEGANTINI E WADA, 2011; VINAI et al., 2013). No entanto, a ABCP (2004) recomenda um teor de 5%, como o menor teor de cimento a ser adotado e Vargas (1977) recomenda que o teor de cimento em relação ao volume de solo compactado seja de 7% a 14%.

A produção de tijolos de solo-cimento é realizada com prensa manual ou hidráulica. A mistura fresca de solo-cimento é colocada dentro de moldes e é prensada. Com a estabilização mecânica, o produto final não necessita de queima, o que é uma grande vantagem do ponto de vista ambiental.

O uso do tijolo de solo-cimento é bastante difundido no Brasil. Nos últimos anos, esse material tem sido utilizado em larga escala por pesquisadores, pois, além de estar associado a temática da sustentabilidade por não necessitar de queima e requer um baixo consumo energético para extração da matéria-prima, dentre outros fatores, este ainda tem grande potencial para incorporação de resíduos. Algumas vantagens deste material são elencadas a seguir:

- O solo-cimento vem se consagrando como tecnologia alternativa por oferecer o principal componente da mistura – o solo – em abundância na natureza, e geralmente disponível no local da obra ou próximo a ela;

- O processo construtivo do solo-cimento é muito simples, podendo ser assimilado por mão de obra não qualificada;
- Apresenta boas condições de conforto, comparáveis às construções de alvenaria de tijolos e ou blocos cerâmicos, não oferecendo condições para instalações e proliferações de insetos nocivos à saúde pública, atendendo às condições mínimas de habitabilidade;
- É um material de boa resistência e perfeita impermeabilidade, resistindo ao desgaste do tempo e à umidade, facilitando a sua conservação;
- A aplicação do chapisco, emboço e reboco são dispensáveis, devido ao acabamento liso das paredes monolíticas, em virtude da perfeição das faces (paredes) prensadas e a impermeabilidade do material, necessitando aplicar uma simples pintura com tinta à base de cimento, aumentando mais a sua impermeabilidade, assim como o aspecto visual, conforto e higiene;
- Baixa agressividade ao meio ambiente, pois dispensa o processo de queima;
- Economia de transporte quando produzidos no próprio local da obra;
- Baixo custo em relação às alvenarias convencionais. (ACCHAR; MARQUES, 2016, p.8)

Os benefícios levantados, evidenciam as boas características do tijolo de solo-cimento. A Figura 4 mostra exemplos de tijolos feitos com solo-cimento.

Figura 4 - Exemplo de tijolos fabricados com solo-cimento



Fonte: Acchar e Marques (2016)

2.6 MANIPUEIRA

Com uma produção em torno de 285 milhões de toneladas/ano de raízes não processadas, a *Manihot esculenta Crantz*, conhecida como mandioca é a quinta cultura básica mais importante do mundo (FAOSTAT, 2017). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2017), em 2016 a produção brasileira de raiz de mandioca foi de cerca de 23,71 milhões de toneladas.

Na agricultura familiar, a mandioca assume um importante papel no âmbito social e econômico. O produto agrícola é muitas vezes a principal cultura produzida por determinadas regiões. Com isso, muitas famílias trabalham no cultivo, beneficiamento e comercialização dos produtos gerados. As raízes, geralmente são processadas em indústrias com pouca tecnologia.

Grande parte dessa produção é processada, dando origem a subprodutos. Madeira et al. (2017), afirmam que durante o processamento da mandioca, um efluente é gerado. Este é a manipueira, um líquido amarelado, resultante do beneficiamento das raízes em indústrias ou casas de produção de farinha ou amido. Na Figura 5, pode-se ver a manipueira armazenada em tanques em uma casa de farinha.

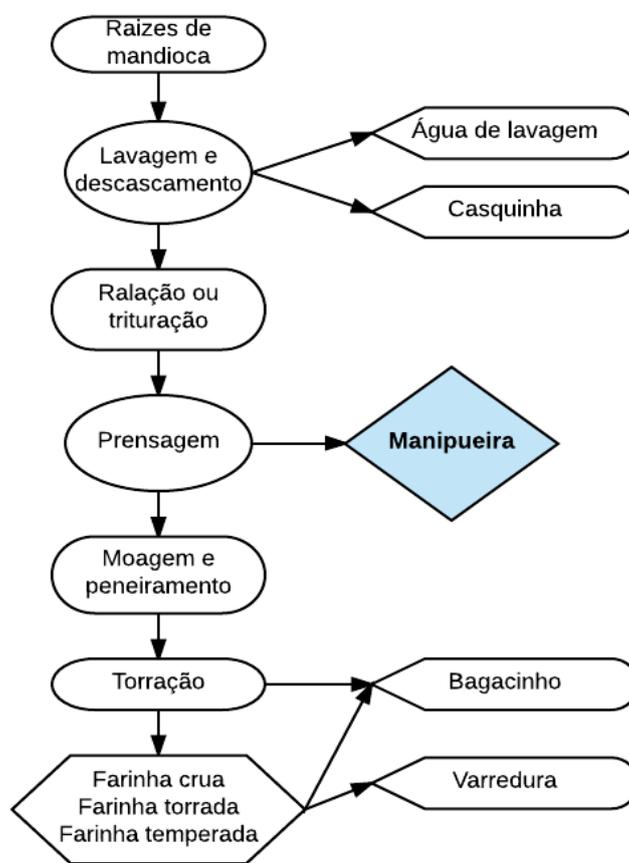
Figura 5 – Manipueira armazenada em tanques



Fonte: Morais (2016)

Para auxiliar no entendimento da origem da manipueira, a Figura 6 exemplifica o fluxograma do processo de produção de farinha de mandioca.

Figura 6 - Fluxograma do processo de fabricação de farinha



Fonte: Autoria própria

Este líquido residual possui um teor elevado de ácido cianídrico e matéria orgânica. Segundo Madeira et al. (2017), a toxidade desse efluente é um grande problema no Brasil, pois este, geralmente não é tratado antes de ser destinado ao meio, causando assim, sérios problemas ambientais. Carvalho et al. (2017), corroboram dizendo que devido ao alto poder de poluição, o líquido deve ser tratado antes de ser dirigido para um corpo de água. Ribas, Cereda e Bôas (2010), afirmam que para cada tonelada de raízes processadas, são gerados cerca de 300 litros de água residual, enquanto Carvalho et al. (2017), relatam que o efluente resultante é algo em torno dos 600 litros para cada tonelada.

A composição da manipueira é variável, pois depende da cultura, e de características típicas da região onde é cultivada a mandioca, como por exemplo, o tipo de solo e os fatores climáticos. Alguns autores analisaram os constituintes do efluente. A Tabela 1, expressa os resultados de quatro trabalhos realizados de 1992 – 2017.

Tabela 1 - Composição da manipueira

Componentes	Referências						
	Ponte (1992)	Hien et al. (1999)	Silva et al. (2005)	Borghetti (2009)	Santos et al. (2017)		
Nitrogênio total (mg/L)	425,5		32,4	154	44	167	83
Fósforo (mg/L)	259,5		17,8	19,26			
Potássio (mg/L)	1853,5		333,6	1463			
Cálcio (mg/L)	227,5		31,37				
Magnésio (mg/L)	405		36,87				
Enxofre (mg/L)	9	9					
Ferro (mg/L)	15,3		6,09				
Zinco(mg/L)	4,2		0,59	3,6			
Manganês (mg/L)	3,7		0,62				
Cobre (mg/L)	11,5		0,05				
Sódio (mg/L)			51,7				
DQO: demanda química de oxigênio (g O ₂ /L)		15,5	14,7	6,18	7,7	6,5	6,2
SST: Sólidos suspenses totais (g/L)		5,9		40,5	6,3	6,8	6,9
Nitrato: NO ₃ , mg/L				11,2			
Amônio: NH ₄ , (mg/L)		174					
pH		5,46	4,8	4,4	7,1	6,7	6,7
Cianeto (mg/L)	42,5	5,6	12	62	1,3	2	2,33

Fonte: Aatoria própria

Na Tabela 1, é evidenciado o enorme potencial de poluição ou eutrofização da manipueira. Carvalho et al. (2017), afirmam que essa água residual deve ter uma destinação adequada, haja visto que possui um amplo espectro de toxicidade devido a presença de cianeto, e uma alta demanda química de oxigênio.

Diante da problemática causada pelo grande volume de manipueira gerado durante o processamento, é perceptível a necessidade de adoção de técnicas de manejo adequadas. Dessa maneira, as alternativas vão além de evitar a degradação ambiental e, meios de proporcionar valor econômico a esse produto têm sido pensados. Conforme relatado por Silva (2008), esse resíduo possui várias formas de aproveitamento: uso como fertilizante natural; defensivo agrícola; na produção de vinagre de uso doméstico e comercial; para produzir sabão; ou ainda na fabricação de tijolos ecológicos.

Em relação ao cianeto, vale ressaltar ainda uma preocupação das agências de Saúde Ocupacional com o controle e exposição de trabalhadores a agentes químicos. A *Occupational Safety and Health Administration* – OSHA (2018), estabelece um limite máximo de exposição ocupacional ao ácido cianídrico de 10 partes por milhão – ppm em uma carga horária de trabalho de 8h por dia, enquanto a Norma regulamentadora NR 15 (BRASIL, 1978), estabelece um limite de tolerância de 8 ppm para as mesmas 8h.

2.6.1 Tijolos com uso de manipueira

Na literatura não foram encontrados trabalhos que utilizaram manipueira na produção de tijolos de solo-cimento. No entanto dois trabalhos se propuseram a estudar o uso da manipueira em tijolos de solo sem cimento, e estes serão apresentados a seguir.

Araújo et. al (2015a), analisaram tijolos com 8% de manipueira no lugar da água, com e sem estabilização térmica. Os tijolos que não passaram por estabilização térmica, foram secos em estufa a 100°C e as outras amostras foram queimadas em duas temperaturas diferentes, 800°C e 1000°C. Não foi apresentado o resultado de absorção de água para os tijolos não queimados. Em relação a resistência à flexão, todas as formulações apresentaram resultados acima de 2 MPa.

Araújo et al. (2015b), tiveram como objetivo avaliar a degradação térmica de tijolo de solo com manipueira substituindo a água da mistura. Foram feitas duas formulações, uma com 92% de argila e 8% de água e outra com 92% de argila com 8% de manipueira. Após moldagem foi realizada a cura térmica dos tijolos em estufa a 110°C por 24h. Ensaios de termogravimetria (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) foram realizados. Os autores afirmaram que de acordo com os resultados, a estabilidade térmica da composição com manipueira atesta o uso desse material como ligante, mas o seu uso ainda deve ser comprovado por ensaios técnicos normativos.

Os trabalhos apresentados levantam a possibilidade de a manipueira ter propriedades ligantes, no entanto, nenhum resultado de absorção de água foi apresentado para comprovar uma ação estabilizante por parte da manipueira. Foram apresentados resultados de resistência à flexão, que não é um ensaio

requerido para comprovação da capacidade mecânica dos tijolos, faltando, portanto, a realização de ensaio de resistência à compressão.

2.7 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Na maioria dos estudos que envolvem a caracterização de materiais resultantes de misturas, são realizadas muitas combinações variando os elementos constituintes. Dessa maneira, um grande número de amostras é produzido e muitos ensaios são realizados até a obtenção das propriedades desejáveis.

O planejamento experimental é uma técnica que permite a obtenção de um processo experimental mais eficiente e econômico, pois, a análise dos dados obtidos com o uso de métodos estatísticos, resulta em objetividade científica nas conclusões. Nesse, o pesquisador pode determinar as variáveis mais significativas no desempenho de um determinado processo (CALADO; MONTGOMERY, 2003). É possível ainda, obter os principais efeitos e as interações entre as variáveis com uma quantidade reduzida de experimentos.

Existem vários tipos de planejamento de experimento, tais como, os planejamentos de experimento fatorial completo, fracionários, compostos, etc. No que diz respeito ao planejamento de experimentos fatorial, a realização de várias amostras de todos os experimentos pode ser inconveniente por vários motivos, como por exemplo, o aspecto temporal e financeiro. Para contornar a dificuldade mencionada e se obter uma estimativa dos erros, um experimento no centro do planejamento de experimentos fatorial é incluído, e nesse é utilizado o valor médio dos níveis de todas as variáveis, recebendo o nome de experimento no ponto central ou no nível zero (BÔSSO, 2012).

O planejamento de experimentos fatorial completo ou fracionário pode ter vários níveis. De acordo com Bôssó (2012), no planejamento de dois níveis é possível estimar quais são efeitos principais e as interações, analisando quais são significativos com a realização de replicatas e/ou com a análise de gráficos de probabilidade normal. Por outro lado, no planejamento de experimentos fatorial com ponto central, ou seja, com três níveis, além de ser possível conhecer os efeitos principais e as interações, pode-se calcular o grau de curvatura da superfície e com uma menor quantidade de replicatas, obter

uma estimativa de erro dos coeficientes da regressão, através de replicatas do ponto central (BOX et al., 1978; FERREIRA E TEÓFILO, 2006; BRUNS et al., 2001; BÔSSO, 2012).

Para Pelisser et al. (2006), quando se trata da produção de materiais de construção à base de cimento, a modelagem numérica de misturas experimentais, é praticamente obrigatória, para que se possa obter resultados otimizados. No entanto, Imanzadeh et al. (2018), afirmam que o uso de planejamento de experimentos no campo da engenharia é recente. São encontrados com maior facilidade, trabalhos que utilizaram planejamento de experimento em concretos e argamassas, havendo, portanto, uma escassez de pesquisas em áreas mais específicas como o solo-cimento.

