



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

- MESTRADO -

**ESTABILIZAÇÃO DE BLOCOS DE TERRA CRUA ATRAVÉS DE
ATIVAÇÃO ALCALINA**

por

LEANDRO SANTOS DE OLIVEIRA

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

JOÃO PESSOA – PARAÍBA

AGOSTO – 2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

- MESTRADO -

ESTABILIZAÇÃO DE BLOCOS DE TERRA CRUA ATRAVÉS DE ATIVÇÃO ALCALINA

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

LEANDRO SANTOS DE OLIVEIRA

Orientador: Profº. Drº. NORMANDO PERAZZO BARBOSA

JOÃO PESSOA – PARAÍBA

AGOSTO – 2015

ESTABILIZAÇÃO DE BLOCOS DE TERRA CRUA ATRAVÉS DE ATIVAÇÃO ALCALINA

*“Não se tira nada de nada, o novo vem do antigo,
mas nem por isso é menos novo.”*

(Bertolt Brecht)

Dedico!

Ao Criador, pela graça que nos concede de viver a vida.
Aos meus pais, pelo exemplo de bondade e perseverança.
A minha alma gêmea Fabiana, fonte inspiradora.
Aos meus filhos Lucas e Daniel, bênçãos num
mundo carente de amor.

AGRADECIMENTOS

A D'us, louvado seja, por tudo que é conhecido e desconhecido pela humanidade, que permite “descobrirmos” o que estava encoberto pelo tempo e aguardando o tempo apropriado de ser redescoberto.

Ao professor Normando Perazzo Barbosa, pela atenção e orientação dada a esta pesquisa, sempre preocupado com a aplicação social e a geração de tecnologias sustentáveis.

Aos professores e profissionais que fazem parte do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, por todo o conhecimento compartilhado.

Aos colegas de turma, pelo companheirismo e amizade em todos os momentos do curso.

Aos técnicos do Laboratório de Solidificação Rápida – LSR/UFPB, na realização de alguns ensaios inerentes a pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Pavimentação – LABPAV/UFPB, por toda ajuda prestada.

Aos técnicos do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas – LABEME/UFPB, Delby, Ricardo, Sebastião, Zito e demais, sempre disponíveis para realização dos ensaios.

A todos os familiares que, independente da distância, estão sempre a me incentivar positivamente, seja com palavras ou pensamentos.

A minha esposa amada, Fabiana Silva Santos e filhos Lucas e Daniel, pelo apoio, companheirismo e incentivo em mais esta fase de minha vida.

Aos meus pais José Felipe de Oliveira (*in memoriam*) e Eronice dos Santos de Oliveira, alicerces do meu caráter e ser.

RESUMO

Para utilização da terra na construção civil, se faz necessário sua estabilização. Tal processo é de fundamental importância para se obter um material em conformidade com as normas vigentes de construção, atendendo a requisitos como: resistência mecânica, estabilidade volumétrica, trabalhabilidade e ductilidade. Atualmente, os produtos mais utilizados para estabilizar a terra são cal, cimento Portland e emulsões betuminosas. Sendo as argilas de fundamental importância para a construção com terra crua, por ser ela o ligante natural, trabalhos têm sido desenvolvidos com intuito de torná-las auto-estabilizantes. Dessa forma, a estabilização de blocos de terra por ativação alcalina tem ganhado especial atenção uma vez que, a eliminação de agregados, influenciará diretamente no custo do material final além da eliminação de processos caros, de tecnologia complexa e de alto grau poluidor em sua elaboração. Neste trabalho, os resultados obtidos, mostram que é possível a obtenção de blocos de adobe resistentes a compressão e a ação da água com uso de ativação alcalina.

Palavras-chave – blocos de terra, ativação alcalina, metacaulim, resíduo cerâmico, geopolímero.

ABSTRACT

Stabilization is important in earthen construction in order to improve mechanical strength, volumetric stability, workability and even ductility. Currently, the products used to stabilize the earth are lime, Portland cement and bitumen emulsions. Due to the environmental problems that the mankind faces nowadays, the use of earthen construction is increasing. Adobe is the most traditional type of block used in masonry. To improve strength against water, a new way to stabilize this kind of unburned earth block is proposed by the alkaline activation of earth. This paper presents the first results about the experimentation made in the stabilization of soil with alkali activator. Two cure temperatures were tested: room temperature and oven at 50°C. The amounts of stabilizer used were 3% and 6% activator by mass of earth. Results show that it is possible for adobe blocks to be resistant to compression and water action using the alkaline activation.

