



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –

ATIVAÇÃO ALCALINA DE BLOCOS DE TERRA CRUA

Por

Adriano da Silva Félix

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

**JOÃO PESSOA-PB
AGOSTO/2016**



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –

ATIVAÇÃO ALCALINA DE BLOCOS DE TERRA CRUA

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

Adriano da Silva Félix

Orientador: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa

JOÃO PESSOA-PB
AGOSTO/2016

F316a Félix, Adriano da Silva.
Ativação alcalina de blocos de terra crua / Adriano da Silva
Félix.- João Pessoa, 2016.
114f. : il.
Orientador: Normando Perazzo Barbosa
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
1. Engenharia civil e ambiental. 2. Adobe. 3. Ativação
alcalina. 4. Estabilização. 5. Construção em terra.

UFPB/BC

CDU: 624:711(043)

“ATIVÇÃO ALCALINA DE BLOCOS DE TERRA CRUA”

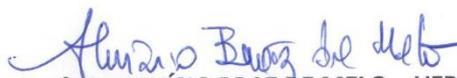
ADRIANO DA SILVA FÉLIX

Dissertação aprovada em 30 de agosto de 2016

Período Letivo: 2016.2



Prof. Dr. NORMANDO PERAZZO BARBOSA – UFPB
Orientador



Prof. Dr. ALUÍSIO BRAZ DE MELO – UFPB
Examinador Interno



Prof. Dr. ULISSES TARGINO BEZERRA – IFPB
Examinador Externo

João Pessoa/PB
2016

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha família, que sempre esteve comigo em todas as minhas decisões, a minha filha Sarah Cavalcante, razão pela qual luto todos os dias para me tornar uma pessoa melhor e a minha namorada e companheira Adriana dos Santos, que não mediu esforços para me ajudar nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

A minha FAMÍLIA, que sempre me deu todo apoio para seguir realizando meus sonhos, em especial minha mãe Nazaré, mulher essa que contribuiu bastante para minha formação pessoal e profissional.

Minha namorada Adriana dos Santos, uma pessoa maravilhosa que ao logo desse trabalho me ajudou e esteve comigo em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa, pelos ensinamentos, pela orientação e dedicação a esse trabalho, pelo exemplo de profissional e ser humano.

Ao Prof. Dr. Ulisses Targino Bezerra (IFPB), pela gentileza e apoio que foi dedicado a esse trabalho.

Aos Professores do PPGE CAM Dr. Aluísio Braz de Melo, Dr. Givanildo Alves de Azeredo e Dr. Gibson Rocha Meira pelos conhecimentos compartilhados durante todo o período do curso.

Aos meus companheiros de mestrado, que sempre foram prestativos e me incentivaram a continuar com meus estudos, em especial Pablo Raphael de Lacerda Ferreira, Carlos Maviasel de Carvalho, Bismark Oliveira de Queiroz, Mellyne Palmeira Medeiros, Leovegildo Douglas Pereira de Souza, José Jerônimo de Souza Nascimento e Rômulo Nery.

Aos alunos de Doutorado e colegas, Jesus Charles do Amaral Nogueira, Brunna Lima de Almeida Victor Medeiros e Cícero Marciano da Silva Santos pelo incentivo e ajuda que me foi dada durante todo esse tempo.

Aos alunos bolsistas Beatriz Lemos Cavalcante de Carvalho Santiago e Raimundo Gonçalves Ribeiro Neto, que contribuíram bastante para a realização deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais e Estruturas da UFPB nas pessoas de Delby, Sebastião, Ricardo, Zito, Cláudio Matias e Otoniel (O gato), pelo esforço e atenção que foi disponibilizado na utilização das dependências do laboratório.

Aos funcionários do Laboratório de Pavimentação e Geotecnia (LPAV) da Universidade Federal da Paraíba - UFPB que sempre estiveram à disposição para a realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) da Pós-Graduação de Química que tem a Professora Iêda Maria Garcia dos Santos como Coordenadora e que ajudou bastante na realização dos ensaios de DRX.

Ao Laboratório de Solidificação Rápida que tem como Coordenador Professor Severino Jackson Guedes Lima e o técnico de laboratório Meyson, que foram essenciais para a realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura.

“A Terra tem o suficiente para todas as nossas necessidades, mas somente o necessário.”

Mahatma Gandhi.

RESUMO

O adobe é um dos primeiros materiais de construção usado pelo homem e volta a ser procurado nos dias atuais, por ser um produto que menos gera impactos ambientais. Porém, esse material de grande potencial tem limitações em seu uso por ser susceptível a ação da água. Geralmente, para melhorar suas propriedades mecânicas e durabilidade se faz necessário o uso de estabilizantes químicos como a cal, e às vezes o cimento Portland. Porém como os adobes são feitos de solos argilosos, tais produtos, para serem efetivos, devem ser incorporados em relativamente grandes quantidades (6%, 8%, 10% ou mais) que acabam eliminando seu caráter sustentável. Neste trabalho pretende-se usar um novo método de estabilização química que é conhecida como ativação alcalina. As percentagens de ligante envolvidas baixam para 2% ou 3%. No processo, componentes mineralógicos, fontes de sílica e alumina reagem em um ambiente de elevada alcalinidade, formando um ligante alternativo com ótimas propriedades mecânicas. As fontes de sílica e alumina amorfas empregadas neste trabalho foram metacaulim e resíduos de cerâmica vermelha. Para fornecer alcalinidade necessária normalmente é utilizado silicato de sódio que tem custo financeiro elevado. Na pesquisa foram usadas diferentes soluções alcalinas desenvolvidas para substituírem o material industrializado. Os adobes foram produzidos e submetidos a cura em estufa, mas também foi testado um processo de cura em estufa solar. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais como: granulometria, fluorescência de raio-X (FRX), difração de raio-X (DRX) e medição do pH. Para mensurar a viabilidade dos adobes como material para alvenaria foram feitos ensaios de resistência à compressão simples, resistência a ação da água, perda de massa, absorção por imersão, perda de massa por erosão, caracterização química (DRX e FRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os adobes estabilizados com ativação alcalina mostraram desempenho satisfatório, e apresentaram resistências que variaram de 1,5 MPa a 6,1 MPa, conforme a composição. No tocante a durabilidade, os corpos de prova estabilizados alcalinamente tiveram melhor comportamento que os de referência e os estabilizados com cimento Portland. Desta forma, a estabilização alcalina se mostrou ser uma maneira moderna e prática para melhorar as propriedades dos milenares blocos de adobe.

PALAVRAS-CHAVE: adobe, ativação alcalina, estabilização, construção com terra

ABSTRACT

Adobe is one of the first building materials used by man and returns to be sought today because its low environmental impacts. However, traditional adobe has as limitations its susceptibility to water action. Generally, to improve the mechanical and durability properties, chemical stabilizers as cement and lime are used, but as adobe are made of clays such products, to be effective, need to be employed in relatively large amounts (6%, 8%, 10% or more) which affect the sustainable character of the material. This work intends to use an innovative new chemical stabilization method that is known as alkaline activation. Binder percentages involved drop to 2% or 3%. In the process, silica and alumina from mineral sources react when exposed to a high alkalinity environment, forming an alternative binder having good mechanical properties. In this work, silica and aluminium sources were from Metakaulin and red ceramic waste. To provide necessary alkalinity sodium silicate is used. But it has high price. In this investigation different alkaline solutions were developed to replace the industrialized material. Adobes were produced and subjected to curing in electric oven and also in a solar greenhouse. Materials characterization tests as particle size, x-ray fluorescence (XRF), x-ray diffraction (DRX) and pH were performed. To see the viability of adobes as a component or masonry, compression strength test were performed. Also the, resistance to the action of water, weight loss, immersion absorption, weight loss by erosion were investigated. Chemical characterization (XRD and XRF) and electron microscopy (SEM) were made. The adobes stabilized with alkaline activation showed very good performance, and had compression strength ranging from 1.5 MPa to 6.1 MPa, depending on its composition. Regarding durability, alkali stabilized samples had better performance than reference and Portland cement stabilized samples. Thus, the alkaline stabilization represents a modern way to improve properties of the millenary adobe blocks.

KEYWORDS: Adobe, Alkaline Activation, Stabilization, Earth construction

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO I | 18 |
| 1. INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 - <i>Tema</i> | 18 |
| 1.2 - <i>Justificativa</i> | 20 |
| 1.3 - <i>Objetivo geral</i> | 21 |
| 1.4 - <i>Objetivos específicos</i> | 22 |
| 1.5 - <i>Estrutura da dissertação</i> | 22 |
| CAPÍTULO II | 24 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 24 |
| 2.1 - <i>Construção com terra</i> | 24 |
| 2.2.1 <i>Composição química do solo</i> | 27 |
| 2.2.2 <i>Composição granulométrica do solo</i> | 27 |
| 2.2.3 <i>Argilas</i> | 29 |
| 2.2.4 <i>Adobe</i> | 33 |
| 2.2 - <i>Geopolímeros</i> | 37 |
| 2.2.1 <i>Histórico dos ligantes alcalino ativados</i> | 37 |
| 2.2.2 <i>Origem dos geopolímeros</i> | 39 |
| 2.2.3 <i>Nomenclaturas dos geopolímeros</i> | 40 |
| 2.2.4 <i>Síntese geopolimérica</i> | 43 |
| 2.1 - <i>Terra crua estabilizada com geopolímero</i> | 46 |
| CAPÍTULO III | 49 |
| 3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL | 49 |
| 3.1 - <i>Seleção dos materiais</i> | 52 |
| 3.1.1 <i>Solo</i> | 52 |
| 3.1.2 <i>Caracterização do solo</i> | 53 |

| | | |
|--------------------------|---|-----------|
| 3.2 | - Precursores geopoliméricos | 53 |
| 3.2.1 | Metacaulim..... | 53 |
| 3.2.2 | Resíduo da cerâmica vermelha | 54 |
| 3.3 | - Soluções alcalinas | 55 |
| 3.3.1 | Silicato de sódio (PA)..... | 55 |
| 3.3.2 | Hidróxido de sódio (PA)..... | 55 |
| 3.3.3 | Soluções alcalinas propostas | 55 |
| 3.4 | - Água..... | 58 |
| 3.5 | - Definições das razões molares | 58 |
| 3.6 | - Misturas dos adobes..... | 59 |
| 3.7 | - Processo de cura..... | 64 |
| 3.7.1 | Cura em estufa elétrica | 64 |
| 3.7.2 | Cura em estufa ecológica | 65 |
| 3.8 | - Ensaio de resistência à compressão simples | 66 |
| 3.10 | Durabilidade dos adobes..... | 67 |
| 3.10.2 | Absorção de água por imersão e perda de massa | 67 |
| 3.10.2 | Perda de massa por erosão (simulador de chuva)..... | 68 |
| 3.11 | Caracterização das misturas | 70 |
| 3.11.1 | Análise química por fluorescência de raios-X..... | 70 |
| 3.11.2 | Difração de raios-X..... | 70 |
| 3.11.3 | Microscopia eletrônica de varredura..... | 71 |
| CAPÍTULO IV | | 72 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 72 |
| 4.1 | - Granulometria do solo e limites de consistência..... | 72 |
| 4.2 | - Mineralogia do solo..... | 75 |
| 4.3 | - Precursor geopolimérico | 76 |
| 4.3.1 | Composição química dos precursores geopoliméricos..... | 76 |
| 4.3.2 | Composição mineralógica dos precursores geopolimérico | 78 |
| 4.3.3 | Composição granulométrica dos precursores geopolimérico..... | 79 |
| 4.4 | - Soluções alcalina propostas | 81 |
| 4.5 | - Resistência à ação da água, absorção e perda de massa por imersão..... | 82 |
| 4.5.1 | Amostras curadas em estufa elétrica | 82 |
| 4.5.2 | Amostras curadas em estufa ecológica | 85 |
| 4.6 | - Perda de massa por erosão (simulador de chuva) | 88 |

| | |
|---|------------|
| 4.7 – Resistência à compressão simples corpos de prova 5x5x5 | 90 |
| 4.7.1 Resistência à compressão simples curadas em estufa elétrica | 90 |
| 4.7.2 Resistência à compressão simples cura em estufa ecológica | 93 |
| 4.8 - Resistência à compressão simples dos adobes com solo amarelo | 96 |
| 4.9 - Fluorescência de raio-X e Difração de raios-X..... | 99 |
| 4.9.1 Fluorescência de raios-X | 99 |
| 4.9.2 Difração de raios-X..... | 100 |
| 4.10 Microscopia eletrônica de varredura | 101 |
| CAPÍTULO V | 104 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 104 |
| CAPÍTULO VI | 106 |
| 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 106 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 107 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Construção com terra no Marrocos. | 19 |
| Figura 2 – Construção de adobe com cerca de 2 mil anos nas vizinhanças de Lima, Peru. | 20 |
| Figura 3 – Cidade histórica de Bam no Irã com mais de 2.000 anos. | 24 |
| Figura 4 – Cidade de Shibam no Iémen com prédios de até 11 pavimentos. ... | 25 |
| Figura 5 – Estrutura química dos argilominerais. | 30 |
| Figura 6 – Representação de um cristal de argila e suas lamelas. | 30 |
| Figura 7 – Estrutura cristalina da caulinita. | 31 |
| Figura 8 – Estrutura cristalina da illita. | 32 |
| Figura 9 – Estrutura cristalina da montmorilonita. | 33 |
| Figura 10 – Processo de moldagem e desforma dos adobes. | 34 |
| Figura 11 – (a) Teste em campo de plasticidade, (b) método de determinar a retração. | 35 |
| Figura 12 – Nomenclatura dos geopolímeros. | 41 |
| Figura 13 – Coordenação tridimensional do centro de silício. | 42 |
| Figura 14 – Modelo conceitual para geopolímeros (Barbosa, 1999). | 42 |
| Figura 15 – Várias espécies de sílica dissolvida em função do pH. | 44 |
| Figura 16 – Modelo conceitual da síntese Geopolimérica proposto por Duxton. | 45 |
| Figura 17 – Planejamento experimental do estudo. | 51 |
| Figura 18 – (a) Solo para moldagem dos corpos de prova, (b) solo para confecção dos adobes. | 52 |
| Figura 19 – Metacaulim utilizado como precursor. | 53 |
| Figura 20 – (a) Resíduo cerâmico descartado, (b) Resíduo cerâmico moído. ... | 54 |
| Figura 21 – Moinho de bolas. | 54 |
| Figura 22 – (a) Silicato de sílica ativa, (b) silicato de resíduo cerâmico, (c) silicato de metacaulim. | 57 |
| Figura 23 – (a) Peagâmetro digital, (b) medição da solução de MK, (c) medição da solução de MS. | 58 |
| Figura 24 – Etapas de moldagem dos corpos de prova. | 62 |
| Figura 25 – Processo de mistura e moldagem das amostras. | 63 |
| Figura 26 – Estufa eletrônica para cura dos corpos de prova e adobes. | 64 |
| Figura 27 – Estufa ecológica. | 65 |
| Figura 28 – (a) Medição com termômetro de mercúrio, (b) medição da superfície do corpo de prova. | 66 |
| Figura 29 – (a) Fôrma para moldar os blocos, (b) adobe moldado e confinado para cura, (c) extração do corpo de prova com aresta de 10 cm. | 67 |
| Figura 30 – Ensaio de erosão em blocos estabilizado (adaptado por Heathcote, (2003)). | 69 |
| Figura 31 – Esquema do protótipo do ensaio de perda de massa por erosão. ... | 70 |
| Figura 32 – Distribuição granulométrica do solo vermelho. | 72 |
| Figura 33 – Distribuição granulométrica do solo amarelo. | 73 |
| Figura 34 – Minerais predominantes nos solos usados. | 76 |
| Figura 35 – Percentual dos óxidos que participam da reação geopolimérica ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$). | 78 |
| Figura 36 – Difratogramas dos precursores geopolimérico. | 79 |

| | |
|--|-----|
| Figura 37 – Granulometria a laser do metacaulim..... | 80 |
| Figura 38 – Granulometria a laser do resíduo da cerâmica vermelha. | 80 |
| Figura 39 – Amostras antes e depois do ensaio de absorção e perda de massa por imersão..... | 85 |
| Figura 40 – Perda de massa por erosão | 88 |
| Figura 41 - (a) Amostra de 3% Ind-RCV, (b) amostra 2% MS-RCV, (c) amostra 3% MK-RCV, (d) amostra 3% RCV-RCV. | 89 |
| Figura 42 – Adobes ensaiados aos 7 dias com precursor de metacaulim. | 90 |
| Figura 43 – Adobes ensaiados aos 7 dias com precursor de resíduo cerâmico. | 91 |
| Figura 44 – Adobes ensaiados aos 28 dias com precursor de metacaulim. | 92 |
| Figura 45 – Adobes ensaiados aos 28 dias com precursor de resíduo cerâmico. | 92 |
| Figura 46 – Adobes ensaiados aos 7 dias com precursor de metacaulim curados em estufa ecológica..... | 94 |
| Figura 47 – Adobes ensaiados aos 7 dias com precursor de RCV curados em estufa ecológica. | 94 |
| Figura 48 – Adobes ensaiados aos 28 dias com precursor de metacaulim curados em estufa ecológica..... | 95 |
| Figura 49 – Adobes ensaiados aos 28 dias com precursor de RCV curados em estufa ecológica. | 95 |
| Figura 50 – Adobes ensaiados aos 7 e 28 dias com precursor de metacaulim. | 97 |
| Figura 51 – Adobes ensaiados aos 7 e 28 dias com precursor de resíduo cerâmico. | 97 |
| Figura 52 - Adobes que apresentaram fissuração. | 98 |
| Figura 53 – (a) amostra de referência aproximada 500 vezes, (b) amostra de referência aproximada 1000 vezes, (c) 3%Sil.Ind-MK aproximada 500 vezes, (d) 3%Sil.Ind-MK aproximada 1000 vezes. | 101 |
| Figura 54 - (a) amostra de 3% MK-MK aproximada 500 vezes, (b) amostra de 3%MK-MK aproximada 1000 vezes, (c) 3% MS-MK aproximada 500 vezes, (d) 3% MS-MK aproximada 1000 vezes. | 102 |
| Figura 55 - (a) amostra de 3% Sil. Ind-RCV aproximada 2.500 vezes, (b) amostra de 3% Sil. Ind-RCV aproximada 1000 vezes, (c) 3% MS-RCV aproximada 2.500 vezes, (d) 3% MS-RCV aproximada 1000 vezes. | 103 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Classificação das partículas do solo segundo normas de diversos países. | 28 |
| Tabela 2 – Resumo histórico de alguns acontecimentos sobre ligantes obtidos por ativação alcalina. | 39 |
| Tabela 3 – Composição química da sílica ativa..... | 56 |
| Tabela 4 – Proporções dos materiais para a composição do silicato proposto. | 57 |
| Tabela 5 – Razões molares necessárias para a formação de geopolímeros.... | 59 |
| Tabela 6 – Proporções utilizadas na ativação do solo vermelho com precursor de metacaulim..... | 59 |
| Tabela 7 – Proporções utilizadas na ativação do solo vermelho com precursor de resíduo da cerâmica vermelha. | 60 |
| Tabela 8 – Razões molares das misturas com 1%, 2% e 3% de ligante com precursor de metacaulim..... | 60 |
| Tabela 9 – Razões molares das misturas com 1%, 2% e 3% de ligante com precursor do resíduo da cerâmica vermelha. | 60 |
| Tabela 10 – Proporções utilizadas na ativação do solo vermelho com precursor de metacaulim e soluções alcalinas propostas. | 61 |
| Tabela 11 – Proporções utilizadas na ativação do solo vermelho com precursor de resíduo da cerâmica vermelha e soluções alcalinas propostas. | 61 |
| Tabela 12 – Proporções utilizadas na ativação dos adobes com solo amarelo e precursor de metacaulim..... | 61 |
| Tabela 13 – Proporções utilizadas na ativação dos adobes com solo amarelo e precursor de resíduo da cerâmica vermelha. | 62 |
| Tabela 14 – Proporções utilizadas na ativação dos adobes com solo amarelo, precursor de metacaulim e soluções alcalinas propostas..... | 62 |
| Tabela 15 – Proporções utilizadas na ativação dos adobes com solo amarelo, precursor de resíduo da cerâmica vermelha e soluções alcalinas propostas. | 62 |
| Tabela 16 – Fracionamento dos componentes físico do solo vermelho e os limites de consistência. | 73 |
| Tabela 17 - Fracionamento dos componentes físico do solo amarelo e os limites de consistência. | 74 |
| Tabela 18 - Redução de água em função do tipo de ligante usado para o solo vermelho. | 75 |
| Tabela 19 - Redução de água em função do tipo de ligante usado para o solo amarelo..... | 75 |
| Tabela 20 – Composição química dos precursores geopolimérico..... | 77 |
| Tabela 21 – Resultados da finura Blaine e Massa Específica. | 81 |
| Tabela 22 – pH e relação SiO_2/Na_2O das soluções alcalinas alternativa..... | 81 |
| Tabela 23 – Amostras ensaiadas a 65°C em estufa eletrônica com precursor de metacaulim. | 82 |
| Tabela 24 – Amostras ensaiadas a 65°C em estufa eletrônica com precursor de resíduo cerâmico. | 83 |
| Tabela 25 - Amostras ensaiadas em estufa ecológica com precursor de metacaulim | 85 |

| | |
|--|----|
| Tabela 26 – Amostras ensaiadas em estufa ecológica com precursor de resíduo cerâmico | 86 |
| Tabela 27 – Composição química dos adobes sintetizados com ativação alcalina..... | 99 |

LISTA DE QUADRO

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Composição granulométrica do solo de acordo com vários autores. | 36 |
| Quadro 2 – Características do silicato de sódio (PA) | 55 |

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Tema

O problema da casa em todo o planeta, e principalmente nos países dos continentes africano, asiático e sul-americano, está muito longe de ser resolvido. No Brasil, em especial, estima-se que há a necessidade de aproximadamente 6 milhões de moradias para suprir a atual demanda populacional e, desse montante, o estado da Paraíba vem contribuindo com cerca de 10,3% do déficit habitacional nacional segundo a Fundação João Pinheiros – MG (2015). Além disso, o país tem inúmeras moradias sem condições de serem habitadas.

Um fator que agrava esse problema é que na maioria das habitações de caráter popular são empregados materiais de construção industrializados que possuem valores inacessíveis às camadas mais pobres da humanidade. Aliado a isso, falta ações do poder público por meio de projetos sociais a longo prazo que possibilitem aos excluídos aquisições de moradias de baixo custo e com condições mínimas de habitabilidade. Dessa forma, a situação de miséria na qual parte da população do país se encontra, leva-a muitas vezes a procurar alternativas nem sempre seguras para a construção de suas moradias.

Em diversas cidades brasileiras, em especial na zona rural, a população ribeirinha utiliza a terra como material para construir suas casas. Esse material que tem um enorme potencial construtivo, é usado de forma errônea e acaba resultando em habitações de péssima qualidade e promovendo riscos à saúde daqueles que ali residem. Um exemplo disso foram os elevados índices de doença de chagas nos anos 70 na região nordeste, que tinham relação direta com a precariedade das residências dos afetados.

Não é de hoje que a terra é usada como material de construção. Depois que o homem descobriu a agricultura, sentiu a necessidade de construir para aguardar e armazenar as colheitas, isto há cerca de 8 mil e 10 mil anos atrás. Naturalmente eram empregados materiais ofertados pela natureza, como pedras, galhos de árvores e a terra no seu estado natural. Nas primeiras civilizações ela era o material mais utilizado para a construção. Esse insumo

servia para diversos tipos de construções que iam desde a uma simples residência a edificações de grande porte (BARBOSA e MATTONE, 2002), como se vê na Figura 1.

Figura 1 – Construção com terra no Marrocos.



Fonte: Barbosa e Mattone, 2002.

Além da disponibilidade, a terra como material de construção tem várias vantagens como: fácil reincorporação ao meio ambiente, propriedades térmicas muito boas, eficiência energética e pouca geração de resíduos (BARBOSA e GHAVAMI, 2007). Com o advento dos materiais de construção industrializados, a terra no seu estado natural foi sendo esquecida. Porém, os problemas ambientais que assolam o planeta nos dias de hoje têm feito com que ela volte a ser um material de construção procurado por arquitetos e engenheiros, preocupados com a preservação do meio ambiente.

Dentro do universo da construção com terra existem várias técnicas construtivas e uma delas é a que utiliza alvenaria de adobe. Esse produto o adobe, é um tijolo obtido por meio da terra no estado plástico moldado de forma manual e seu processo de cura é realizado ao ar livre sem necessidade de gasto energético. O material pode receber palha cortada ou fibras vegetais na sua composição, o que confere ductilidade ao bloco.

A produção de adobes é antiquíssima e civilizações como a egípcia, a persa, a babilônica além daquelas que se desenvolveram na China e na Índia, e as pré-colombianas nas Américas construíram edificações que, apesar da fragilidade do material, desafiam aos milênios (Figura 2).

Figura 2 – Construção de adobe com cerca de 2 mil anos nas vizinhanças de Lima, Peru.



Fonte: Arquivo pessoal.

Uma das características dos adobes é a sua suscetibilidade em relação à água. Para adaptá-lo aos usos “modernos” é preciso intervir na matriz de terra para torná-la resistente também à ação da água. A cal e o cimento Portland têm sido usados para tal finalidade, porém devido ao adobe ser um material composto por solos argilosos, para a matriz ganhar estabilidade e resistência à ação da água se faz necessário o uso de uma elevada quantidade de ligante, o que pode vir a interferir nas características benéficas da terra. Desta forma, aqui se pretende usar outra alternativa que é a ativação alcalina, que tem a vantagem de, em pequenas quantidades, melhorar a trabalhabilidade do material, permitindo redução da quantidade de água com conseqüente melhoria da resistência, dar estabilidade dimensional e torná-lo resistente à água.

A ativação alcalina é uma técnica relativamente recente que consiste em agrupar partículas de materiais ricos em sílica e alumina amorfos, em ambiente alcalino, formando um material cimentício capaz de realizar o encapsulamento de resíduos minerais e com um custo energético bastante reduzido. O produto dessas reações é comumente chamado de ativação alcalina.

1.2 - Justificativa

A terra como material de construção, tradição milenar esquecida, tem sido encarada como uma boa opção a ser resgatada nos dias de hoje. Inúmeras e crescentes iniciativas têm sido vistas em todo o mundo, através de congressos, oficinas, publicações sobre o tema da Arquitetura e Construção

com terra. Note-se que esse material, a terra crua, muitas vezes discriminada, tem recebido muito incentivo, não apenas nos países em vias de desenvolvimento, mas também na Europa, notadamente Inglaterra, França, Itália, Espanha e Portugal, e até no próprio Estados Unidos e na Austrália.

A UFPB já trabalha com construção com terra há mais de duas décadas e essa proposta trata de um tema inovador, qual seja a estabilização alcalina da terra. Estudos preliminares já feitos na instituição com outras técnicas de construção com terra mostram um potencial interessante desse método de dar resistência à ação da água ao material. As composições convencionais utilizam metacaulim para fornecer sílica e alumina amorfos. Aqui, vai-se estudar também a substituição desse material por resíduos de cerâmica vermelha, que não passam de argila calcinada, rica naqueles materiais.

Comumente como fonte de sílica amorfa, utiliza-se, juntamente com o hidróxido de sódio, o silicato de sódio. Como o metacaulim, o resíduo da cerâmica vermelha e a sílica ativa são ricos em silício, vai-se pesquisar a incorporação desses resíduos na terra e verificar que resposta se tem quando da eliminação do silicato de sódio, material esse que tem um custo bastante elevado e alto potencial poluente. Os principais parâmetros de controle são a resistência à compressão e o desempenho quando exposto à água.

Recentemente na Província de Rio Negro, Argentina, foi criada uma lei que exime de taxas as construções com adobes. Países como Peru, Equador, Nova Zelândia e outros já dispõem de norma técnica oficial sobre construção de adobe. No Brasil, está em andamento na ABNT a elaboração do projeto de norma *PN 002:123.009-001 Alvenaria de adobe – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio*. Portanto, é uma questão de tempo que a construção com adobes ressurgirá “oficialmente” e receberá financiamento de instituições de fomento à habitação. Então, tendo em vista o menor impacto causado pelas alvenarias de terra em relação as de blocos cerâmicos ou de concreto, o presente trabalho tem relevância no campo da arquitetura e construção civil sustentáveis.

1.3 - Objetivo geral

Aplicar a ativação alcalina e analisar sua viabilidade técnica na produção de adobe.

1.4 - Objetivos específicos

- (i) - Caracterizar física e quimicamente as propriedades dos materiais;
- (ii) - Otimizar as misturas para ativação alcalina da terra;
- (iii) - Verificar o efeito da substituição de metacaulim por resíduos de cerâmica vermelha na ativação alcalina da terra;
- (iv) – Verificar o efeito da substituição do silicato de sódio industrializado por aquele obtido a partir de hidróxido de sódio e produtos diversos (sílica ativa, metacaulim, resíduos de cerâmica vermelha);
- (v) - Otimizar a quantidade de ligante geopolimérico nas misturas com terra;
- (vi) - Estabelecer o efeito da ativação alcalina na estabilidade volumétrica, resistência à ação da água e resistência à compressão;
- (vii) - Promover a ativação alcalina dos adobes com o uso de um sistema térmico de baixo custo energético;

1.5 - Estrutura da dissertação

O presente trabalho é composto de seis capítulos:

Inicialmente, o Capítulo I aborda o tema sobre a problemática habitacional brasileira gerada por conta dos elevados custos dos materiais de construção industrializados e apresenta a terra aliada ao ligante geopolimérico como material alternativo e sustentável para amenizar esse problema.

O Capítulo II é reservado ao estudo da literatura sobre construção com terra, em especial, o adobe e sobre ligantes ativados alcalinamente (geopolímeros) e a aplicação desse material como estabilizante na construção com terra de forma a se entender qual a motivação que gerou o trabalho.

O Capítulo III apresenta toda a parte metodológica que foi utilizada com base em estudos anteriores. Aqui é possível visualizar e entender os procedimentos experimentais como: caracterização física e química dos materiais, composição das misturas, processo de cura e caracterização química e mecânica do material após a síntese geopolimérica.

No Capítulo IV são apresentados os resultados quantitativos e qualitativos obtidos neste estudo tais como: caracterização física e química dos materiais utilizados, efeito da quantidade e tipo de ligante na resistência mecânica dos adobes, efeito do ligante ao tocante a resistência à ação da água e análise da microestrutura do material após a realização da síntese e feito as discussões de acordo com a literatura atual sobre o assunto.

O Capítulo V são mostradas as conclusões de acordo com os resultados obtidos nesse trabalho e a sua relação com as conclusões da literatura atual sobre o assunto de construção com terra estabilizada com o ligante geopolimérico.

No Capítulo VI são feitas sugestões para trabalhos futuros no âmbito da construção com terra estabilizada com geopolímero.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a estrutura teórica do trabalho por meio de revisão da literatura referente às temáticas abordadas, divididos em três itens que visam esclarecer o entendimento sobre o assunto: construção com terra, geopolímeros e terra crua estabilizada com geopolímero.

2.1 - Construção com terra

Desde a pré-história a construção com terra vem sendo utilizada pelo homem como matéria-prima para diversas construções que vão desde pequenas residências a belíssimas obras de engenharia, exemplos disso são as pirâmides do Egito, muralha da China, e várias outras construções realizadas pelas civilizações sul-americanas datadas entre 9.000 e 10.000 anos (MINKE, 2006). Uma grande parte do patrimônio histórico e cultural do planeta é construído com terra, como é o caso da cidade de Bam no Irã, que tem mais de 2.000 anos e estava erguida até o ano de 2003, mas foi destruída por um terremoto (figura 3).

Figura 3 – Cidade histórica de Bam no Irã com mais de 2.000 anos.



Fonte: Barbosa e Mattone, 2002.

Existe outra cidade histórica que ainda hoje é habitada e foi toda construída com terra, a cidade de Shibam no Iêmen, que teve origem no sé

III, embora os edifícios que persistiram até aos nossos dias atuais sejam na sua maioria do século XVI (figura 4). A cidade é composta por edifícios os quais possuem entre 5 a 11 pavimentos e vem desafiando os tempos mesmo a terra sendo considerada um material frágil (HELFRITZ, 1937; TORGAL, EIRES e JALALI, 2009).

Figura 4 – Cidade de Shibam no Iêmen com prédios de até 11 pavimentos.