Com relação ao uso do planejamento de experimentos em solo-cimento, Dallacort et al. (2002), utilizaram o planejamento de experimento fatorial, para analisar a resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. Os autores concluíram que as curvas de superfície obtidas através das variações da massa específica e da resistência do solo estabilizado, podem ser utilizadas para estimar proporções ótimas para a fabricação de tijolos de solo-cimento com o solo estudado.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo, é feita a descrição dos materiais utilizados. Os procedimentos adotados para avaliar a influência da incorporação de manipueira em substituição a água em formulações de tijolo solo-cimento maciços também serão apresentados.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo

Na pesquisa, foi utilizado solo coletado na BR-101(Km 126), no percurso situado entre as cidades de São José de Mipibú e Goianinha, próximo ao rio Baldun, no Estado do Rio Grande do Norte. O solo foi caracterizado como A-4, segundo o padrão da *Highway Research Board* (HRB) da AASHOTO e como um solo arenoso com fração fina silto-argilosa, pelo *Unified Soil Classification System* (USCS). De acordo com Silva (2013), esse solo apresenta características geotécnicas, representativas dos solos tropicais lateríticos, com ocorrência nessa região do Estado do Rio Grande do Norte. Após ser coletado o solo foi armazenado no laboratório de Mecânica dos solos da UFRN, onde passou por processo de secagem ao ar livre em ambiente coberto, protegido da ação das intempéries. Logo depois de ser secado, o solo foi desagregado e peneirado na peneira ABNT de nº 4 (4,8mm).

3.1.2 Cimento

Foi utilizado o cimento composto CP II F-40. Cimento cujas propriedades são recomendadas pela ABCP, para produção de composições de solo-cimento. O produto foi adquirido no comércio local da cidade de Natal/RN.

3.1.3 Água

A água utilizada é proveniente do sistema de abastecimento público da cidade de Natal/RN, fornecida pela concessionária local, a CAERN – Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte.

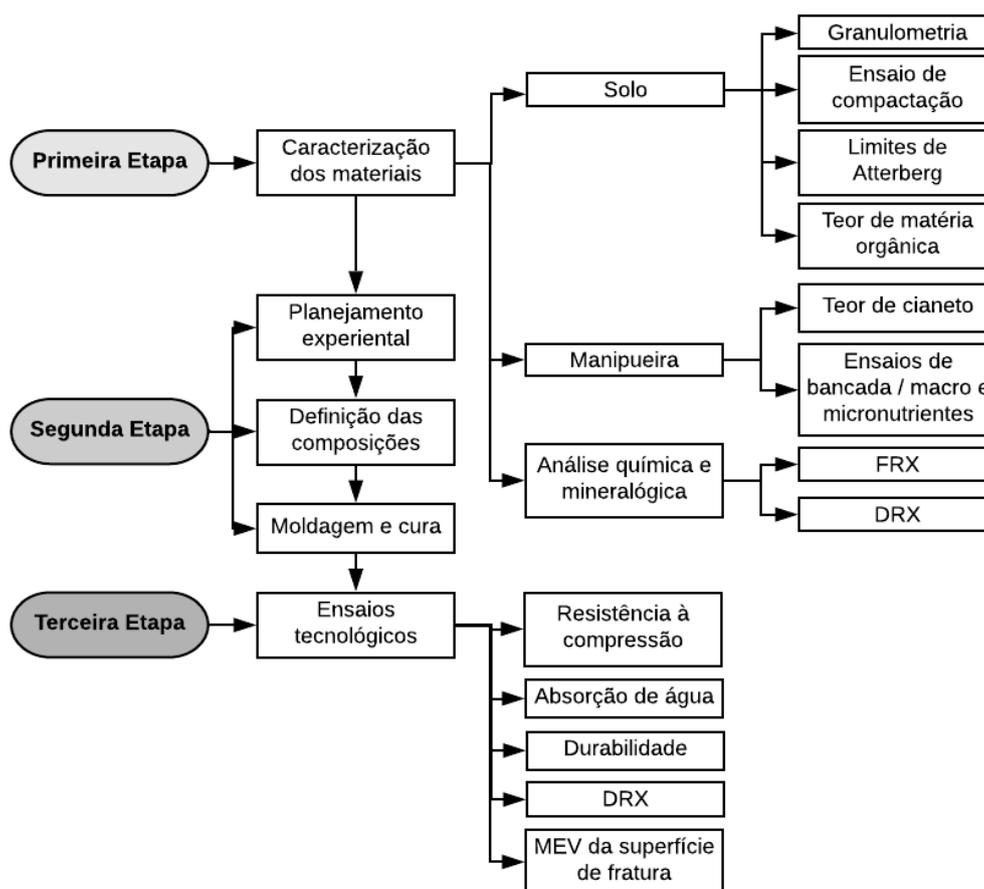
3.1.4 Manipueira

O efluente foi coletado em casas de farinha de pequeno porte, localizadas na cidade de Lagoa Nova/RN. A fim de diminuir o teor de cianeto presente em sua composição, expôs-se a manipueira durante 48h ao sol durante o dia e em ambiente coberto que permitia a ventilação a noite. De acordo com Tokarnia et al. (2012) e Silva (2016), com esse procedimento, a manipueira tem seu teor de cianeto reduzido pela metade em 24h e este ainda decai para menos de $\frac{1}{4}$ com 48h.

3.2 MÉTODOS

A metodologia de pesquisa foi dividida em três etapas. Na primeira, a caracterização dos materiais foi realizada. Em seguida foi realizado um planejamento experimental, as composições foram definidas e o procedimento de moldagem e cura dos tijolos, descrito. Por fim, são apresentados os ensaios tecnológicos que permitiram analisar as composições formuladas. Para melhor compreensão do procedimento experimental das três etapas da pesquisa, um fluxograma é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Metodologia da pesquisa



Fonte: Autoria própria

3.2.1 Caracterização dos materiais

Como apresentado no fluxograma da metodologia de pesquisa, na primeira etapa foi realizada a caracterização dos materiais. Os procedimentos utilizados nessa etapa serão descritos a seguir.

3.2.1.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Na caracterização do solo foram realizados os ensaios de análise granulométrica, compactação, limites de Atterberg e matéria orgânica. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos da UFRN.

3.2.1.1.1 Análise granulométrica

O ensaio de análise granulométrica é necessário para se conhecer a distribuição granulométrica das partículas do solo. Este foi realizado de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016).

3.2.1.1.2 Ensaio de compactação

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016). O teor ideal de água utilizado nas formulações foi definido através deste ensaio.

3.2.1.1.3 Limites de Atterberg (LL e LP)

Para determinação dos limites de Atterberg seguiu-se as recomendações da NBR 6459 (ABNT, 2016) para determinação do limite de liquidez (LL) e da NBR 7180 (ABNT, 2016) para determinação do limite de plasticidade (LP). Com a diferença aritmética entre os dois limites, foi determinado o índice de plasticidade (IP), que é a medida da faixa de variação da umidade na qual o solo se comportará de maneira plástica.

3.2.1.1.4 Teor de matéria orgânica

Para a determinação do teor de matéria orgânica presente no solo foi realizado o ensaio pelo Método MAB - peróxido de hidrogênio (BORTOLIN e CASSOL, 2010). Nesse método o peróxido de hidrogênio concentrado (30 a 50%) é adicionado a uma quantidade conhecida de solo. Durante um determinado período de tempo a mistura fica reagindo, podendo ser aquecida ou não, e após o término do processo de oxidação, a amostra é levada a estufa para secar a 105°C e pesada. Para a realização do ensaio foram utilizadas 50g de solo passado na peneira n° 40(0,42mm) e em seguida foram adicionados 150ml de H₂O₂ (30% a 50% V/V) por 96h para a reação total. Ao final, os sedimentos foram lavados com água destilada e secos em estufa a 105°C, por 24 horas.

O teor de matéria orgânica foi obtido de acordo com a seguinte equação:

$$MOS_{H_2O_2}(\%) = (M_{INICIAL} - M_{H_2O_2}) \times 100 / M_{INICIAL} \quad (1)$$

Onde:

- $MOS_{H_2O_2}$ = Teor em porcentagem de matéria orgânica.
- $M_{INICIAL}$ = Massa do solo isento de umidade.

$M_{H_2O_2}$ = Massa do solo após a reação com H₂O₂ e seco a 105°C.

3.2.1.2 CARACTERIZAÇÃO DA MANIPUEIRA

A manipueira foi caracterizada por meio de ensaio de determinação de cianeto no laboratório Bioagri em Paulista-PE. Os ensaios de bancada (potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, sólidos em suspensão, sólidos totais), foram realizados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB). Ensaios de macronutrientes e micronutrientes, cloreto, sulfato e fosfato, foram realizados no laboratório da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN).

3.2.1.3 ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS MATERIAIS

A manipueira, o solo e o cimento foram submetidos ao ensaio de caracterização de espectrometria de fluorescência de raios X, através do aparelho Shimadzu EDX-700 para a determinação da composição química. O solo foi submetido a difração de raios X, no aparelho Shimadzu XRD-6000, com radiação de Cu-K α e ângulo de varredura (2θ) de 0° a 80°, para identificação das fases mineralógicas presentes. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais da UFRN.

3.2.2 Planejamento experimental

Foram executados 3 planejamentos experimentais fatoriais completos, com 3 repetições no ponto central, sendo o primeiro 2³, para avaliar a resistência à compressão, o segundo e terceiro 2², para avaliar a absorção de água e a perda de massa respectivamente. Os fatores teor de cimento em relação a massa de solo, porcentagem de substituição da água por manipueira, foram os efeitos investigados nos 3 planejamentos experimentais, adicionando-se ainda o fator tempo no primeiro.

O fator teor de cimento, teve como limite mínimo o valor de 6% respeitando o estabelecido por Sherwood (1993), e limite máximo de 12% baseado nos bons resultados encontrados por Silva et al. (2014), sendo 9% o valor do ponto central. No fator substituição da água por manipueira, os limites mínimo e máximo foram 0% e 100% respectivamente, e o ponto central o percentual de 50%, uma vez que se quer analisar a substituição total da água. Por fim, no fator tempo foi considerado como limite mínimo 7 dias, que é a

idade requerida para realização dos ensaios técnicos estabelecidos na NBR 8491 (ABNT, 2012) e o limite máximo de 49 dias para verificar se houve melhoras significativas das propriedades do material após os 28 dias, idade em que as reações cimentícias começam a ficar mais lentas, a qual foi estabelecida para o ponto central. Os fatores e os valores quantitativos das variáveis codificadas em cada nível estudado nos planejamentos experimentais são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores e níveis das variáveis utilizadas nas composições

Fatores	Níveis		
	-1	0	+1
Manipueira	0	50%	100%
Cimento	6%	9%	12%
Tempo	7	28	49

Fonte: Autoria própria

No primeiro planejamento experimental foram realizados 11 ensaios, dos quais 8 foram combinações dos 2 níveis dos 3 fatores e 3 foram realizados no ponto central. Para cada ensaio foram moldadas 3 amostras, sendo o valor do ensaio a média dos 3 resultados obtidos, totalizando 33 tijolos.

No segundo e terceiro planejamento experimental, foram realizados 7 ensaios, sendo 4 provenientes de combinações dos 2 níveis dos 2 fatores e 3 realizados no ponto central. Igualmente ao primeiro planejamento, para cada ensaio 3 amostras foram utilizadas, totalizando 21 tijolos para a análise da absorção e 21 tijolos para a Durabilidade modificado.

A análise estatística das respostas obtidas, foi realiza com o auxílio do software STATISTICA. No software foi possível extrair uma tabela de Análise de Variância (ANOVA), diagrama de Pareto e o gráfico com os valores observados e os preditos no modelo.

3.2.3 Definição das composições

Nesta pesquisa, 5 formulações foram estudas nos 3 planejamentos experimentais definidos anteriormente. As nomenclaturas bem como a quantidade de tijolos que foram fabricados para cada formulação são exibidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição das formulações dos tijolos de solo-cimento

Exp	Nomenclaturas	M	C	Compressão (NBR 8492)		Absorção (NBR 8492)		Durabilidade (NBR 13554)	
				Nº de tijolos	Idade (dias)	Nº de tijolos	Idade (dias)	Nº de tijolos	Idade (dias)
1	6C0M	0%	6%	6	7 e 49	3	7	3	7
2	12C0M	0%	12%	6	7 e 49	3	7	3	7
3	6C100M	100%	6%	6	7 e 49	3	7	3	7
4	12C100M	100%	12%	6	7 e 49	3	7	3	7
5	9C50M	50%	9%	9	28	9	7	9	7
Total				33		21		21	
						75			

Legenda:

M: Manipueira; **C:** Cimento; **6C0M:** 6% de cimento e 0% de substituição da água por manipueira; **12C0M:** 12% de cimento e 0% de substituição da água por manipueira; **6C100M:** 6% de cimento e 100% de substituição da água por manipueira; **12C100M:** 12% de cimento e 100% de substituição da água por manipueira; **9C50M:** 9% de cimento e 50% de substituição da água por manipueira.

Fonte: Autoria própria

3.2.4 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os tijolos maciços de solo-cimento foram moldados de acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012). Ao todo, foram fabricados 75 tijolos. As misturas foram realizadas mecanicamente com o auxílio da betoneira Motomil-MB-150L e os tijolos maciços produzidos em uma prensa manual, da marca Sahara, que possui dimensões internas de 5,0cm de espessura, 10,0cm de largura e 21,0cm de comprimento, o que configura o tijolo como tipo A de acordo com a NBR 8491 (2012). Após a prensagem, os tijolos passaram por processo de cura úmida, com o auxílio de um borrifador, durante 7 dias em local coberto. Os tijolos foram moldados e curados no Laboratório de Propriedade Físicas dos Materiais Cerâmicos (LaPFiMC) da UFRN.

3.2.5 Ensaio tecnológicos

Nos tijolos, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, absorção de água, durabilidade por imersão e secagem nos laboratórios de Solos e Materiais de Construção da UFRN. E ensaios de DRX e MEV foram realizados no Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais da UFRN nos tijolos que apresentaram melhores resultados no ensaio de resistência à compressão.

3.2.5.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de resistência à compressão simples dos tijolos maciços foram realizados, aos 7, 28 e 49 dias de acordo com o primeiro planejamento experimental. O rompimento das amostras foi realizado na máquina universal AMSLER com célula de carga de 10.000Kg, de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012).