Keywords - earth blocks, alkaline activation, metakaolin, waste ceramic, geopolymer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desempenho de materiais industrializados.....	18
Figura 2 – Estimativa de demanda habitacional.....	19
Figura 3 – Assentamento de blocos com aplicação de argamassa.....	22
Figura 4 – Confeção de blocos de adobe.....	22
Figura 5 – Construção colonial. Igreja em Santa Rita Durão.– MG.....	23
Figura 6 – Execução de uma parede monolítica.	23
Figura 7 - Execução de uma parede de pau a pique.....	24
Figura 8 – Elementos químicos mais importantes na crosta terrestre.....	25
Figura 9 – Tamanhos relativos de cascalho, areia, silte e argila.	26
Figura 10 – Representações esquemáticas das folhas tetraédrica e octaédrica, unidades estruturais dos argilominerais.	28
Figura 11 – Representação de um cristal de argila.	28
Figura 12 - Estado do solo em função do seu teor de umidade.	30
Figura 13 – Relação entre o limite de retração (LR) e as variações de volume da terra e da água evaporada, durante o processo de secagem.	32
Figura 14 – Produção de adobes – Nigéria.....	33
Figura 15 – Formas para preparo de adobe.....	33
Figura 16 – Moldagem manual de adobe	33
Figura 17 – Estrutura tri-dimensional para o Na-polissialato.....	39
Figura 18 – Modelo proposto para ativação alcalina de aluminossilicatos.....	41
Figura 19 – Obtenção de metacaulinita.....	42
Figura 20 – Principais aglomerações produtivas mínero-cerâmicos brasileiras.	43
Figura 21 – Planejamento Experimental.	45
Figura 22 – Ferramenta de teste de hipóteses – SOLVER.	47
Figura 23 – Resultado de otimização com uso da ferramenta SOLVER para o precursor resíduo cerâmico.....	48
Figura 24 – Solo peneirado em malha 4,8mm.....	49
Figura 25 – Resíduo Cerâmico: (a) antes da moagem; (b) após moagem em moinho de bolas.	50
Figura 26 – Corpos de prova produzidos em forma cúbica.....	52

Figura 27 – Corpos de Prova Acondicionados em Saco Fechado.	53
Figura 28 – Preparo de material em molde cilíndrico feito com cano de PVC.	54
Figura 29 – Reação de ativação alcalina	55
Figura 30 – Blocos de Terra Adensados Manualmente em Corpos de Prova Cilíndricos.....	56
Figura 31 – Corpos de Prova Acondicionados em Saco Fechado	56
Figura 32 – Preparo dos corpos de prova: (a) mistura de materiais secos; (b) adição de água; (c) adição de solução alcalinizante; (d) mistura homogeneizada; (e) material pronto para moldagem.....	57
Figura 33 – Moldagem dos corpos de prova: (a) moldes cilíndricos de PVC rígido; (b) exsudação excessiva após desmolde.....	58
Figura 34 – Regime de cura dos corpos de prova. (a) primeiras 72h em embalagem fechada; (b) após as 72h iniciais, os corpos de prova continuam a cura expostos ao ar.....	59
Figura 35 – Curva de distribuição granulométrica.....	60
Figura 36 - Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca Máxima.	61
Figura 37 - Difração de Raio-X para (a) resíduo cerâmico e (b) metacaulim. ...	62
Figura 38 – Percentuais de SiO_2 e Al_2O_3 para cada precursor.	63
Figura 39 – Resistência a Compressão (MPa). MK: Metacaulim e RC: Resíduo Cerâmico SPJ: Cinza de bagaço de cana.....	66
Figura 40 - Amostras imersas em água.	67
Figura 41 – Resistência a Compressão – Terceiro experimento.....	68
Figura 42 - Resistência a compressão - quarto experimento.	71
Figura 43 – Teste de Absorção de água - quarto experimento.	72
Figura 44 – Ensaio de capilaridade.	73
Figura 45 – Rompimento dos corpos de prova por compressão diametral.	74
Figura 46 - Comparativo do aumento de peso em função da absorção de água	74
Figura 47 – Ensaio de compressão (MPa) com tempo de cura de 70 meses. .	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das partículas do solo segundo normas de diversos países.....	26
Tabela 2 – Principais tipos de argilas.....	29
Tabela 3 – Índice de Plasticidade e Limite de Liquidez para caracterização do tipo de solo.....	31
Tabela 4 – Breve histórico da química dos aluminossilicatos.....	36
Tabela 5 – Estruturas dos polissialatos.....	38
Tabela 6 – Materiais utilizados na pesquisa.....	49
Tabela 7 – Ensaio de caracterização do solo.....	50
Tabela 8 - Quantitativos de solo + ativador alcalino utilizados.....	52
TABELA 9 - Razões Molares dos Óxidos da Mistura Reagente.....	54
Tabela 10 – Regimes de cura adotados (Tempo (h) acumulado).....	59
Tabela 11 – Limites de Atterberg	61
Tabela 12 – Análise dos precursores por FRX.....	63
Tabela 13 – Preparo de C.P. de solo + ativador alcalino.....	64
Tabela 14 – Preparo de C.P. de solo + ativador alcalino R.C. e SPJ Sem adição de silicato de sódio – Segundo experimento.....	65
Tabela 15 - Razões molares dos óxidos na ativação alcalina.....	67
Tabela 16 – Preparo de C.P. de solo + ativador alcalino R.C. Sem adição de silicato de sódio – Terceiro experimento.....	67
Tabela 17 - Absorção de água (%A) para corpo de prova ativado com resíduo cerâmico.....	69
Tabela 18 – Preparo de C.P. de solo + ativador alcalino R.C. Sem adição de silicato de sódio – Segundo experimento.....	69
Tabela 19 - Razões molares dos óxidos na ativação alcalina – quarto experimento.....	70
Tabela 20 - Absorção de água (%A) – quarto experimento	72
Tabela 21 - Absorção de água por capilaridade.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LP	Limite de plasticidade
LR	Limite de retração
LL	Limite de liquidez
PS	Polissialato
PSS	Polissialato Siloxo
PSDS	Polissialato Disiloxo
BTC	Bloco de terra comprimida
C.P.	Corpo de prova