Fonte:Torgal, Eires e Jalali, 2009.

Com o desenvolvimento da indústria de materiais da construção civil essa tecnologia com grande potencial construtivo foi esquecida e tida como técnica ultrapassada, porém com a necessidade do mercado de desenvolver processos construtivos que não afetem o meio ambiente, esse modelo de material vem novamente ganhando espaço. Além disso, mesmo havendo preconceito, um terço da população mundial vive em habitações de terra crua. Em todas as regiões de clima quente e seco, a terra tem sido o material de construção mais utilizado.

O elevado uso da terra como material de construção é proveniente dos seus benefícios: facilidade na obtenção do material, boas propriedades térmicas, absorção e liberação de umidade, geração mínima de poluição e baixo consumo energético no seu manuseio, fácil reincorporação na natureza e facilidade de gerar tecnologias apropriadas que facilitam o acesso das populações mais carente a terem o material (DEGIRMENCI e BARADAN, 2005; ACHENZA e

FENU, 2006; BARBOSA e GHAVAMI, 2007; DEGIRMENCI, 2008; BARBOSA e GHAVAMI, 2015; CORRÊA et al, 2015).

Além desse material ser benéfico ao meio ambiente e bastante abundante na natureza, as construções com terra crua termicamente têm um desempenho superior em relação aos tijolos cerâmicos. Um estudo de Garzón (2002) mostrou que a carga térmica que atravessa uma parede de 20 cm rebocada em ambos os lados, em um certo intervalo de tempo, é três vezes menor em um muro de tijolos crus de solo-cimento que em um de tijolos cerâmicos furados.

Do ponto de vista do controle da umidade relativa do ar nas edificações, estudos realizados por Minke (2006) mostram que, em um ambiente construído com 30 m² de paredes e 3 m de altura, quando a umidade subitamente passa de 50% para 80%, se forem de tijolos de terra crua, as paredes absorvem 9 litros de água em um período de 48 h, ao passo que uma parede idêntica de tijolos cerâmicos só seria capaz de absorver 0,9 litros no mesmo tempo. Se ocorrer o contrário, a umidade relativa diminui, as paredes de terra liberam de volta a umidade ao ambiente e assim tornando a edificação um local mais agradável.

Sendo um material natural, o manuseio da terra se faz com geração mínima de poluição e resíduos. Mesmo quando a terra é associada a materiais industrializados, estes entram em pequenas proporções. Assim, a reincorporação na natureza é relativamente fácil (BARBOSA e GHAVAMI, 2015). Esses benefícios já citados unidos ao grande apelo ecológico que é feito nos dias atuais em busca de amenizar os impactos ambientais que sofrem o planeta terra e coloca em risco as futuras gerações, a terra crua, como material de construção vem ganhando espaço em diversas pesquisas e despertando o interesse pelas camadas mais privilegiadas da sociedade.

Atualmente existem mais de vinte tecnologias de construção com terra, além de outras variações decorrentes de diferenças regionais (HOUBEN e GUILLAUD, 1989). De certa forma, simplificando, pode-se dizer que há três técnicas construtivas de se elevarem as paredes que são: alvenaria, monolítica e mista.

Na técnica de alvenaria, esse sistema é composto por elementos individuais (blocos e tijolos) que são unidos por meio de outro elemento, a argamassa de assentamento. As alvenarias mais comuns na construção com terra empregam os adobes e os blocos de terra comprimida (BTC). As paredes

monolíticas é uma técnica onde a terra é compactada de forma manual ou mecânica entre duas formas. Esse sistema é conhecido como taipa de pilão e na maioria das vezes geram paredes bastante espessas. Finalmente, na técnica mista, a terra serve apenas de enchimento a uma estrutura, geralmente de madeira, e não tem função estrutural. Esse sistema é conhecido como taipa de mão, ou apenas taipa (BARBOSA e GHAVAMI, 2015). Para o uso da terra como material de construção se faz necessário o entendimento da sua composição física e química

2.2.1 Composição química do solo

Na crosta terrestre os elementos químicos mais abundantes são o oxigênio (46,7%), silício, (27,7%), alumínio (8,1%) e ferro (5%), seguindo-se cálcio, sódio, potássio, magnésio, titânio, hidrogênio e outros (MASON e MOORE, 1982; SANTOS, 1989). Estes elementos normalmente se apresentam na forma de óxidos que é a forma mais estável na natureza. Então, resulta que os principais componentes químicos encontrados na terra são a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e a hematita (Fe_2O_3), havendo ainda a presença dos outros óxidos dos elementos citados acima (SANTOS, 1989). A percentagem desses compostos é bastante variável de um local para outro. Em geral, a sílica é majoritária, porém nos solos lateríticos (solos de cor avermelhada encontrados principalmente nas regiões tropicais da Terra), o teor de alumina pode se aproximar da sílica. A coloração para o vermelho é devido ao teor de ferro mais elevado que nas terras comuns (BARBOSA e GHAVAMI, 2007).

2.1.2 Composição granulométrica do solo

Para se ter um bom domínio da construção com terra, como em outras ciências que fazem uso do solo, é importante ter o conhecimento das dimensões das partículas que compõe a terra, pois seu comportamento mecânico delas depende (CAPUTO, 1978). Dessa forma, os tamanhos das partículas são classificados, por convenção em:

- (i) – Pedregulho – partículas de dimensões entre 50,0 mm e 4,8 mm;
- (ii) – Areia – partículas de dimensões entre 4,8 mm e 0,05 mm;

(iii) – Silte – partículas finas entre 0,05 mm e 0,005 mm;

(iv) – Argila – partículas finíssimas só visíveis ao microscópio, com dimensões inferiores a 0,005 mm.

Os limites das partículas apresentados não são absolutos, pois na literatura internacional são apresentados valores que diferem dos citados como é visto na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação do tamanho das partículas do solo segundo normas de diversos países.

| Partícula | NBR 7181 | AASHTO | França | Inglaterra |
|------------------|-----------------|---------------|---------------|-------------------|
| Pedregulho | 4,8 a 50,0 | 2,0 a 5,0 | 2,0 a 20,0 | 2,0 a 60,0 |
| Areia | 0,05 a 4,8 | 0,075 a 2,0 | 0,02 a 2,0 | 0,06 a 2,0 |
| Silte | 0,005 a 0,05 | 0,005 a 0,075 | 0,002 a 0,02 | 0,002 a 0,06 |
| Argila | < 0,005 | < 0,005 | < 0,002 | < 0,002 |

Fonte: Barbosa e Ghavami, 2007.

De forma geral, os três primeiros componentes acima citados são quimicamente inertes, ou seja, não reativos, quando postos em presença de cal ou cimento (BARBOSA e MATTONE, 2002; DEGIRMENCI, 2005; BARBOSA e GHAVAMI, 2007; MILLOGO e MOREL, 2012). O pedregulho e a areia constituem o esqueleto do material. As frações arenosas e pedregulhosa apresentam grande capacidade de mobilizar atrito interno, desde que haja contato entre os grãos. No estado compactado elas se tornam praticamente incompressíveis. Nos tijolos de terra crua e nas paredes monolíticas a presença da areia é indispensável para lhes dar a estrutura resistente aos esforços mecânicos. O silte, partícula de granulometria fina consegue absorver água em seus poros, permitindo tanto uma diminuição do atrito interno dos grãos quanto um rearranjo preenchendo os vazios quando o solo sofre uma pressão de compactação.

A argila é formada de partículas lamelares, com uma superfície específica muito superior em relação aos demais componentes do solo. Desta forma

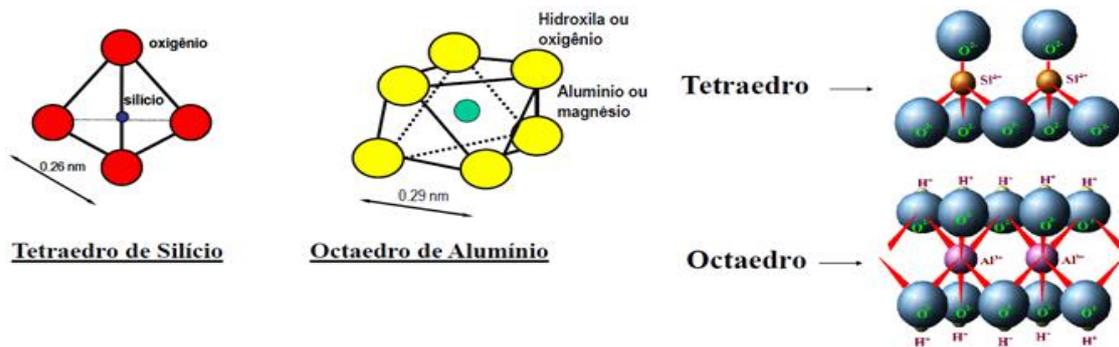
tornando-se quimicamente ativas, reagindo com a cal, com componentes do cimento e soluções alcalinas para a formação de geopolímeros (DAVIDOVITS, 1979; DAVIDOVITS, 1987; DAVIDOVITS, 1991; BARBOSA e MATTONE, 2002; PINTO, 2004; BARBOSA e GHAVAMI, 2007; BARBOSA e GHAVAMI, 2015). Como em qualquer tecnologia de construção com terra a argila é manipulada sempre com a presença de água, pois a sua existência se faz necessário para dar a requerida coesão à terra, desta forma se comportando como um ligante natural.

Os componentes do solo de maior dimensão, pedregulho e areia (grossa, média e fina) podem ser obtidos por peneiramento, ensaio normalizado no Brasil pela NBR 7181/84. A percentagem de silte e de argila são determinadas comumente pelo ensaio de sedimentação, cujo procedimento é indicado também na citada norma. Sendo as argilas de fundamental importância para a construção com terra crua por ser ela o ligante natural, algumas considerações a mais serão feitas a respeito dessa fração do solo.

2.1.3 Argilas

Argila é um material de origem natural com aspecto pulverulento e de baixa granulometria que desenvolve plasticidade quando misturada a uma certa quantidade de água (GRIN, 1962; GOMES, 1988; SANTOS, 1989;). As argilas são minúsculas partículas de forma lamelar, compostas principalmente de aluminossilicatos hidratados formados durante o processo de lixiviação (perda de constituintes pela ação da água que os dissolvem e as transportam) das partículas mais grossas dos minerais rochosos originais (rocha mãe). As formas lamelares se apresentam compostas essencialmente pela combinação de duas monocamadas básicas. Uma, formada por folhas tetraédricas de SiO_4 e outra, por folhas octaédricas de um metal (Al, Mg ou Fe) envolto por seis átomos de oxigênio nos vértices (figura 5).

Figura 5 – Estrutura química dos argilominerais.

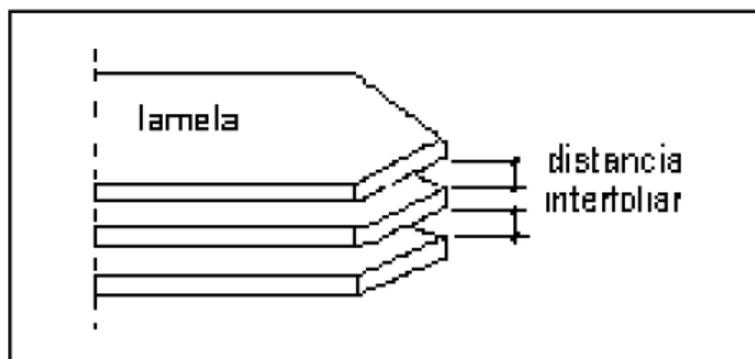


Fonte: Gomes, 1988.

De modo geral, o termo argilas refere-se às partículas do solo que possuem diâmetro inferior a 5 μm e das quais podem fazer parte diferentes tipos de minerais: silicatos lamelares de magnésio e de alumínio (filossilicatos), quartzo, feldspato, carbonatos, óxidos metálicos e até mesmo matéria orgânica (LUNA e SCHUCHARDT, 1999).

Um cristal de argila é composto por um grupo de lamelas separadas por uma distância chamada de distância interfoliar ou interplanar basal (figura 6). Entre as lamelas podem existir íons de elementos alcalinos (K, Na e Li) ou alcalino-terrosos (Ca e Mg). Segundo o tipo de argila, a ligação entre as lamelas pode variar de forte a fraca e permitir ou não a penetração de água entre elas.

Figura 6 – Representação de um cristal de argila e suas lamelas.



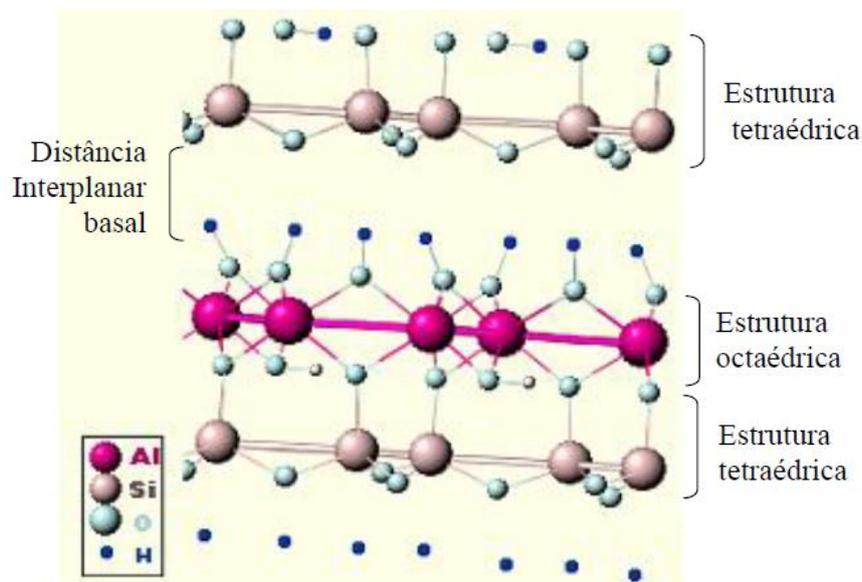
Fonte: Barbosa e Ghavami, 2007.

O modo como essas folhas são empilhadas e a possibilidade de várias sequências regulares e irregulares diferem os vários tipos de argilominerais. O arranjo dessas camadas pode se dar segundo sete modelos diferentes, pelo que é considerado igual número de grupos sistemáticos nos argilominerais

crystalinos: caulinita, illita, montmorilonita, clorita, vermiculita, interestratificados e paligorsquita/sepiolita. Cada grupo compreende várias espécies, cujo número se deve em particular à substituição isomórfica muito comum nos argilominerais (SANTOS, 1992).

Os principais grupos de argilominerais são caulinita, illita e montmorilonita, e o que diferencia esses argilominerais é basicamente o tipo de estrutura e as substituições que podem ocorrer, do alumínio por magnésio ou ferro e do silício por alumínio ou ferro, principalmente, e consequente neutralização das cargas residuais geradas pelas diferenças de cargas elétricas dos íons por alguns cátions (MEIRE, 2001). A caulinita é formada pelo empilhamento regular de camadas 1:1 em que cada camada consiste de uma folha de tetraedros SiO_4 e uma folha de octaedros (Al_2OH_6), ligadas entre si em uma única camada, através de oxigênio, dando uma estrutura fortemente polar com uma distância interplanar basal de 7 Ångstrons (SANTOS, 1992). Na Figura 7 é mostrada a estrutura cristalina da caulinita.

Figura 7 – Estrutura cristalina da caulinita

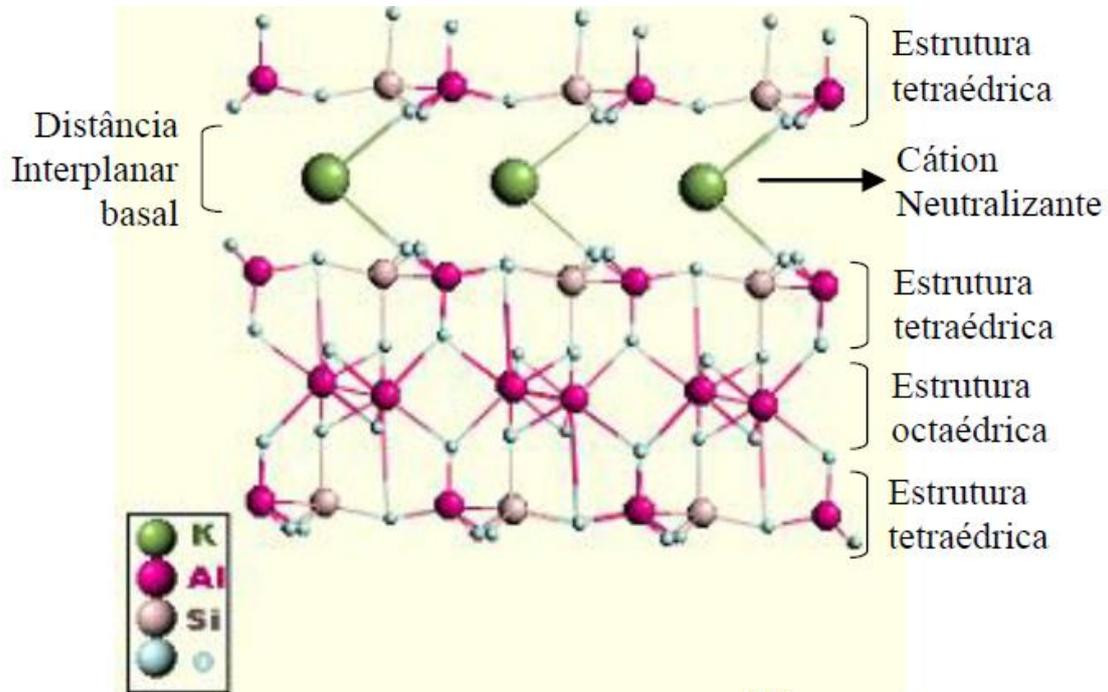


Fonte: Associação Brasileira de Cerâmica, 2000.

A illita tem uma estrutura cristalina 2:1, semelhante à montmorilonita, com diferença que há substancialmente uma substituição maior de alumínio por silício, o que dá uma maior carga à estrutura cristalina, que é neutralizada pelo potássio. Como consequência dessas diferenças, as camadas estruturais são

rigidamente ligadas e não expandem como pode ser visualizado na figura 8. Possui ainda uma distância interplanar basal de 9-10 Ångstrons (SANTOS, 1992).

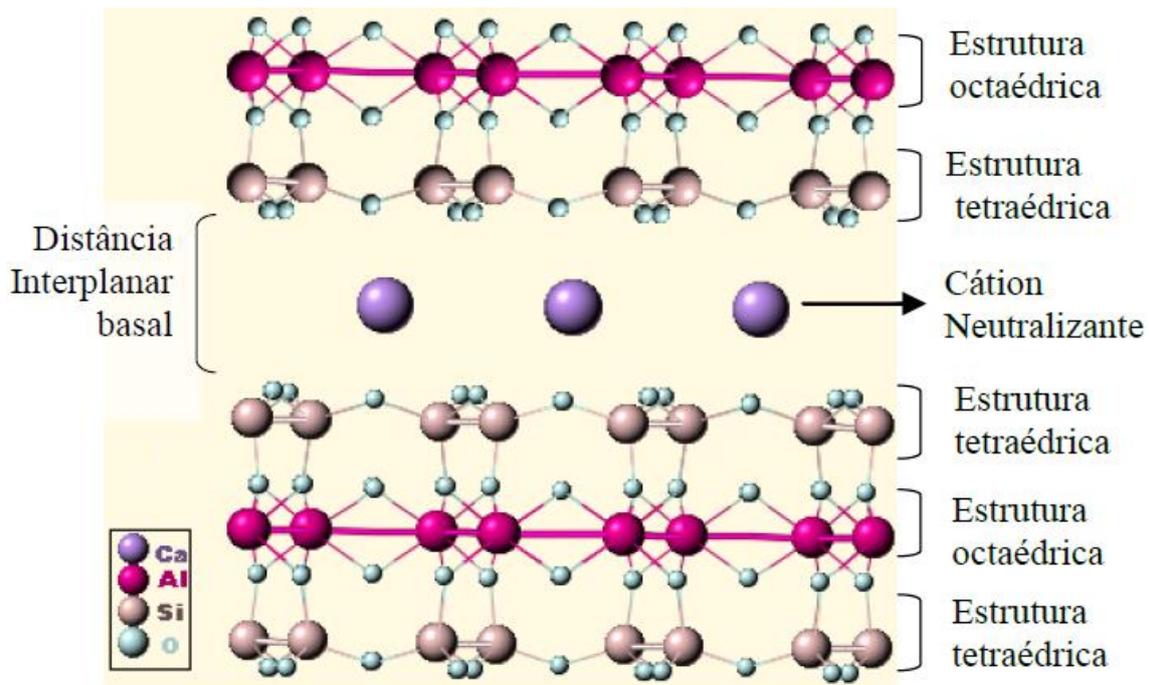
Figura 8 – Estrutura cristalina da illita.



Fonte: Associação Brasileira de Cerâmica, 2000.

A montmorilonita apresenta, como a illita, estrutura tipo 2-1 (Figura 9), mas dentro da camada octaédrica central os íons de alumínio podem ser permutados por íons de outros elementos químicos como magnésio, ferro, alumínio, níquel. As lamelas são fracamente ligadas eletricamente e os íons que ligam a estrutura não são mais de potássio, porém cátions de sódio, de cálcio e moléculas de água. A distância interplanar basal é variável podendo ser da ordem de 14 a 20 Ångstrons. Conseqüentemente a água penetra com facilidade entre as lamelas, resultando que a montmorilonita não é estável em presença de água, apresentando notável expansão (SANTOS, 1992; BARBOSA e GHAVAMI, 2007).

Figura 9 – Estrutura cristalina da montmorilonita.



Fonte: Associação Brasileira de Cerâmica, 2000.

Para o uso da terra como material de construção, se faz necessário o conhecimento do tipo de argila que o solo contém, pois, a caulinita apresenta absorção interfoliar, ou seja, absorção entre as lamelas menor em relação à illita e montmorilonita. Como os adobes são compostos por solos argilosos é preferencial o uso de solo com argila caulínica, facilitando sua estabilização e prevenindo futuras expansibilidades da terra.

2.1.4 Adobe

Adobe é um elemento de alvenaria feito com a terra no estado plástico, com processo de produção simples, talvez por essa razão a maioria das construções antigas com terra, muitas delas ainda habitadas atualmente, tenham sido feitas com adobe. A norma NTE, (2000), define adobe como bloco maciço de terra crua, feito com uma massa de solo argiloso de alta plasticidade que pode conter palha ou outro material que melhore sua estabilidade, frente a agentes externos. O grupo CRATerre, (1979) cita o adobe como um dos primeiros materiais de construção do mundo e destaca seu caráter ecológico, além disso, destaca o processo simples de construção sem haver a necessidade do uso de tecnologias avançadas. O termo adobe deriva do árabe “attob” e significa tijolo

seco ao sol (ROGERS e SMALLEY,1995). Este fato leva a pensar que esta técnica teria sido introduzida na Península Ibérica durante a ocupação árabe. No oriente médio seu conhecimento é muito antigo e amplamente difundido. Sua utilização é muito presente nos países do Norte da África, de onde se difundiu pelo Sul da Espanha e Portugal, devido à proximidade e facilidade de transporte pelo Mar Mediterrâneo (VEIGA, 2008).

Embora as edificações com adobes existissem já na América pré-colombiana, os índios brasileiros não construíam com terra. Eles usavam madeira e palha para se abrigarem. A construção com adobe chegou ao Brasil por meio dos colonizadores portugueses. (Barbosa e Ghavami, 2007) ressaltam que um dos motivos que faz o adobe um material com grande potencial construtivo é seu processo de produção, onde o mesmo é elaborado por meio de uma massa plástica de terra e água e moldado com formas de madeira (Figura 10).

Figura 10 – Processo de moldagem e desforma dos adobes.

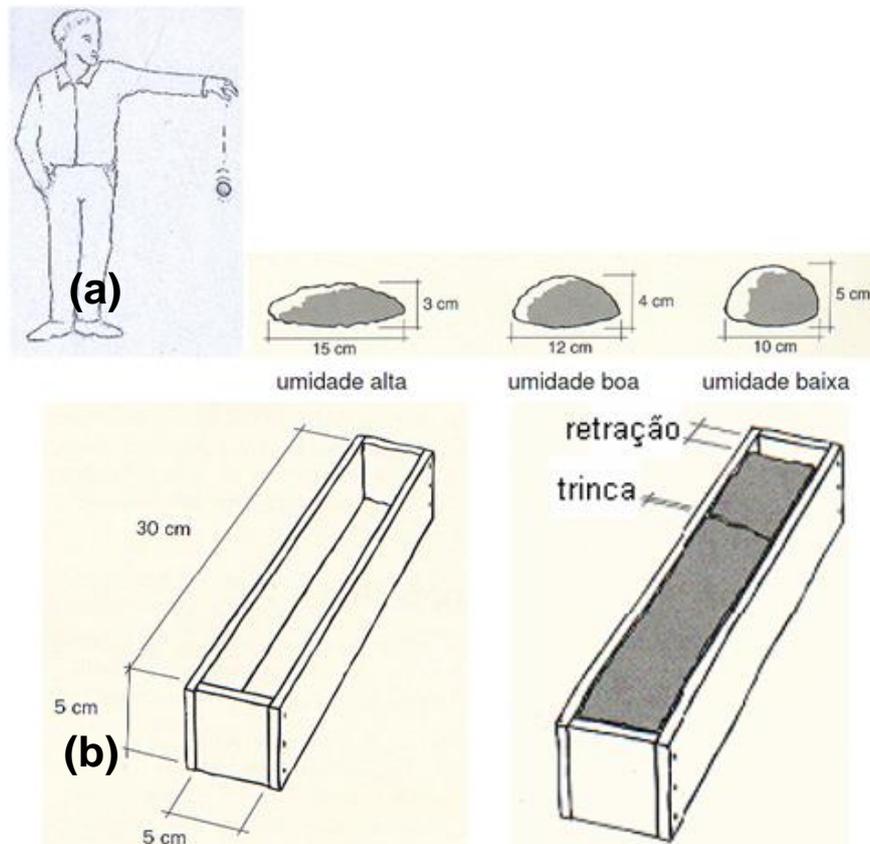


Fonte: Rede Proterra, 2009.

No processo produtivo dos adobes, o solo passa inicialmente por uma determinação em campo, afim de saber se a terra tem propriedades adequadas. Essas propriedades são: granulometria, plasticidade e retração. Tais propriedades podem ser determinadas em laboratório, como já foi citado antes com a composição granulométrica. Para a determinação da plasticidade e da

retração, podem ser usados métodos em laboratório ou técnica simples de campo (figura 11).

Figura 11 – (a) Teste em campo de plasticidade, (b) método de determinar a retração.



Fonte: Barbosa e Ghavami, 2007.

A composição granulométrica, em especial a quantidade de argila é quem vai determinar as características de plasticidade e retração (BARBOSA e GHAVAMI, 2007; BARBOSA e GHAVAMI, 2015; CORRÊA et al, 2015). Porém, alguns autores citam composições granulométricas de diversas formas (quadro 1).

Quadro 1 – Composição granulométrica do solo adequado para adobes, de acordo com vários autores.

| Areia (%) | Silte (%) | Argila (%) | Referências bibliográficas |
|------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------|
| | 9 e 3 | 9 e 3 | Veloso et al., 1985 |
| 40 a 55 | | 20 | Martinez, 1979 |
| >45 | | < 20 | Alves, 1985 |
| 50 | 30 | 20 | Milanez, 1958 |
| 55 a 75 | 10 a 28 | 15 a 18 | CRATerre, 1979 |

Fonte: adaptado de Veiga, 2008.

Outro fator que vai influenciar de acordo com a composição granulométrica é o tipo de estabilização do solo. Estabilizar um solo é um processo de intervenção na matriz da terra, de forma a melhorar as suas características mecânicas e de durabilidade. Existem vários tipos de estabilização de solos. Pode-se citar três métodos que vão de acordo com a natureza do processo, que são: mecânica, física e química. Barbosa e Ghavami, (2007) citam algumas formas de estabilização de solos:

- (i) Ação mecânica com equipamentos capazes de densificar a terra reduzindo poros e capilaridade;
- (ii) O uso de produtos químicos hidrofugantes para eliminar a absorção de água pelos grãos de solo, sendo, em geral, produtos caros;
- (iii) Envolvimento dos grãos de terra por uma fina camada de material impermeabilizante capaz de fazer o fechamento dos poros e canais capilares, como emulsões asfálticas;
- (iv) A formação de ligações químicas entre os cristais de argila e cal;
- (v) Criação de um esqueleto sólido inerte que se opõe ao movimento das partículas. É o caso dos agentes de ligação, tais como cimento Portland.

Além disso, a adição de fibras pode ser considerada como um método de estabilização, dando ductilidade ao material, mas não é capaz de dar resistência contra a ação da água. Novos métodos de estabilização merecem ser pesquisados. A argila é constituída de sílica e alumina que podem estar, mesmo em pequena quantidade, na forma amorfa. Tal fato pode contribuir para a estabilização através da ativação alcalina, que é um método químico capaz de melhorar as propriedades de um solo.

2.2 - Geopolímeros

2.2.1 Histórico dos ligantes alcalino ativados

Os primeiros estudos realizados com ligantes alcalino ativado se remetem à década de 40 na Bélgica, onde Purdon (1940) realizou a ativação de escórias com hidróxido de sódio. O autor descreve que o produto gerado por esses dois materiais passa por um processo de transformação dividida em duas etapas. Na primeira há a liberação de sílica, alumina e hidróxido de cálcio por meio da dissolução gerada pelo hidróxido de sódio, e em uma segunda etapa haveria a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratado por meio da regeneração dos compostos dissolvidos. Embora o trabalho de Feret (1939) seja considerado o precursor para a utilização da escória como material da ativação alcalina devido a este autor dá apenas importância ao uso desse material em substituição ao Cimento Portland.

Porém, foi Glukhovsky (1959), que embasou os estudos sobre ligantes ativados por álcalis. Essa comprovação veio de uma investigação para tentar entender a durabilidade de diversas estruturas históricas como as pirâmides do Egito e alguns templos romanos. As construções antigas eram compostas de uma ligante a base de aluminosilicatos de cálcio hidratado, semelhantes às que ocorrem em argamassas e concretos de cimento Portland e fases cristalinas do mineral zeólita analcita encontrado na crosta terrestre, que é um dos fatores da durabilidade desse ligante (GLUKHOVSKY, 1959). Desta forma, com base nessas investigações, Glukhovsky desenvolveu um novo tipo de ligante denominado “solo-cimento”, “solo” pelo fato de se assemelhar com uma rocha natural e “cimento” pela sua capacidade ligante. Os “solo cimentos” eram obtidos a partir de aluminosilicatos minerais moídos, misturados com resíduos industriais ricos em álcalis.

Nas décadas de 70 e 80 diversos pesquisadores identificaram a existência de quase 40% de zeólitas do tipo analcita na composição de argamassas encontradas em Jericó no vale do rio Jordão e em Tel-Ramad na Síria, datadas de 7000 A.C. (CONTENSON e COURTOIS, 1979; PERINET et al., 1980; DAVIDOVITS e COURTOIS, 1981). Langton e Roy (1984) analisaram argamassas romanas tendo descoberto na composição desses ligantes a presença de analcita. Campbell e Folk (1991) mostraram que a durabilidade dos

ligantes antigos era consequência do alto nível de compostos zeolíticos e amorfos em sua composição.

Porém no âmbito da ativação das escórias de alto-forno Glukhovsky (1980), já tinha realizado investigações bastante importantes: (i) Identificou os produtos gerados das reações, onde na sua grande maioria eram constituídos por silicatos de cálcio hidratados e aluminosilicatos de cálcio e de sódio hidratados, (ii) observou que os minerais argilosos ativados por um meio alcalino formavam silicatos de alumínio hidratados (zeólitas). No entanto, esse autor não aprofundou-se em estudos de materiais aluminosilicosos.

As pesquisas de ligantes obtidos por ativação alcalina ganhou um novo rumo após a descoberta do francês Joseph Davidovits (1979), que trabalhou com ativação de materiais ricos em sílica e alumina (caulim e metacaulim) isentos ou como baixa concentração de cálcio na sua composição, dessa forma, criando os chamados “geopolímeros”. Segundo Davidovits (1979), trata-se de uma adaptação moderna de ligantes estruturais usados por Romanos e Egípcios. Esse fato se deve a estudos químicos e mineralógicos realizados em blocos das pirâmides do Egito, onde o autor levanta a hipótese de que as pedras não são rocha calcária, mas sim um ligante feito a partir da mistura de calcário oriundo de Gizé com NaOH, produzido no local pela mistura de cal, carbonato de sódio e água (JALALI e TORRAL, 2009).