3.2.5.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os ensaios de absorção de água foram realizados aos 7 dias após a cura das amostras de acordo com o segundo planejamento experimental. Neste ensaio, os tijolos foram pesados e colocados em estufa retilínea FANEM, até atingirem constância de massa. Logo após, os tijolos foram novamente pesados e imersos em água pelo período de 24h consecutivas, sendo então retirados da imersão e pesados. Os dados obtidos nos ciclos de pesagem, secagem e imersão em água, foram utilizados para o cálculo do percentual de absorção dos tijolos maciços prensados. Os ensaios foram realizados seguindo a NBR 8492 (ABNT, 2012).

3.2.5.3 ENSAIO DE DURABILIDADE POR IMERSÃO E SECAGEM

Os ensaios de durabilidade por imersão e secagem, tiveram início aos 7 dias de cura das amostras, de acordo com o terceiro planejamento experimental. Os preceitos previstos na NBR 13554 (ABNT, 2012), foram utilizados na realização desse ensaio, com algumas adaptações. O método prescreve 6 ciclos com 5h de molhagem e 42h de secagem em estufa a temperatura de $71\pm 2^{\circ}\text{C}$. Não foi realizada a etapa de escovação das amostras. Grande (2003) justifica que a etapa de escovação não é necessária nos tijolos utilizados nas obras de construção civil, devido as solicitações de abrasão superficial a que esses são submetidos, serem menos rigorosas que as constatadas nas utilizadas para fins rodoviários. O tempo de realização dos ensaios foi de 12 dias.

3.2.5.4 ANÁLISE MINERALÓGICA DAS COMPOSIÇÕES

As amostras mais significativas das composições solo-cimento e manipueira, provenientes dos tijolos maciços submetidos a ensaios de

compressão, foram submetidas a ensaios de difração de raios-X, no aparelho Shimadzu XRD-6000, com radiação de Cu-K α e ângulo de varredura (2θ) de 0° a 80°, para a identificação das fases mineralógicas. As amostras selecionadas para realização desses ensaios, foram imersas em álcool etílico absoluto por 24 horas e secas em estufa a 110 °C, por um período de 06 horas antes da realização dos ensaios, seguindo o método de preparação de amostras para porosimetria por intrusão de mercúrio (DUART, 2008). Após, foram acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados. A realização desse procedimento tem como intuito a retirada da água livre presente nas amostras das misturas de solo-aglomerante, induzindo a paralisação das reações de hidratação (cimentícias e pozolânicas), o que evita que as alterações na microestrutura do material continuem.

3.2.5.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A caracterização morfológica das melhores composições, foi realizada para analisar a superfície de fratura das melhores amostras dos tijolos submetidos ao ensaio de resistência à compressão. As imagens foram obtidas no ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo, os resultados dos ensaios descritos na metodologia, são apresentados. Uma discussão sobre os valores obtidos é realizada, e estudos estatísticos são exibidos para as variáveis respostas, resistência à compressão, absorção de água e perda de massa. Além disso, para as amostras em estudo, são apresentadas as composições mineralógicas e micrografias que representam a superfície da microestrutura das melhores amostras.

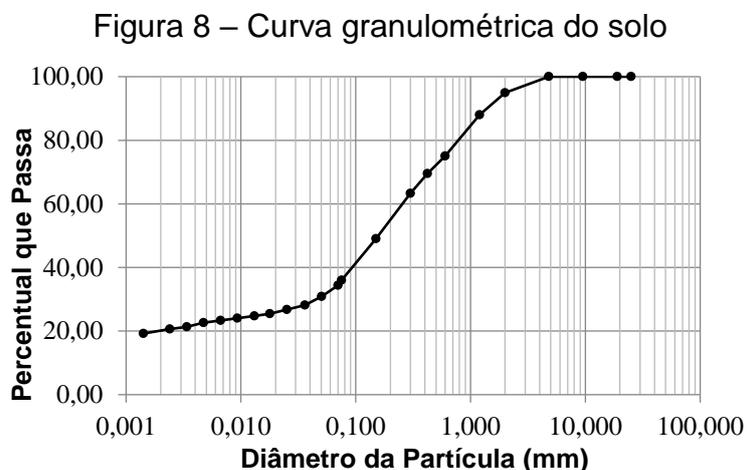
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Caracterização do solo

Para a caracterização do solo foram realizados os ensaios de análise granulométrica, ensaio de compactação e limites de Atterberg. Os resultados serão apresentados a seguir.

4.1.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Na Figura 8 a curva granulométrica do solo utilizado é apresentada. O solo possui percentual passante de 100% na peneira N° 4 (4,8mm), 69,55% na N° 40 (0,42mm) e 36% na peneira N° 200 (0,075mm).



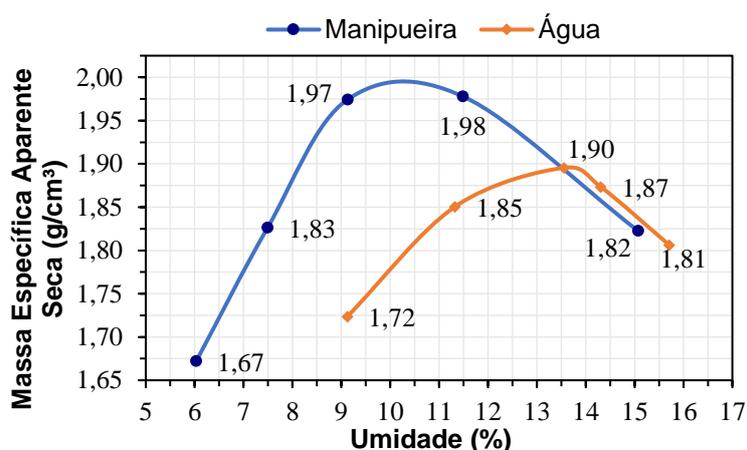
Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos demonstram que o solo utilizado atende as prescrições da NBR 10833 (ABNT, 2012), para solos utilizados em composições de solo-cimento, as quais são: 100% dos grãos passando na peneira de abertura de malha 4,8mm; e 10% a 50% passando na peneira com abertura de malha de 0,075mm. O percentual de 36% passante na peneira de N° 200 (0,075mm), demonstra uma significativa quantidade de finos no solo, o que indica a presença de argilominerais. Os argilominerais poderão proporcionar o efeito microfiller, responsável pelo refinamento dos poros, deixando o material mais denso, com reduzida absorção de água e significativa resistência à compressão.

4.1.1.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Os resultados do ensaio de compactação são exibidos por meio das curvas plotadas na Figura 9.

Figura 9 – Curvas de compactação do solo



Fonte: Autoria própria

As compactações realizadas com água e manipueira apresentaram 13,53% e 10,01% de umidade ótima e 1,90 g/cm³ e 1,99 g/cm³ de massa específica aparente seca, respectivamente. A composição de solo com manipueira apresenta um menor teor de umidade ótima associado a uma maior massa específica aparente seca, o que indica um melhor empacotamento da mistura. Neste ensaio foi possível determinar os teores de água que serviram de referência para as composições estudadas, otimizando deste modo o processo de fabricação dos tijolos.

4.1.1.3 LIMITES DE ATTERBERG (LL E LP) E MATÉRIA ORGÂNICA

Os resultados dos limites de Atterberg e matéria orgânica são exibidos na Tabela 4. Vale ressaltar que os resultados para os limites de Atterberg atenderam a NBR 10833 (ABNT, 2012), que estabelece para solos utilizados em composições de solo-cimento, um limite de liquidez igual ou inferior a 45% e um índice de plasticidade igual ou menor que 18%.

Tabela 4 – Limites de Atterberg e teor de matéria orgânica do solo

Variáveis	Água	Manipueira
Limite de liquidez (LL)	25,30%	22,00%
Limite de Plasticidade (LP)	18,10%	14,30%
Índice de Plasticidade (IP)	7,20%	7,70%
Teor de matéria orgânica	4,9%	

Fonte: Autoria própria

O valor encontrado para o teor de matéria orgânica está acima do teor máximo de 2% estabelecido por Blucher (1951). Segundo o autor, devido à presença de açúcares e ácido húmico, presentes na matéria orgânica, um teor acima de 2% pode influenciar na qualidade do solo-cimento. No entanto, o mesmo autor relata que existem casos em que a estabilização de solos contendo até 5% de matéria orgânica foi bem-sucedida, como é o caso desta pesquisa.

4.1.2 Caracterização da manipueira

A Tabela 5 mostra os resultados para os ensaios que determinam a composição da manipueira líquida. As altas concentrações de potássio, nitrogênio, sódio, ferro e cálcio condizem com os resultados encontrados na literatura por Ponte (1992). as variações dos valores encontrados podem ser justificadas pelo fato de a composição variar de acordo com diversos fatores como clima, solo, cultura etc.

Tabela 5 – Composição da manipueira líquida

Variável	Valor	Ponte (1992)
Nitrogênio (N)	1121,00 mg/L	425,5 mg/L
Fósforo (P)	132,00 mg/L	259,5 mg/L
Potássio (K)	1456,00 mg/L	1853,5 mg/L
Cálcio (Ca)	93,00 mg/L	227,5 mg/L
Magnésio (Mg)	219,00 mg/L	405 mg/L
Sódio (Na)	351,00 mg/L	
Zinco (Zn)	20,00 mg/L	4,2 mg/L
Cobre (Cu)	9,00 mg/L	11,5 mg/L
Ferro (Fe)	117,00 mg/L	15,3 mg/L
Manganês (Mn)	15,00 mg/L	3,7 mg/L
Sólidos totais	14563,00 mg/L	
Sólidos em suspensão	2373,00 mg/L	
Cloreto (Cl)	545,40 mg/L	
Sulfato	78,53 mg/L	
Fosfato	27,07 mg/L	
Cianeto livre	5,62 mg/L	
Cianeto Total	8,92 mg/L	42,5 mg/L
pH	4,50	
Condutividade elétrica	7,62 mS/cm	

Fonte: Autoria própria

O baixo pH apresentado (4,5) demonstra a acidez da manipueira que poderia prejudicar o processo de hidratação do cimento, porém, isso não foi constatado nos ensaios técnicos realizados. Um elevado valor de sólidos presentes no líquido também pode ser observado, evidenciando a presença de matéria orgânica. O teor de ácido cianídrico se mostrou bem abaixo do encontrado por Ponte (1992), e isso se deve ao fato de a manipueira ter sido exposta ao sol durante 2 dias. Pode-se acrescentar ainda, que o teor de ácido cianídrico livre apresentou o valor de 5,62mg/L, que atendeu a NR 15 (BRASIL, 1978), que estabelece um limite máximo de 8mg/L em ambientes de trabalho com uma carga horária de 8h por dia.

4.1.3 Análise química e mineralógica das matérias primas

A composição química dos materiais utilizados é exibida na Tabela 6. Nos valores obtidos para o solo em estudo, pode-se observar elevados teores de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), típico de solos lateríticos. Os minerais sílica e

a alumina presentes no solo, quando na forma desorganizada, poderão recombinaar com a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formada durante o processo de hidratação do cimento e formar silicato de cálcio hidratado (CSH) e ou silicato aluminato de cálcio hidratado (CASH), fases responsáveis pelo ganho de resistência dos materiais que utilizam cimento na formulação. Para determinação da composição química da manipueira foi necessário utilizar a parte pastosa que decanta no fundo do líquido, devido à baixa precisão do ensaio de Fluorescência de raios-X, quando realizado em líquidos. Os resultados demonstram teores significativos de potássio (K_2O), cálcio (CaO), ferro (Fe_2O_3) e sódio (Na_2O), semelhantes aos resultados apresentados nos ensaios de bancada realizados no líquido exibidos na Tabela 3. Os resultados para o cimento CP II-F40 utilizado, apresentam um alto teor de cálcio (CaO) e sílica (SiO_2), típico de cimentos com alta concentração de filer calcário.

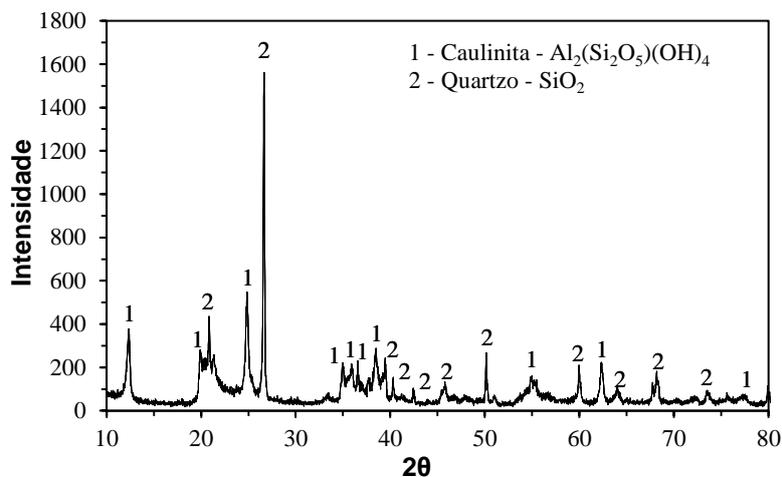
Tabela 6 – Composição química dos materiais

Óxido	Massa (%)		
	Solo	Manipueira	Cimento
SiO_2	40,494	2,457	12,63
Al_2O_3	32,611	2,306	2,745
Fe_2O_3	19,804	15,922	7,338
K_2O	0,140	32,654	---
CaO	0,329	25,739	77,287
SO_3	---	3,123	---
P_2O_5	---	3,592	---
Na_2O	---	9,986	---

Fonte: Autoria própria

O resultado da difração de raio X (DRX), do solo utilizado, é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – DRX do solo estudado



Fonte: Autoria própria

Foram identificadas as fases mineralógicas, Caulinita e Quartzo, em concordância com os elevados teores de sílica e alumina apresentados anteriormente na Tabela 6. A presença dos minerais Caulinita e Quartzo é justificada pelo fato de se tratar de um solo laterítico, típico de regiões tropicais.

4.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

4.2.1 Resistência à compressão simples

Como descrito na metodologia os ensaios de resistência à compressão foram realizados seguindo um planejamento de experimento fatorial completo 2^3 , com 3 repetições no ponto central. As variáveis independentes foram a manipueira, considerando a porcentagem de substituição à água, o teor de cimento e o tempo. A variável dependente avaliada como resposta obtida foi a média da resistência à compressão dos tijolos. A matriz do planejamento experimental é exibida na Tabela 7.

Tabela 7 – Matriz do planejamento experimental da resistência à compressão

Exp	Nomenclaturas	M	C	T	Resistência (MPa)	Ordem de execução
1	6C0M	0	6	7	1,93 ± 0,16	(2)
2	6C100M	100	6	7	1,95 ± 0,05	(5)
3	12C0M	0	12	7	4,05 ± 0,25	(11)
4	12C100M	100	12	7	4,14 ± 0,55	(8)
5	6C0M	0	6	49	2,24 ± 0,12	(7)
6	6C100M	100	6	49	2,42 ± 0,11	(3)
7	12C0M	0	12	49	4,66 ± 0,15	(10)
8	12C100M	100	12	49	4,90 ± 0,34	(1)
9	9C50M	50	9	28	3,95 ± 0,21	(4)
10	9C50M	50	9	28	3,94 ± 0,30	(9)
11	9C50M	50	9	28	3,94 ± 0,03	(5)

Legenda:

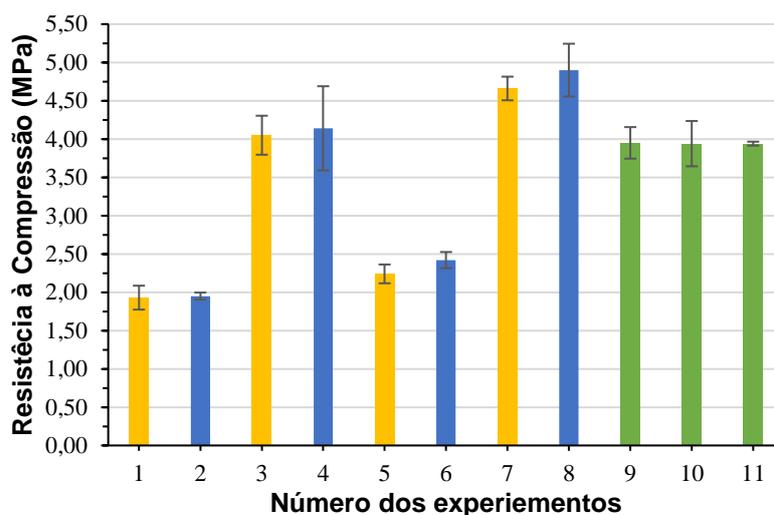
M: Manipueira; **C:** Cimento; **T:** Tempo (dias); **6C0M:** 6% de cimento e 0% de substituição da água por manipueira; **12C0M:** 12% de cimento e 0% de substituição da água por manipueira; **6C100M:** 6% de cimento e 100% de substituição da água por manipueira; **12C100M:** 12% de cimento e 100% de substituição da água por manipueira; **9C50M:** 9% de cimento e 50% de substituição da água por manipueira.

Fonte: Autoria própria

Pode-se constatar na Tabela 7, que todos os valores obtidos para as composições analisadas atenderam a NBR 13553 (ABNT, 2012), que estabelece o mínimo de 1 MPa, para materiais empregados na construção de paredes de solo-cimento sem fins estruturais. De modo geral, as composições do ponto médio também apresentaram resultados expressivos e acima das normas citadas anteriormente.

As composições com 12% de cimento apresentaram maior resistência à compressão. Sabe-se que um maior teor de aglomerante é responsável por uma maior formação de compostos cimentícios hidratados, que estão diretamente ligados ao ganho de resistência mecânica. Ao compararmos as amostras com manipueira, com os corpos de prova com água, na mesma proporção de ligante, 6% e 12%, os tijolos com manipueira apesar de obterem resultados médios maiores em todas as idades analisadas, ao considerarmos o desvio padrão, é possível perceber que os resultados apresentados são semelhantes. A Figura 11 exibe o gráfico que permite uma melhor comparação dos resultados de resistência à compressão obtidos para os experimentos.

Figura 11 – Resistência à compressão



Legenda:		
1: 6C0M – 7 dias;	4: 12C100M – 7 dias;	8: 12C100M – 49 dias;
2: 6C100M – 7 dias;	5: 6C0M; – 49 dias;	9: 9C50M – 28 dias;
3: 12C0M – 7 dias;	6: 6C100M – 49 dias;	10: 9C50M – 28 dias;
	7: 12C0M – 49 dias;	11: 9C50M – 28 dias.

Fonte: Autoria própria

Apesar de a manipueira apresentar um baixo pH (4,5), sendo considerado ácido, em trabalho realizado na área agrônômica, Barreto et al. (2013), afirmam que o uso de manipueira no solo aumenta o pH devido ao seu alto teor de cátions, o que também proporciona um aumento da capacidade de troca catiônica do solo. No mesmo trabalho, os autores verificaram que a manipueira também proporcionou um incremento do cálcio trocável. Correlacionando com a engenharia civil, fenômenos semelhantes são observados quando se usa cal na estabilização de solos, de acordo com Vizcarra (2010), quando se utiliza a cal no solo o pH e a quantidade de cátions de cálcio livres aumenta. Os cátions de cálcio podem substituir outros cátions dentro dos complexos de troca catiônica que o correm no solo. O autor afirma ainda que o processo de troca catiônica é parcialmente responsável pela aglomeração e floculação de partículas de solos que são tratados com cal, e nesta pesquisa o mesmo fenômeno foi observado durante a preparação das misturas evidenciando a característica ligante da manipueira. Vale ressaltar que a manipueira não prejudicou o processo de hidratação do cimento. Logo, a substituição da água pelo efluente na fabricação dos tijolos, é totalmente viável, o que confere à manipueira um destino ambientalmente correto e ao mesmo

tempo permite que a água possa ser utilizada para fins mais nobres como o consumo humano e agropecuário.

Um estudo estatístico foi realizado com as respostas obtidas para o planejamento experimental estudado. Uma tabela ANOVA (Tabela 8) foi gerada permitindo a análise da significância dos fatores analisados sobre a variável resposta, considerando uma probabilidade estatística (p) menor que 0,05, dentro de um intervalo de confiança de 95% e um F tabelado de 18,51 para o mesmo intervalo de confiança.

Tabela 8 – ANOVA do planejamento exp. para a resistência à compressão

Fatores	Efeito estimando, R ² = 0,92288				
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F-calculado	p-valor
(1) Manipueira	0,03511	1	0,03511	1053,4	0,000948
(2) Cimento	10,60301	1	10,60301	318090,4	0,000003
(3) Tempo	0,57781	1	0,57781	17334,4	0,000058
(1) x (2)	0,00211	1	0,00211	63,4	0,015415
(1) x (3)	0,01201	1	0,01201	360,4	0,002763
(2) x (3)	0,04351	1	0,04351	1305,4	0,000765
(1) x (2) x (3)	0,00001	1	0,00001	0,4	0,602640
Falta de ajuste	0,94202	1	0,94202	28260,6	0,000035
Erro puro	0,00007	2	0,00003		
Soma total	12,21567	10			
F _{0,95; 1; 2} = 18,51					

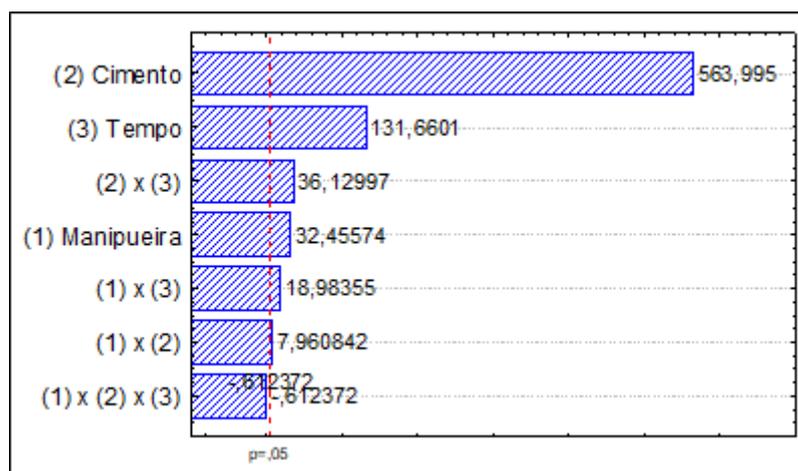
Fonte: Autoria própria

O coeficiente de correlação (R²) estimado foi equivalente a 0,92288, indicando que o modelo explicou aproximadamente 92,3% da variação dos dados obtidos, porém, a falta de ajuste foi considerada significativa, dessa maneira apesar de o modelo apresentar fatores significativos, esse não é preditivo para a faixa dos parâmetros testados, logo, não é possível gerar um modelo para a resposta resistência à compressão. Os fatores que apresentaram efeito significativo sobre a variável resposta com F-calculado > 18,51 e p-valor < 0,05, foram a manipueira, o cimento, o tempo, manipueira/cimento, manipueira/tempo e cimento/tempo que estão em destaque na Tabela 8.

No diagrama de Pareto apresentado na Figura 12, é possível observar, quais os fatores que apresentam ou não efeito significativo sobre a variável

resposta, sobre uma diferente perspectiva. É possível notar em ordem decrescente quais fatores mais influenciam a variável resposta, visto que o fator mais significativo é o cimento, seguido da sua interação com o tempo. Pode-se perceber ainda que a interação manipueira/cimento/tempo não influencia a variável resposta.

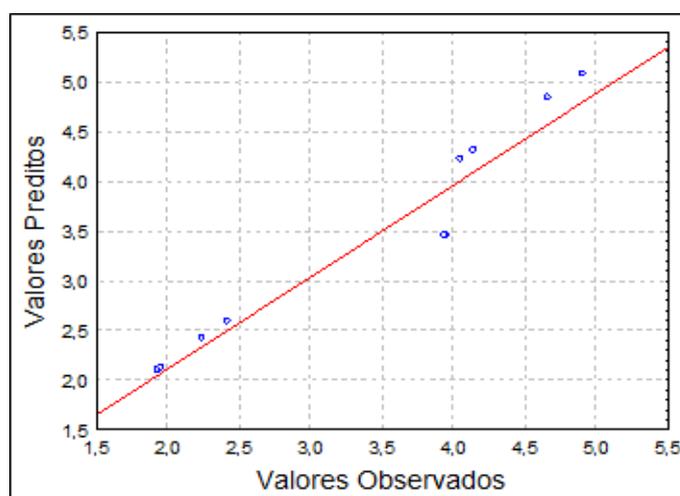
Figura 12 – Diagrama de Pareto para a resistência à compressão



Fonte: Autoria própria

A Figura 13 exibe o gráfico que relaciona os valores observados (experimentais) e os valores preditos (modelo). No gráfico, é possível visualizar as distorções produzidas entre o modelo e os dados experimentais, permitindo verificar os desvios existentes entre os dois valores.

Figura 13 – Valores observados e preditos para a resistência à compressão



Fonte: Autoria própria

Os valores do modelo (preditos) apresentam desvios em relação aos valores experimentais (observados) ao se considerar o modelo linear testado para a resistência à compressão. Logo, como mencionado anteriormente a equação do modelo gerado não é preditiva. Contudo, há uma certa ordenação dos valores apresentados e por essa razão uma nova tabela ANOVA foi gerada (Tabela 9), desta vez para verificar a existência de curvatura do modelo e assim determinar se há a necessidade de pontos axiais adicionais para tornar o modelo preditivo.

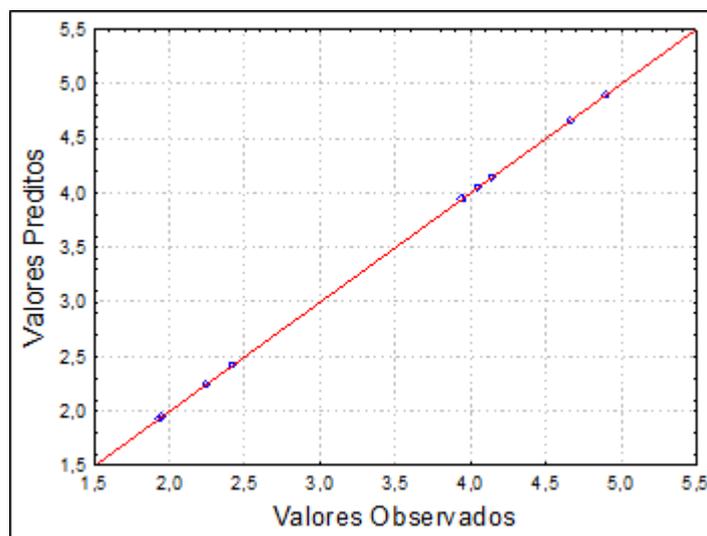
Tabela 9 – ANOVA do planejamento exp. para a resistência à compressão com curvatura

Efeito estimando, R² = 0,99999					
Fatores	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F-calculado	p-valor
Curvatura	0,94202	1	0,94202	28260,6	0,000035
(1) Manipueira	0,03511	1	0,03511	1053,4	0,000948
(2) Cimento	10,60301	1	10,60301	318090,4	0,000003
(3) Tempo	0,57781	1	0,57781	17334,4	0,000058
(1) x (2)	0,00211	1	0,00211	63,4	0,015415
(1) x (3)	0,01201	1	0,01201	360,4	0,002763
(2) x (3)	0,04351	1	0,04351	1305,4	0,000765
(1) x (2) x (3)	0,00001	1	0,00001	0,4	0,602640
Erro puro	0,00007	2	0,00003		
Soma total	12,21567	10			
F_{0,95; 1; 2} = 18,51					

Fonte: Autoria própria

A curvatura aparece em destaque e é apresentada como um fator significativo. Foi constatado ainda, que o coeficiente de correlação (R²) estimado foi equivalente a 0,99999, indicando que o modelo explicou 99,9% da variação dos dados obtidos, sendo melhor que o coeficiente de correlação estimado para o modelo sem curvatura. Por estar perto dos 100% o modelo com curvatura obtido para o planejamento experimental testado é considerado significativo e predito. A Figura 14 exibe o novo gráfico que relaciona os valores observados (experimentais) e os valores preditos (modelo).