Após essa revolução nos estudos de ligantes por ativação alcalina, diversos autores passaram a investigar fatores que influenciam na otimização da resistência mecânica e geram menor custo do ponto de vista dos ativadores alcalinos. A tabela 2 sumariza um histórico dos trabalhos realizados na temática de ligantes por ativação alcalina.

Tabela 2 – Resumo histórico de alguns acontecimentos sobre ligantes obtidos por ativação alcalina.

| Autor | Ano | Descrição |
|----------------------|------------|---|
| Feret | 1939 | Cimentos com escórias. |
| Purdon | 1940 | Combinações álcalis-escórias. |
| Glukhovsky | 1959 | Bases teóricas e desenvolvimento de cimentos alcalinos. |
| Glukhovsky | 1965 | Primeiros cimentos alcalinos. |
| Davidovits | 1979 | Termo “geopolímeros” |
| Malinowski | 1979 | Caracterização de aquedutos milenares |
| Forss | 1983 | Cimento tipo F |
| Davidovits e Sawyer | 1985 | Patente do cimento “Pyrament”. |
| Krivenko | 1986 | Sistema $R_2O - RO - SiO_2 - H_2O$ |
| Malolepsy Petri | 1986 | Ativação de escórias sintéticas |
| Malek et al. | 1986 | Cimentos de escórias com resíduos radiativos |
| Davidovits | 1987 | Comparação entre concretos correntes e concretos milenares |
| Deja e Malolepsy | 1989 | Resistência ao ataque de cloretos. |
| Kaushal et al. | 1989 | Cura adiabática de ligantes alcalinos com resíduos nucleares. |
| Roy e Langton | 1989 | Analogias dos concretos milenares. |
| Majundar et al | 1989 | Ativação de escória $C^{12}A$ |
| Talling e Brandstetr | 1989 | Ativação alcalina de escórias. |
| Wu et al. | 1990 | Ativação de cimento de escórias. |
| Roy et al. | 1991 | Pega rápida de cimentos ativados alcalinamente. |
| Roy e Silsbee | 1992 | Revisão sobre cimentos ativados alcalinamente. |
| Palomo e Glassa | 1992 | Metacaulim com CBC |
| Roy e Malek | 1993 | Cimento de escórias |
| Glukhovsky | 1994 | Concretos milenares, modernos e futuros. |
| Krivenko | 1994 | Cimentos alcalinos. |
| Wang e Scrivener | 1995 | Microestrutura de escórias ativadas alcalinamente. |

Fonte: Adaptado de Jalali e Torgal, 2009.

2.2.2 Origem dos geopolímeros

De origem francesa, a observação realizada pelo professor e pesquisador Joseph Davidovits na década de 70, de difratogramas de um material amorfo de aluminossilicato obtido de soluções e misturas em ambientes altamente alcalinos, resultou no termo conhecido atualmente como geopolímero. Esse termo derivou-se de um pensamento quanto a sua valia tecnológica, onde “geo”, refere-se à natureza da matéria do material inorgânico e “polímero”, refere-se a estrutura análoga a de polímeros orgânicos, já que a descoberta surgiu em pesquisas

envolvendo polímeros inorgânicos, que servissem de material ligante alternativo em meio a crise energética da época (DAVIDOVITS, 1979; DAVIDOVITS, 1985; DAVIDOVITS, 1987; DAVIDOVITS, 1991). Os geopolímeros tem sido também denominados de cimentos ativados alcalinamente (PALOMO e DE LA FUENTE, 2003; ROY, 1999), cerâmica alcalina (KRIVEN; GORDON; BELL, 2004) e geocimento (KRIVENKO, 1994).

De acordo com Davidovits, (1979), os geopolímeros foram idealizados para possivelmente substituir o cimento Portland em diversas construções, a polimerização acontece por meio de uma rápida reação química em condições fortemente alcalinas. É importante ressaltar que o cimento Portland é um material cimentício baseado em reações de hidratação de óxidos de cálcio, silício e alumínio, com formação de fases cristalinas distintas e de uma cadeia amorfa de silicato de cálcio hidratado (METHA e MONTEIRO, 2008). Já os geopolímeros apresentam a formação de uma fase gel de aluminossilicato (DAVIDOVITS, 1979; DAVIDOVITS, 1991).

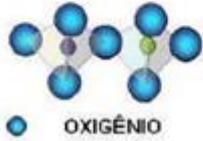
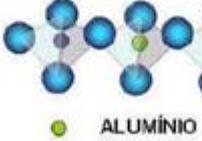
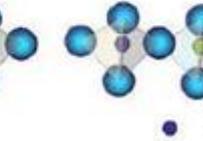
Os primeiros geopolímeros sintetizados foram fabricados com caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quartzo (SiO_2) e soluções de hidróxido de sódio (NaOH) com diversas concentrações, sendo submetidas à temperatura de 150°C (DAVIDOVITS, 1979; DAVIDOVITS, 1987; DAVIDOVITS, 1991). Atualmente os geopolímeros são sintetizados a partir de um vasto número de materiais aluminossilicosos e vários tipos de ativadores alcalinos. De modo semelhante (DAVIDOVITS, 1991) às temperaturas de síntese, mais utilizadas, variam de 25°C a 100°C, o que irá influenciar tanto a cinética da reação de formação do geopolímero quanto às propriedades termomecânicas que determinaram o tipo de aplicação do produto sintetizado (DAVIDOVITS, 1987; DAVIDOVITS, 1991). Estudos mais recentes comprovam que a formação dos geopolímeros podem ser por meio de temperaturas menores na faixa de 25°C a 60°C (GOMES, 2008).

2.2.3 Nomenclaturas dos geopolímeros

Na sua origem, percebeu-se que não existia uma nomenclatura adequada capaz de descrever a estrutura desses novos materiais cimentícios. Desta forma, Davidovits, (1991), devido aos geopolímeros apresentarem estruturas análogas aos polímeros orgânicos, criou a nomenclatura *polisialato*, termo que descreve encadeamento de tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados alternadamente pelo

compartilhamento de átomos de oxigênio, de acordo com a figura 12. O termo polisialato é uma abreviatura de silício-oxo-aluminato, estabelecida pela IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) no encontro realizado em Estocolmo em 1976 (DAVIDOVITS, 1987; DAVIDOVITS, 1991).

Figura 12 – Nomenclatura dos geopolímeros.

| Designação | Poli-sialato | Poli-(sialato-siloxo) | Poli-(sialato-disiloxo) |
|--|--|---|--|
| Simbologia | PS | PSS | PSDS |
| Fórmula | -Si-O-Al- | -Si-O-Al-O-Si-O- | -Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- |
| Si:Al | 1 | 2 | 3 |
| SiO ₂ :Al ₂ O ₃ | 2 | 4 | 6 |
| Representação do modelo |  |  |  |
| |  | | |

Fonte: Adaptado - Davidovits, 1982; Gomes, 2008; Veloso, 2015.

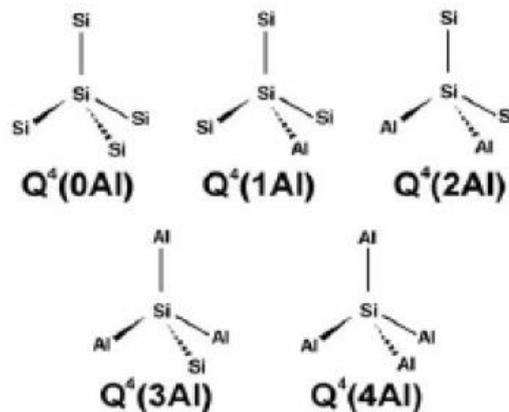
Existe uma equação (equação 1) empírica para determinar diversos tipos de arranjos, onde **M** é o cátion (M= Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca⁺⁺, Ba⁺⁺, NH₄⁺⁺, H₃O⁺), **p** é o grau de policondensação, **z** = 1, 2 ou 3, está relacionado com o tipo de arranjo dos silicatos com os aluminatos e descreve se é um polisialato (PS), poli (sialato-siloxo) (PSS) ou poli(sialato-disiloxo) (PSDS), e **w** é o teor de água do compósito. Porém ainda existem dificuldades devido ao fato do produto descoberto não possuir composição estequiométrica bem definida (DAVIDOVITS, 1982).



A equação mostra que as ligações entre o silício e o alumínio ocorrem por uma ponte de oxigênio e que as razões SiO₂/Al₂O₃ admitem apenas inteiros de acordo com o tipo de polisialato (z=1, SiO₂/Al₂O₃=2; z=2, SiO₂/Al₂O₃=4 e z=3, SiO₂/Al₂O₃=6). Já Engelhardt et al. (1982) por análises de espectroscopia raman e ressonância magnética nuclear, propõem uma notação baseada no arranjo do alumínio na estrutura dos tetraedros de silício e parece ser a mais próxima da realidade dos geopolímeros. Desta maneira, uma notação tridimensional do tipo:

$Q^n(mAl)$, onde $0 \leq m \leq n \leq 4$, sendo n o número de coordenação do silício central e m o número de alumínio vizinhos. Esse esquema tem sido mais recentemente usado para descrever a ligação de um tetraedro de silício com outros tetraedros de alumínio, onde observam-se razões SiO_2/Al_2O_3 fracionadas que descrevem melhor a estrutura dos geopolímeros (GOMES, 2008). A notação base do $Q^n(mAl)$ é descrita na figura 13.

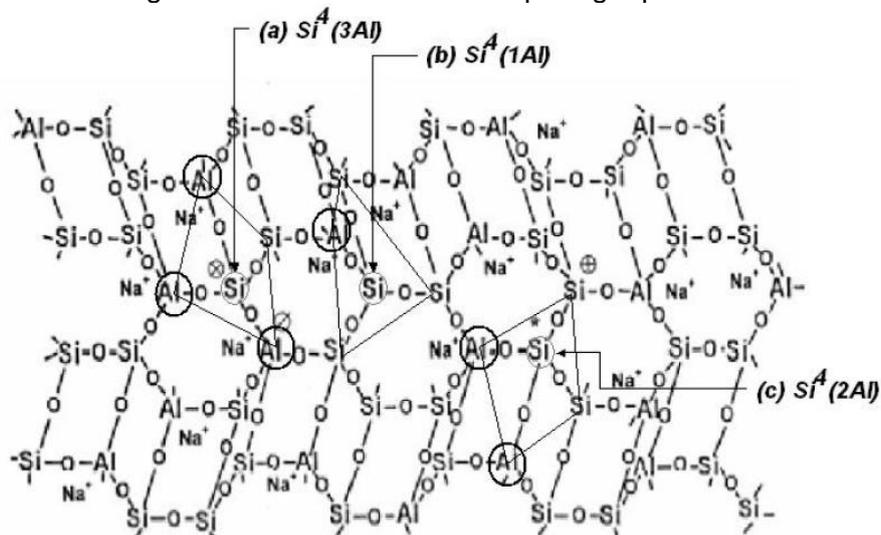
Figura 13 – Coordenação tridimensional do centro de silício.



Fonte: Engelhardt et al, 1982 e Gomes, 2008.

A partir desse modelo tridimensional do centro de silício, foi permitida a elaboração de modelos conceituais como o proposto por Barbosa (1999), figura 14.

Figura 14 – Modelo conceitual para geopolímeros



Fonte: Barbosa, 1999.

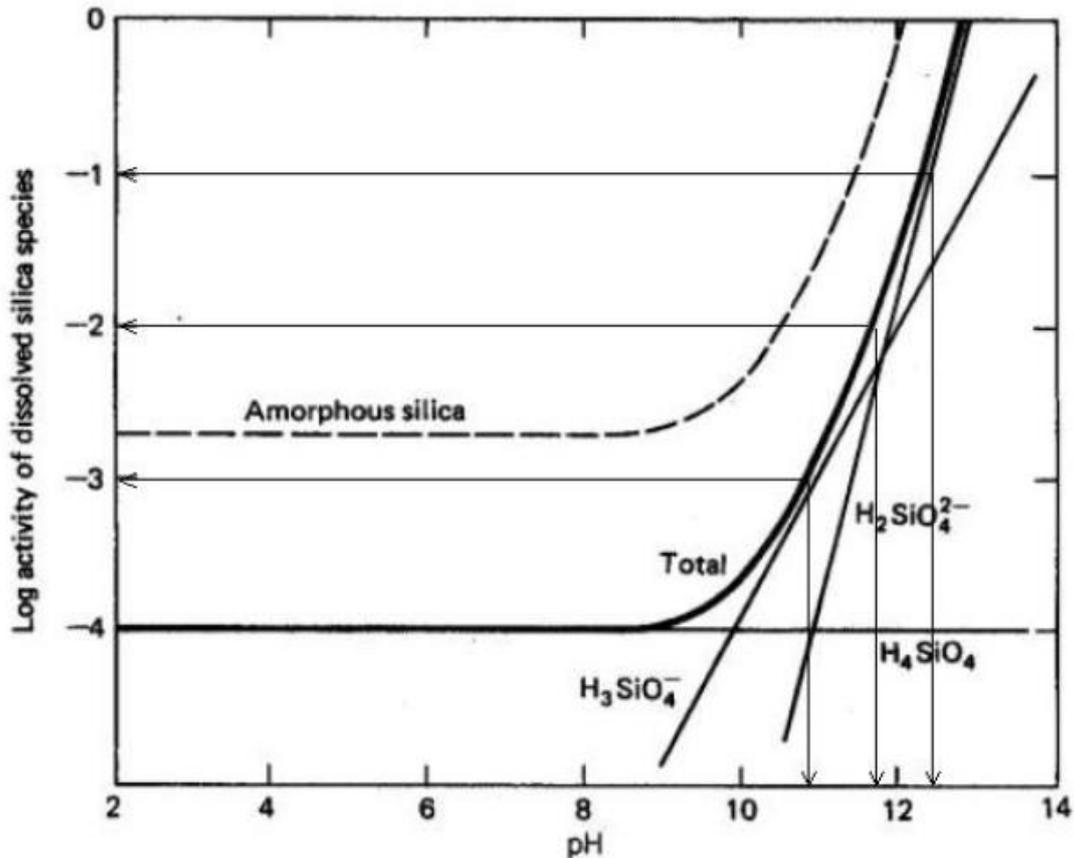
Neste modelo, foi possível observar, por exemplo, três possíveis ligações dos tetraedros de silício com os de alumínio, o (a) $S^{\#}(3Al)$, que se refere a um tetraedro SiO_4 ligado a três tetraedros de AlO_4 , o (b) $S^{\#}(1Al)$ que se refere a um SiO_4 ligado a um AlO_4 e o (c) $S^{\#}(2Al)$ que se refere a um SiO_4 ligado a dois AlO_4 , evidenciando que em uma mesma cadeia geopolimérica podem existir vários tipos de arranjos entre os tetraedros de silício e alumínio e que a razão molar SiO_2/Al_2O_3 pode assumir outros valores que não apenas os inteiros.

2.2.4 Síntese geopolimérica

Existem várias nomenclaturas referentes ao processo da formação dos geopolímeros como já foi mencionado antes, porém os mais conhecidos são: ativação alcalina e geopolimerização, embora ambos sejam semelhantes no processo de obtenção (DAVIDOVITS, 1979; PALOMO et al., 1999a; HARDJITO et al., 2004; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ e PALOMO, 2005). Na síntese da ativação alcalina são usados materiais com elevada porcentagem de óxido de silício e cálcio na sua composição, como é o caso da escória de alto-forno, que ao ser ativada com soluções alcalinas de baixa ou média concentração, originando produtos de reação do tipo silicato de cálcio hidratado (CSH do cimento Portland) (PURDON, 1940; TEOREANU e PURI, 1975, GLUKHOVSKY et al., 1980; KUTTI et al., 1982; MALOLEPSZY, 1989; PUERTAS, 1995; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ et al., 1998; ROY, 1999). Nesse caso com a ausência do alumínio, o processo de endurecimento é retardado (WENG et al, 2005).

Segundo Van Jaarsveld et al. (1997), para a reação da ativação alcalina mais conhecida como polimerização acontecer, é necessário a exposição do precursor geopolimérico a um ambiente fortemente alcalino para ser possível a dissolução da sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Em um estudo realizado por Drever (1997), é demonstrando que a dissolução da sílica cristalina ou amorfa, material esse de total importância para a realização da síntese só é possível em ambientes com pH superior a 10. Na figura 15 a quantidade de sílica dissolvida aumenta de 10, 100 e 1000 vezes quando o pH aumenta respectivamente para 10.85, 11.7 e 12.4 em ambas as fases.

Figura 15 – Várias espécies de sílica dissolvida em função do pH.

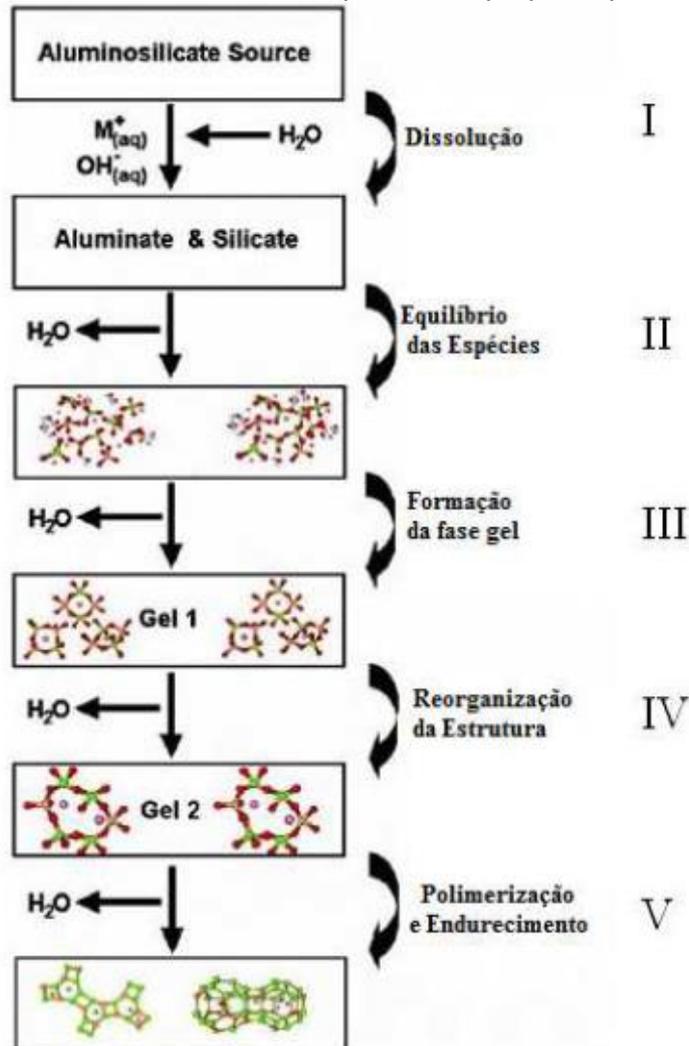


Fonte: Drever,1997 apud Gomes 2008, Souza 2009.

Na geopolimerização, o material composto quase exclusivamente por sílica e alumina, é ativado por soluções alcalinas bastante concentradas originando-se uma reação de polimerização. Palomo et al. (1999b) complementam que as duas principais diferenças caracterizadas por ambos os modelos de ativação alcalina seriam: (i) composição do material a ser ativado: essencialmente, Si (silício) e Ca (cálcio) na ativação alcalina, enquanto Si (silício) e Al (alumínio) dominantes na geopolimerização e (ii) concentração do ativador: baixo ou moderado para o primeiro modelo e alto para o segundo.

O mecanismo de dissolução da sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) consiste em um processo de transformação em um tempo muito curto, onde a estrutura plana da caulinita se torna em uma estrutura espacial, fazendo com que os tetraedros de Si e Al se liguem alternadamente compartilhando moléculas de oxigênio (DAVIDOVITS, 1979; DAVIDOVITS, 1994). A reação de polimerização é vista na figura 16 de forma simplificada e sistemática, embora esse processo aconteça simultaneamente.

Figura 16 – Modelo conceitual da síntese Geopolimérica proposto por Duxson.



Fonte: Duxson et al, 2007.

Como mostra Van Jaarsveld e Van Deventer, (1999), a síntese de geopolímeros, realiza nas seguintes etapas: (i) dissolubilidade, onde a solução alcalina vai hidrolisar a superfície do mineral dissolvendo pequenas quantidades de alumínio e silício. (ii) após a dissolubilidade reagem com os íons silicato, já dissolvidos, e polimerizam por reações de condensação. (iii) formação de um gel. (iv) organização dos aluminossilicatos dissolvidos. (v) estrutura final da síntese, seja por dissolução e outro processo de cristalização, ou por um mecanismo do estado sólido. Em estudos anteriores, realizados em 1998, Van Jaarsveld et al, observaram que na fase de dissolução com a mistura dos elementos alumina e sílica dissolvidos pelo hidróxido alcalino ocorre a eventual formação de gel, esse processo se deve ao tipo de solução alcalina utilizada ou

da natureza do precursor geopolimérico (finura e estrutura amorfa) (GHARZOUNI et al., 2015). Porém o próprio autor relata que este mecanismo para a dissolução e formação do gel ainda não é completamente entendido.

Para Duxson et al. (2005), a reação de ativação é o resultado de duas fases consecutivas, onde a primeira é a fase de nucleação ou dissolução do material fonte de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e formação de espécies poliméricas, e a segunda, o crescimento, que é a fase a qual os núcleos se organizam e inicia-se a formação de cristais. Estes processos de reorganização estrutural determinam a microestrutura e a distribuição dos poros do material a ser sintetizado, que são cruciais para definir as propriedades físicas dos geopolímeros (DUXTON, 2006).

2.1 - Terra crua estabilizada com geopolímero

Como discutido anteriormente, diversas são as técnicas utilizadas para realizar a estabilização da terra como material de construção. As mais utilizadas são empregando cal, em adobes, e cimento Portland em blocos de terra comprimida. Porém, se forem usadas altas porcentagens deste ligante modificará as características benéficas da terra (MINKE, 2006; BARBOSA e GHAVAMI, 2015). Além disso, o cimento Portland desassocia o caráter ecológico que a construção com terra tem, pois no seu processo produtivo o mesmo gera bastante gases poluentes (CHAO-LUNG e TRONG-PHUOC, 2015). Dessa forma, é imprescindível o uso e aprimoramento da técnica de estabilização por meio da ativação alcalina.

Os primeiros estudos usando o ligante geopolimérico como estabilizante da terra foi realizado por Boutterin e Davidovits, (2003), estes autores usaram solos caulinítico e montmorilonítico para a produção de adobes, que foi nomeado de tijolo geopolimérico de baixa temperatura (LTGS). Para a estabilização foram utilizadas proporções do ligante que variaram de 0,5% à 10% em temperaturas de 85°C e 450°C, que obtiveram as respectivas resistências à compressão de 6 MPa e 60 MPa. De acordo com Boutterin e Davidovits, (2003), podem ser usados valores maiores dos ligantes, pois o mesmo não afeta as propriedades da terra.

Diop e Crutzeck, 2008a, obtiveram adobes com o uso de uma argila da província de Tchiky, no Senegal, que é composta predominantemente por ilita e montmorilonita, onde a mesma passou por um processo de peneiramento na

malha de nº 325 e foi misturada com soluções de NaOH que variaram as molaridades de 4, 8 e 12 mols. Nesse estudo os adobes foram submetidos a cura em estufa elétrica com temperaturas de 40°C, 80°C e 120°C. Os tijolos que obtiveram melhores resultados tiveram resistência à compressão de 20 MPa que foram as misturas com 12 mols curadas a temperatura de 80°C. As demais molaridades obtiveram resistências menores devido ao menor poder de dissolução das soluções de NaOH (DIOP e CRUTZECK, 2008b).

Em estudo realizado por Mohsen & Mostafa (2010), mostrou que, as argilas com baixo teor de caulinita podem ser usadas como matéria-prima para tijolos geopoliméricos, e que a temperatura ambiente pode ser inviável para amostras ativadas apenas com solução de NaOH devido a baixa resistência mecânica. No entanto, o aumento da temperatura no processo sendo superior a 100°C diminui a resistência à compressão devido à rápida eliminação da água presente na mistura. A cura dos tijolos sendo a 75°C durante 24 horas poderá resultar melhorias nas propriedades mecânicas. Comprovando que o aumento de resistência à compressão está relacionada diretamente ao tipo de ativador alcalino utilizado (NaOH ou silicato de sódio).

Para Diop et al., 2011, em um estudo comparativo sobre desempenho de dois tipos de argila (natural e calcinada a 700°C), foi observado que a argila calcinada tende a ter um aumento de resistência mecânica com idades menores. Para os testes de longa duração (1 semana a 3 meses), para tijolos mantidos a 40°C (seco/úmido), a resistência não aumentou com o tempo para ambas as argilas (natural e calcinada) ativada com hidróxido de sódio, mas este depende da concentração de NaOH. A resistência máxima é obtida após 14 dias para todas as concentrações. Já nos testes de curto prazo (6 h, 12 h, 24 h), com tijolos mantidos a 120°C (cura seca), a situação se alterou. A argila calcinada deu as melhores resistências mecânicas. Para todos os casos, a longo prazo ou a curto prazo, calcinados ou não, a resistência aumenta com a concentração. Os tijolos produzidos desta forma são duráveis e relativamente baratos de se produzir.

Para teste de resistência à compressão das misturas de resíduos com metacaulim e cerâmica, realizados por OLIVEIRA et al., 2014, sob tempos de cura de 7 e 28 dias, em temperatura ambiente de 50°C, foram obtidos os resultados de resistência constante, sem diferenças entre os valores obtidos com os dois precursores. Outra característica importante observada está no material

com a ativação alcalina, em sua redução substancial de água no processamento, atingindo 40% em comparação com a mesma quantidade de material sem ativação alcalina. Esta aplicação é reforçada pelo fato de os blocos com a ativação alcalina tornar-se resistente à água, resultando em valores de absorção de água de 10,10% para os blocos feitos com o precursor de resíduo cerâmico. O aumento da temperatura de cura e a quantidade de ativador, não melhoraram a resistência à compressão das amostras.

Muñoz et al. (2015), avaliaram o sucesso na estabilização do solo com o ativador alcalino composto por uma combinação de NaOH, KOH e silicato de sódio. Os blocos foram compactados com uma presa hidráulica e curados em estufa elétrica com temperatura de 65°C durante 7 dias. O resultado desse estudo produziu blocos com resistência à compressão de 7,58 MPa.

CAPÍTULO III

3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização deste estudo foram considerados aspectos que envolvessem a fabricação de blocos de terra crua (adobe) e o ligante alcalino. Sendo assim, foram avaliados parâmetros que influenciavam diretamente o produto final. Na primeira etapa foram realizadas análises químicas e físicas de todos os materiais granulares e pulverulentos utilizados no processo de obtenção da terra estabilizada (solo) e os precursores (metacaulim, resíduo da cerâmica vermelha).

Em seguida, verificam-se as características químicas dos ativadores alcalinos determinando-se quantidades e importância para a composição do ligante, como também a elaboração de alguns ativadores que, além de serem alcalinos fornecem sílica necessária para a ativação das misturas

Nos procedimentos de cura dos adobes utilizaram-se estufas comuns com base em outros trabalhos e propõe uma estufa ecológica para reduzir o custo energético do processo. Finalmente, uma análise de desempenho mecânico do material estabilizado e verificação da resistência à ação da água foi feita.

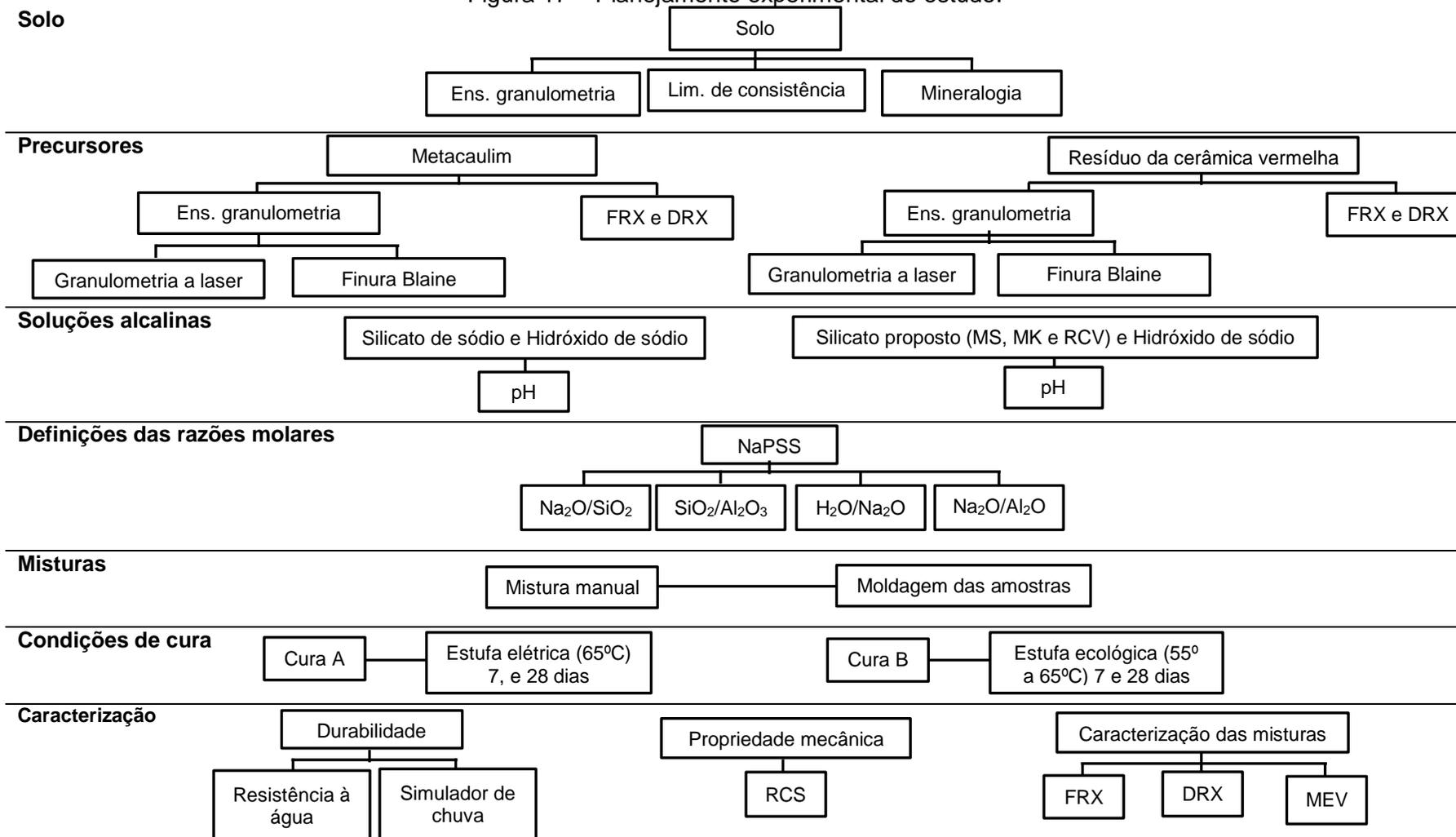
O planejamento experimental dessa pesquisa se descreve da seguinte forma:

- (i) Caracterização física, mineralógica do material de base, a terra, e determinação dos limites de Atterberg dos solos utilizados;
- (ii) Caracterização física e química dos precursores usados no processo de ativação alcalina;
- (iii) Escolha e caracterização física e química dos precursores usados no processo de ativação alcalina;
- (iv) Caracterização dos ativadores alcalinos e produção das soluções propostas;
- (v) Definição geométrica dos adobes e elaboração das formas para a sua confecção;
- (vi) Criação de uma estufa ecológica que usa a luz solar para o processo de cura e ativação das misturas;

- (vii) Análise dos parâmetros de retração, resistência mecânica e resistência a ação da água nas misturas elaboradas;
- (viii) Investigação do comportamento de adobes de referência (terra + água) e adobes estabilizados alcalinamente com caracterização da microestrutura e composição química dos corpos de prova obtidos.

O cronograma do planejamento experimental da pesquisa pode ser visto por etapas na figura 17

Figura 17 – Planejamento experimental do estudo.