Figura 14 – Valores observados e preditos para a resistência à compressão com curvatura



Fonte: Autoria própria

No novo gráfico, os valores preditos (modelo) praticamente não apresentam desvios em relação aos valores observados (experimentais), considerando o novo modelo com curvatura, testado para a resistência à compressão. Portanto, a equação do novo modelo gerado seria significativa e preditiva, e esse poderia ser considerado confiável para o intervalo dos fatores testados. No entanto, seria necessário a realização de mais quatro ensaios em pontos axiais para validar o novo modelo quadrático.

4.2.2 Absorção de água

Como descrito na metodologia os ensaios de absorção de água foram realizados seguindo um planejamento de experimento fatorial completo 2^2 , com 3 repetições no ponto central. As variáveis independentes foram a manipueira, considerando a porcentagem de substituição à água e o teor de cimento. A variável dependente avaliada como resposta obtida foi à média da absorção de água dos tijolos. A Tabela 10 exhibe a matriz do planejamento experimental.

Tabela 10 – Matriz do planejamento experimental da absorção de água

Exp	Nomenclaturas	M	C	Absorção (%)	Ordem de execução
1	6C0M	0	6	15,42 ± 0,06	(2)
2	6C100M	100	6	14,94 ± 0,21	(7)
3	12C0M	0	12	13,83 ± 0,24	(3)
4	12C100M	100	12	13,45 ± 0,38	(1)
5	9C50M	50	9	14,61 ± 0,23	(4)
6	9C50M	50	9	15,20 ± 0,65	(6)
7	9C50M	50	9	17,70 ± 0,86	(5)

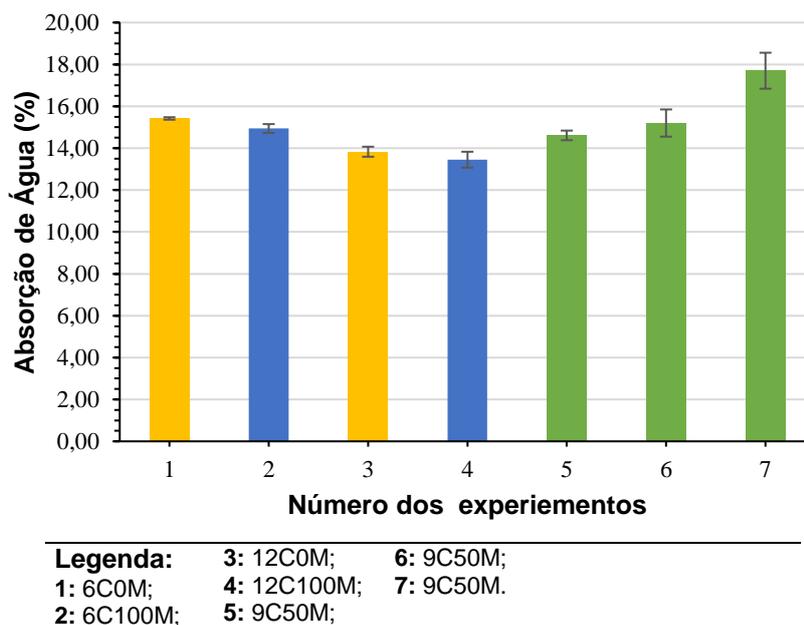
Legenda:

M: Manipueira; **C:** Cimento; **6C0M:** 6% de cimento e 0% de substituição da água por manipueira; **12C0M:** 12% de cimento e 0% de substituição da água por manipueira; **6C100M:** 6% de cimento e 100% de substituição da água por manipueira; **12C100M:** 12% de cimento e 100% de substituição da água por manipueira; **9C50M:** 9% de cimento e 50% de substituição da água por manipueira.

Fonte: Autoria própria

Os resultados demonstram que todas as composições estudadas apresentaram valores de absorção de água abaixo dos 20%, estabelecido como limite máximo para formulações de solo-cimento pela norma NBR 8491 (ABNT, 2012). Em um estudo que também utilizou resíduos agroindustriais em formulações de solo-cimento, Ferreira e Cunha (2017), em comparação com esta pesquisa, também obtiveram valores de absorção de água abaixo dos 20%. Por outro lado, na pesquisa realizada por Siqueira e Holanda (2013), com resíduo agroindustrial, nem todas as formulações atenderam o limite de 20%. Os menores teores de absorção de água foram apresentados pelas composições com 12% de cimento, isso devido o maior teor de ligante, proporcionar mais reações cimentícias, deixando as composições mais densas e com o tamanho dos poros reduzido. Os resultados exibidos podem ser correlacionados com o ensaio de resistência à compressão, uma vez que quanto maiores às resistências apresentadas, menores os teores de absorção de água. Quando comparamos as formulações com manipueira, apesar de exibirem uma menor absorção média de água, ao se considerar o desvio padrão os resultados são semelhantes, o que indica que o uso do resíduo não prejudicou essa propriedade. Para uma melhor visualização dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água, um gráfico com os valores de absorção é apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Absorção de Água



Fonte: Autoria própria

Assim como no ensaio de resistência à compressão, um estudo estatístico foi realizado com as respostas obtidas para o planejamento experimental estudado. Uma tabela ANOVA (Tabela 11) foi gerada permitindo a análise da significância dos fatores analisados sobre a variável resposta, considerando uma probabilidade estatística (p) menor que 0,05, dentro de um intervalo de confiança de 95% e um F tabelado de 18,51 para o mesmo intervalo de confiança.

Tabela 11 – ANOVA do planejamento exp. para a absorção de água

Fatores	Efeito estimando, R ² = 0,22388				p-valor
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F-calculado	
(1) Manipueira	0,18490	1	0,18490	0,1	0,817754
(2) Cimento	2,37160	1	2,37160	0,9	0,446946
(1) x (2)	0,00250	1	0,00250	0,0	0,978453
Falta de ajuste	3,48922	1	3,48922	1,3	0,372851
Erro puro	5,38207	2	2,69103		
Soma total	11,43029	6			

F_{0,95; 1; 2} = 18,51

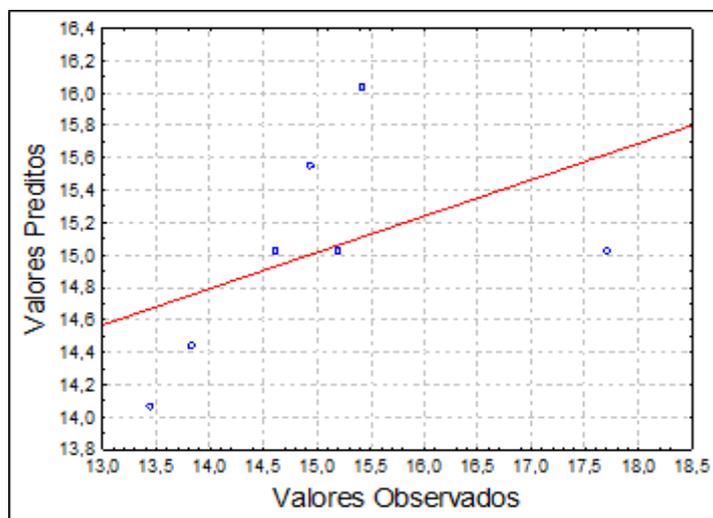
Fonte: Autoria própria

Para a ANOVA apresentada, o coeficiente de correlação (R²) estimado, foi equivalente a 0,22388, indicando que o modelo explicou aproximadamente

22,4% da variação dos dados obtidos. Além de apresentar um coeficiente de correlação distante da unidade, o modelo não apresentou nenhum fator significativo para a variável resposta estudada, pois, nenhum fator apresentou $F_{\text{calculado}} > 18,51$ e $p\text{-valor} < 0,05$, mostrando que não é preditivo para a faixa dos parâmetros testados, portanto, não é possível gerar um modelo para a resposta absorção de água. Para verificar a curvatura do modelo e para tentar melhorar o modelo gerado, uma nova tabela ANOVA havia sido gerada. Nessa o coeficiente de correlação foi melhorado passando a apresentar 0,52914, explicando aproximadamente 52,9% da variação dos dados, no entanto, o valor ainda continua distante da unidade e os fatores continuaram sem apresentar influência na absorção de água, o que indica que o modelo é insatisfatório para a resposta absorção de água.

Na Figura 16, é possível constatar que os valores do modelo (preditos), apresentam grandes desvios em relação aos valores experimentais (observados) ao se considerar o modelo linear testado para a resistência à absorção de água.

Figura 16 – Valores observados e preditos para a absorção de água



Fonte: Autoria própria

Dessa forma, como mencionado anteriormente a equação do modelo gerado não é preditiva. Assim, não pode ser utilizada para prever resultados para a variável absorção de água.

4.2.3 Durabilidade modificado

Assim como o ensaio de absorção de água, o ensaio de durabilidade modificado também foi realizado seguindo um planejamento de experimento fatorial completo 2^2 , com 3 repetições no ponto central. As variáveis independentes foram a manipueira, considerando a porcentagem de substituição a água e o teor de cimento. A variável dependente avaliada como resposta obtida foi a média da perda de massa dos tijolos. A matriz do planejamento experimental é exibida na Tabela 12.

Tabela 12 – Matriz do planejamento experimental da perda de massa

Exp	Nomenclaturas	M	C	Perda de massa (%)	Ordem de execução
1	6C0M	0	6	0,67 ± 0,02	(2)
2	6C100M	100	6	0,40 ± 0,02	(7)
3	12C0M	0	12	0,73 ± 0,05	(3)
4	12C100M	100	12	0,53 ± 0,07	(1)
5	9C50M	50	9	0,49 ± 0,03	(4)
6	9C50M	50	9	0,50 ± 0,03	(6)
7	9C50M	50	9	0,46 ± 0,12	(5)

Legenda:

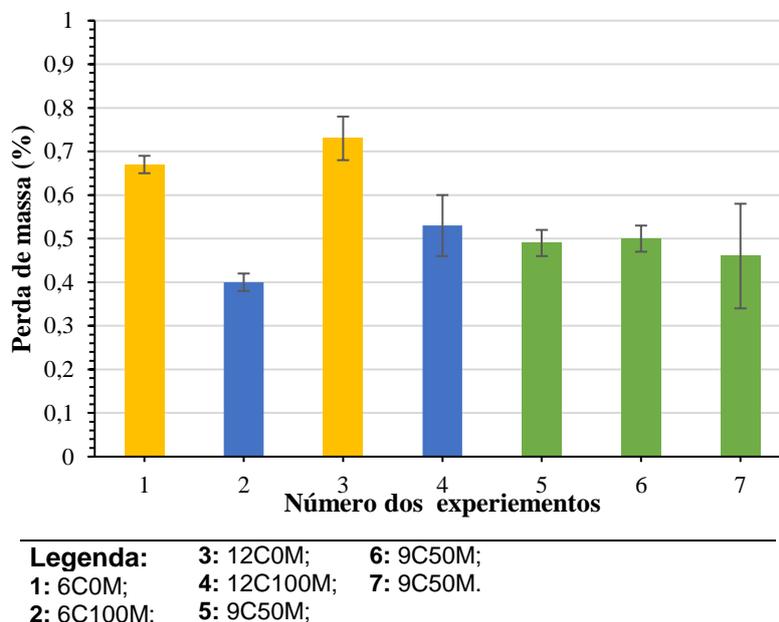
M: Manipueira; **C:** Cimento; **6C0M:** 6% de cimento e 0% de substituição da água por manipueira; **12C0M:** 12% de cimento e 0% de substituição da água por manipueira; **6C100M:** 6% de cimento e 100% de substituição da água por manipueira; **12C100M:** 12% de cimento e 100% de substituição da água por manipueira; **9C50M:** 9% de cimento e 50% de substituição da água por manipueira.

Fonte: Autoria própria

Os resultados de perda de massa após os tijolos serem submetidos ao ensaio de Durabilidade modificado permitem constatar que os valores de perda de massa ficaram bem abaixo do limite máximo de 10% estabelecido pela NBR 13553 (ABNT, 2012), para os solos do tipo A-4. Os baixos valores de perda de massa, podem estar relacionados de maneira geral a prensagem do solo, na qual por meio da compactação se proporciona a estabilização mecânica e, ainda podem ter ligação com as reações cimentícias da estabilização química, constatado também na pesquisa de Silva et al. (2014). Os resultados obtidos neste estudo, ao serem comparados com os obtidos na pesquisa realizada por Siqueira et al. (2016), na qual se utilizou resíduos sólidos industriais em formulações de solo-cimento, se mostram inferiores aos aferidos pelos autores. É importante frisar, que os tijolos com manipueira apresentaram menor perda

de massa quando comparados aos que continham água na formulação (Figura 17), tendo estas amostras, provavelmente uma estrutura mais densa.

Figura 17 – Perda de massa



Fonte: Autoria própria

No ensaio de Durabilidade modificado um estudo estatístico também foi realizado com as respostas obtidas para o planejamento experimental estudado. A tabela ANOVA (Tabela 13) gerada, que permite a análise da significância dos fatores analisados sobre a variável resposta, leva em consideração uma probabilidade estatística (p) menor que 0,05, dentro de um intervalo de confiança de 95% e um F tabelado de 18,51 para o mesmo intervalo de confiança.

Tabela 13 – ANOVA do planejamento exp. para a perda de massa

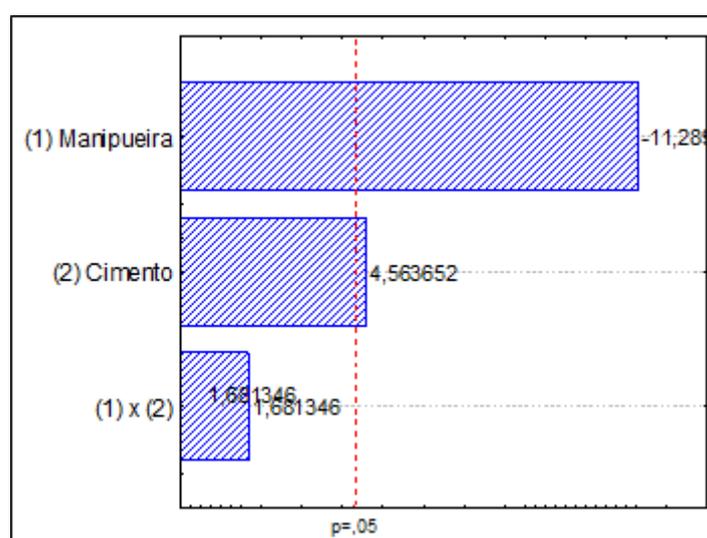
Efeito estimando, $R^2 = 0,78696$					
Fatores	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F-calculado	p-valor
(1) Manipueira	0,05523	1	0,05523	127,4	0,007756
(2) Cimento	0,00903	1	0,00903	20,8	0,044812
(1) x (2)	0,00123	1	0,00123	2,8	0,234717
Falta de ajuste	0,01686	1	0,01686	38,9	0,024754
Erro puro	0,00087	2	0,00043		
Soma total	0,08320	6			
F _{0,95; 1; 2} = 18,51					

Fonte: Autoria própria

Para os resultados de perda de massa o coeficiente de correlação (R^2) estimado, foi equivalente a 0,78696, indicando que o modelo explicou aproximadamente 78,7% da variação dos dados obtidos, porém, assim como na análise estatística da resistência à compressão, a falta de ajuste foi considerada significativa, por isso, apesar de o modelo também apresentar fatores significativos, esse não é preditivo para a faixa dos parâmetros testados, impossibilitando a geração do modelo para a resposta perda de massa. A manipueira e o cimento foram os fatores que apresentaram efeito significativo sobre a variável resposta, pois, apresentaram $F\text{-calculado} > 18,51$ e $p\text{-valor} < 0,05$, e estão em destaque na Tabela 13.

A Figura 18 apresenta o diagrama de Pareto para a perda de massa. Os fatores que apresentam ou não efeito significativo sobre a variável resposta, podem ser observados sobre uma perspectiva diferente. Assim como no diagrama de Pareto apresentado para a resposta resistência à compressão, é possível notar em ordem decrescente quais fatores mais influenciam a variável resposta, no entanto, ao contrário do observado na resposta resistência à compressão, o cimento aparece como o segundo fator mais significativo na resposta perda de massa, e a manipueira fica em primeiro lugar, sendo o fator que mais influência na resposta analisada. Pode-se perceber ainda que a interação do fator manipueira/cimento, não influencia a variável resposta.

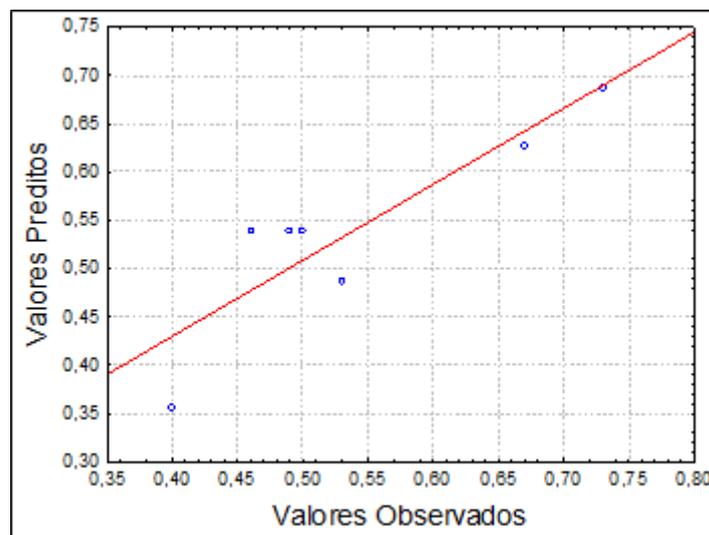
Figura 18 – Diagrama de Pareto para a perda de massa



Fonte: Autoria própria

É possível verificar na Figura 19 que os valores do modelo (preditos), apresentam desvios consideráveis em relação aos valores experimentais (observados), levando em consideração o modelo linear testado para a perda de massa. Portanto, a equação do modelo gerado não é preditiva.

Figura 19 – Valores observados e preditos para a perda de massa



Fonte: Autoria própria

Para verificar a existência de curvatura no modelo e se novos pontos axiais são necessários para tornar o modelo preditivo, uma nova tabela ANOVA foi gerada. Os resultados desta nova análise são exibidos na Tabela 14.

Tabela 14 – ANOVA do planejamento exp. para a perda de massa com curvatura

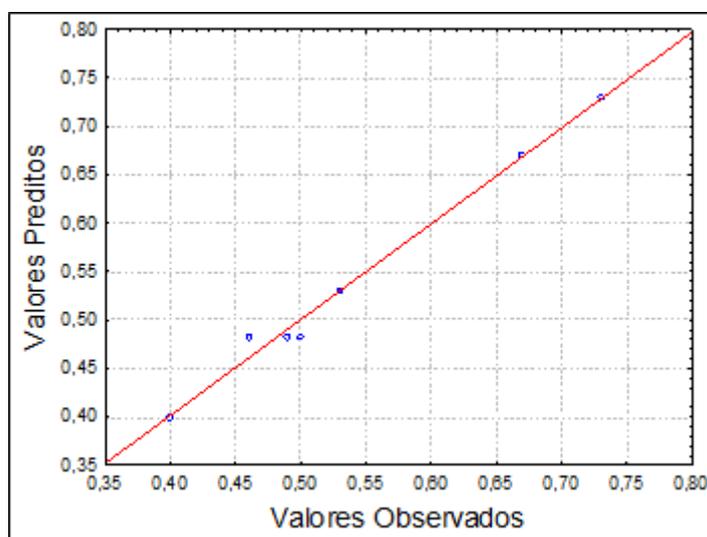
Fatores	Efeito estimando, $R^2 = 0,98958$				p-valor
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F-calculado	
Curvatura	0,01686	1	0,01686	38,9	0,024754
(1) Manipueira	0,05523	1	0,05523	127,4	0,007756
(2) Cimento	0,00903	1	0,00903	20,8	0,044812
(1) x (2)	0,00123	1	0,00123	2,8	0,234717
Erro puro	0,00087	2	0,00043		
Soma total	0,08320	6			
$F_{0,95; 1; 2} = 18,51$					

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar que assim como na resposta resistência à compressão, a curvatura é apresentada em destaque como um fator

significativo. Foi verificado ainda, que o coeficiente de correlação (R^2) estimado foi equivalente a 0,98958, indicando que o modelo explicou aproximadamente 98,9% da variação dos dados obtidos, apresentando melhora em relação ao coeficiente de correlação estimado para o modelo sem curvatura. Como está perto dos 100% o modelo com curvatura para o planejamento experimental testado pode ser considerado significativo e predito. Na Figura 20, o novo gráfico que relaciona os valores observados (experimentais) e os valores preditos (modelo) é exibido.

Figura 20 – Valores observados e preditos para a perda de massa com curvatura



Fonte: Autoria própria

No novo gráfico, os valores preditos (modelo) apresentam desvios bem menores em relação aos valores observados (experimentais), quando comparado com o gráfico anterior exibido na Figura 19. Desse modo, a equação do novo modelo gerado seria significativa e preditiva, logo, para o intervalo dos fatores testados esse poderia ser considerado confiável. Contudo, a realização de mais quatro ensaios em pontos axiais se faz necessária para validar o novo modelo quadrático.

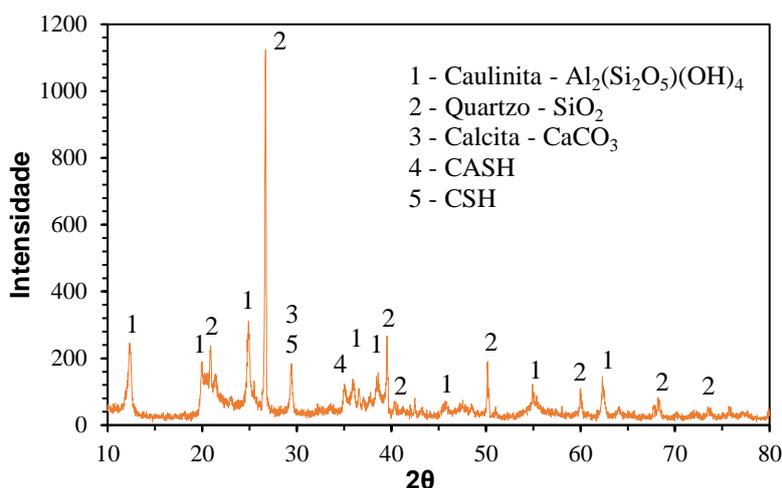
4.2.4 Análise mineralógica das composições de solo cimento

As composições que apresentaram os melhores resultados nos ensaios de resistência à compressão foram submetidas a ensaio de difração de raios-X. As amostras selecionadas foram as com 12% de cimento aos 49 dias com e

sem manipueira e o ponto central com 9% de cimento e 50% de manipueira em substituição a água aos 28 dias, que possuem as seguintes nomenclaturas 12C0M, 12C100M e 9C50M.

A difração de raios-X da amostra com 12% de cimento sem manipueira é exibida na Figura 21. Destaca-se a predominância do argilomineral caulinita e do quartzo predominantes no solo. A fase calcita encontrada, pode ser justificada pelo alto teor de cálcio apresentado na composição do cimento, que ao entrar em contato com o ar passa por processo de carbonatação. Também foram encontrados CSH e CASH que são fases resultantes do processo de hidratação do cimento. Sabe-se que as fases cimentícias encontradas contribuem para o ganho de resistência mecânica. O CSH foi encontrado na composição $\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_2$, conhecida como Clinotobermorite, que também foi encontrada por Braz et al. (2018), quando utilizaram resíduos da reciclagem de alumínio, cinza do bagaço de cana e zeólita em argamassas. O CASH foi encontrado com a composição $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2)(\text{H}_2\text{O})$, denominada Lawsonite, também encontrada por Kupwade-Patil et al. (2016), ao estudarem a microestrutura de pastas de cimento com a utilização de cinzas vulcânicas pozolânicas.

Figura 21 – DRX da formulação 12C0M aos 49 dias

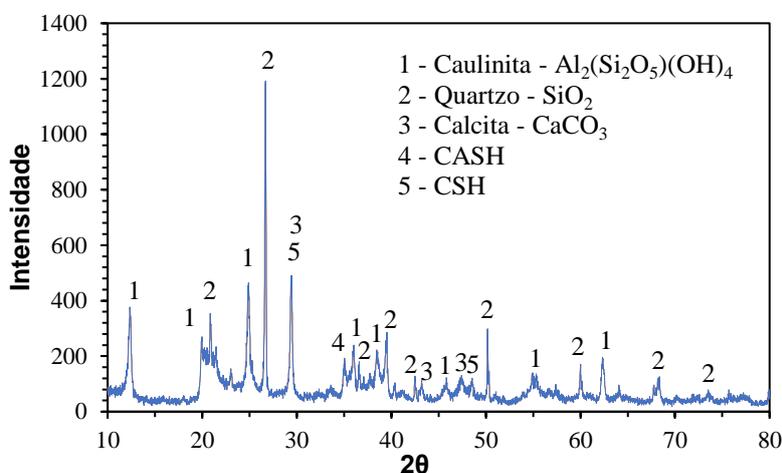


Fonte: Autoria própria

Pode-se perceber ainda, que a fase de CSH aparece juntamente com a fase calcita em aproximadamente $20,46^\circ 2\theta$. Isso é devido a uma sobreposição de picos nessa região.

A Figura 22 exibe a difração de raios-X da composição com 12% de cimento e 100% de manipueira em substituição à água. Foram encontradas as mesmas fases presentes na formulação sem manipueira, no entanto um novo pico de CSH aparece na posição $48,55^{\circ}2\theta$. A caulinita e o quartzo ainda predominam na difração, devido ao fato de o solo ser utilizado em maior proporção nas formulações. Outro fator notório é que mais picos aparentam ser mais intensos, e conseqüentemente mais picos foram identificados na formulação com manipueira quando comparada a formulação que utilizou apenas água, o que pode indicar uma maior cristalinidade da amostra.

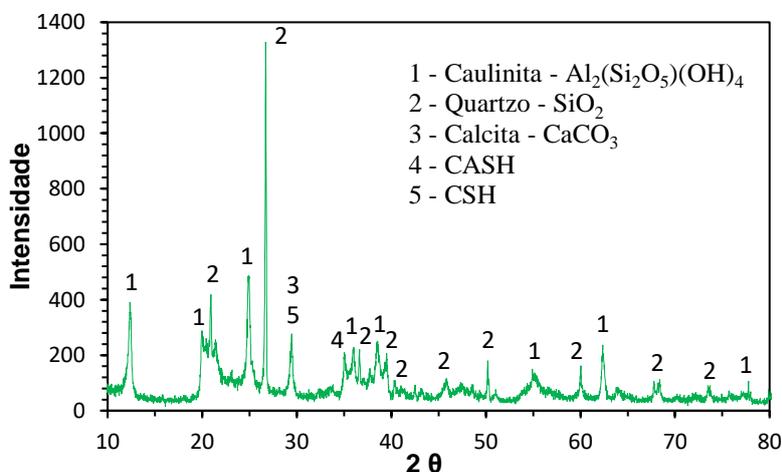
Figura 22 – DRX da formulação 12C100M aos 49 dias



Fonte: Autoria própria

Na Figura 23, é apresentada a difração de raios-X da composição com 9% de cimento e 50% de manipueira em substituição à água.