3.1 - Seleção dos materiais

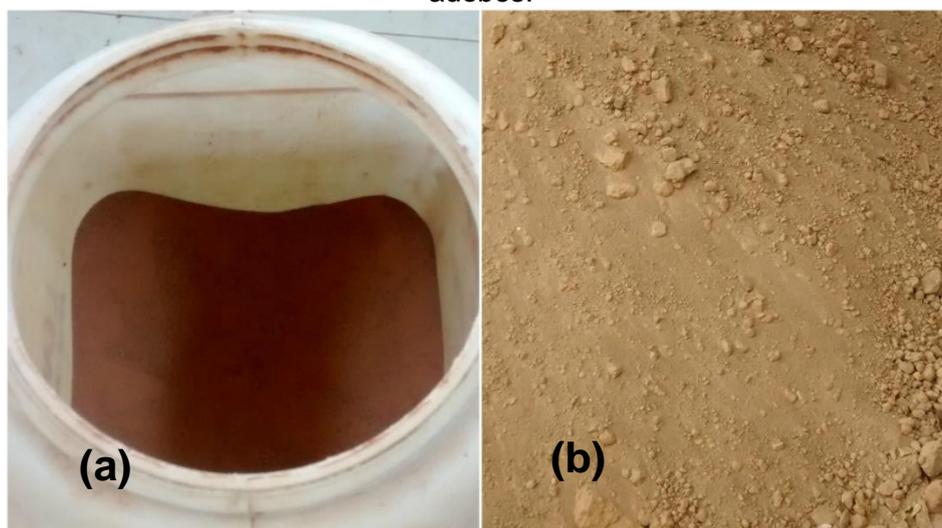
Para a elaboração dos adobes, foram utilizados solo vendido em depósitos de materiais de construção, conhecidos popularmente como *barro*. Os precursores fonte de aluminossilicatos usados foram metacaulim e resíduo da cerâmica vermelha.

Os ativadores alcalinos foram silicato de sódio (PA) e hidróxido de sódio (PA). Para a fabricação dos ativadores que substituíssem o silicato de sódio foram produzidos supostos silicatos com misturas de hidróxido de sódio, resíduos minerais (metacaulim, resíduo da cerâmica vermelha e sílica ativa) e água destilada.

3.1.1 Solo

Os solos usados neste trabalho foram originários do município de Santa Rita – Paraíba, cidade localizada na região da grande João Pessoa. Na elaboração dos corpos de provas foi utilizado um solo de cor levemente avermelhada, já para os adobes o solo usado tinha coloração amarelada, visto na figura.

Figura 18 – (a) Solo para moldagem dos corpos de prova, (b) solo para confecção dos adobes.



3.1.2 Caracterização do solo

A caracterização do solo foi feita por meio do ensaio de granulometria por peneiramento para a parte granular e sedimentação para identificar os teores de silte e argila, como descreve a NBR-7181/84 - Análise Granulométrica de Solos. Para determinar a quantidade de água necessária para realização dos adobes, foram realizados ensaios identificando os limites de consistência, de acordo como descrito nas Normas Brasileiras: NBR-7180/84 – Limite de Plasticidade de Solos e NBR-6459/84 – Determinação do Limite de Liquidez de Solos.

3.2 - Precursores geopoliméricos

Os precursores usados nesse estudo foram materiais ricos em óxido de silício e óxido de alumínio. Executou-se também, os métodos de avaliação química e granulométrica para caracterizar os precursores por meio do Fluorescência de raios – X (FRX), difração de raio – X (DRX), granulometria a laser e finura Blaine.

3.2.1 Metacaulim

O metacaulim utilizado é um produto comercial fornecido pela empresa Metacaulim Nordeste que é um material de fácil acesso encontrado na região, ver figura 19.

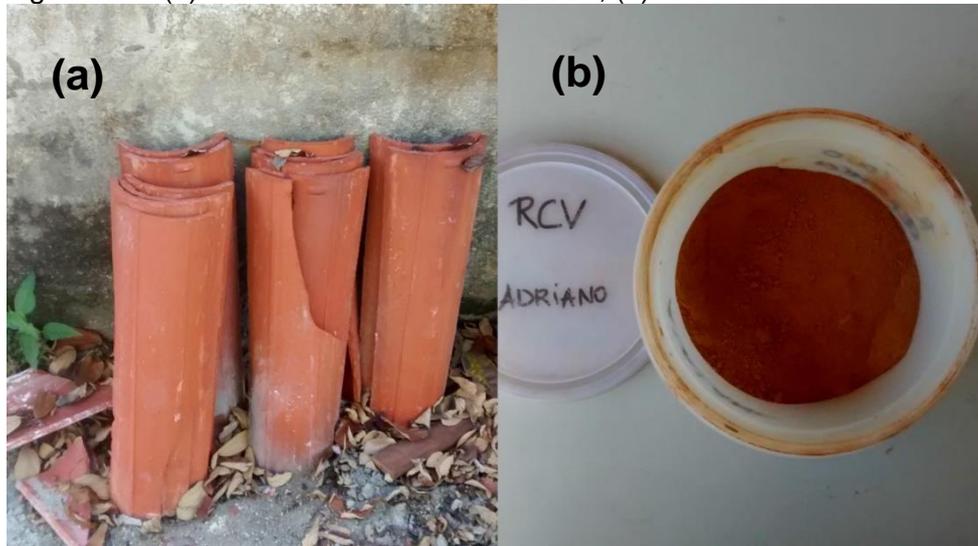
Figura 19 – Metacaulim utilizado como precursor.



3.2.2 Resíduo da cerâmica vermelha

O resíduo cerâmico utilizado foi coletado de olarias da região de João Pessoa – Paraíba, provenientes das falhas no processo de queima, armazenamento e transporte dos materiais produzidos, como visto na figura 20.

Figura 20 – (a) Resíduo cerâmico descartado, (b) Resíduo cerâmico moído.



Para a obtenção da finura necessária, para que o resíduo cerâmico reagisse com a solução alcalina, foi executada sua moagem em um moinho de bolas modelo SONNEX I-4205, fabricado pela CONTENCO, com capacidade de 50 dm³, que pode ser visto na figura 21.

Figura 21 – Moinho de bolas.



A moagem foi executada seguindo o estudo realizado por Vieira (2005) e Carvalho (2016) onde o processo realizava um número adequado de bolas e

um tempo preestabelecido de rotações. Para conferir a granulometria do material, realizou-se o ensaio de granulometria a laser e finura Blaine.

3.3 - Soluções alcalinas

3.3.1 Silicato de sódio (PA)

O silicato de sódio (PA) usado foi fornecido pela empresa Pernambuco Química S/A a descrição do material pode ser visualizada na tabela 3.

Tabela 3 – Características do silicato de sódio (PA)

| | |
|--|-----------------------------------|
| Fórmula: | Na ₂ OSiO ₃ |
| Aspecto | Líquido viscoso levemente turvo |
| Cor | Incolor a levemente amarelado |
| Alcalinidade como Na ₂ O (em %) | 16,00% a 19,00% |
| Sílica como SiO ₂ (em %) | 33,00% a 38,00% |
| Solubilidade | Solúvel em água |
| Relação SiO ₂ / Na ₂ O | 1,95 a 2,50 |
| pH | 11,00 a 14,00 (solução a 1%) |
| Densidade (g/ml) a 20°C | 1,63 a 1,67 |
| Viscosidade (Brookfield) a 20°C | > 600 cPs |
| Ferro (ppm) | < 100 |
| Sólidos totais (em %) | 50,00 a 57,00 |

Fonte: Pernambuco Química, 2015.

3.3.2 Hidróxido de sódio (PA)

O hidróxido de sódio (PA), foi em escamas fornecido pela Pernambuco Química S/A com cor predominantemente branca e pH aproximadamente de 13.

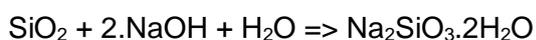
3.3.3 Soluções alcalinas propostas

As soluções alcalinas propostas para esse estudo foram obtidas através do balanceamento estequiométrico, usando como matéria-prima o hidróxido de sódio (PA) e materiais de caráter pozolânico: sílica ativa (MS), metacaulim (MK) e resíduo da cerâmica vermelha (RCV). Devido a sílica ativa ser o material com uma maior porcentagem de sílica na fase amorfa, como pode ser visto na tabela 4, ela foi usada como referência para os demais materiais na obtenção do silicato alternativo.

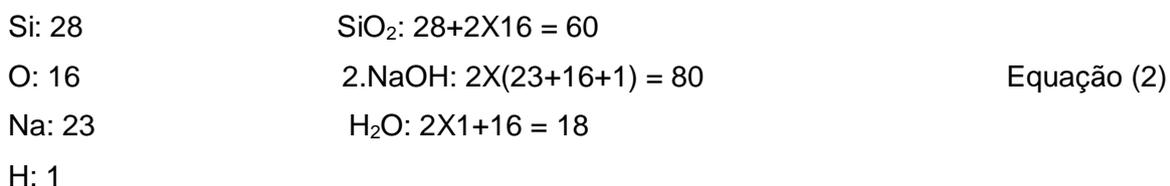
Tabela 4 – Composição química da sílica ativa.

| Óxidos | (%) |
|--------------------------------|------------|
| SiO ₂ | 95,416 |
| Al ₂ O ₃ | 2,229 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,129 |
| K ₂ O | 0,679 |
| CaO | 0,594 |
| Na ₂ O | ----- |
| MgO | 0,480 |
| Outros | 0,473 |

A equação 2 descreve como foram encontradas as proporções para a obtenção do silicato proposto.



Massa Atômica:



1,0 g de sílica; 1,33 g de hidróxido de sódio; 0,30 g de água destilada

Como os materiais utilizados não tinham 100% de sílica em sua composição, foram feitas as correções de acordo com a quantidade de sílica encontrada em cada material, que podem ser visualizadas na tabela 5 como ficaram as proporções para cada material, de modo que se aproximasse o máximo possível da relação SiO₂/Na₂O do silicato industrializado. A quantidade de água foi corrigida, pois o valor estipulado pelo balanceamento era insuficiente para a reação e, em alguns casos, foi necessário colocar água adicional, devido a temperatura que era gerada durante a mistura ser elevada, e conseqüentemente poderia reduzir a porcentagem de água.

Tabela 5 – Proporções dos materiais para a composição do silicato proposto.

| Silicato proposto | NaOH_(g) | H₂O_{dest} (g) | MS_(g) | RCV_(g) | MK_(g) |
|--------------------------|---------------------------|--|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| MS | 1,33 | 0,70 | 3,16 | ---- | ---- |
| RCV | 1,33 | 1,80 | ---- | 3,32 | ---- |
| MK | 1,33 | 1,10 | ---- | ---- | 3,40 |

As etapas da mistura e processo de preparação das soluções são descritas a seguir:

- (i) Pesagem do hidróxido de sódio e água destilada;
- (ii) Mistura o NaOH com a água destilada, dissolve bem e espera até que a mistura resfriar por aproximadamente 10 minutos;
- (iii) Após resfriamento, mistura a parte líquida com o material fonte de sílica (MS, RCV e MK);
- (iv) Misturar até o material sólido dissolver por completo e reagir com o hidróxido de sódio para formar um gel;
- (v) Esperar o gel formado pela reação exotérmica resfriar por aproximadamente 30 minutos.

O aspecto do silicato proposto pode ser visto na figura 22.

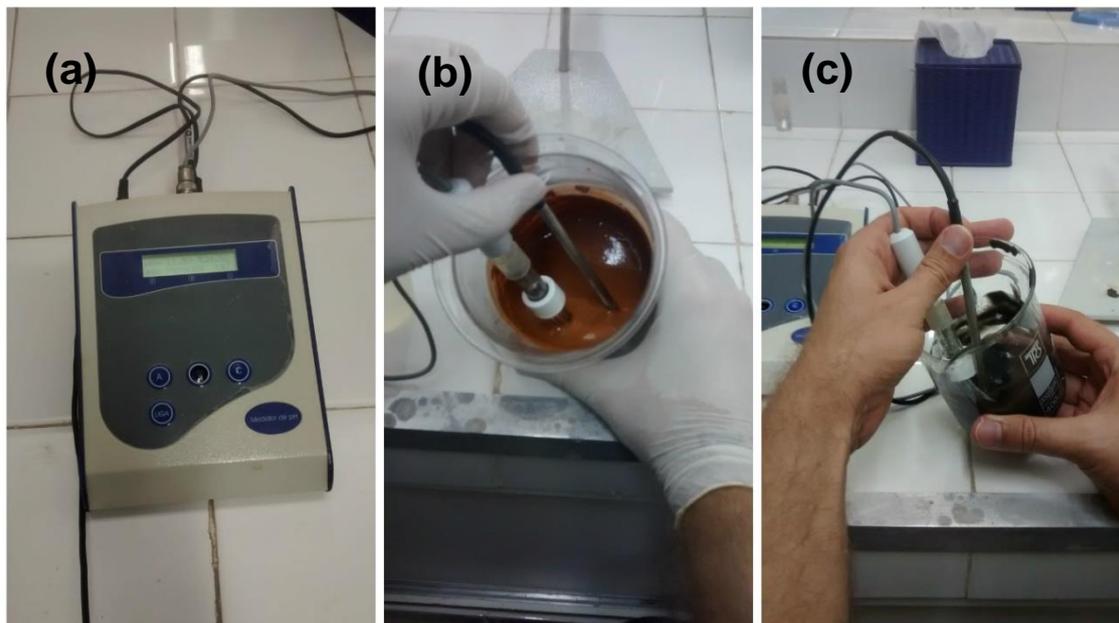
Figura 22 – (a) Silicato de sílica ativa, (b) silicato de resíduo cerâmico, (c) silicato de metacaulim.



O pH das soluções propostas foi determinado por meio da utilização de um peagâmetro, onde foram usados dois sensores, um para medir o pH da solução e o outro para indicar a temperatura do material no momento do ensaio

(Figura 23). As medições foram realizadas após 1 hora de realização da mistura, onde já era possível perceber o resfriamento do material.

Figura 23 – (a) Peagâmetro digital, (b) medição da solução de MK, (c) medição da solução de MS.



3.4 - Água

A água utilizada para produzir as soluções, foi água destilada obtida no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LAPAV) da UFPB, já para moldagem foi empregada água potável da rede de distribuição pública (CAGEPA).

3.5 - Definições das razões molares

Para a produção do ligante geopolimérico, o método abordado foi o sugerido por Davidovits (1982), para gerar os compostos do tipo NaPSS (polissialatosiloxo de sódio). Este método consiste em preparar uma mistura de alumino-silicatos em solução alcalina, para que a composição da mistura tenha razões molares de óxidos dentro dos intervalos indicados na tabela 6.

Tabela 6 – Razões molares necessárias para a formação de geopolímeros.
Razões molares dos óxidos

| | |
|--|---------------|
| Na ₂ O/SiO ₂ | 0,20 a 0,28 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 3,50 a 4,50 |
| H ₂ O/Na ₂ O | 15,00 a 17,50 |
| Na ₂ O/Al ₂ O ₃ | 0,80 a 1,20 |

Fonte: Davidovits, 1982.

3.6 – Misturas dos adobes

Nesse estudo serão avaliados o comportamento dos adobes estabilizados por meio da ativação alcalina, onde será utilizado uma mistura de referência com 0% do ativador e outras com 1%, 2% e 3% de ligante geopolimérico em relação a massa do solo.

As proporções dos materiais para a síntese dos geopolímeros foram obtidos com base no estudo realizado por Oliveira et al (2014), que seguia as razões molares determinadas por Davidovits (1982). Dessa forma, foi feita uma adaptação onde os materiais são visualizados na tabela 7 para geopolímeros com precursor de metacaulim e na tabela 8 com resíduo da cerâmica vermelha e suas respectivas razões molares para as misturas com 1%, 2% e 3% de ligante nas tabelas 9 e 10 na ativação do solo vermelho.

Tabela 7 – Proporções utilizadas na ativação do solo vermelho com precursor de metacaulim.

| Solo % | Ativador alcalino % | % Ativador alcalino | | | | % H ₂ O _{pot.} |
|--------|---------------------|---------------------|---|------|----------------|------------------------------------|
| | | Precursor (MK) | Na ₂ OSiO ₃ (IND) | NaOH | Água destilada | |
| 100 | 0% | --- | --- | --- | --- | 18,5 |
| 100 | 1% | 0,39 | 0,34 | 0,04 | 0,22 | 12,0 |
| 100 | 2% | 0,78 | 0,68 | 0,08 | 0,44 | 10,4 |
| 100 | 3% | 1,18 | 1,04 | 0,12 | 0,66 | 10,4 |

Tabela 8 – Proporções utilizadas na ativação do solo vermelho com precursor de resíduo da cerâmica vermelha.

| Solo % | Ativador alcalino % | % Ativador alcalino | | | | % H ₂ O _{pot.} |
|--------|---------------------|---------------------|---|-------|----------------|------------------------------------|
| | | Precursor (RCV) | Na ₂ OSiO ₃ (IND) | NaOH | Água destilada | |
| 100 | 0% | --- | --- | --- | --- | 18,5 |
| 100 | 1% | 0,416 | 0,35 | 0,026 | 0,206 | 12,0 |
| 100 | 2% | 0,83 | 0,70 | 0,053 | 0,413 | 10,4 |
| 100 | 3% | 1,25 | 1,05 | 0,08 | 0,62 | 10,4 |

Tabela 9 – Razões molares das misturas com 1%, 2% e 3% de ligante com precursor de metacaulim.

| Razões molares dos óxidos | |
|--|-------|
| Na ₂ O/SiO ₂ | 0,27 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 3,57 |
| H ₂ O/Na ₂ O | 15,61 |
| Na ₂ O/Al ₂ O ₃ | 0,96 |

Tabela 10 – Razões molares das misturas com 1%, 2% e 3% de ligante com precursor do resíduo da cerâmica vermelha.

| Razões molares dos óxidos | |
|--|-------|
| Na ₂ O/SiO ₂ | 0,22 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 6,02 |
| H ₂ O/Na ₂ O | 16,23 |
| Na ₂ O/Al ₂ O ₃ | 1,35 |

Com base nestas mesmas razões molares, foi realizado a substituição do silicato industrializado pelas soluções propostas e, a síntese geopolimérica de forma a garantir a mesma estabilidade dimensional e resistência à água. Para todas as misturas a molaridade das soluções eram aproximadamente 4 mols. Os valores das misturas são visualizados nas tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Proporções utilizadas na ativação do solo vermelho com precursor de metacaulim e soluções alcalinas propostas.

| Solo % | Ativador alcalino % | % Ativador alcalino | | | | % H ₂ O _{pot.} |
|--------|---------------------|---------------------|---|------|----------------|------------------------------------|
| | | Precursor (MK) | Na ₂ OSiO ₃ (MK, MS, RCV) | NaOH | Água destilada | |
| 100 | 1% | 0,39 | 0,34 | 0,04 | 0,22 | 14,0 |
| 100 | 2% | 0,78 | 0,68 | 0,08 | 0,44 | 12,5 |
| 100 | 3% | 1,18 | 1,04 | 0,12 | 0,66 | 12,0 |

Tabela 12 – Proporções utilizadas na ativação do solo vermelho com precursor de resíduo da cerâmica vermelha e soluções alcalinas propostas.

| Solo % | Ativador alcalino % | % Ativador alcalino | | | | % H ₂ O _{pot.} |
|--------|---------------------|---------------------|---|-------|----------------|------------------------------------|
| | | Precursor (RCV) | Na ₂ OSiO ₃ (MK, MS, RCV) | NaOH | Água destilada | |
| 100 | 1% | 0,416 | 0,35 | 0,026 | 0,206 | 14,0 |
| 100 | 2% | 0,83 | 0,70 | 0,053 | 0,413 | 12,5 |
| 100 | 3% | 1,25 | 1,05 | 0,08 | 0,62 | 12,0 |

Como a moldagem dos adobes foi realizada com outro tipo de terra a única alteração nas misturas foi na quantidade de água de moldagem para ambas as soluções alcalinas, e foram moldadas apenas as amostras que resistiram ao ensaio de resistência à ação da água com o solo anterior (tabela 13, 14, 15 e 16).

Tabela 13 – Proporções utilizadas na ativação dos adobes com solo amarelo e precursor de metacaulim.

| Solo % | Ativador alcalino % | % Ativador alcalino | | | | % H ₂ O _{pot.} |
|--------|---------------------|---------------------|---|------|----------------|------------------------------------|
| | | Precursor (MK) | Na ₂ OSiO ₃ (IND) | NaOH | Água destilada | |
| 100 | 0% | -- | -- | -- | -- | 15,8 |
| 100 | 1% | 0,39 | 0,34 | 0,04 | 0,22 | 9,0 |
| 100 | 2% | 0,78 | 0,68 | 0,08 | 0,44 | 9,0 |
| 100 | 3% | 1,18 | 1,04 | 0,12 | 0,66 | 8,0 |

Ativação Alcalina de Blocos de Terra Crua

Tabela 14 – Proporções utilizadas na ativação dos adobes com solo amarelo e precursor de resíduo da cerâmica vermelha.

| Solo % | Ativador alcalino % | % Ativador alcalino | | | | % $H_2O_{pot.}$ |
|--------|---------------------|---------------------|--------------------|-------|----------------|-----------------|
| | | Precursor (RCV) | Na_2OSiO_3 (IND) | NaOH | Água destilada | |
| 100 | 0% | --- | --- | --- | --- | 15,8 |
| 100 | 1% | 0,416 | 0,35 | 0,026 | 0,206 | 9,0 |
| 100 | 2% | 0,83 | 0,70 | 0,053 | 0,413 | 9,0 |
| 100 | 3% | 1,25 | 1,05 | 0,08 | 0,62 | 8,0 |

Tabela 15 – Proporções utilizadas na ativação dos adobes com solo amarelo, precursor de metacaulim e soluções alcalinas propostas.

| Solo % | Ativador alcalino % | % Ativador alcalino | | | | % $H_2O_{pot.}$ |
|--------|---------------------|---------------------|----------------------------|------|----------------|-----------------|
| | | Precursor (MK) | Na_2OSiO_3 (MK, MS, RCV) | NaOH | Água destilada | |
| 100 | 2% | 0,78 | 0,68 | 0,08 | 0,44 | 10,0 |
| 100 | 3% | 1,18 | 1,04 | 0,12 | 0,66 | 12,0 |

Tabela 16 – Proporções utilizadas na ativação dos adobes com solo amarelo, precursor de resíduo da cerâmica vermelha e soluções alcalinas propostas.

| Solo % | Ativador alcalino % | % Ativador alcalino | | | | % $H_2O_{pot.}$ |
|--------|---------------------|---------------------|----------------------------|-------|----------------|-----------------|
| | | Precursor (RCV) | Na_2OSiO_3 (MK, MS, RCV) | NaOH | Água destilada | |
| 100 | 2% | 0,83 | 0,70 | 0,053 | 0,413 | 10,0 |
| 100 | 3% | 1,25 | 1,05 | 0,08 | 0,62 | 12,0 |

Para a obtenção dos corpos de provas executou-se as misturas manualmente dos materiais determinados para a ativação alcalina do solo (Figura 24).

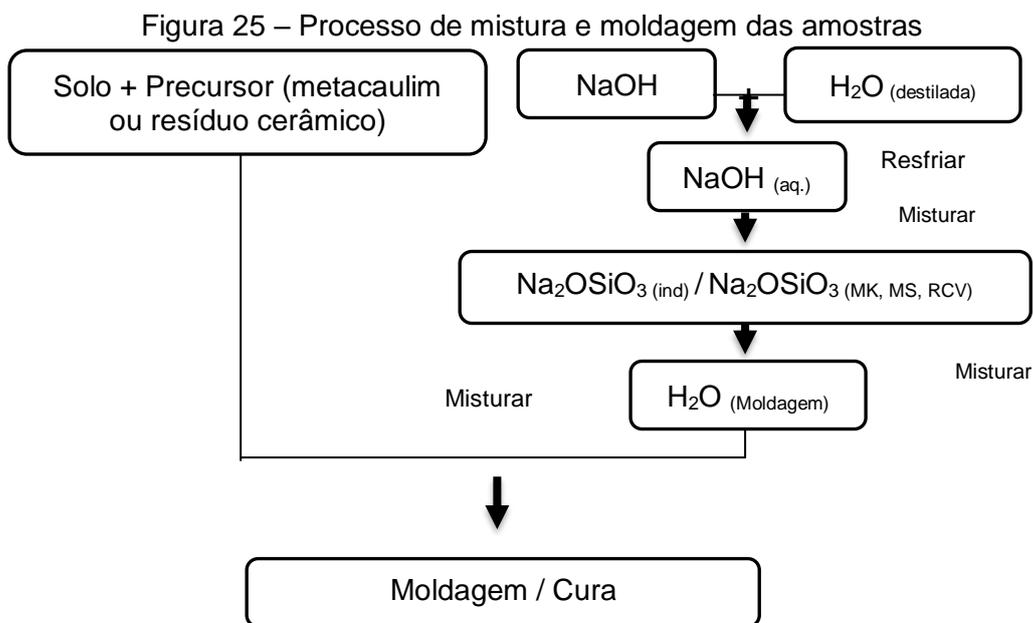
Figura 24 – Etapas de moldagem dos corpos de prova



Descrições das etapas para obtenção do solo ativado alcalinamente:

- (i) Mistura manual do material sólido (solo + precursor), obtendo uma mistura homogênea;
- (ii) Preparar o ativador alcalino começando pela mistura da água destilada com NaOH e esperar o resfriamento da solução obtida por aproximadamente 10 minutos;
- (iii) Após o resfriamento adicionar o silicato de sódio (Na_2OSiO_3 (IND)/ Na_2OSiO_3 (MK, MS, RCV));
- (iv) Misturar a água da moldagem com a solução alcalina e adicionar imediatamente ao solo;
- (v) Promover a mistura manual do solo com o ativador alcalino de forma que se obtenha um material homogêneo;
- (vi) Realizar a moldagem de imediato, afim de garantir uma boa compactação dos corpos de prova;
- (vii) Após 30 minutos realizar a desforma do material e confinar as amostras em sacos plásticos durante 3 dias para depois submetê-las ao processo de cura (SUMAJOW e RANGAN, 2006).

A figura 25 descreve todo o processo de forma esquemática:



3.7 – Processo de cura

Para obtenção dos geopolímeros a literatura atual tem um vasto registro de procedimentos de cura diferentes. Porém, alguns regimes de cura são adotados com objetivos específicos de acordo para cada aplicação do ligante geopolimérico (DAVIDOVITS 2005, FERNANDEZ–JIMENEZ e PALOMO 2005).

A síntese geopolimérica, segundo Davidovits (1982), pode ser realizada a temperaturas que variam entre 25°C e 100°C, porém, estudos realizados com a estabilização de solo com ligante geopolimérico comprovaram que a temperatura de 100°C gera materiais com menor resistência mecânica devido a maior porosidade da matriz (OLIVEIRA et al. 2014, SOUSA 2011). Embasado nesta comprovação, o regime de cura adotado por esse estudo foi com temperatura de 65°C obtido em estufa elétrica e 50°C a 65°C em estufa ecológica. As idades escolhidas para análise das amostras foram de 7 e 28 dias contando da data da moldagem.

3.7.1 Cura em estufa elétrica

Para conseguir uma temperatura constante de 65°C foi utilizada uma estufa elétrica FANEN de secagem e esterilização modelo 315 SE (Figura 26), disponível no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Figura 26 – Estufa eletrônica para cura dos corpos de prova e adobes



3.7.2 Cura em estufa ecológica

Devido ao adobe ser um material que obtém endurecimento ao ar livre e também visando a economia de energia no processo de fabricação, sabendo que, a ativação alcalina necessita de um aumento na temperatura para realização da síntese, o presente estudo pretende criar uma estufa ecológica feita com madeira e vidro para substituir o processo sem que, necessite de energia elétrica. Desta forma, foi elaborada uma estufa com uma base de madeira compensada com as seguintes dimensões 140 cm x 55 cm com espessura de 2 cm, com encaixes para acoplar as peças de vidro e com a base toda revestida de papel alumínio. Além disso, o vidro foi vedado com cola de silicone para garantir um maior confinamento do calor gerado dentro da estufa (Figura 27).

Figura 27 – Estufa ecológica



A temperatura da estufa ecológica foi medida de duas maneiras, onde a primeira foi obtida por um termômetro de mercúrio para conferir a temperatura do ambiente interno da estufa e a segunda mensuração com um medidor térmico a laser de superfície, que realizava a medição diretamente no corpo de prova (Figura 28a e 28b). Nesse método de cura só foi realizada as amostras com solo vermelho com dimensões de 5 cm x 5 cm x 5 cm.

Figura 28 – (a) Medição com termômetro de mercúrio, (b) medição da superfície do corpo de prova.

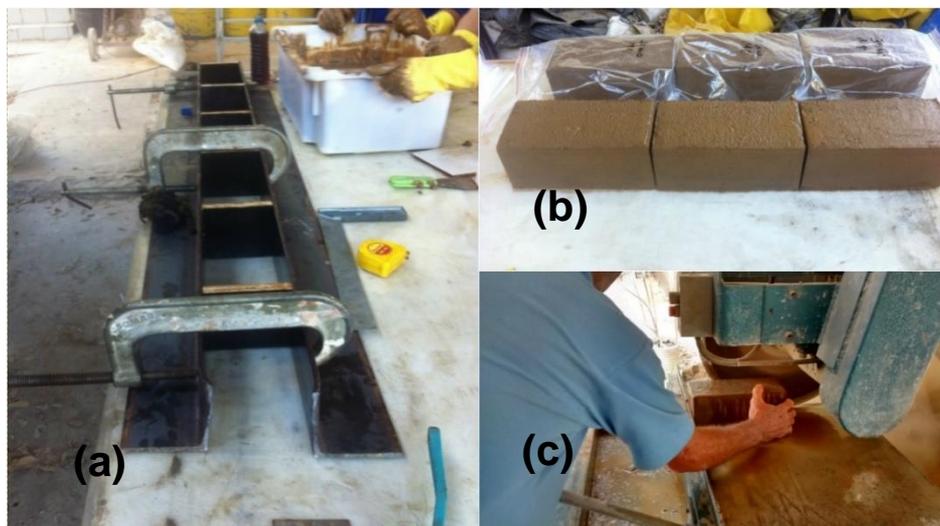


3.8 – Ensaio de resistência à compressão simples

Para a realização do ensaio de compressão simples foi utilizado uma prensa manual com célula de carga de 20 ton. Na determinação da resistência mecânica foram utilizados dois tipos de corpos de prova, o primeiro foi moldado com as dimensões de 5 cm x 5 cm x 5 cm, já o segundo foi obtido por meio da moldagem do bloco (adobe) com 24 cm x 12 cm x 12 cm, a moldagem foi feita em uma forma composta por duas cantoneiras metálicas em perfil “L” e com divisórias de madeira (Figura 29a e 29b).

Para realizar o ensaio no bloco foram extraídos dois corpos de prova de 10 cm x 10 cm x 10 cm de acordo com a norma ALVENARIA DE ADOBE – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio; norma essa que já foi encaminhada para avaliação e aprovação na Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (Figura 29). A finalidade de moldar uma amostra de tamanho menor em relação ao bloco, é ver quais as misturas têm um melhor comportamento com o ligante geopolimérico. A resistência dos corpos de provas foi dada por meio de uma média aritmética de 3 amostras, já os adobes foram feitos 3 blocos de cada mistura e extraídos 2 corpos de prova de cada tijolo, contabilizando um total de 6 amostras, onde eram descartados o maior e o menor valor e a média era obtida através das outras 4 amostras.

Figura 29 – (a) Forma para moldar os blocos, (b) adobe moldado e confinado para cura, (c) extração do corpo de prova com aresta de 10 cm.



3.10 Durabilidade dos adobes

Devido ao adobe ser um material onde o ligante fundamental é a argila, ou seja, a matriz responsável pela agregação das partículas não endurece por ação química e com isso tornando o material susceptível ao desgaste por meio da ação da água. Dessa forma, para mensurar a durabilidade dos adobes foram realizados dois ensaios: absorção de água por imersão e perda de massa por erosão (simulador de chuva).

3.10.2 Absorção de água por imersão e perda de massa

Os ensaios de resistência e absorção de água por imersão foram feitos considerando-se uma adaptação da norma NBR – 8492/12: tijolo maciço de solo - cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água.

As amostras passavam 48 horas em estufa com temperatura de 110°C para eliminar a água em seus capilares e após esse procedimento eram pesadas. Em seguida, as mesmas eram colocadas em um recipiente que mantivessem submersas até o término do ensaio. Para conseguir o peso úmido as amostras eram retiradas e realizada a secagem da sua superfície com um pano seco e logo em seguida era feito a sua pesagem. A absorção dos corpos de prova foi determinada pela equação 3 nas amostras que, após o ensaio, se mantiveram com forma possível para a determinação do seu peso, ou seja, as que não se desgastaram por completo.

$$W = \frac{P_w - P_s}{P_s} \times 100 \quad (3)$$

Em que: W = absorção de água (%)

P_w = peso úmido (g)

P_s = peso seco (g)

Para determinar a perda de massa por meio do desgaste gerado pela ação da água, as amostras eram recolocadas em estufa com temperatura de 110°C durante 48 horas e após esse período era realizado uma nova pesagem. Os valores de perda de massa foram obtidos pela equação 4.

$$M = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100 \quad (4)$$

Em que: M = perda de massa (%)

P_1 = peso seco antes do ensaio (g)

P_2 = peso seco depois do ensaio (g)

3.10.2 Perda de massa por erosão (simulador de chuva)

A durabilidade dos adobes ativado alcalinamente foi verificado com base no método formulado pelo Bulletin 5, do Building Code of Australia, com as modificações previstas por Heathcote (2003), que fornece os parâmetros necessários para determinar a durabilidade dos corpos de prova.

No ensaio padrão australiano, as amostras de solo estabilizado são submetidas a um jato d'água com pressão de 50 kPa, por um tempo mínimo de 60 minutos, gerados por uma mangueira acoplada a um mini chuveiro que produz um jato pressurizado (Figura 30).

Figura 30 – Ensaio de erosão em blocos estabilizado (adaptado por Heathcote, (2003)).



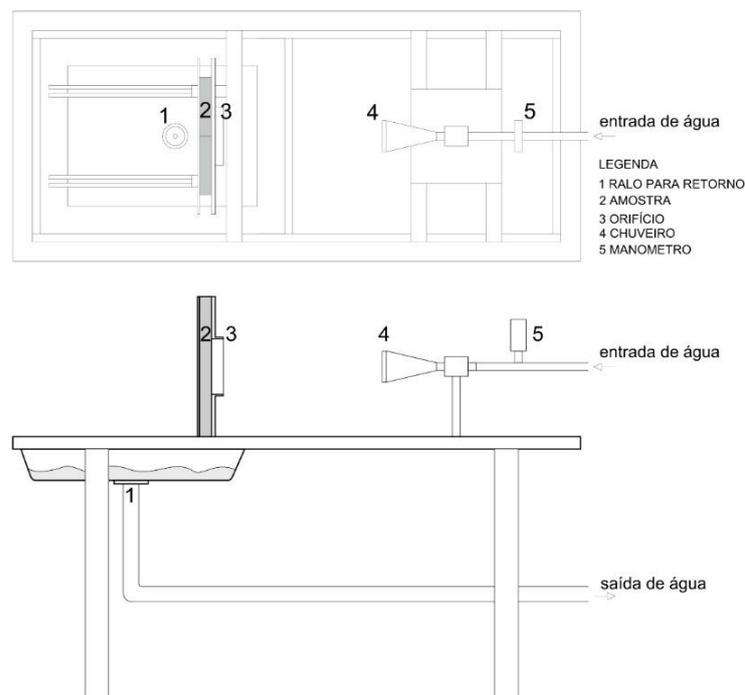
Fonte: Obonyo, Exelbirt e Baskaran, 2010.

Nesse estudo em questão, o objetivo foi aferir a durabilidade de placas de solo estabilizado alcalinamente a um regime de chuva contínua de aproximadamente 60 mm/m².

O ensaio submetia 3 corpos de prova (15 cm x 15 cm x 3 cm) de misturas que antes foram ensaiadas no teste de resistência e absorção de água por imersão e se mantiveram intactas. As mesmas eram expostas a um jato d'água na horizontal, proveniente de um chuveiro padronizado com 37 furos, cada furo com 1,5 mm de diâmetro. O jato pressurizado produzia uma vazão aproximada de 12 l/mim, e uma pressão de 50 kPa, que correspondia a uma coluna d'água de 5 m. A distância entre os corpos de prova e o chuveiro era de 470 mm, de acordo com o ensaio padrão.

Como o experimento tem uma duração de 1 hora para cada placa, isso gera um custo hídrico de aproximadamente 800 litros, foi utilizado um protótipo do Laboratório de Materiais e Estruturas (LABEME) da UFPB com as configurações do ensaio padrão que era alimentado por meio de uma bomba submersa com uma capacidade de vazão máxima de 2000 l/hora e provido de uma tubulação que ocasionava o retorno da água utilizada no ensaio para um tanque onde a mesma poderia ser reutilizada várias vezes e gerando uma maior economia (Figura 31).

Figura 31 – Esquema do protótipo do ensaio de perda de massa por erosão.



Foram ensaiados corpos de prova produzidos com o solo vermelho e curadas em estufa eletrônica com 7 dias. A perda de massa dos corpos de prova ensaiados foi obtida por meio da equação 4 (página 71).

3.11 Caracterização das misturas

3.11.1 Análise química por fluorescência de raios-X

A análise química foi realizada no Laboratório de Solidificações Rápida da UFPB com um equipamento Modelo XRF-1800 da Shimadzu. Por meio da fluorescência de raios-X obteve-se os percentuais de SiO_2 , Al_2O_3 e M_2O ($\text{M} = \text{K}$ e Na) de cada precursor geopolimérico, desta forma determinando a quantidade ideal para cada mistura seguindo as relações molares dos óxidos determinadas por Davidovits (1982). Também foram realizados os ensaios em amostras já sintetizadas afim de identificar a sua composição.

3.11.2 Difração de raios-X

Os precursores geopoliméricos e os materiais sintetizados, triturados em almofariz, e o solo usado para a confecção dos adobes e corpos de prova foram

peneirados na peneira ABNT nº 325, sendo submetidos a análises de difração de raios-X, no equipamento X-Ray Diffractometer da marca Siemens, modelo D 5000, operando com radiação $K\alpha$ de cobre, 30 kV e 30 mA, com varredura de 2θ entre 10° e 60° . O ensaio foi realizado no Laboratório de Análise Microestrutural e Química da Universidade Federal de Campina Grande e no Laboratório de Análises Químicas da UFPB (LACOM).

3.11.3 Microscopia eletrônica de varredura

Para a realização do MEV utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura disponível no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) da UFPB. As amostras foram confinadas com resina e posteriormente cortadas até a gramatura de $\frac{1}{4}$ de microns. O ensaio do MEV só foi realizado nas amostras de 3% de ligante que apresentaram resistência à água.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos na pesquisa e realizadas as discussões de acordo com a literatura internacional sobre os temas abordados.

4.1– Granulometria do solo e limites de consistência

As composições granulométricas dos solos são visíveis na curva de distribuição das partículas do solo, na figura 32 e 33, como também as frações do solo e os limites de consistência, nas tabelas 15 e 16.

Figura 32 – Distribuição granulométrica do solo vermelho.

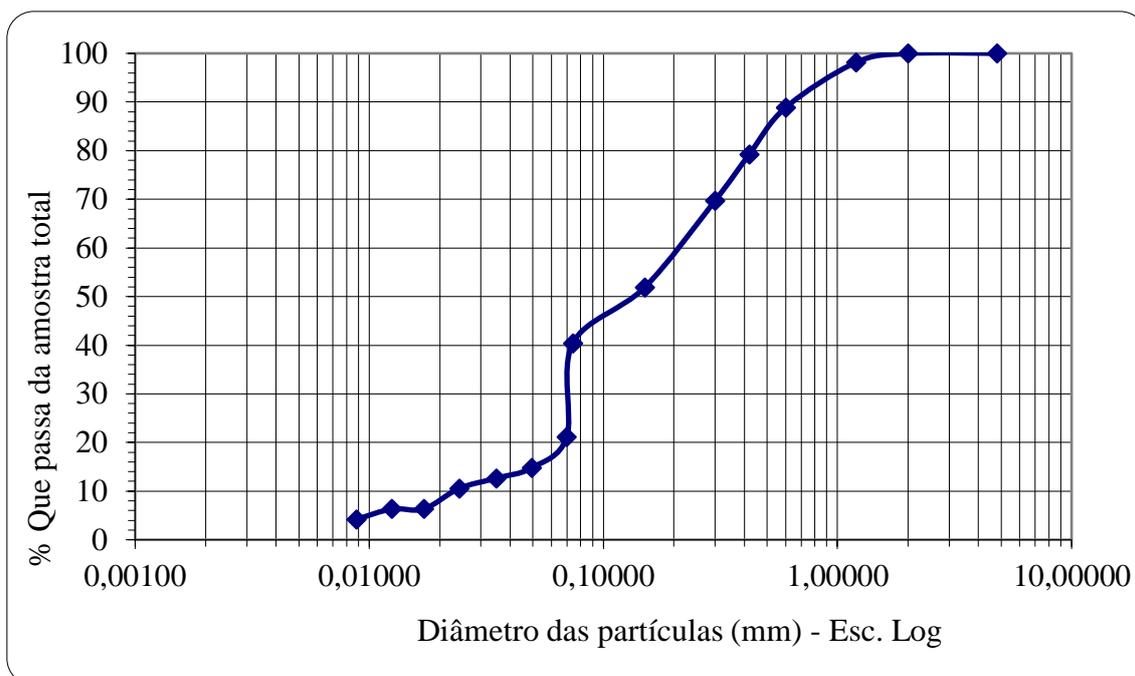


Tabela 17 – Fracionamento dos componentes físico do solo vermelho e os limites de consistência.

| Granulometria do solo (%) | |
|----------------------------|----|
| Areia (0,06 mm a 2,0 mm) | 60 |
| Silte (0,002 mm a 0,06 mm) | 27 |
| Argila (< 0,002 mm) | 13 |
| Limites Atterberg (%) | |
| Limite de liquidez | 28 |
| Limite de plasticidade | 19 |
| Índice de plasticidade | 11 |

Figura 33 – Distribuição granulométrica do solo amarelo.

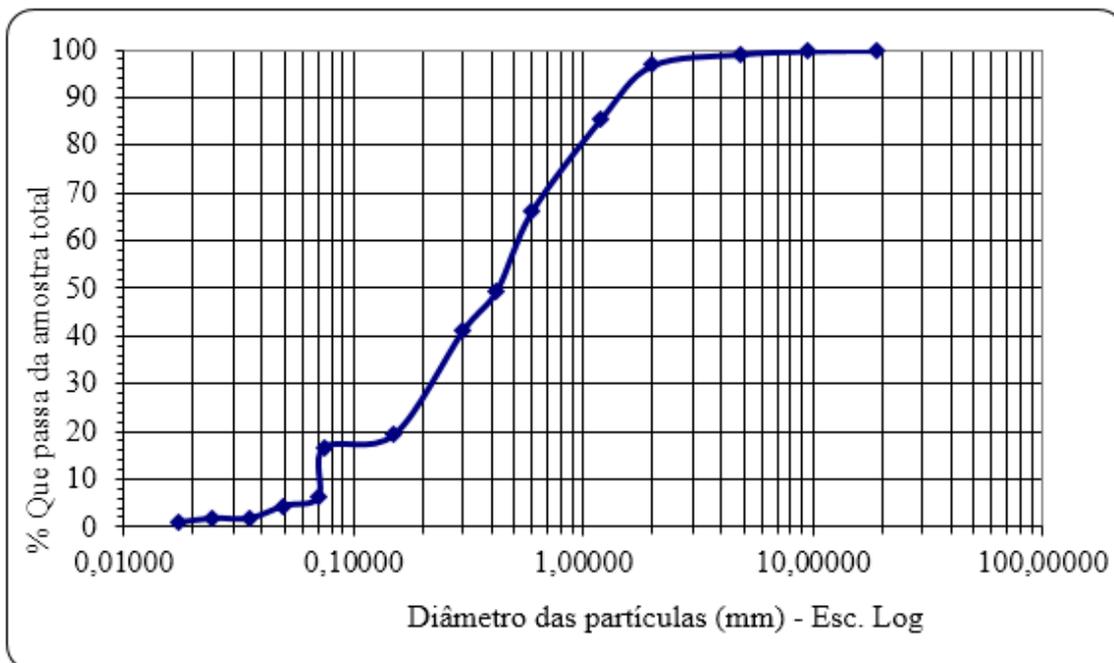


Tabela 18 - Fracionamento dos componentes físico do solo amarelo e os limites de consistência.

| Granulometria do solo (%) | |
|---------------------------------|----|
| Pedregulho (d > 2,00 mm) | 3 |
| Areia grossa (0,42mm a 2,00 mm) | 47 |
| Areia fina (0,06 mm a 2,0 mm) | 33 |
| Silte (0,002 mm a 0,06 mm) | 11 |
| Argila (< 0,002 mm) | 6 |
| Limites Atterberg (%) | |
| Limite de liquidez | 23 |
| Limite de plasticidade | 15 |
| Índice de plasticidade | 8 |

Ambos os solos usados nesta pesquisa apresentaram uma quantidade muito baixa de argila em sua composição, sendo de 13% para o solo vermelho e 6% para o solo amarelo. Esses valores são considerados bastante inferiores quando comparados a solos utilizados para produção de adobes convencionais. De acordo com a CRAterre (1979), para a produção de adobes é necessário o uso de solos que tenham percentuais de argila superior a 15%. Porém, estes valores são considerados para solos não estabilizados ou com estabilizantes químicos (cimento, cal e gesso), que quando apresenta uma quantidade de argila muito baixa dificulta a trabalhabilidade do material e, conseqüentemente impossibilitando uma melhor aglutinação das demais partículas do solo, tendo em vista que a argila funciona como ligante natural da mistura (CORRÊA et al., 2006; VEIGA, 2008; QUAGLIARINI e LENCI, 2010; SHARMA, MARWAHA e VINAYAK, 2016).

Para adobes estabilizados por meio da ativação alcalina não é necessário que o solo tenha esses percentuais de argila, pois o ligante geopolimérico modifica a reologia da terra e mesmo com baixos teores de finos (argila) na mistura é possível realizar a aglutinação das partículas maiores. Outra vantagem observada na realização das misturas em relação aos limites de consistência do solo foi que, em todas as misturas que foram estabilizadas com o ligante geopolimérico houve uma diminuição da quantidade de água para obtenção da plasticidade adequada, na realização da moldagem, como pode ser visto na tabela 19 para o solo vermelho, e na tabela 20, para o solo amarelo.

Tabela 19 - Redução de água em função do tipo de ligante usado para o solo vermelho.

| Quantidade do ligante | Solução alcalina | Precursor | Redução de água |
|------------------------------|-------------------------|------------------|------------------------|
| 1% | Industrial | (MK ou RCV) | 35% |
| 2% | Industrial | (MK ou RCV) | 44% |
| 3% | Industrial | (MK ou RCV) | 44% |
| 1% | Proposto | (MK ou RCV) | 24,5% |
| 2% | Proposto | (MK ou RCV) | 32,5% |
| 3% | Proposto | (MK ou RCV) | 35% |

Tabela 20 - Redução de água em função do tipo de ligante usado para o solo amarelo.

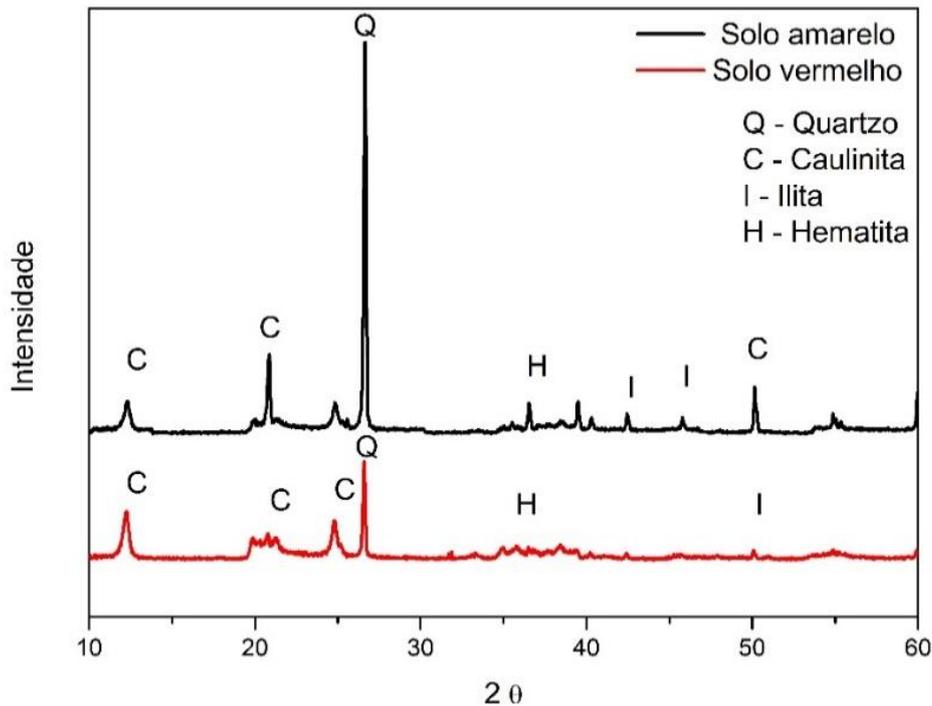
| Quantidade do ligante | Solução alcalina | Precursor | Redução de água |
|------------------------------|-------------------------|------------------|------------------------|
| 1% | Industrial | (MK ou RCV) | 43% |
| 2% | Industrial | (MK ou RCV) | 43% |
| 3% | Industrial | (MK ou RCV) | 49,4% |
| 2% | Proposto | (MK ou RCV) | 36,7% |
| 3% | Proposto | (MK ou RCV) | 24% |

Essa redução da quantidade de água da mistura é ocasionada pelo processo de sintetização dos geopolímeros, onde em cada etapa (dissolução, equilíbrio das espécies, formação do gel, reorganização e polimerização) acontece a formação de moléculas de água, que nos adobes é atenuado devido a quantidade de argila na mistura. A redução da água é maior nas misturas com a solução alcalina industrializada devido ao seu maior poder de dissolução dos aluminossilicatos. Certamente, a diminuição da água é o primeiro fator de contribuição para o aumento da resistência à compressão.

4.2 - Mineralogia do solo

Os minerais encontrados nos dois solos podem ser vistos na figura 34.

Figura 34 – Minerais predominantes nos solos usados.



O mineral com maior predominância nos dois solos foi a caulinita seguida de quartzo, ilita e hematita. Os dois solos estudados apresentaram quantidades significantes dos minerais caulinita e ilita, que tem uma grande importância na síntese da ativação alcalina, pois são compostos de silício e alumínio. Porém, esses argilos minerais presentes nos dois solos apresentaram diversas quantidades de picos nos difratogramas, o que indica um alto teor de cristalinidade desse material.

4.3 - Precursor geopolimérico

4.3.1 Composição química dos precursores geopoliméricos

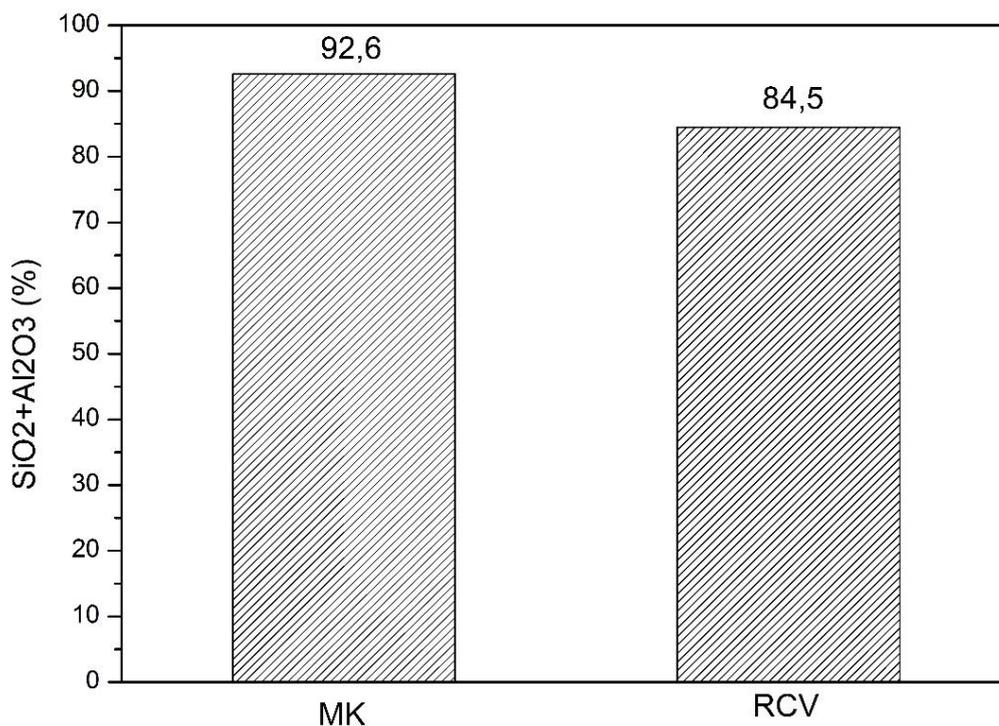
Na tabela 21 pode ser visto a composição química do metacaulim e resíduo da cerâmica vermelha.

Tabela 21 – Composição química dos precursores geopolimérico

| Composto químico | Metacaulim (%) | R. Cerâmica vermelha (%) |
|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| SiO ₂ | 54,003 | 60,101 |
| Al ₂ O ₃ | 38,584 | 24,398 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,585 | 6,814 |
| K ₂ O | 0,723 | 2,809 |
| CaO | 0,380 | 1,649 |
| Na ₂ O | 0,171 | 0,171 |
| MgO | 1,236 | 1,815 |
| Outros | 1,318 | 2,243 |

Geralmente a maioria dos materiais pozolânicos são usados como precursores geopoliméricos devido a sua elevada quantidade de óxidos, que de acordo com a norma NBR 12653/15 tenha a soma dos óxidos SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ valores superiores a 70%, esta composição vai variar de acordo com a natureza do material utilizado. Para a norma NBR 12653/15, o Fe₂O₃ é considerado um óxido importante, porém na síntese geopolimérica o mesmo não participa efetivamente, desta forma sendo considerado apenas SiO₂+Al₂O₃. Na figura 35 pode ser observado que os precursores utilizados têm valores consideráveis de aluminossilicatos, mesmo sendo materiais distintos a quantidade de sílica e alumina não houve uma variação muito brusca.

Figura 35 – Percentual dos óxidos que participam da reação geopolimérica ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$).

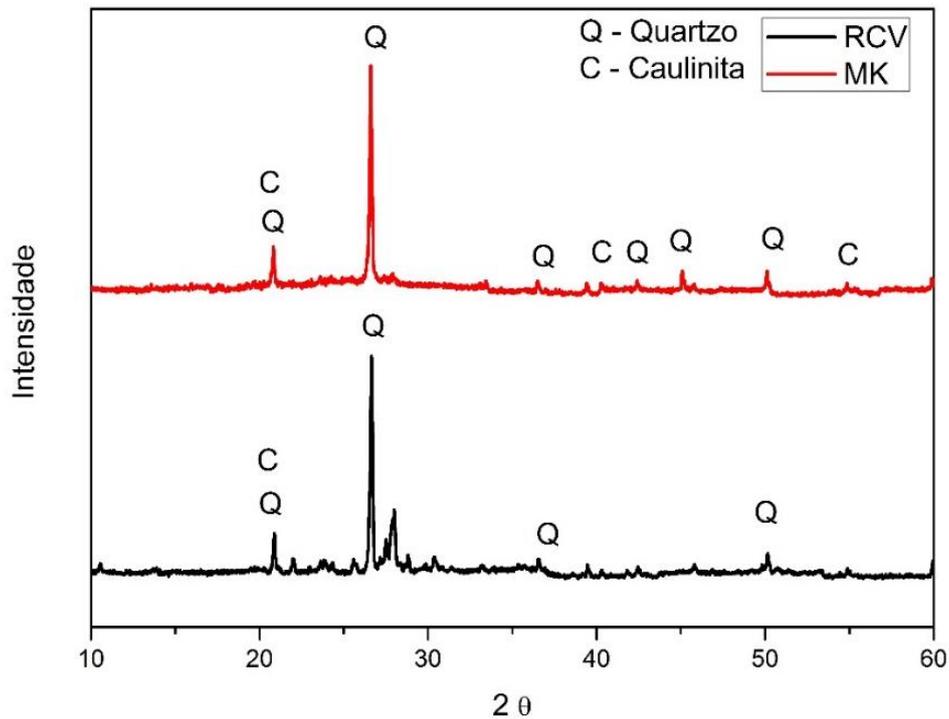


Os precursores apresentaram teores de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ representativos para fabricação de geopolímero, porém esses óxidos podem estar presentes na composição dos minerais, na forma cristalina ou amorfa, onde essa última tem melhor reatividade para materiais desse caráter ou como pozolanas.

4.3.2 Composição mineralógica dos precursores geopolimérico

A figura 36, mostra os difratogramas dos precursores geopoliméricos, onde é possível observar a presença de minerais predominantes como caulinita e quartzo. De acordo com Santos (1992), a caulinita, quando submetida a processo de calcinação em temperaturas superiores a 700°C , sofre uma transformação passando a metacaulinita, que se dá por meio da desidroxilação. Dessa forma, é possível afirmar que além dos dois minerais citados anteriormente (caulinita e quartzo) os precursores têm metacaulinita em sua composição.

Figura 36 – Difratogramas dos precursores geopoliméricos.



Os precursores apresentaram comportamento de material amorfo nos intervalos de 10° a 22° (2 θ), onde os mesmos são característicos do mineral caulínítico, que nesse caso está como metacaulinita. No restante da análise é possível identificar picos do mineral quartzo (22,4°, 26°) que se encontram com uma estrutura mais organizada e segue do ângulo 26° até 50°. O resíduo cerâmico apresentou uma maior quantidade de material cristalino em relação ao metacaulim, o que já era esperado devido seu processo de queima, que algumas vezes calcina o material em temperaturas maiores de 900°C. Porém, se faz necessário o uso de outros métodos de caracterização para determinar os teores de cristalinidade e amorficidade de forma mais precisa.

4.3.3 **Composição granulométrica dos precursores geopolimérico**

As figuras 37 e 38 mostram a granulometria dos precursores utilizados na síntese geopolimérica.

Figura 37 – Granulometria a laser do metacaulim.

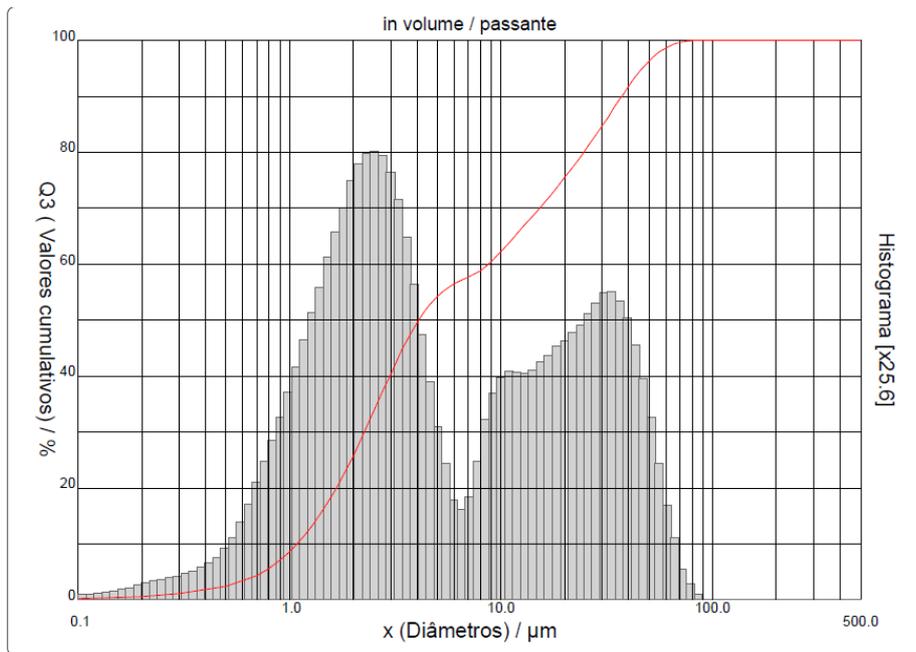
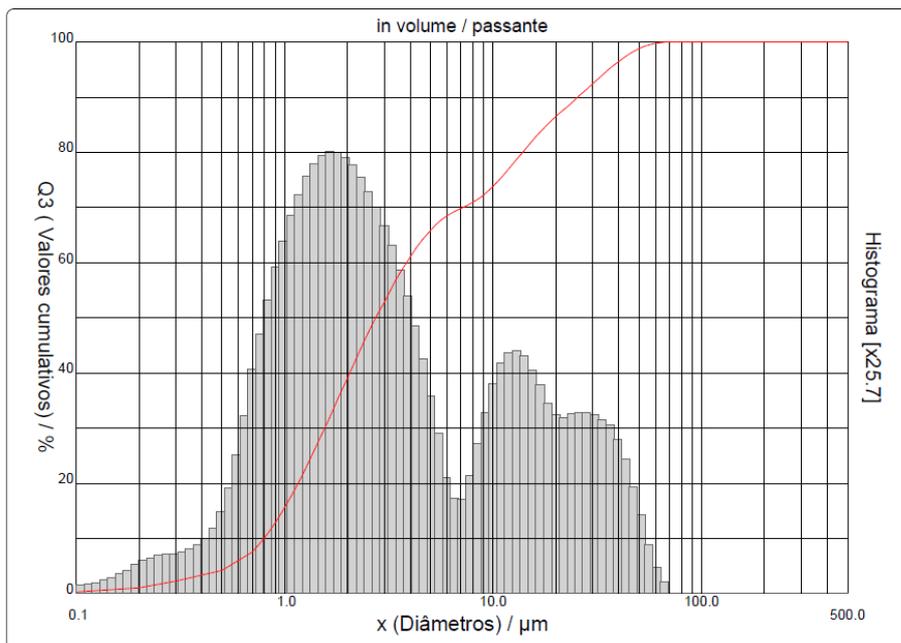


Figura 38 – Granulometria a laser do resíduo da cerâmica vermelha.



Embora o metacaulim seja um material de granulometria bastante fina, o resíduo cerâmico apresentou uma quantidade de partículas menores em relação ao material comercial, sendo este um fator muito importante para a reatividade como precursor geopolimérico. Porém, o mais usual para determinar o caráter reativo de um precursor na síntese de geopolímero, é o índice de finura pelo método Blaine que é sumarizado na tabela 22.

Tabela 22 – Resultados da finura Blaine e Massa Específica.

| Ensaio | Metacaulim | Resíduo Cerâmico |
|--|-------------------|-------------------------|
| Finura Blaine [cm ² /g] | 11.000 | 16.421 |
| Massa Específica [g/cm ³] | 2,51 | 2,51 |

Mesmo o metacaulim apresentando uma melhor reatividade no que tange a uma maior quantidade de mineral na fase amorfa, o resíduo cerâmico se equiparou ao material industrial por ter uma finura bem superior. Esses resultados são descritos na bibliografia pelo estudo realizado por Weng et al (2005), pois os autores relatam que a superfície específica do precursor geopolimérico é um fator importante para o sucesso da reação, pois este é determinante na dissolução das partículas fonte de aluminossilicatos.

4.4 - Soluções alcalina propostas

Os resultados das aferições do pH das soluções alcalinas propostas são vistos na tabela 22.

Tabela 23 – pH e relação SiO₂/Na₂O das soluções alcalinas alternativa

| Tipo de solução | SiO₂ / Na₂O | pH |
|------------------------|--|-----------|
| MS | 2,17 | 12,50 |
| MK | 2,17 | 12,10 |
| RCV | 2,17 | 10,01 |

Fonte: Autor, 2016

As soluções de sílica ativa (MS) e de metacaulim (MK) mantiveram o pH próximo ao do hidróxido de sódio apresentando uma pequena redução, já a solução produzida com resíduo cerâmico teve uma redução elevada em relação aos demais. Essa diminuição é proveniente da maior quantidade de água que a mistura com RCV precisa para acontecer a reação de formação de gel. Porém, mesmo havendo uma redução consideravelmente alta, a solução apresentou relação SiO₂/Na₂O idêntica as do silicato industrializado e pH com valor suficiente para dissolver os aluminossilicatos. Segundo Drever (1997), a sílica amorfa, responsável pelo processo de geopolimerização, só passa a ser dissolvida por meio alcalino, onde o pH tenha valores iguais ou superiores a 10,

dessa forma, as soluções proposta estão dentro dos critérios para a produção de geopolímeros, embora a solução produzida com RCV apresente um poder de dissolução reduzida em relação as demais.