Figura 23 – DRX da formulação 9C50M aos 28 dias



Fonte: Autoria própria

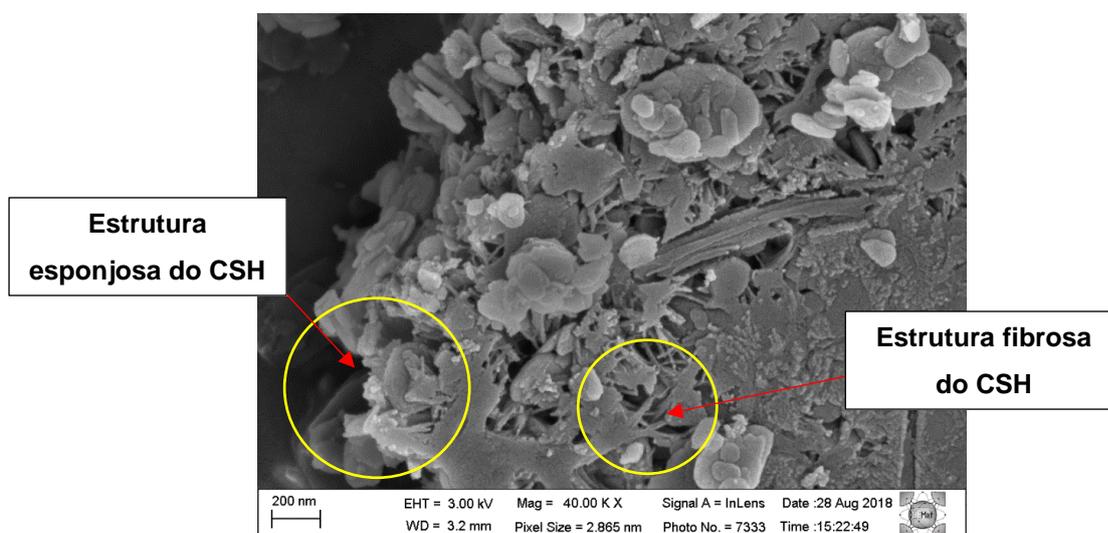
As fases presentes na formulação continuam sendo as encontradas anteriormente nas difrações exibidas. Assim como na mistura que utilizou apenas água, apenas um pico de CSH foi identificado, e de modo semelhante à amostra em que 100% da água foi substituída por manipueira, mais picos foram identificados.

4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das composições de solo cimento

Assim como no ensaio de difração de raios-X, as composições que apresentaram os melhores resultados nos ensaios de resistência à compressão foram submetidas a ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Sendo utilizadas as amostras com as mesmas idades e nomenclaturas do ensaio de difração de raios-X 12C0M, 12C100M e 9C50M.

O MEV da formulação com 12% de cimento sem manipueira é exibido na Figura 24. Além de partículas de quartzo típicas do solo laterítico utilizado, podem ser vistas algumas formações esponjosas características do CSH. Formações semelhantes foram apresentadas no trabalho de Braz et al. (2018) para o CSH. Algumas estruturas fibrosas também podem ser vistas nas formulações. De acordo com Fonsêca (2018), essas estruturas podem estar relacionadas ao CSH e possivelmente contribuem com o ganho de resistência mecânica.

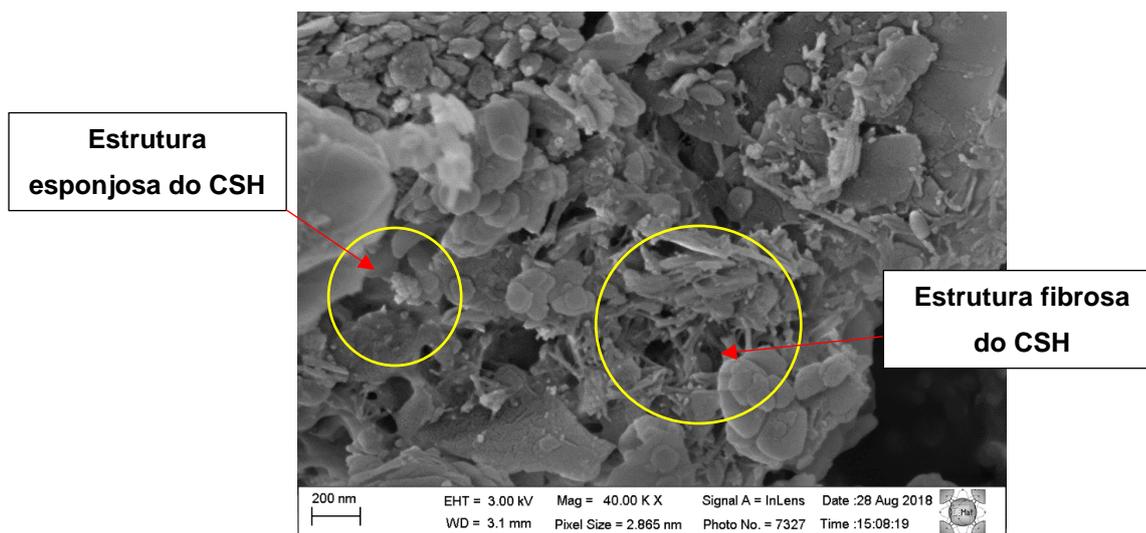
Figura 24 – MEV da formulação 12C0M aos 49 dias



Fonte: Autoria própria

A micrografia da Figura 25 mostra a microestrutura da amostra que utilizou 100% de manipueira em substituição a água. As mesmas estruturas esponjosas e fibrosas, características do CSH são observadas, o que mostra que a manipueira não prejudicou o processo de hidratação do cimento, em concordância com os ensaios técnicos apresentados anteriormente.

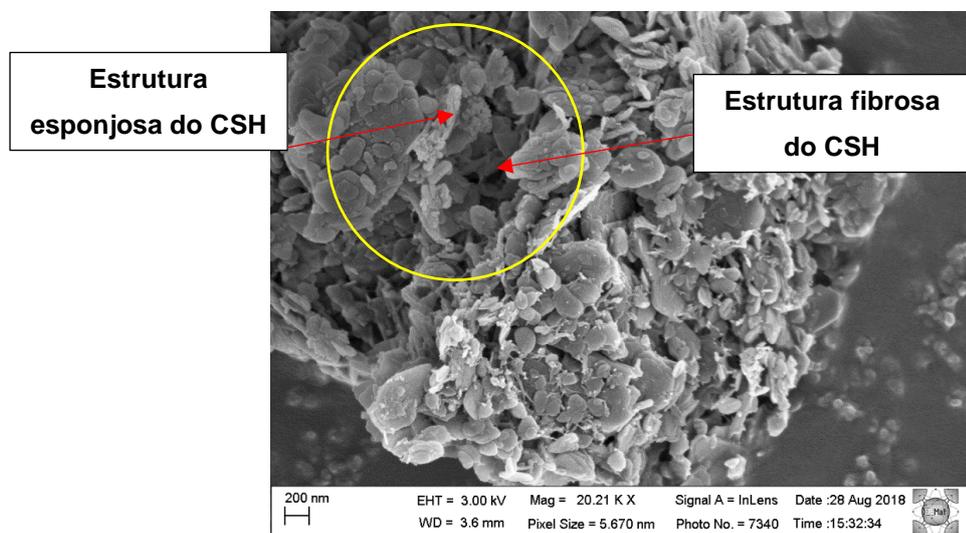
Figura 25 – MEV da formulação 12C100M aos 49 dias



Fonte: Autoria própria

Na Figura 26, o MEV da composição com 9% de cimento e com 50% de manipueira é apresentado. As formações de estruturas esponjosas e fibrosas que indicam a presença de CSH continuam aparecendo, o que justifica o ganho de resistência da amostra.

Figura 26 – MEV da formulação 9C50M aos 28 dias



Fonte: Autoria própria

De modo geral, todas as amostras, apresentaram estruturas que indicam a presença de CSH, principal responsável pelo ganho de resistência em materiais à base de cimento. O CSH também preenche espaços vazios, ao mesmo tempo que se liga as partículas do solo, contribuindo para os baixos valores de absorção de água e perda de massa.

CAPÍTULO 5

Conclusão

- Na caracterização dos materiais, o solo utilizado atendeu aos parâmetros requeridos para utilização em formulações de solo-cimento. Além disso, apresentou elevado teor de sílica e alumina em sua composição química. O cimento apresentou uma expressiva quantidade de cálcio e a manipueira, significativos teores de potássio e cálcio.
- A manipueira apresentou comportamento semelhante a cal durante a preparação das misturas, fazendo com que o material apresentasse uma maior formação de flocos.
- Apesar dos bons resultados obtidos, no planejamento experimental, os modelos não foram considerados preditivos, e desse modo não podem gerar equações úteis para previsão de resultados das propriedades técnicas estudadas.
- No ensaio de resistência à compressão, todos os tijolos apresentaram resistência superior a requerida pela NBR 13553 (ABNT, 2012), que requer 1MPa para o solo cimento utilizado em alvenarias sem fins estruturais. Aos 7 dias apenas os tijolos com 6% de cimento não atenderam o limite mínimo de 2MPa, estabelecido pela NBR 8491 (ABNT, 2012), para tijolos de solo cimento.
- Todas as formulações ficaram abaixo dos 20% de absorção de água estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012).
- Os tijolos utilizados no ensaio de Durabilidade modificado apresentaram perda de massa inferior aos 10% estabelecidos com limite máximo para os solos do tipo A-4. A perda de massa ficou abaixo de 1% para todas as formulações.
- Ao comparar os resultados obtidos pelos tijolos de solo-cimento com manipueira com os que utilizaram água na mistura, os tijolos com manipueira apresentaram resultados semelhantes nos ensaios de

resistência à compressão e absorção de água e, menores perdas de massa no ensaio de durabilidade, o que comprova a viabilidade técnica da produção dos tijolos de solo-cimento com manipueira e a utilização desses em alvenarias sem fins estruturais.

- Do ponto de vista técnico a substituição da água por manipueira se mostra viável para produção de tijolos de solo-cimento, pois a manipueira não prejudica o processo de hidratação do cimento. Do ponto de vista ambiental, tem-se a grande vantagem da não utilização da água potável para fabricação dos tijolos, visto que a água pode ser totalmente substituída no processo.
- As limitações encontradas foram referentes ao tratamento prévio que deve ser realizado na manipueira para redução do teor de cianeto, com a exposição do efluente ao sol, sugerindo que em produções de longa escala devam-se construir tanques abertos para armazenamento do resíduo. A manipueira com o passar do tempo, começa a apresentar odor cada vez mais intenso, sendo necessária a utilização de máscaras para manuseio do líquido. No ensaio de difração de raios-X, não foi possível a identificação de fases mineralógicas, pois, devido ao alto teor de matéria orgânica, a amostra não apresenta picos cristalinos.

Sugestões para trabalhos futuros

- Para trabalhos futuros deve-se realizar um estudo químico para redução do odor gerado pela manipueira.
- Sugere-se que o conforto térmico de casas fabricadas com tijolos de solo-cimento com manipueira seja estudado.
- Sugere-se também que a qualidade do ar dentro dessas casas seja aferida, a fim de atestar que os tijolos não liberam nenhuma substância nociva aos habitantes de casas fabricadas com o tijolo.

Referências

ABIKO, A. K. **Estabilização de solos com cimentos pozolânicos de cinza da casca de arroz e de resíduos cerâmicos**. 1987.92f. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: EPUSP. São Paulo - SP, 1987.

ACCHAR, Wilson; MARQUES, Sheyla K.J. **Ecological Soil-Cement Bricks from Waste Materials**. [s.l.]: Springerbriefs In Applied Sciences and Technology, 2016. 64 p.

AMARAL, Mateus Carvalho et al. Soil–cement bricks incorporated with eggshell waste. **Proceedings of The Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management**, [s.l.], v. 166, n. 3, p.137-141, ago. 2013. Thomas Telford Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/warm.12.00024>.

ARAÚJO, N. C. de et al. Propriedades mecânicas de tijolos fabricados com solo e água residuária de mandioca. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal - PB, v. 10, n. 2, p.213-2017, 28 dez. 2015a. Grupo Verde de Agroecologia e Abelhas. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v10i2.3427>.

ARAÚJO, Narcísio Cabral de et al. Degradação térmica de tijolo fabricado com solo e manipueira. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria - RS, v. 16, n. 3, p.861-870, dez. 2015b.

ASHOUR, Taha et al. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 104, p.139-146, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.016>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Dosagem das Misturas de Solo-Cimento: Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio**. Estudo Técnico 35. 63p. São Paulo - SP: ABCP, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro - RJ, 2016.

_____. **NBR 7175: Cal hidratada para argamassas**. Rio de Janeiro - RJ, 2003.

_____. **NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro - RJ, 2016.

_____. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro - RJ, 2016.

_____. **NBR 8491: Tijolo de solo-cimento — Requisitos**. Rio de Janeiro - RJ, 2012.

_____. **NBR 8492:** Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro - RJ, 2012.

_____. **NBR 10833:** Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento. Rio de Janeiro - RJ, 2012.

_____. **NBR 12023:** Solo-cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro - RJ, 2012.

_____. **NBR 13554:** Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio. Rio de Janeiro - RJ, 2012.

AUBERT, J.E. et al. An earth block with a compressive strength higher than 45MPa! **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 47, p.366-369, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.068>.

AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de et al. Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 148, p.359-368, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.208>.

BARBOSA, N. P. S; GHAVAMI. K. Terra Crua para Edificações. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010, 2ª. Ed. v.2. Cap.25. p.1565 – 1598.

BARRETO, M.t.l. et al. Atributos químicos de dois solos submetidos à aplicação de manipueira. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal Of Agricultural Sciences**, [s.l.], v. 8, n. 4, p.528-534, 28 dez. 2013. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v8i4a2425>.