4.5 – Resistência à ação da água, absorção e perda de massa por imersão

4.5.1 Amostras curadas em estufa elétrica

Os resultados do ensaio de imersão dos corpos de prova curados na estufa eletrônica são descritos nas tabelas 24 e 25.

Tabela 24 – Amostras ensaiadas a 65°C em estufa eletrônica com precursor de metacaulim.

| Tipo da Amostra | Peso (g) | Resistência à água | Peso úmido (g) | Peso seco (g) | Peso da água (g) | Perda de massa (g) |
|-----------------|----------|--------------------|----------------|---------------|------------------|--------------------|
| Sil. IND. 1% | 250 | SIM | 278,8 | 249,3 | 28,8 | 0,8 |
| Sil. IND. 2% | 250 | SIM | 276 | 249,4 | 26 | 0,7 |
| Sil. IND. 3% | 250 | SIM | 275 | 249,2 | 25 | 0,6 |
| Sil. MK. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. MK. 2% | 250 | SIM | 279,3 | 249 | 29,3 | 1,4 |
| Sil. MK. 3% | 250 | SIM | 277,5 | 249,1 | 27,5 | 1,0 |
| Sil RCV. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. RCV. 2% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. RCV. 3% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. MS. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. MS. 2% | 250 | SIM | 278,5 | 249,1 | 28,5 | 1,0 |
| Sil. MS. 3% | 250 | SIM | 278 | 248,1 | 28 | 0,9 |

Tabela 25 – Amostras ensaiadas a 65°C em estufa eletrônica com precursor de resíduo cerâmico.

| Tipo da Amostra | Peso (g) | Resistência à água | Peso úmido (g) | Peso seco (g) | Peso da água (g) | Perda de massa (g) |
|-----------------|----------|--------------------|----------------|---------------|------------------|--------------------|
| Sil. IND. 1% | 250 | SIM | 278 | 248,58 | 28 | 1,4 |
| Sil. IND. 2% | 250 | SIM | 276 | 249,2 | 26 | 0,8 |
| Sil. IND. 3% | 250 | SIM | 276,4 | 249,3 | 26,4 | 0,7 |
| Sil. MK. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. MK. 2% | 250 | SIM | 278,3 | 248,1 | 28,3 | 2,3 |
| Sil. MK. 3% | 250 | SIM | 276,7 | 246,3 | 26,7 | 1,7 |
| Sil. RCV. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. RCV. 2% | 250 | SIM | 269 | 234,4 | 19 | 3,2 |
| Sil. RCV. 3% | 250 | SIM | 277,9 | 246,8 | 27,9 | 2,3 |
| Sil. MS. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. MS. 2% | 250 | SIM | 277,9 | 247,5 | 27,9 | 2,3 |
| Sil. MS. 3% | 250 | SIM | 281 | 248,4 | 31 | 0,8 |

As amostras de referências sem a estabilização por meio da ativação alcalina não resistiram ao ensaio, dessa forma, não sendo possível realizar a aferição de absorção e perda de massa. Já as amostras estabilizadas com o método da ativação alcalina obtiveram uma maior durabilidade quando exposta à ação da água. Os melhores resultados foram com as misturas elaboradas com o ligante de silicato de sódio industrializado, sendo que os estabilizados com precursor de metacaulim tiveram uma pequena melhoria na absorção de água em relação ao resíduo cerâmico de 11,5%, 10,4% e 10,0%, e os de resíduo cerâmico de 11,2%, 10,4% e 10,5% para os teores de 1%, 2% e 3% de ligante respectivamente.

Os adobes estabilizados com as soluções propostas também obtiveram ótimos resultados em relação a substituição do silicato industrializado, porém os com teores de 1% para todas as misturas não resistiram a ação da água. No tocante à resistência à água as misturas que obtiveram os piores resultados foram as de silicato de RCV – MK que não tiveram resistência alguma à água e RCV – RCV, onde a amostra de 3% RCV – RCV teve absorção de 11,2% e perda de massa de 1,3%, mas tendo no final do ensaio um aspecto de intacta em relação a de 2% RCV – RCV que foi possível realizar a medição, mas estava bastante deteriorada. A absorção de água e perda de massa podem ser visualizadas nas figuras 39 e 40.

Figura 39 – Resultados de absorção de água por imersão

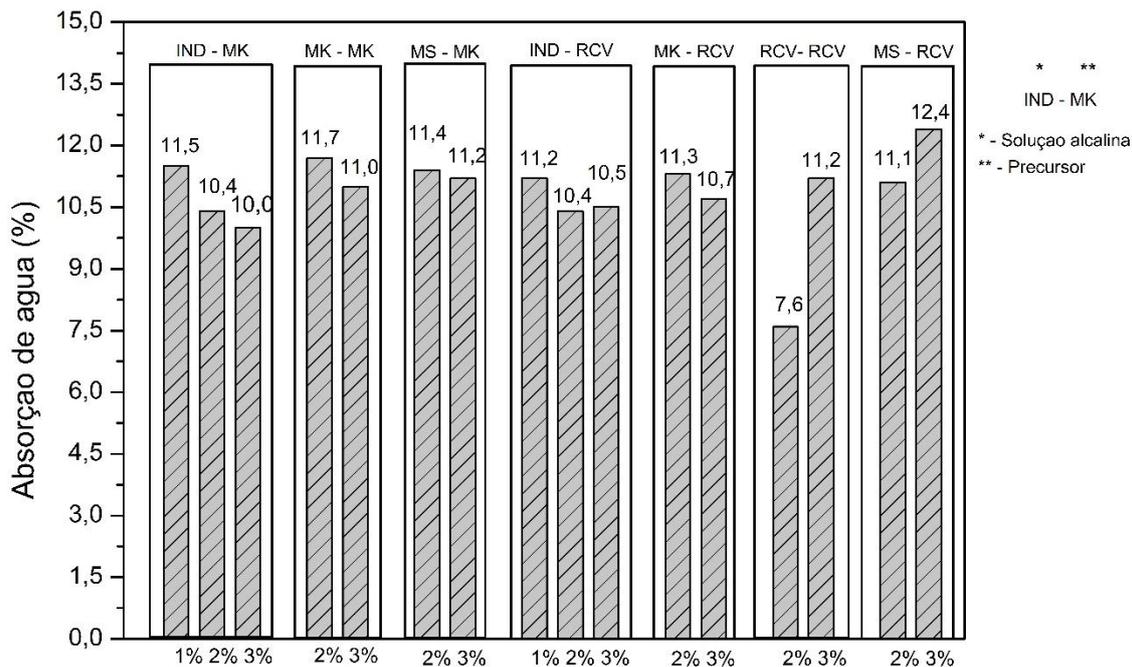
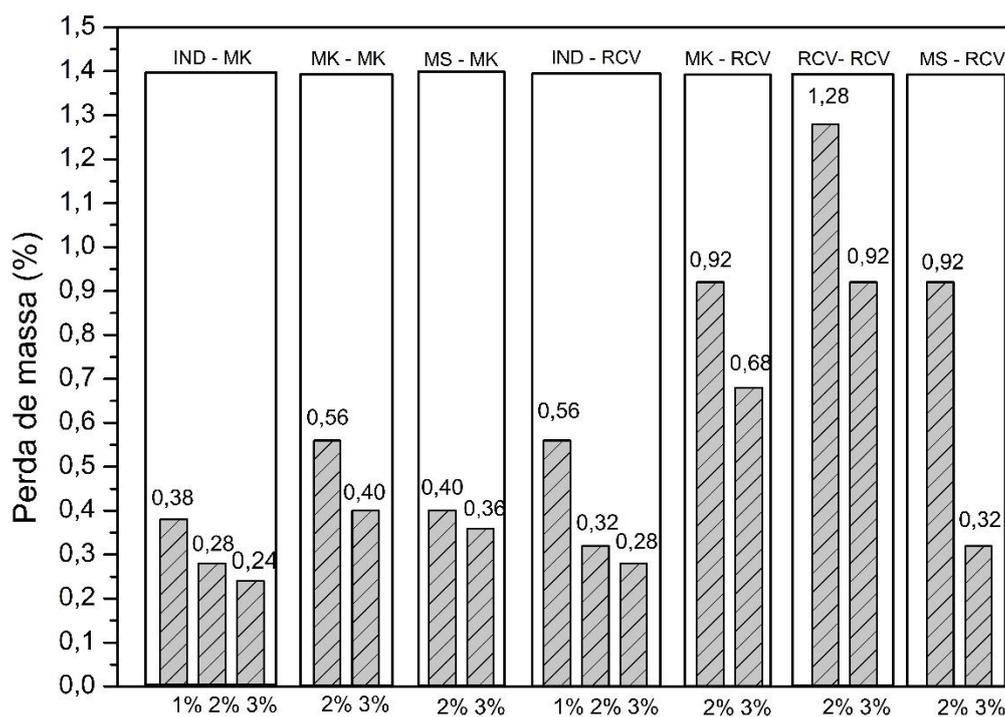


Figura 40 – Resultados de perda de massa por imersão



Na figura 41 pode ser visto o aspecto dos corpos de prova durante e após ao ensaio de absorção e perda de massa por imersão.

Figura 41 – Amostras antes e depois do ensaio de absorção e perda de massa por imersão.



4.5.2 Amostras curadas em estufa ecológica

Os resultados de resistência à água, absorção de água e perda de massa das amostras curadas na estufa ecológica são descritos nas tabelas 26 e 27.

Tabela 26 - Amostras ensaiadas em estufa ecológica com precursor de metacaulim

| Tipo da Amostra | Peso (g) | Resistência à água | Peso úmido (g) | Peso seco (g) | Peso da água (g) | Perda de massa (g) |
|-----------------|----------|--------------------|----------------|---------------|------------------|--------------------|
| Sil. IND. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. IND. 2% | 250 | SIM | 275,9 | 247,3 | 25,9 | 2,7 |
| Sil. IND. 3% | 250 | SIM | 275,8 | 248,4 | 25,8 | 1,6 |
| Sil. MK. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. MK. 2% | 250 | SIM | 285,2 | 245,3 | 35,2 | 4,7 |
| Sil. MK. 3% | 250 | SIM | 275,5 | 248 | 25,5 | 2 |
| Sil RCV. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. RCV. 2% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. RCV. 3% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. MS. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. MS. 2% | 250 | SIM | 275,1 | 246,9 | 25,1 | 3,1 |
| Sil. MS. 3% | 250 | SIM | 279,5 | 245,5 | 29,5 | 4,5 |

Tabela 27 – Amostras ensaiadas em estufa ecológica com precursor de resíduo cerâmico

| Tipo da Amostra | Peso (g) | Resistência à água | Peso úmido (g) | Peso seco (g) | Peso da água (g) | Perda de massa (g) |
|-----------------|----------|--------------------|----------------|---------------|------------------|--------------------|
| Sil. IND. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. IND. 2% | 250 | SIM | 278,0 | 244,5 | 28 | 2,9 |
| Sil. IND. 3% | 250 | SIM | 277 | 248,1 | 27 | 1,9 |
| Sil. MK. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. MK. 2% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. MK. 3% | 250 | SIM | 270,7 | 243,7 | 20,7 | 6,3 |
| Sil RCV. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. RCV. 2% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. RCV. 3% | 250 | SIM | 280,1 | 238,3 | 32,1 | 11,7 |
| Sil. MS. 1% | 250 | NÃO | -- | -- | -- | -- |
| Sil. MS. 2% | 250 | SIM | 278,1 | 247 | 28,1 | 3,0 |
| Sil. MS. 3% | 250 | SIM | 280,8 | 247,6 | 30,8 | 2,4 |

As amostras com precursor de metacaulim submetidas a cura em estufa ecológica tiveram desempenho próximo das feitas em estufa elétrica, tendo apenas a mistura com teor de 1% que não resistiu a água em relação a cura elétrica. Já as de resíduo cerâmico tiveram um número maior de amostras que dissolveram quando submetida ao ensaio de imersão. Essas diferenças entre a estufa elétrica e ecológica se devem a estabilidade da temperatura do equipamento elétrico, pois o método de cura proposto chega a temperatura de 65°C, porém não se mantém constante, e dessa forma, não realizando a ativação completa dos materiais aluminossilicatos. Os resultados de absorção e perda de massa podem ser vistos na figura 42 e 43.

Figura 42 – Resultados de absorção de água por imersão das misturas curada em estufa ecológica.

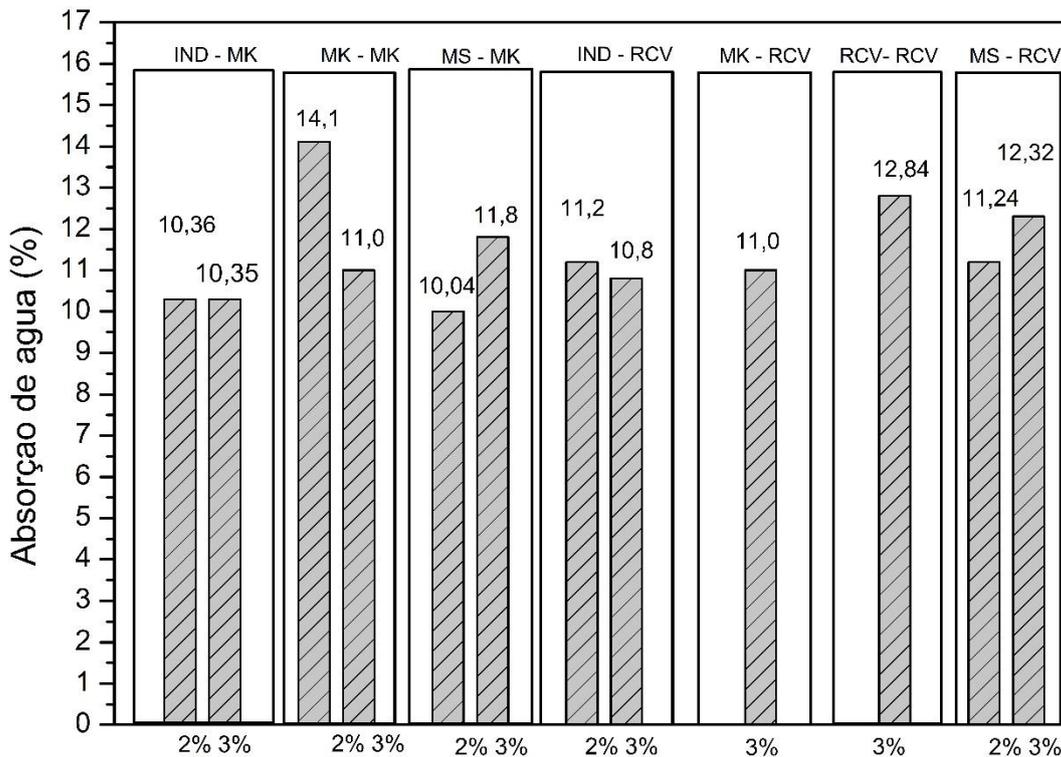
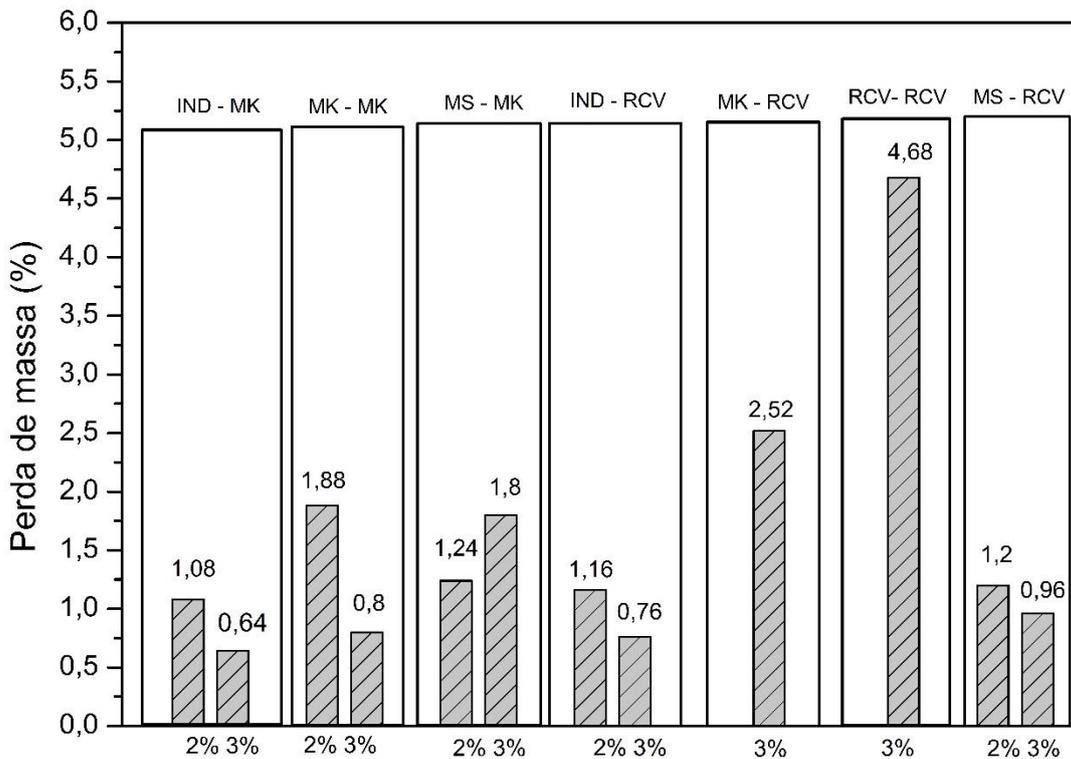


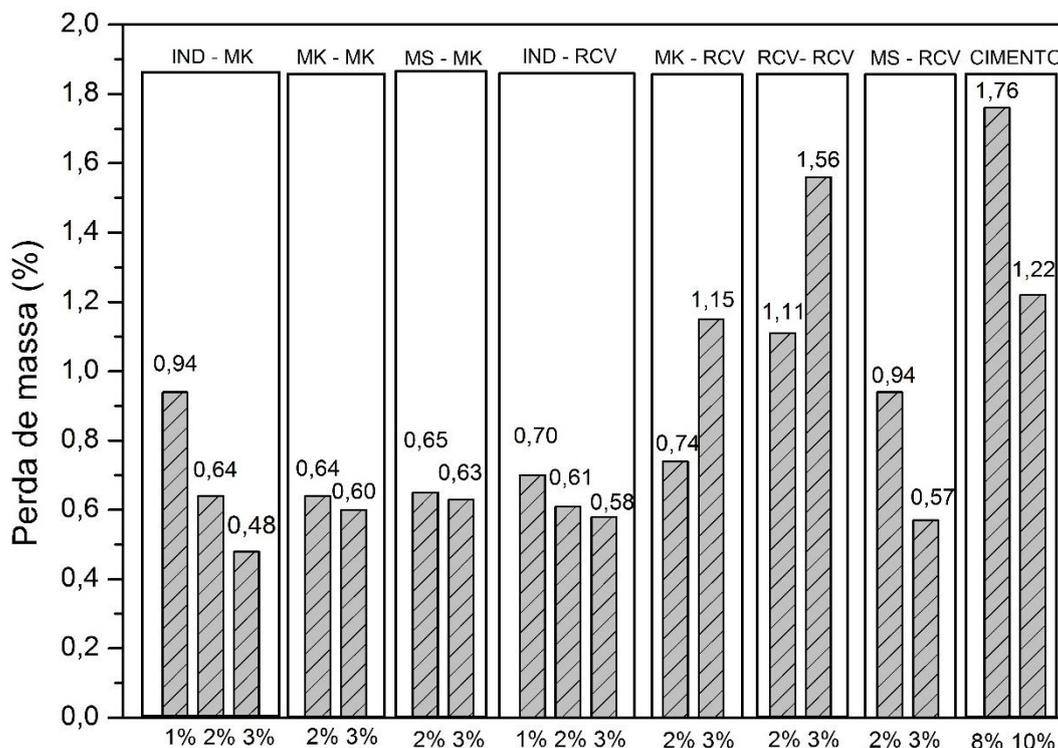
Figura 43 - Resultados de perda de massa por imersão das misturas curada em estufa ecológica



4.6 – Perda de massa por erosão (simulador de chuva)

Os resultados do ensaio de perda de massa por erosão são descritos na figura 40.

Figura 44 – Perda de massa por erosão



Todas as amostras submetidas ao ensaio de erosão obtiveram perda de massa muito pequena, e principalmente se destacando as de 3% Ind-MK, 3% Ind-RCV e 3% MS-RCV com os valores de 0,48, 0,58 e 0,57 respectivamente. As demais misturas ficaram com valores abaixo de 1,0% de perda de massa, com exceção das amostras de 3% MK-RCV, 2% RCV-RCV, 3% RCV-RCV e as amostras estabilizadas com cimento Portland. Em estudos feitos por Heathcote e Morre, (2003) com base na norma australiana Boletim 5, os valores admissíveis para erosão em blocos de terra estabilizados com cimento eram de 10%. Dessa forma, podemos ver que todos os corpos de prova ensaiado obtiveram valores bem inferior aos estabelecidos pela norma australiana.

Os blocos estabilizados com cimento Portland tende a ter um aumento da perda de massa devido a menor estabilidade química característica do ligante quando exposto a água em movimento (Heathcote e Moore, 2003; Obonyo, Exelbirt e Baskaran, 2010). De acordo com Metha e Monteiro, (2008), esse

mecanismo de erosão do ligante se dá por meio da lixiviação dos produtos hidratados da pasta de cimento Portland devido ao pH baixo da água em relação ao pH do silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio.

No caso dos adobes estabilizados com a ativação alcalina, essa perda de massa é reduzida devido a inércia química característica dos ligantes geopoliméricos (PALOMO et al., 1999b; DIOP e CRUTZECK, 2008a; DIOP e CRUTZECK, 2008b). A quantidade de massa que os corpos de prova perderam é consequência do atrito gerado pelo jato de água no momento do ensaio fazendo com que as partículas de solo, que estão na superfície da amostra se desprendam, como pode ser visto na figura 41.

Figura 45 – Amostras submetidas ao ensaio de erosão (a) Amostra de 3% Ind-RCV, (b) amostra 2% MS-RCV, (c) amostra 3% MK-RCV, (d) amostra 3% RCV-RCV.



Esses resultados indicam que blocos estabilizados com ativação alcalina se torna mais duráveis a ação da água em relação aos com cimento Portland e garantindo uma resistência ao material a longo prazo.

4.7 – Resistência à compressão simples corpos de prova 5x5x5

4.7.1 Resistência à compressão simples curadas em estufa elétrica

Geralmente os adobes moldados sem o uso de estabilizantes químicos tendem a ter resistência mecânica reduzida, como foi o caso das amostras preparadas neste trabalho. Os corpos de prova ensaiados nos 7 primeiros dias tiveram resistência de 0,75 MPa, chegando a 1,00 MPa quando rompidos aos 28 dias, esses valores são característicos da literatura sobre adobe. Os resultados dos adobes estabilizados com ativação alcalina nas idades de 7 dias podem ser vistos na figura 42 para precursor de metacaulim, e figura 43 para precursor de resíduo cerâmico.

Figura 46 – Adobes ensaiados aos 7 dias com precursor de metacaulim em estufa elétrica

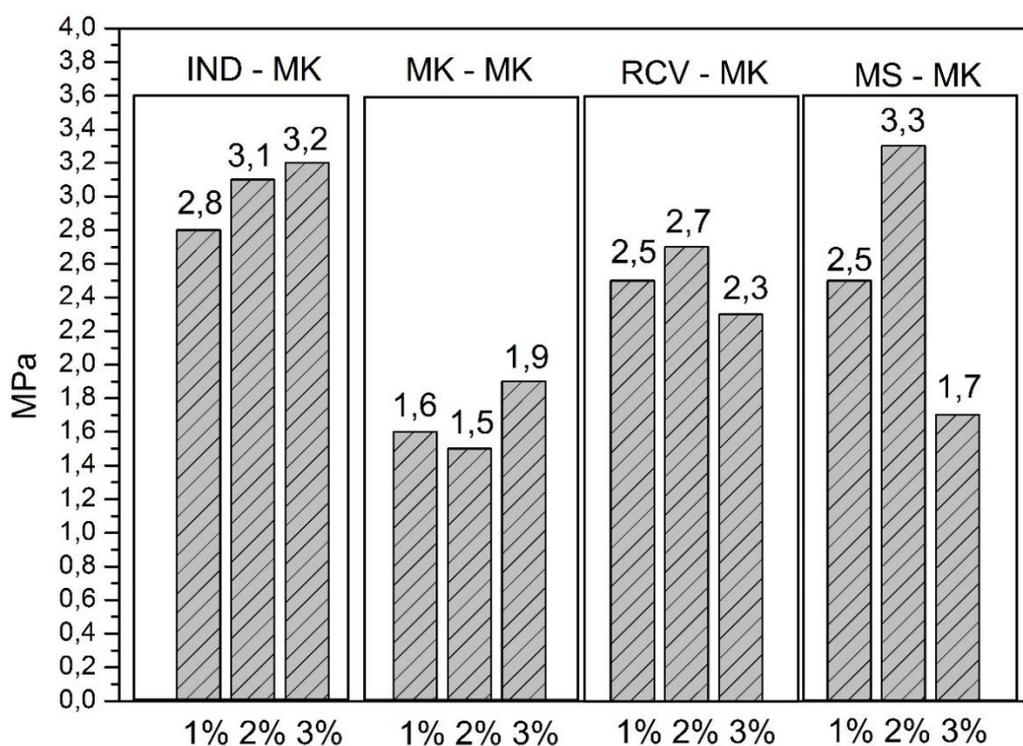
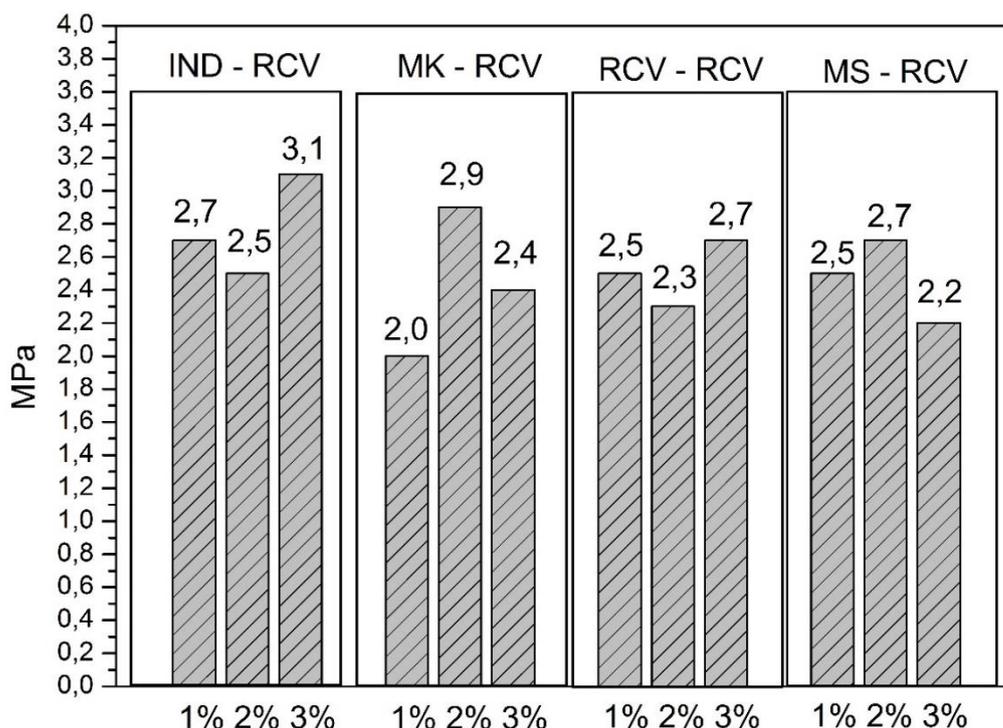


Figura 47 – Adobes ensaiados aos 7 dias com precursor de resíduo cerâmico em estufa elétrica.



Como já era esperado os corpos de prova com metacaulim apresentaram valores maiores em relação ao resíduo cerâmico tendo em vista a maior reatividade do precursor, porém esses valores não foram tão diferentes. Além disso, todas as amostras estabilizadas com ativação alcalina obtiveram resistência superior as produzidas apenas com a terra e água (referência). Em relação a substituição do silicato industrializado os adobes com as três soluções propostas (MK, RCV e MS) tiveram resistência dentro dos valores estabelecidos pela NBR – 8492/12 Tijolo maciço de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água, exceto os produzidos com as soluções de MK – MK.

Na avaliação da resistência à compressão aos 28 dias os corpos de prova mostraram um aumento significativo como pode ser visto nas figuras 44 e 45.

Figura 48 – Adobes ensaiados aos 28 dias com precursor de metacaulim em estufa elétrica.

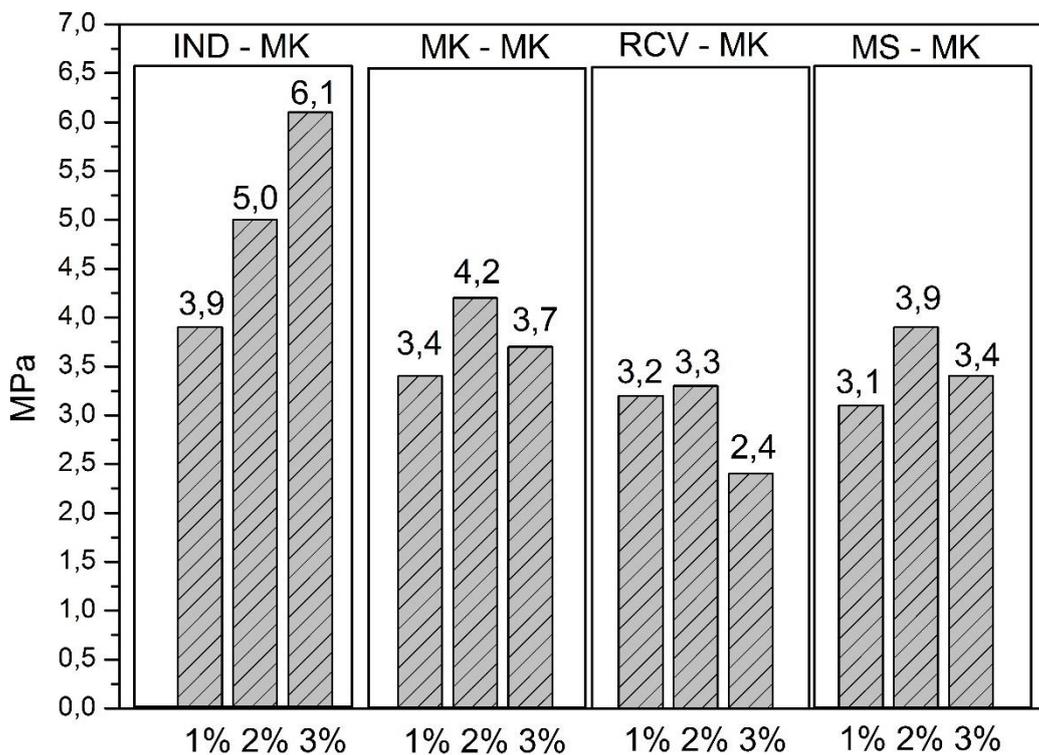
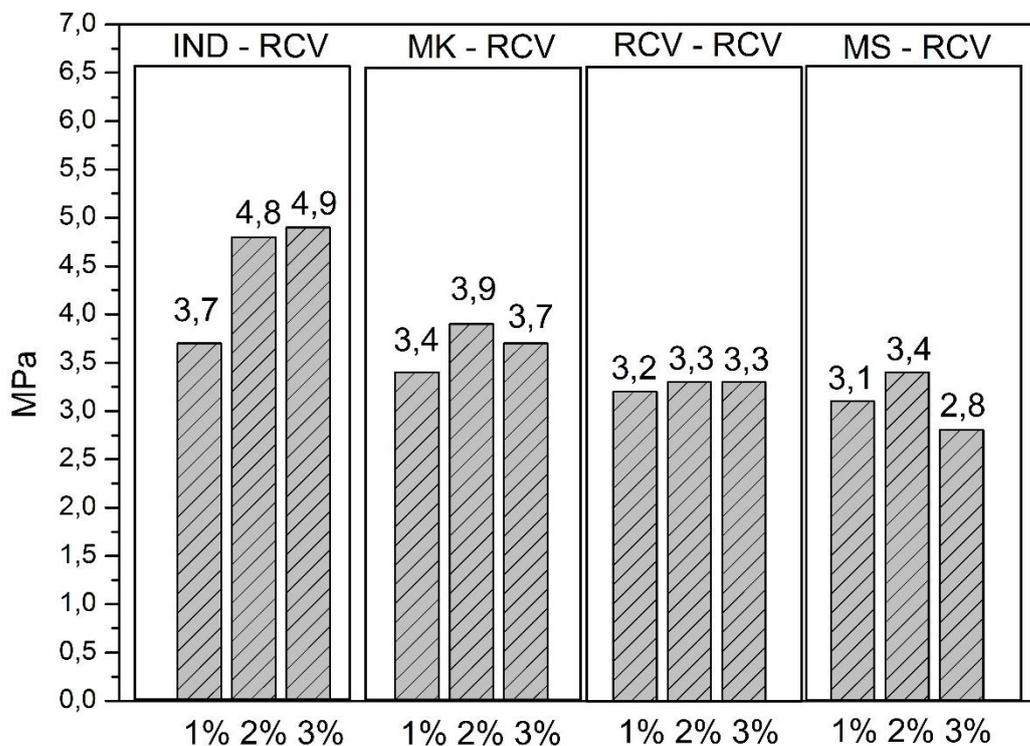


Figura 49 – Adobes ensaiados aos 28 dias com precursor de resíduo cerâmico em estufa elétrica.



Nas amostras ensaiadas aos 28 dias foi possível obter adobes que se classificam como blocos portantes, ou seja, tijolos que teriam função estrutural e não apenas de vedação, como foi o caso da composição de 3%IND-MK. As demais misturas obtiveram valores de resistência à compressão acima dos estabelecidos pela norma NBR – 8492/12, porém com a idade de 28 dias percebe-se que o teor otimizado de ligante é de 2%, pois quando passa para 3% acontece uma redução no desempenho mecânico de todas as misturas, com exceção das produzidas com silicato de sódio industrializado e a de 3% RCV-RCV.

De acordo com a bibliografia dos ligantes geopoliméricos, esse comportamento das amostras de 28 dias é normal para ligantes a base de metacaulim ou outra fonte semelhante de aluminossilicatos, porém alguns dos fatores para essa redução na resistência à compressão são: i) o menor poder de dissolução dos aluminossilicatos com o uso de apenas um ativador alcalino, que no caso desse estudo foi o NaOH (PALOMO et al., 1999b; PINTO, 2004; CRIADO; PALOMO e FERNANDEZ-JIMENEZ, 2005); ii) a sílica presente no silicato de sódio industrializado tem um maior caráter reativo do que a utilizada nas soluções propostas, dessa forma, prejudicando na relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e interferindo diretamente no ganho de resistência (XU e DEVENTER, 2000); iii) as amostras com as soluções propostas recebem uma maior quantidade de NaOH, dessa forma possibilitando o excesso de álcalis nas misturas, que pode aumentar a dissolução, mas causando a precipitação de gel de aluminossilicatos nas primeiras idades e contribuindo para a perda de resistência (LEE e DEVENTER, 2002).

4.7.2 Resistência à compressão simples cura em estufa ecológica

As figuras 46 e 47 mostram os resultados de resistência à compressão das amostras curadas em estufa ecológica com 7 dias e as 48 e 49 para as curadas com 28 dias.

Figura 50 – Adobes ensaiados aos 7 dias com precursor de metacaulim curados em estufa ecológica.

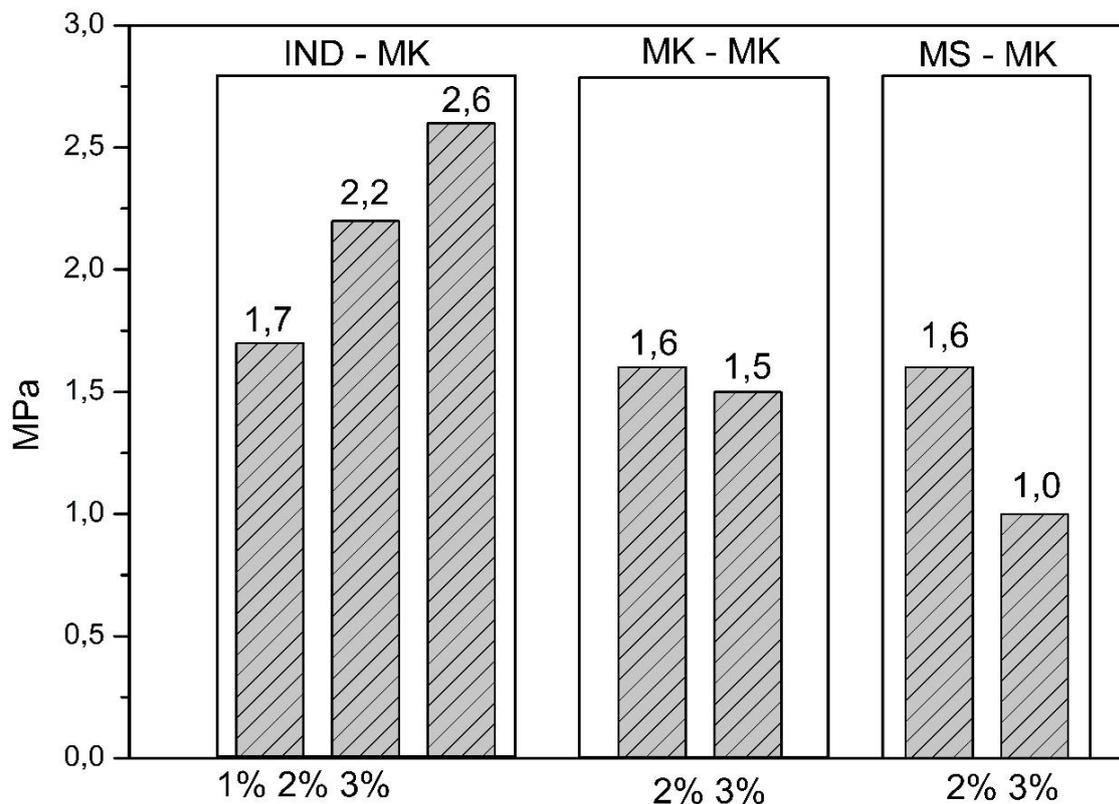


Figura 51 – Adobes ensaiados aos 7 dias com precursor de RCV curados em estufa ecológica.

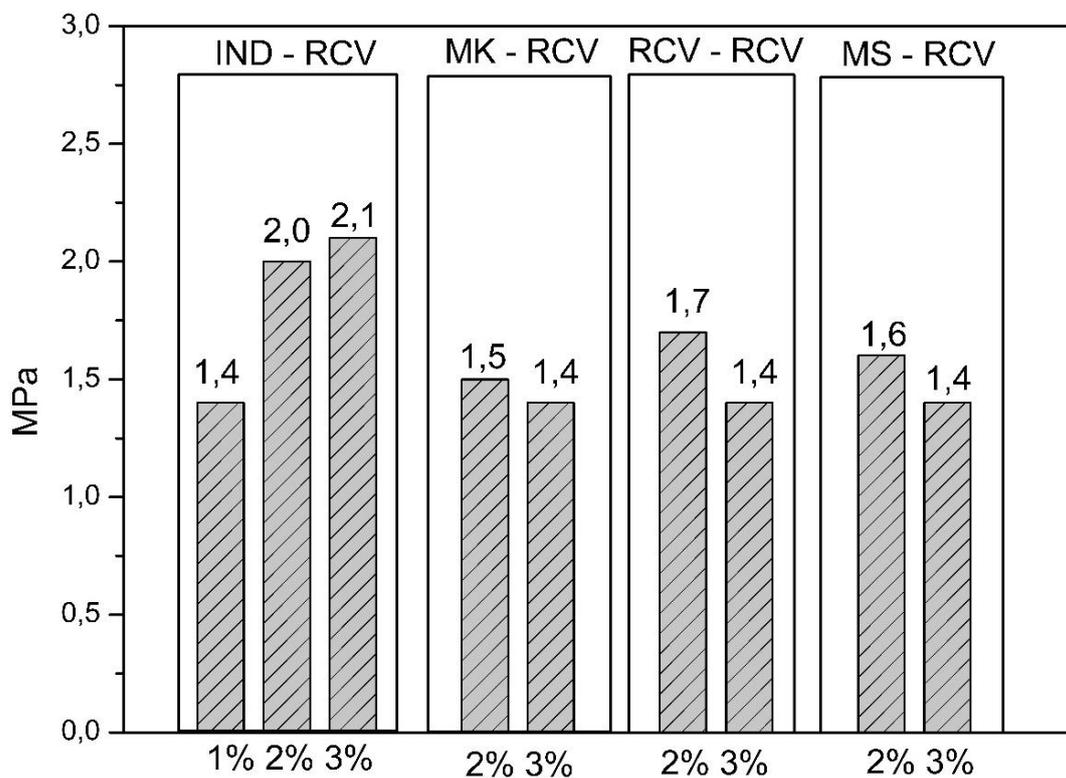


Figura 52 – Adobes ensaiados aos 28 dias com precursor de metacaulim curados em estufa ecológica.

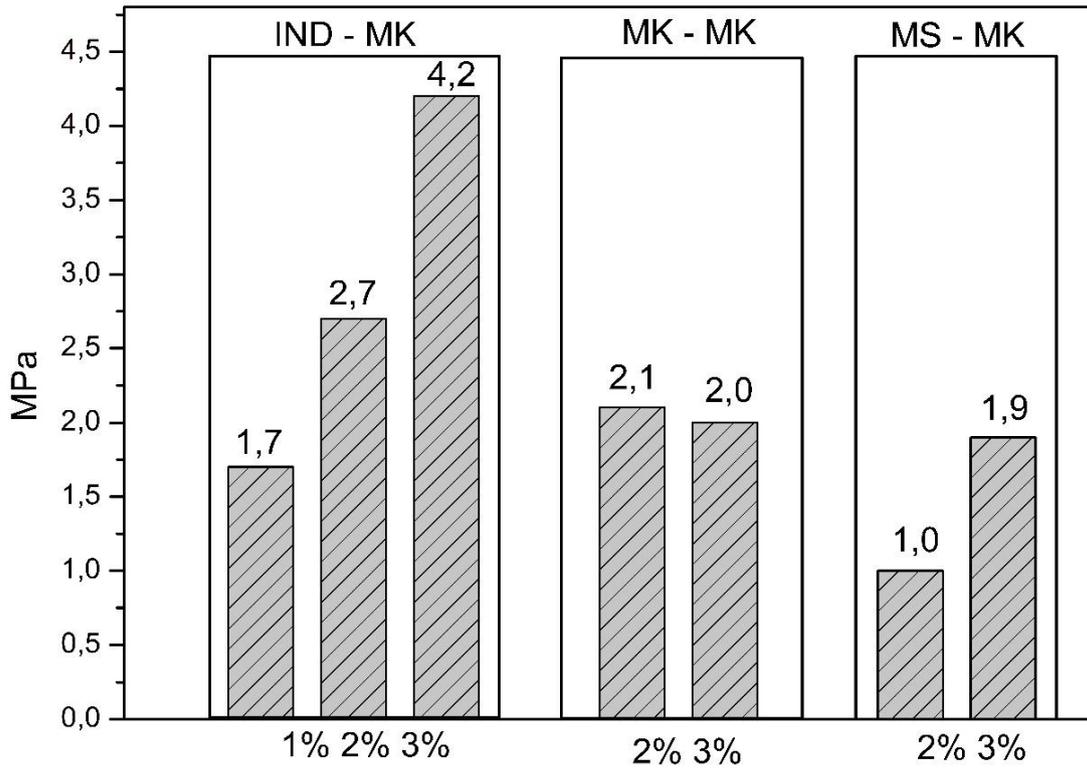
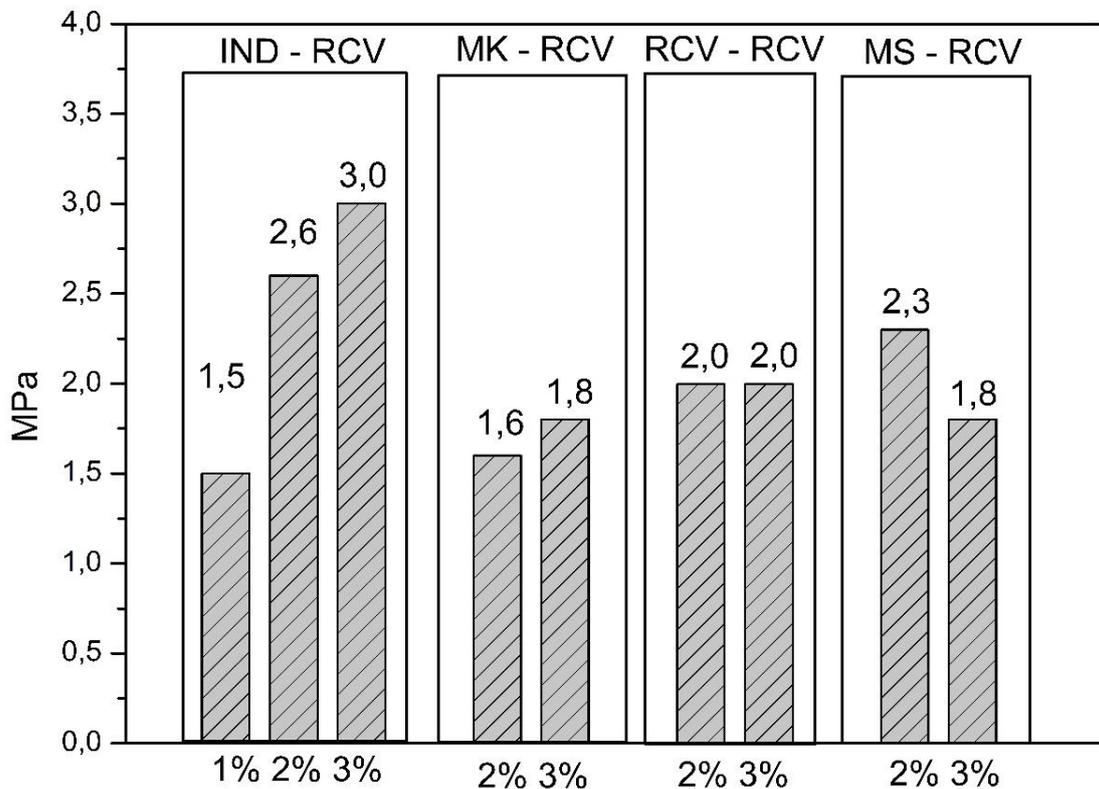


Figura 53 – Adobes ensaiados aos 28 dias com precursor de RCV curados em estufa ecológica.



As resistências das misturas curadas em estufa ecológica tiveram uma diminuição em relação as misturas de cura elétrica, porém mesmo com essa redução a maioria das amostras mantiveram valores dentro dos estabelecidos pela norma NBR – 8492/12, que determina que os blocos têm que ter no mínimo 2,0 MPa de resistência à compressão, exceto as seguintes misturas: 1% Ind-MK, 1%Ind-RCV, 1%MS-MK, 2%MK-RCV, 3%MK-RCV e 2%MS-RCV, não obtiveram a exigência mínima.

Um dos fatores que interferiram na evolução da resistência à compressão foi a variação térmica que era gerada ao longo do dia, pois a temperatura da estufa era em função da incidência solar que a mesma recebia, que de acordo com alguns autores essa variável é primordial para determinar a resistência para ligantes geopoliméricos. Além disso, outro fator é o ambiente úmido que tinha na estufa, pois para manter a temperatura próximo de 65°C a mesma tinha que ficar com a tampa fechada, dessa forma, gerando um ambiente úmido, onde esse afeta na redução do pH das amostras e conseqüentemente diminuindo a resistência das mesmas (PINTO, FERNANDES e JALALI, 2002).

4.8 - Resistência à compressão simples dos adobes com solo amarelo

Os resultados dos adobes moldados são descritos nas figuras 50 e 51.

Figura 54 – Adobes ensaiados aos 7 e 28 dias com precursor de metacaulim.

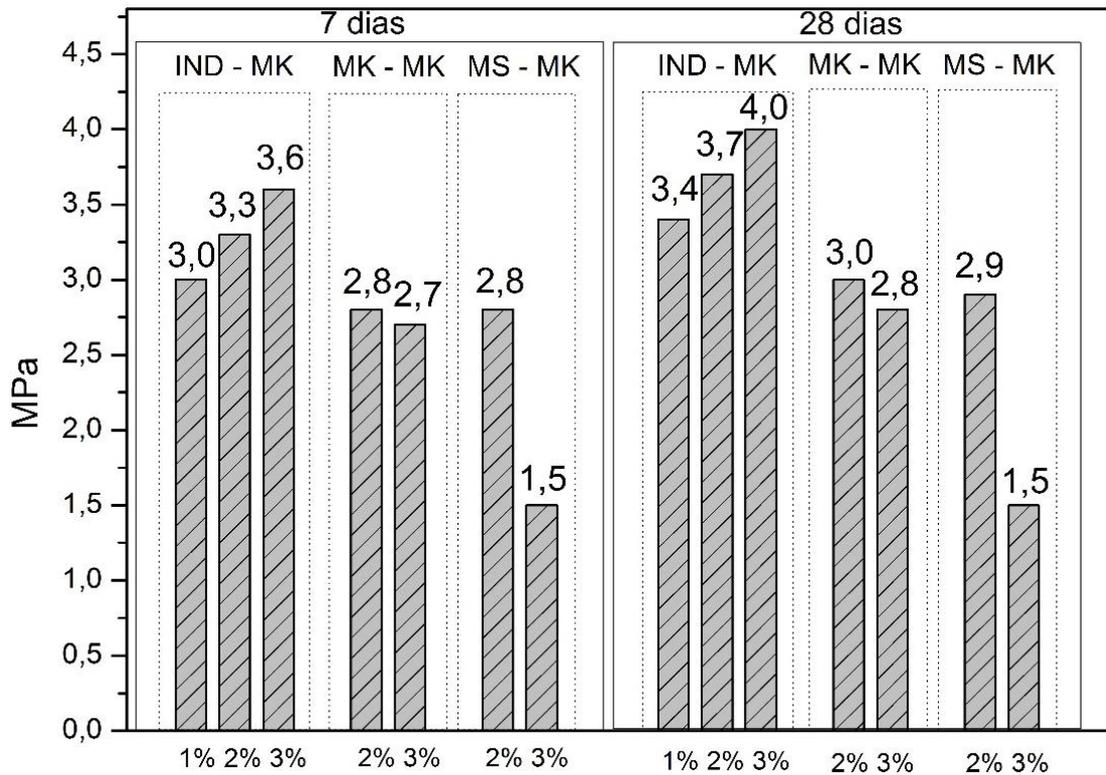
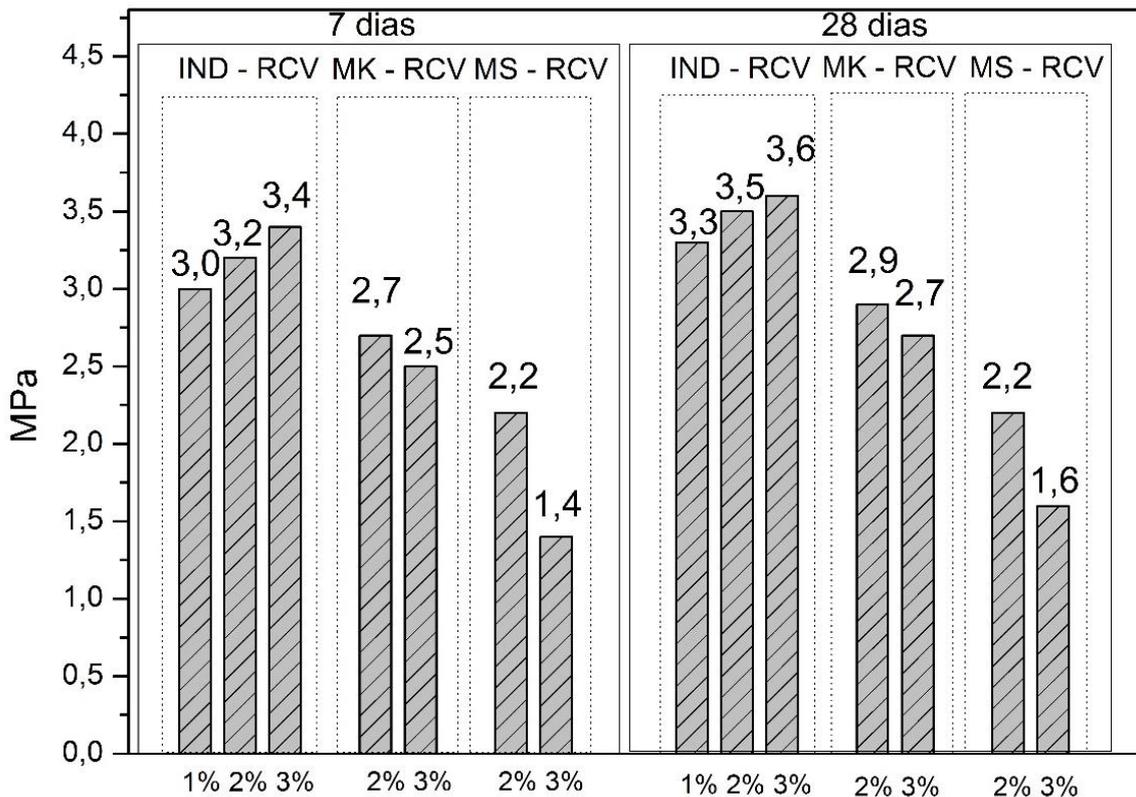


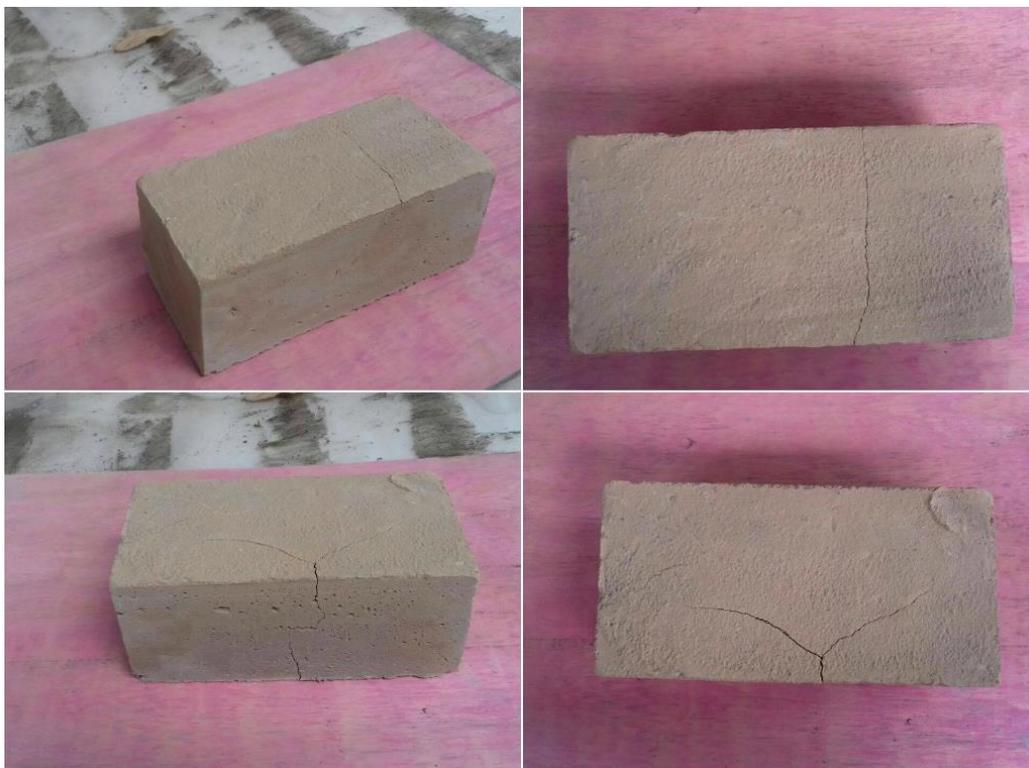
Figura 55 – Adobes ensaiados aos 7 e 28 dias com precursor de resíduo cerâmico.



Com foi visto antes o solo usado para a produção dos adobes tem teor menor de argila, mas as mesmas proporções do ligante. Estas amostras apresentaram redução das resistências em relação aos corpos de prova com aresta de 5 cm feitas com o solo vermelho que, de acordo com Corrêa et al., (2006), essa variação da resistência está relacionada com a espessura do adobe. Embora a comparação com os corpos de prova não seja proporcional em relação as suas dimensões, se os tijolos tivessem espessura menor, provavelmente sua resistência seria parecida com as amostras produzidas com solo vermelho.

Outro fator importante em relação a espessura dos adobes é o processo de secagem. Como os mesmos eram muito espessos, surgiram algumas fissuras na superfície dos blocos em algumas misturas, que de acordo com Corrêa et, al., 2006, essa variável contribui para dificultar a eliminação da água no adobe e consequentemente gera o aparecimento de fissuras, que tem influência na queda de resistência à compressão, porém os que apresentaram fissuras foram descartados (Figura 52).

Figura 56 - Adobes que apresentaram fissuração.



4.9- Fluorescência de raio-X e Difração de raios-X

4.9.1 Fluorescência de raios-X

A composição química dos materiais sintetizados com ativação alcalina pode ser vista na tabela 28.

Tabela 28 – Composição química dos adobes sintetizados com ativação alcalina.

| Composto químico | 3% Sil. Ind-MK (%) | 3% Sil. MK-MK (%) | 3% Sil. MS-MK (%) | 3% Sil. Ind-RCV (%) |
|--------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| SiO ₂ | 75,149 | 72,342 | 65,461 | 67,816 |
| Al ₂ O ₃ | 16,426 | 17,740 | 21,635 | 20,198 |
| Fe ₂ O ₃ | 5,770 | 6,554 | 9,182 | 8,195 |
| K ₂ O | 0,234 | 0,252 | 0,197 | 0,238 |
| CaO | 0,531 | 0,106 | 0,108 | 0,139 |
| Na ₂ O | 0,171 | 0,956 | 0,769 | 0,762 |
| MgO | 0,090 | 0,082 | 0,082 | 0,117 |
| Outros | 1,629 | 1,968 | 2,113 | 2,535 |

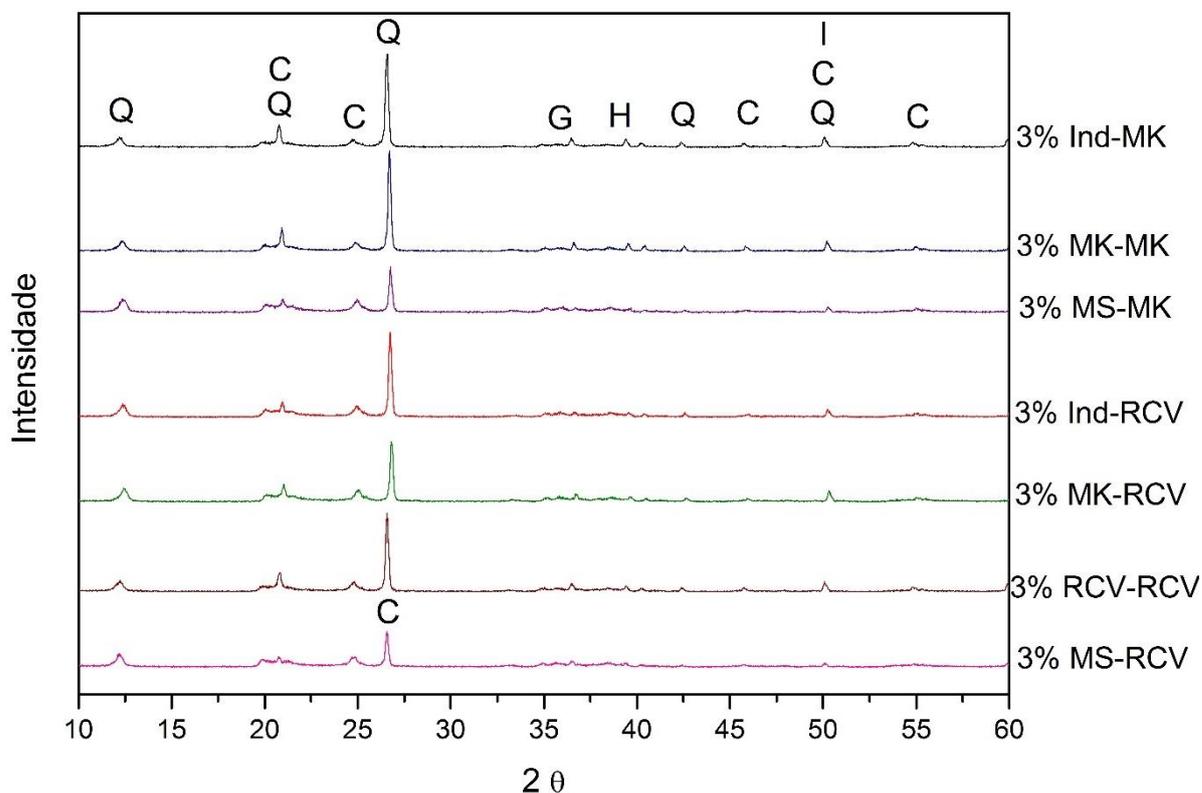
| Composto químico | 3% Sil. MK-RCV (%) | 3% Sil. RCV-RCV (%) | 3% Sil. MS-RCV (%) |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| SiO ₂ | 68,609 | 72,067 | 66,533 |
| Al ₂ O ₃ | 19,898 | 17,860 | 20,695 |
| Fe ₂ O ₃ | 8,010 | 6,849 | 8,741 |
| K ₂ O | 0,258 | 0,275 | 0,229 |
| CaO | 0,137 | 0,138 | 0,142 |
| Na ₂ O | 0,734 | 0,661 | 0,980 |
| MgO | 0,102 | 0,099 | 0,113 |
| Outros | 2,252 | 2,051 | 2,497 |

Os resultados dos materiais sintetizados são coerentes de acordo com a composição química dos ligantes alcalinamente ativado, onde os óxidos SiO₂ e Al₂O₃ são majoritários em relação aos demais óxidos, porém as quantidades representadas nesse ensaio não significam que houve a sintetização por completo, nesse caso sendo necessário realizar outros ensaios complementares para ter certeza se houve a formação dos geopolímeros.

4.9.2 Difração de raios-X

Os difratogramas dos materiais após a sua ativação podem ser vistos na figura 53.

Figura 57 – Difratogramas das misturas sintetizadas com ativação alcalina



(Q) Quartzo (C) Caolinita (G) Goetita (H) Hematita (I) Ilita

Nos padrões difratográficos dos materiais utilizados para a síntese da ativação alcalina foi possível observar que os materiais tinham uma estrutura mais organizada, o que remete a uma estrutura mais cristalina. Porém após o processo de “ativação” os difratogramas apresentaram uma redução nos picos antes apresentados. Isso indica que houve alterações na estrutura química dos materiais de forma que se assemelham a estrutura amorfa dos materiais geopolimérico.

Como pode ser visto nos padrões difratográficos, as misturas que apresentaram uma maior variação foram 3% MS-MK, 3% Ind-RCV e 3% MS-RCV. As amostras que tiveram a sílica ativa em substituição ao silicato de sódio apresentaram perdas nos picos antes identificados nos outros materiais devido a alta reatividade da sílica ativa e conseqüentemente uma maior dissolução em

meio alcalino. Já a amostra de 3% do ligante produzido com silicato de sódio industrializado e resíduo cerâmico como material precursor, apresentou uma leve redução, que pode ser devido ao aumento da sua finura do resíduo cerâmico que possibilitou uma maior reatividade para a realização da ativação alcalina. Porém se faz necessário unir esses resultados com outros de melhor precisão para caracterização química desses materiais, como por exemplo a ressonância magnética nuclear e espectroscopia de infravermelho, pois só os difratogramas não são precisos para afirmar se houve a formação de geopolímeros.

4.10 Microscopia eletrônica de varredura

Na figura 54 são apresentadas as amostras de referência (solo e água) e 3% IND-MK, e na figura 55 são vistas as com 3% MK-MK e 3% MS-MK.