BEZERRA, Márcio Gleybson da Silva. **Água Residuária da Mandioca como Fertilizante Orgânico em Pasto de Brachiaria Brizantha CV. Marandu**. 2014. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Produção Animal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba-rn, 2014.

BLUCHER, E. **Mecânica dos solos para engenheiros rodoviários** – volume 1. São Paulo, (1951).

BORGHETTI, Ivo Alberto. **AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DA MICROALGA Chlorella minutissima EM MEIO DE CULTURA COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MANIPUEIRA**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pósgraduação em Engenharia de Bioprocessos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2009.

BORTOLIN, M.A. & CASSOL, L.C. **Determinação da matéria orgânica do solo usando peróxido de hidrogênio: Uma metodologia ecologicamente correta**. In: FERTBIO, Guarapari, 2010.

BÔSSO, Antônio Rafael de Souza Alves. **Desenvolvimento do Software PlanEx de Planejamento de Experimentos Online e sua Aplicação Didática**

na **Pós-Graduação**. 2012. 172 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Química, Instituto de Química, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

BOX, George E. P.; HUNTER, William G.; HUNTER, J. Stuart. **Statistics for Experimenters**. Estados Unidos: John Wiley e Sons, 1978.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Limite de tolerância. Portaria 3214 de 08 de junho de 1978 -**NR 15** - anexo 11.

BRAZ, Inara Guglielmetti et al. Effect of the Addition of Aluminum Recycling Waste on the Pozzolanic Activity of Sugarcane Bagasse Ash and Zeolite. **Waste And Biomass Valorization**, [s.l.], p.1-21, 28 maio 2018. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-018-0342-6>.

BRUNS, Roy Edward; FAIGLE, José Fernando Gregori. **Quimiometria**. Química Nova, Vol. 8, 84-99, 1985.

BURIOL, Telmo Luiz. **Caracterização de jazidas para construção de habitações populares, com solo-cimento, em Santa Maria**. 2002. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica**. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003. 260 p.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**, volume1. Editora LTC. 6ª edição. Rio de Janeiro, RJ, 2011.

CARVALHO, Júlio Cesar de et al. Biorefinery integration of microalgae production into cassava processing industry: Potential and perspectives. **Bioresource Technology**, [s.l.], p.1-8, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.213>.

CASTRO, Mário Andrean Macedo et al. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos de solo-cimento formulados com coprodutos siderúrgicos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 21, n. 3, p.666-676, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160003.0064>.

CASTRO, Sidcley Ferreira. **INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAULIM EM SOLO-CIMENTO PARA CONSTRUÇÕES CIVIS**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2008.

CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. THABA (1984). **Manual de construção com solo-cimento**. 3 ed.atual. São Paulo: CEPED/ BNH/ URBIS/ CONDER/ PMC/OEA/ CEBRACE/ ABCP. 147 p.

CHISTÉ, Renan Campos; COHEN, Kelly de Oliveira. **Estudo do processo de fabricação da farinha de mandioca**. Belém - PA: Embrapa Amazônia

Oriental, 2006. 75 p. (Documentos, 267). Disponível em:<
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/43362/1/Doc.267.pdf>>.
Acesso em 15 de mar de 2018.

DALLACORT, Rivanildo et al. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 6, n. 3, p.511-518, dez. 2002. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662002000300022>.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, RS, 2008.

DU, Bing; ZHOU, Chang-bo; DUAN, Ning. Recycling of electrolytic manganese solid waste in autoclaved bricks preparation in China. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [s.l.], v. 16, n. 2, p.258-269, 22 ago. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-013-0181-2>.

DUTRA, Sónia Vanessa Meneses. **ESTADO DA ARTE SOBRE A UTILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTIÇOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**. 2014. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civi, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2014.

EKO, Robert Medjo et al. Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 35, p.340-346, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.050>.

FAOSTAT. **Base de dados FAOSTAT, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação**, 2017. Roma, Itália: FAO. Disponível em: <
<http://faostat3.fao.org/home/E>>. Acesso em: 09 de nov. 2017.

FERREIRA, Márcia M. C.; TEÓFILO, Reinaldo F. **Quimiometria II: Planilhas Eletrônicas para Cálculos de Planejamentos Experimentais, Um Tutorial**. Química Nova, Vol. 29, nº 2, 338-350, 2006.

FERREIRA, Regis de C.; CUNHA, Ananda H. N. Quality evaluation of soil-cement-plant residue bricks by the combination of destructive and non-destructive tests. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 21, n. 8, p.543-549, ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n8p543-549>.

Fundação João Pinheiro – FJP. **Déficit habitacional aumenta com a recessão**. Belo Horizonte, MG. mar. 2017. Disponível em: <
<http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/fjp-na-midia/3785-1-3-2017-deficit-habitacional-aumenta-com-a-recessao>>. Acesso em: 09 de nov. 2017.

FONSÊCA, Nayara Jhêssica Marques da. **POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PELA CAL EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

GRANDE, Fernando Mazzeo. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem a adição de sílica ativa**. 2003. 165f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2003.

HIEN, P.G. et al. Closed Wastewater System in the Tapioca Industry in Vietnam. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 39, n. 5, p.89-96, mar. 1999.

IMANZADEH, S. et al. Formulating and optimizing the compressive strength of a raw earth concrete by mixture design. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 163, p.149-159, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.088>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Rio de Janeiro, RJ, v.30 n.1 p.1-81, jan. 2017. Disponível em:< [ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Fasciculo/lspa_201701.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/lspa_201701.pdf)>. Acesso em: 08 de nov. 2017.

KINUTHIA, J.M.; OTI, J.E. Designed non-fired clay mixes for sustainable and low carbon use. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 59-60, p.131-139, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2012.02.021>.

KUPWADE-PATIL, Kunal et al. Microstructure of cement paste with natural pozzolanic volcanic ash and Portland cement at different stages of curing. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 113, p.423-441, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.084>.

LEONEL, R. F. et al. Characterization of soil-cement bricks with incorporation of used foundry sand. **Cerâmica**, [s.l.], v. 63, n. 367, p.329-335, set. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633672131>.

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 2010. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2010.

LOPES, W. G. R. **Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas-SP, 2002.

MADEIRA, Jonni Guiller Ferreira et al. Ecological analysis of hydrogen production via biogas steam reforming from cassava flour processing wastewater. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 162, p.709-716, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.076>.

MARQUES, Sheyla Karolina Justino. **PRODUÇÃO DE TIJOLOS RESÍDUO-CIMENTO USANDO CASCALHO DE PERFURAÇÃO E CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**. 2015. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso do Programa de Pós-graduação do Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – Rn, 2015.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: **Microestrutura, propriedades e materiais**. 4. ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 669 p.

MIQUELEIZ, L. et al. Alumina filler waste as clay replacement material for unfired brick production. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 163, p.68-74, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.05.006>.

MIRANDA, Larissa de Almeida et al. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO GRITS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 35, n. 6, p.1335-1340, out. 2011.

MORAIS, Maria Lúcia. **Projeto incentiva o reaproveitamento da manipueira em cultivos agrícolas**. Universidade Federal do Oeste do Pará. 2016. Disponível em: < http://www.ufopa.edu.br/divulgacao_cientifica/projeto-incentiva-o-reaproveitamento-da-manipueira-em-cultivos-agricolas>. Acesso em: 15 mar. 2018.

ORTIGÃO, J. A. R.; **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007. 391 p.

OSHA. **Permissible Exposure Limits / OSHA Annotated Table Z-1**, 2018. Washington, EUA: OSHA. Disponível em: < <https://www.osha.gov/dsg/annotated-pels/tablez-1.html>>. Acesso em: 10 de mar. 2018.

OTI, J.E.; KINUTHIA, J.M.; BAI, J. Design thermal values for unfired clay bricks. **Materials & Design**, [s.l.], v. 31, n. 1, p.104-112, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.011>.

OTI, J.E.; KINUTHIA, J.M.; BAI, J. Engineering properties of unfired clay masonry bricks. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 107, n. 3-4, p.130-139, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.002>.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 5, p.832-838, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>.

PASCHOALIN FILHO, João Alexandre; STOROPOLI, João Henrique; DIAS, Antônio Jose Guerner. Evaluation of compressive strength and water absorption of soilcement bricks manufactured with addition of pet (polyethylene terephthalate) wastes. **Acta Scientiarum - Technology**, Maringá - PR, v. 38, n. 2, p.163-171, jun. 2016.

PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P.; ROMAN, H. R.; MOHAMAD, G. **Análise estatística aplicada a modelagem de misturas experimentais de argamassas para revestimento de blocos de concreto**. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2006). Florianópolis. 2006.

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 354 p.

PINTO, Eduardo da Silva. **Solo-Cimento Compactado: proposta de métodos de ensaio para dosagem e caracterização física e mecânica**. 2016. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru - Sp, 2016.

PONTE, J.J. Histórico das pesquisas sobre a utilização da manipueira: extrato líquido das raízes de mandioca como defensivo agrícola. **Fitopatol. Venezolana**, Macaray, v. 5, n. 2, p. 2-5, 1992.

RAHMAT, Mohamad Nidzam; ISMAIL, Norsalisma; KINUTHIA, John Mungai. Strength and environmental evaluation of stabilised Clay-PFA eco-friendly bricks. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 125, p.964-973, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.114>.

RIBAS, Maria Magdalena Ferreira; CEREDA, Marney Pascoli; BÔAS, Roberto Lyra Villas. Use of Cassava Wastewater Treated Anaerobically with Alkaline Agents as Fertilizer for Maize (*Zea mays* L.). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s.l.], v. 53, n. 1, p.55-62, fev. 2010.

SANTOS, Eliana Fernandes dos; PARREIRA, Alexandre Benetti. ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS APLICADAS AOS SOLOS TROPICAIS. In: 44ª RAPV – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO E 18º ENACOR – ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 2015, Foz do Iguaçu. **REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**. Foz do Iguaçu: Rapv, 2015. p. 1 - 12.

SANTOS, Jordana Dorca dos et al. Evaluation of the Combined Process of Coagulation/Flocculation and Microfiltration of Cassava Starch Wastewater: Removal Efficiency and Membrane Fouling. **Water, Air, & Soil Pollution**, [s.l.], v. 228, n. 7, p.228-238, 8 jun. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-017-3416-3>.

SECO, A. et al. Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests. **Construction and**

Building Materials, [s.l.], v. 131, p.600-605, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.107>.

SEGANTINI, Antonio Anderson da Silva; WADA, Patrycia Hanna. Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição. **Acta Scientiarum-technology**, Maringá - PR, v. 33, n. 2, p.179-183, 20 abr. 2011. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i2.9377>.

SHERWOOD, P. T., **Soil Stabilization with cement and lime: State of the Art Review**, HMSO, London, 1993.

SILVA, Frederico Fonseca et al. Desdobramento do amido em glicose para identificar água residuária de indústria de mandioca no perfil do solo. **Acta Science Agronomic.**, Maringá - PR, v. 27, n. 3, p.507-511, set. 2005.

SILVA, A. P. Seminário Nacional Sobre Manipueira, 1., 2008 Vitoria da Conquista, **Aproveitamento sustentável da manipueira**, Vitoria da Conquista, BA, 2008. Disponível em: <http://www.emater.pi.gov.br/download/200812/EMATER01_718d0905eb.docx>. Acesso em: 09 nov. 2017.

SILVA, Valdir Carneiro. **INTOXICAÇÃO EXPERIMENTAL POR RESÍDUO DE MANDIOCA (*Manihot esculenta Crantz*) (MANIPUEIRA) EM OVINOS**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência Animal nos Trópicos, Universidade Federal da Bahia, Salvador - Ba, 2016.

SILVA, V. M. **Estudo da potencialidade do resíduo cerâmico incorporado na produção de tijolos maciços de solo-aglomerante(s)**. 2013. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SILVA, Vamberto Monteiro da et al. Incorporation of ceramic waste into binary and ternary soil-cement formulations for the production of solid bricks. **Materials Research**, [s.l.], v. 17, n. 2, p.326-331, abr. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392014005000014>.

SIQUEIRA, F. B. et al. Influence of industrial solid waste addition on properties of soil-cement bricks. **Cerâmica**, [s.l.], v. 62, n. 363, p.237-241, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623631969>.

SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. Effect of incorporation of grits waste on the densification behavior of soil-cement bricks. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 360, p.414-419, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613601917>.

SIQUEIRA, F.B.; HOLANDA, J.N.F. Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 131, p.1-6, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.040>.

SOUZA, Márcia I. B.; SEGANTINI, Antonio A. S.; PEREIRA, Joelma A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 12, n. 2, p.205-212, set. 2008.

SUBRAMANIAPRASAD, C. K.; ABRAHAM, Benny Mathews; NAMBIAR, E. K. Kunhanandan. Influence of Embedded Waste-Plastic Fibers on the Improvement of the Tensile Strength of Stabilized Mud Masonry Blocks. **Journal of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 27, n. 7, p.04014203-1 a 04014203-7, jul. 2015. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001165](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001165).

TAKEDA, M. C. (2006). **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos do subleito de rodovias do interior paulista**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos - SP.

TOKARNIA, C.H. et al. Plantas tóxicas do Brasil para animais de produção. **Editora Helianthus**, Rio de Janeiro, p.443-459, 2012.

VARGAS, Milton. Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo: McGraw-Hill, 1977.

VILLAMIZAR, María Catalina Niño et al. Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 36, p.276-286, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.056>.

VILLIBOR, Douglas Fadul et al. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas**. 2. ed. São Paulo: Arte e Ciência, 2009. 193 p.

VINAI, R. et al. Coal combustion residues valorisation: Research and development on compressed brick production. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 40, p.1088-1096, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.096>.

VIZCARRA, Gino Omar Calderon. **APLICABILIDADE DE CINZAS DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO PARA BASE DE PAVIMENTOS**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.