Figura 58 – (a) amostra de referência ampliada 500 vezes, (b) amostra de referência ampliada 1000 vezes, (c) 3%Sil.Ind-MK ampliada 500 vezes, (d) 3%Sil.Ind-MK ampliada 1000 vezes.

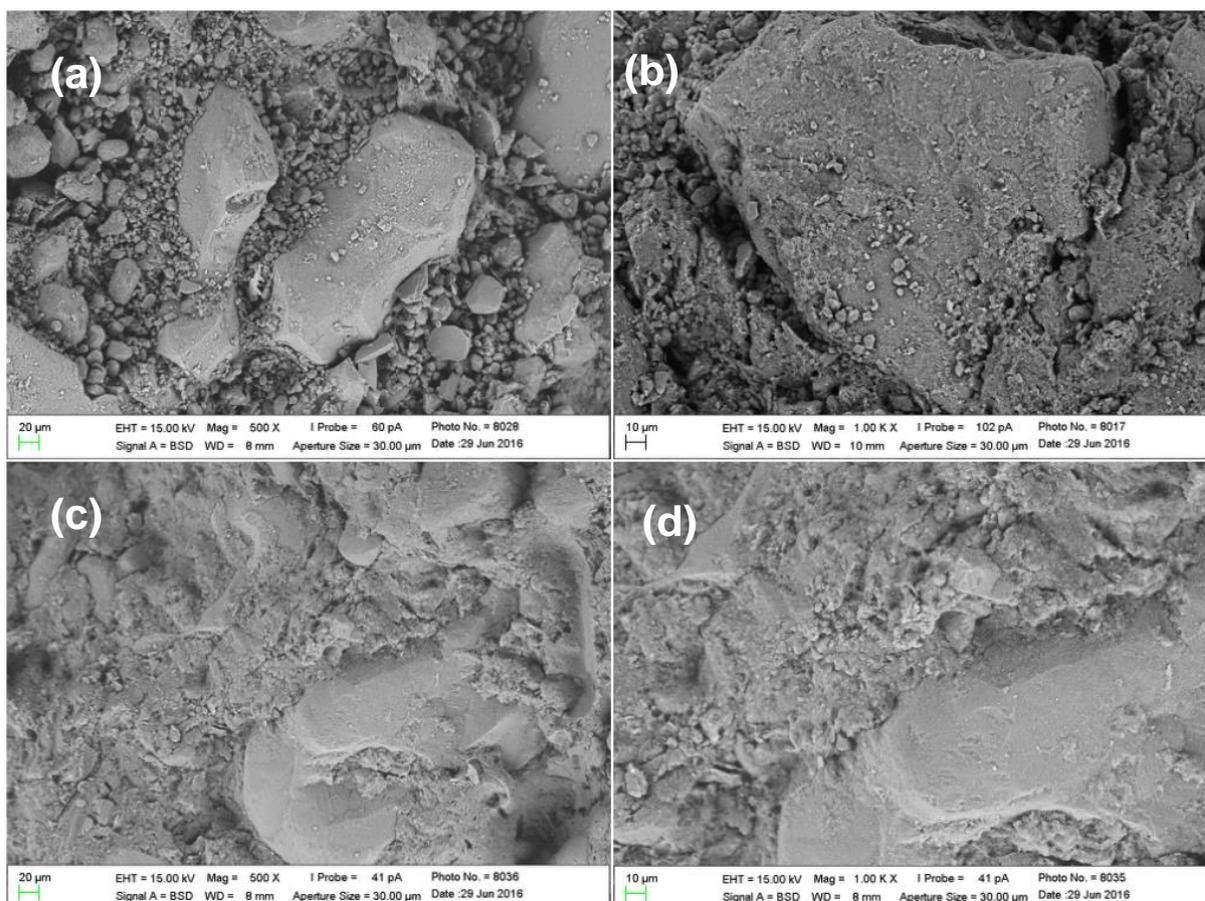
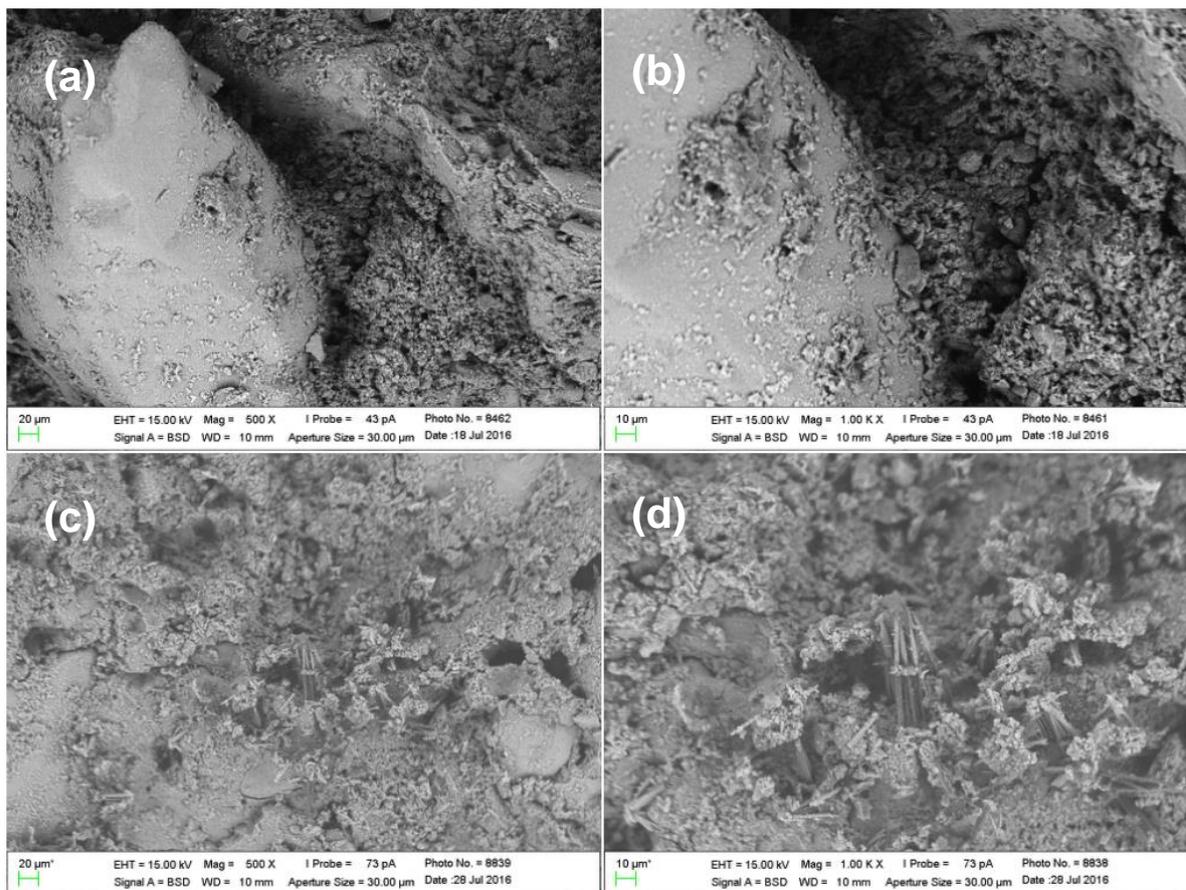


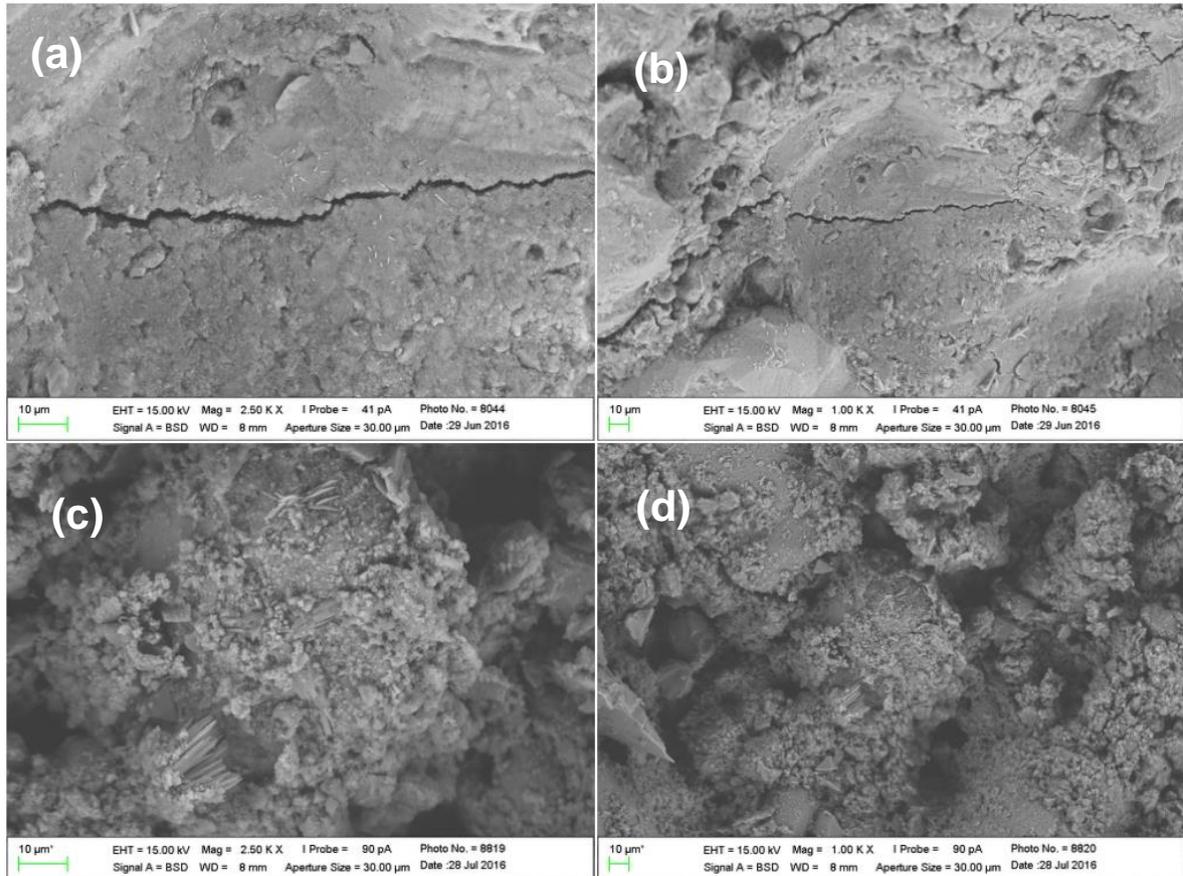
Figura 59 - (a) amostra de 3% MK-MK ampliada 500 vezes, (b) amostra de 3%MK-MK ampliada 1000 vezes, (c) 3% MS-MK ampliada 500 vezes, (d) 3% MS-MK ampliada 1000 vezes.



Comparando a amostra de referência com as demais que foram estabilizadas quimicamente é visível a formação de uma estrutura mais compactada e com uma menor quantidade de vazios, principalmente quando visualizamos a amostra produzida com 3%Sil. Ind-MK, que foi a que teve os melhores resultados de durabilidade e resistência mecânica. A mistura de 3%MS-MK apresentou na sua microscopia a presença de cristais em formato de agulhas. Essa estrutura é coerente de acordo com a literatura sobre ativação alcalina com cinzas volante e sílica ativa que apresenta um material com caráter semicristalino segundo Palomo et al., (1999a). Como essas misturas tinham uma quantidade maior de SiO_2 devido ao uso da sílica ativa acredita-se que esse fator é responsável pela formação dessa estrutura cristalina.

Para as amostras estabilizadas com resíduo cerâmica como precursor, também foi possível identificar cristais, como pode ser visto na figura 56.

Figura 60 - (a) amostra de 3% Sil. Ind-RCV ampliada 2.500 vezes, (b) amostra de 3% Sil. Ind-RCV ampliada 1000 vezes, (c) 3% MS-RCV ampliada 2.500 vezes, (d) 3% MS-RCV ampliada 1000 vezes.



Com exceção das misturas produzidas com silicato de sílica ativa, as demais apresentaram cristais que são formados no material cerâmico no processo de queima, que devido está em uma forma cristalina não reage com as soluções alcalinas. Nesse caso, para a sua identificação e melhor precisão é ideal o uso microscopia eletrônica de varredura com EDS.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho procurou analisar o comportamento de adobes estabilizados por meio da ativação alcalina e pontuar questões importantes sobre esse tema. Como materiais precursores, fornecedores de sílica e alumina amorfas, foram usados metacaulim e resíduos cerâmicos. Como ativador alcalino, silicato de sódio industrializado e misturas alternativas. Os resultados apresentados, permitem obterem-se as conclusões que seguem.

Um dos fatores para o sucesso da ativação alcalina é a criteriosa determinação das razões molares, em especial a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, o que implica na necessidade da caracterização química dos materiais precursores, no caso, Metacaulim e resíduos cerâmicos.

Embora o resíduo cerâmico tenha apresentado muita sílica e alumina cristalina em sua composição, ele apresenta reatividade no processo de estabilização dos adobes, desde que sua finura seja adequada.

Nos adobes moldados com geopolímeros produzidos com resíduo cerâmico foi possível observar, que os mesmos apresentaram melhorias na durabilidade e na resistência mecânica com valores próximos dos que utilizaram metacaulim. Dessa forma, pode-se dizer que é viável a sua utilização como precursor geopolimérico beneficiando o meio ambiente e gerando materiais mais duráveis.

Nos adobes estabilizados em que o silicato de sódio foi substituído por soluções alternativas, foi possível observar que as mesmas conduziram a resultados satisfatórios no que tange a durabilidade e resistência mecânica. Isto indica a viabilidade da substituição do produto industrial por soluções alternativas que venham a diminuir o impacto ambiental e o custo de produção dos adobes.

Os corpos de prova estabilizadas por ativação alcalina tiveram uma melhoria na sua durabilidade e resistência mecânica, pois foi possível observar a modificação que o ligante geopolimérico fez na matriz da terra tornando o material mais compacto e inerte quimicamente, devido a sua estrutura ter sido modificada com o aparecimento de fases amorfas.

Em relação a cura em estufa ecológica mesmo apresentando uma redução de desempenho mecânico os corpos de prova apresentaram melhorias em relação ao adobe convencional e se mostraram viáveis para a produção em larga escala de forma simples e com pouco custo. Porém, esse processo deve ser melhorado e assim gerar adobes mais resistentes.

A ativação alcalina se mostrou uma técnica promissora para o uso na estabilização de blocos de terra que podem ser usados em construções de habitações de interesse social, uma vez que seu uso gera adobes mais resistentes e duráveis com uma produção simples e de baixo custo.

CAPÍTULO VI

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- (i) Verificar o desempenho térmico de alvenarias produzidas com adobes estabilizados por meio da ativação alcalina;
- (ii) Investigar a influência dos argilominerais presentes no solo no processo de estabilização dos adobes;
- (iii) Analisar o desempenho mecânico de adobes com variações das relações molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$;
- (iv) Investigar a durabilidade de adobes submetidos ao ensaio de erosão com simulação de vários ciclos de chuva;
- (v) Avaliar o desempenho de adobes produzidos com teores maiores de ligante geopolimérico e com solos bastante argilosos;
- (vi) Mesclar diversos resíduos (industriais e agroindustriais) para a produção de soluções alcalinas no uso da ativação alcalina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHENZA, M.; FENU, L. **On earth stabilization with natural polymers for earth masonry construction**. *Materials and Structures* 39 2006 21–27.

Associação Brasileira de Cerâmica. **Panoramas setoriais: matérias-primas naturais**, 2000. Disponível em: www.abceram.org.br/asp/abc_2614.asp.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR – 7170. **Tijolo maciço cerâmico para alvenaria** – 1983.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR – 7171. **Bloco Cerâmico para alvenaria** – 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR – 7181. **Análise granulométrica de solos** – 1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR – 8491: **Tijolo de solo cimento, especificações**. 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR – 8492: **Tijolo maciço de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água**, 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653: **Materiais Pozolânicos – Especificação**. Rio de Janeiro, 2015.

BARBOSA N. P, GHAVAMI K. **Terra crua para edificações**. São Paulo: IBRACON, 2007, v. 2, p. 1505-1538.

BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. **Earth construction and sustainability**. *Key Engineering Materials*. 634 (2015) 433-446.

BARBOSA, N. P.; MATTONE, R. **Construção com terra crua. I Seminário Ibero-americano de Construção com Terra**. Salvador, BA, Anais Proterra/Cyted. Set 2002. Disponível em: www.passeidireto.com/arquivo/2106795/2-terra-cap-ibracon/11.

BARBOSA, V. F. F. **Síntese e caracterização de polissialatos**. 1999. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. (1999).

BOUTTERIN, C.; DAVIDOVITS, J., 2003, **La Brique Géopolymère L.T.GS. CORDI- GÉOPLYMÈRE S.A.**, Coodination et Développement International des Géopolymère, Saint-Quentin, France. *Geopolymer '88*, Vol.1, pp. 79-88 - article modifié en Juillet 2003 avec l'autorisation de CORDI-Géopolymère S.A. Disponível em: https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/ltgs-fr.pdf.

CAMPBELL, D. H.; FOLK, R. L. **The ancient Egyptian pyramids-concrete or rock**. *Concrete International*, 1991 pp.29-44.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978. 242p.

CARVALHO, C. M. **Caracterização de resíduos da indústria cerâmica e seu emprego em argamassas de Cimento Portland**. 2016. Dissertação de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. UFPB.

CHAO-LUNG H.; TRONG-PHUOC, H. **Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks**. Construction and Building Materials 93 2015 335–341.

CONTENSON, H.; COURTOIS, L. **A propos des vases de chaux. Recherches sur leur fabrication et leur origine**. Paleorient 5, 1979 177-182.

CORRÊA, A. A. R.; MENDES, L. M.; BARBOSA, N.P.; DE PAULA PRTÁSIO, T. DE AGUIAR CAMPOS, N. TONOLI, G. H. D. **Incorporation of bamboo particles and "synthetic termite saliva" in adobes**. Construction and Building Materials. 98 2015 250-256.

CORRÊA, A. A. R.; TEIXEIRA, V. H.; LOPES, S. P.; OLIVEIRA, M. S. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do adobe (tijolo de terra crua)**. Ciências Agrotécnicas, Lavras, 2006 v. 30, n. 3, p. 503-515.

CRATerre – Centre de Recherche et D’Application – Terre. **Construire em terre**. Paris: CRATerre. 270p. 1979.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A. **Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products**. Fuel 84, pp.2048-2054 2005.

DAVIDOVITS J. **Method for bonding fiber reinforcement on concrete and steel structures and resultant products**. U.S. Patent 5.925.449 1999. 20 Jul 1999.

DAVIDOVITS, J. **Ancient and modern concretes: What is the real difference?** Concrete International, v. 9, nº 12, p. 23-35, Dezembro 1987.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and sustainable development**. The Poly(sialate) terminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry. Proceedings of 2005 Geopolymere Conference.1, pp.9-15.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: inorganic polymeric new materials**. Journal of Thermal Analysis 37, 1633 1991.

DAVIDOVITS, J. **Mineral polymers and methods of making them**. US Patent 4.349.386 1982. 14 Set 1982.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements**. In: **Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes**, Kiev, Ukraine, 131 1994.

DAVIDOVITS, J. **Synthesis of new high-temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites.** Annual Pacific Technology Conference Technical Displays, 4: 151-154 1979.

DAVIDOVITS, J.; COURTOIS, L. **D.T.A. detection of intra-ceramic geopolymeric setting in archaeological ceramics and mortars.** Abstracts of papers 21st Symposium on Archaeometry, 1981 p.22 New York.

DAVIDOVITS, J.; SAWYER, J.L. **Early high strength mineral polymer.** U.S. Patent 4.509.958. 1985.

DEGIRMENCI, N. **The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization.** Construction and Building Materials 22 2008 1220–1224.

DEGIRMENCI, N.; BARANDA, B **Chemical resistance of pozzolanic plaster for earthen walls.** Construction and Building Materials 19 2005 536–542.

DIOP, M. B.; CRUTZECK, M. W. **Low temperature process to create brick.** Construction and Building Materials 22 2008b 1114–1121.

DIOP, M. B.; CRUTZECK, M. W. **Sodium silicate activated clay brick.** Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 67 2008a 499-505.

DIOP, M. B.; CRUTZERCK, M. W.; MOLEZ, I. **Comparing the performances of bricks made with natural clay and clay activated by calcination and addition of sodium silicate.** Applied Clay Science 54 2011 172–178.

DREVER, J.I. **The geochemistry of natural waters.** Surface and Ground Water Environments. 3 rd ed. 1997: Prentice Hall Ltd. 420-421.

DUARTE, I.; PEDRO, E.; VARUM, H.; MIRÃO, J.; PINHO A. **Soil mineralogical composition effects on the durability of adobe blocks from the Huambo region, Angola.** Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 74, 2015 pp 1-8.

DUXON, P.; PROVIS, J.; GRANT, LUKEY.; MALLICOAT, SETH.; KRIVEN, WALTRAUD; DEVENTER, JANNIE (2005) **Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties.** Colloids and Surfaces 269, pp. 47-58.

DUXSON, P., LUKEY, G. C., VAN DEVENTER, J. S. J., 2006, **Thermal Evolution of Metakaolin Geopolymers: Part 1 – Physical Evolution.** Journal of Non-Crystalline Solids v. 352, pp. 5541-5555.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymer technology: the current state of the art.** Journal Material Science, 42:2917–2933 2007.

DUXTON, P. **The structure and thermal evolution of metakaolin geopolymers.** Thesis of Doctor of Philosophy in Engineering of Department of Chemical and Biomolecular Engineering, the University of Melbourne, 2006.

ENGELHARDT, G., HOEBBEL, D., TARMAK, M., SAMOSON, A. AND LIPPMAA, E. **²⁹Si-NMR-Untersuchungen zur Anionenstruktur von kristallinen Tetramethylammonium-alumosilicaten und-alumosilicatlösungen.** Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie 484: 22-32 (1982).

FÉLIX, A. S.; FERREIRA, P. R. L.; BARBOSA, N. P.; BEZERRA, U.T.; GHAVAMI, K. **Alkaline Stabilization of Adobes.** 16th Non-Conventional Materials and Technologies. Winnipeg, Canada, set 2015.

FERET, R. (1939) **Slags for the manufacture of cement.** Rev. Mater. Constr. Trav.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO (2005) **Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder:** Effect of the activator. Cement and Concrete Research 35, pp. 1984-1992

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. **Characterisation of fly ashes.** Potential reactivity as alkaline cements. Fuel , v.82, p. 2259–2265 2003.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PUERTAS, F.; ARTEAGA, A. **Determination of kinetic equations of alkaline activation of blast furnace slag by means of calorimetric data.** Journal Thermal Analysis 52 945–955 1998.

Fundação João Pinheiros – MG, 2015. **Déficit habitacional no Brasil 2013:** resultados preliminares. Belo Horizonte, 2015.

GARZÓN, B.S.; **De la construcción tradicional a la racionalización de componentes en caña y tierra-cemento.** In: Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra. Anais. Salvador, Ba, Proterra/Cyted 2002.

GHARZOUNI, A.; JOUSSEIN, E.; SAMET, B.; BAKLOUTI, S.; ROSSIGNOL, S. **Effect of the reactivity of alkaline solution and metakaolin on geopolymer formation.** Journal of Non-Crystalline Solids 410 2015 127–134.

GLUKHOVSKY, V. D. **Soil Silicates.** Gostroiizdat Publish. Kiev, 1959 USSR.

GLUKHOVSKY, V.D.; ROSTOVSKAJA, G.S.; RUMYNA, G.V. 1980 **High strength slag alkaline cements.** 7th International Congress on the Chemistry of. Cement 3, pp.164-168.

GOMES, C.F. **Argilas: o que são e para que servem.** Calouste Gulbenkian, Lisboa. 1988. 457p.

GOMES, K.C. **Potencial de ativação alcalina de materiais residuais aluminosilicosos no desenvolvimento de matrizes cimentícias.** 2008. Dissertação de mestrado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. UFPB.

GRIN, R. E. **Clay mineralogy.** McGraw Hill, New York.1962.

HARDJITO, D.; WALLAH, S. E.; SUMAJOUW; RANGUN, B. V. **Fly ash based geopolymer concrete, Construction material for sustainable development.** Concrete World: Engineering & Materials, American Concrete Institute, India 2004.

HEATHCOTE, K.; MOORE, G. **The UTS durability test for earth wall construction.** 2003. Disponível em: www.Dab.Uts.Edu.Au/Ebrf/Research/Leipzig-Paper.Doc.

HELFRITZ, H. **Land without Shade.** Journal of the Royal Central Asian Society 24 1937 201–216.

HOHSEN, Q., MOSTAFA, N. Y., 2010, **Investigating the possibility of utilizing low kaolinitic clays in production of geopolymer bricks.** Ceramics – Silikáty 2010, 54 (2), 160-168.

HOUBEN, H; GUILLAUD, H: **Traité de construction en terre.** Edition Parenthèses, Marseille, França: 1989.

KHAN, M. I., AZIZLI, K. SUFIAN, S. MAN, Z. **Sodium silicate-free geopolymers as coating materials: Effects of Na/Al and water/solid ratios on adhesion strength.** Ceramics International 41 – 2015, p. 2794–2805.

KRIVEN, W. M. GORDON, M. BELL, J. L. **Geopolymers: Nanoparticulate, nanoporous ceramics made under ambient conditions.** In: PROC. Annual Meeting of The Microscopy Society OF America, 62, 2004 Savannah. Savannah: Microscopy Society of America, 2004.

KRIVENKO, P. V. **Alkaline cements.** In: First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, 1994, Ukraine.

KUTTI, T.; MALINOWSKI, R.; SREBRENİK, M. **Investigation of mechanical properties and structure of alkali activated blast furnace slag mortars.** Silices Industriels 6 1982 149–158.

LANGTON, C. A.; ROY, D. M. **Longevity of borehole and shaft sealing materials: characterization of ancient cement-based building materials.** Scientific Basis For Nuclear Waste Management 26, 1984 pp. 543-549.

LEE, W. K. W.; DEVENTER, J. S. J. **The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements.** Cement and Concrete Research 32 2002 pp.577-584.

LUNA, F. J.; SCHUCHARDT, U. **Argilas pilarizadas - Uma Introdução.** v.22, Química Nova, n.1, p.104-109, 1999.

MALOLEPSZY, J. **The hydration and the properties of alkali activated slag cementitious materials.** Zeszyły Naukowe AGH, Ceramika 53, p. 7–125 1989.

MASON, B. E.; MOORE, C. B. 1982. **Principles of Geochemistry**, 4th Ed. New York, John Wiley & Sons, 344p.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEIRE, J. M. L. **Argilas**: o que são, suas propriedades e classificações. Comunicações técnicas: 2001. Disponível em: www.visaconsultores.com/pdf/VISA_com09.pdf.

MILLOGO, Y.; MOREL, J.C. **Microstructural characterization and mechanical properties of cement stabilized adobes**. Materials and Structures 2012 45:1311–1318.

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

MUÑOZ, J. F; EASTON, T. DAHMEN, J. **Using alkali-activated natural aluminosilicate minerals to produce compressed masonry construction materials**. Construction and Building Materials 95 2015 86–95

Norma Técnica del Reglamento Nacional de Edificaciones (NTE). **NTE E. 080-ADOBE**. Lima-Peru. p.310-216. 2000.

OBONYO, E.; EXELBIRT, J.; BASKARAN, M. **Durability of compressed earth bricks**: assessing erosion resistance using the modified spray testing. Sustainability 2 2010 3639-3649.

OLIVEIRA, L. S.; BARBOSA, N. P.; CARVALHO, C. M.; SANTOS, F. S. **Stabilization of raw earth through alkaline activation**. Key Engineering Materials 600 2014 215-224.

PALOMO, A.; DE LA FUENTE, J. I. L. **Alkali-activated cementitious materials**: alternative matrices for the immobilization of hazardous wastes – Part I. Stabilization of boron. Cement and Concrete Research, v. 33, n.2, p. 281-288. 2003.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. **Alkali-activated fly ashes**: a cement for the future. Cement and Concrete Research 29 1999a 1323–1329.

PALOMO, A.; VARELA, M. T. B.; GRANIZO, M. T.; PUERTAS, F.; VARQUEZ, T.; GRUTZECK, M. W. **Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin**. Cement and Concrete Research 29 7 997–1004. 1999b.

PERINET, G.; CONTENSON, H.; COURTOIS, L. **Etude mineralogique de vaisselles blanches de Ras-Shamra et Tell Ramad (Syrie)**. Compte Rendu Acad. Sci.. 1980 p. 143-144 Paris.

PINTO, A. **Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulino**. Tese Doutorado, Universidade do Minho, Portugal. 2004. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/671>.

PINTO, A; FERNANDES, P; JALALI, S. **Geopolymer manufacture and applications** – main problems when using concrete technology. In proceedings of 2002 Geopolymer Conference. Melbourne, Australia.

PURDON, A. O. **The action of alkalis on blast furnace slag**. Journal of the Society of Chemical Industry 59, 1940 p. 191-202.

QUAGLIARINI, E.; LENCI, S. **The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks**. Journal of Cultural Heritage 11 2010 309–314.

ROGERS, C.D.F.; SMALLEY, I.J. **The Adobe Reaction and the Use of Loess Mud in Construction**. Construction and Building Materials 40 1995 137-138.

ROY, D. M. **Alkali-activated cements opportunities and challenges**. Cement and Concrete Research, v.29 p. 249-245. 1999.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**, vol. 1, Ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, S. P., 1989.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. Vol. 3, Ed.2. São Paulo: E. Blücher, 1992.

SOUSA, S. M. T. **Efeito da ativação alcalina dos aluminossilicatos nas propriedades mecânicas e microestruturais de compósitos argilosos prensados**. 2011. Tese de doutorado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. UFPB.

SOUZA, J. D. R. B. **Adesivos alcalinamente ativados: ativação com silicato de potássio e silicato de sódio**. 2009. Dissertação de mestrado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. UFPB.

SUMAJOW, M; RANGAN, B. (2006) **Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Reinforced beams and columns**. Research Report GC, Curtin University of Technology, Perth, Australia.

SHARMA, V.; MARWAHA, B. M.; VINAYAK, H. K. **Enhancing durability of adobe by natural reinforcement for propagating sustainable mud housing**. International Journal of Sustainable Built Environment. 2016 5, 141-155.

TEOREANU, I.; PURI, A. **The activation of blast furnace slags by sodium silicate**. Silicatechnik 6, 209–216 (1975).

TORGAL, F. P., CASTRO GOMES, J. P., JALALI, S. **Utilization of mining wastes to produce geopolymers**. In Geopolymers, Structure, Processing, Properties and Applications, ISBN – 13: 978 1 84569 449 4, Ed. J. Provis & J. Van Deventer, Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, UK, p. 267-293, 2009.

TORGAL, F. P.; EIRES, R. M. G; JALALI, S. **Construção em terra**. Universidade do Minho, Guimarães 2009.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **Ligantes obtidos por ativação alcalina.** Universidade do Minho, Guimarães 2009.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash – based Geopolymers.** Industrial and Engineering Chemistry Research 38, 3932 1999.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LORENZEN, L. **Factors affecting the immobilization of metal in geopolymerized fly ash.** Metallurgical and Materials Transactions B. Process Metallurgy and Materials Processing Science 29, 1: 283-291 1998.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LORENZEN, L. **The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metals: Part I. Theoria and Applications.** Minerals Engineering, v. 10, n 7, p. 659 – 667. 1997.

VARELA, B. **“A Study on the suitability of geopolymers for structure steel fire protection”**, Tese de Doutorado, Universidade do Estado do Novo México, Estados Unidos, 2002.

VEIGA, L. F. M. **Caracterização físico-química de adobes estabilizados com amido de mandioca.** 2008. Dissertação de mestrado na Rede Temática em Engenharia de Materiais. UFOP.

VIEIRA, A. A.P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassa e concreto.** 2005. Dissertação de mestrado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana. UFPB.

WENG, L.; SAGOA-CRENTSIL, BROWN, T.; SONG, S. **Effects of aluminates on the formation of geopolymer.** Materials Science & Engineering. 2005, 117 163-168.

XU, H.; DEVENTER, J. S. J. **The geopolymerisation of alumino-silicate minerals.** International Journal of Mineral Processing 59 2000 p. 247-266.

ZHANG, H. Y., KODUR, V. Q. I., S. L, WU, B. **Characterizing the bond strength of geopolymers at ambient and elevated temperatures.** Cement & Concrete Composites 58 2015 40–49.