SUMÁRIO

1.1	Generalidades	16
1.2	Justificativa.....	19
1.3	Objetivos	20
1.3.1	Objetivo geral.....	20
1.3.2	Objetivos específicos.....	20
2.1	Construção com terra.....	21
2.1.1	Técnicas de construção com terra.....	21
2.2	Propriedades da terra.....	24
2.2.1	Composição química	24
2.2.2	Composição granulométrica	25
2.2.3	Argilas.....	27
2.2.4	Água no solo.....	29
2.2.4.1	Plasticidade	30
2.2.4.2	Densidade Seca.....	31
2.2.4.3	Retração da terra.....	31
2.3	Adobe.....	32
2.4	Tecnologia Apropriada	34
2.5	Ativação alcalina de aluminossilicatos	35
2.5.1	Geopolímero	37
2.5.1.1	Aplicações.....	37
2.5.1.2	Terminologia.....	38
2.5.1.3	Geopolimerização.....	40
2.5.1.4	Precursores Geopoliméricos	41
2.5.1.5	Resíduo Cerâmico (RC)	42
3.1	Caracterização dos Materiais.....	46
3.1.1	Difração de Raios-X (DRX).....	46
3.1.2	Florescência de Raios-X (FRX)	46

3.1.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	46
3.1.4	Resistência à Compressão Simples	47
3.1.5	Ferramenta para teste de hipóteses - SOLVER	47
3.2	Materiais.....	48
3.2.1	Solo	49
3.2.2	Hidróxido de sódio	50
3.2.3	Resíduo Cerâmico	50
3.2.4	Silicato de Sódio Alcalino	51
3.2.5	Geopolímero	51
3.3	Metodologia aplicada para autoestabilizar os blocos de adobe	51
3.3.1	Preparo dos blocos de terra estabilizados.....	57
3.3.2	Regime de cura	58
4.1	Solo	60
4.2	Precursores geopoliméricos.....	62
4.3	Ativação de blocos de terra.....	64
4.4	Considerações finais.....	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Um dos materiais de construção mais antigos utilizado pelas civilizações é a terra crua. No entanto, com o advento dos materiais industrializados, a terra foi sendo “esquecida” como material de construção, dando lugar aos chamados materiais de construção convencionais, os quais são ditos como símbolos da modernidade, mas que carregam consequências danosas ao meio ambiente tais como: produção excessiva de CO₂, geração de subprodutos (poluentes) responsáveis pela chuva ácida e necessidade de grande quantidade de energia em seu processamento.

Vários são os benefícios e vantagens da utilização da terra crua em construções das quais, podemos citar: disponibilidade – é um dos materiais mais abundantes no meio ambiente; excelente desempenho térmico – restringe a passagem da carga térmica pela parede produzida; absorção e liberação de umidade mantendo o ambiente climatizado; geração mínima de poluição e baixo consumo energético no seu manuseio; é de fácil reincorporação na natureza além de ser uma tecnologia com facilidade de ser transmitida e de ser absorvida por populações com pouca instrução, necessitando de equipamentos pouco sofisticados e de baixo custo de aquisição.

Na utilização da terra para elaboração de alvenaria, se faz necessário sua estabilização. Tal processo é de fundamental importância para se obter um material em conformidade com as normas vigentes de construção, atendendo a requisitos como: resistência mecânica, estabilidade volumétrica, trabalhabilidade e ductilidade. Segundo Barbosa e Ghavami (2007), vários meios têm sido aplicados para a estabilização da terra:

- Ação mecânica, capaz de densificar a terra a tal ponto que ficam bloqueados os poros e canais capilares: é o caso dos tijolos de terra prensados, utilizando-se de equipamentos caros;

- Utilização de produtos químicos água-repelentes para eliminação da absorção e adsorção de água por parte dos grãos de solo: em geral são produtos caros;

- Envolvimento dos grãos de terra por uma fina camada de material impermeabilizante, capaz de fechar poros e canais capilares: é o caso de emulsões betuminosas;

- Formação de ligações químicas entre os cristais de argila: é o caso de certos estabilizantes químicos que, fazendo o papel de ligante ou de catalisador, utilizam as cargas positivas e negativas das lamelas de argila para uni-las entre si, ou de estabilizante capaz de reagir diretamente com a argila presente no solo formando material insolúvel e inerte. Este último caso é o que se chama reação pozolânica¹, obtida notadamente com a cal. É, no entanto, um processo muito lento;

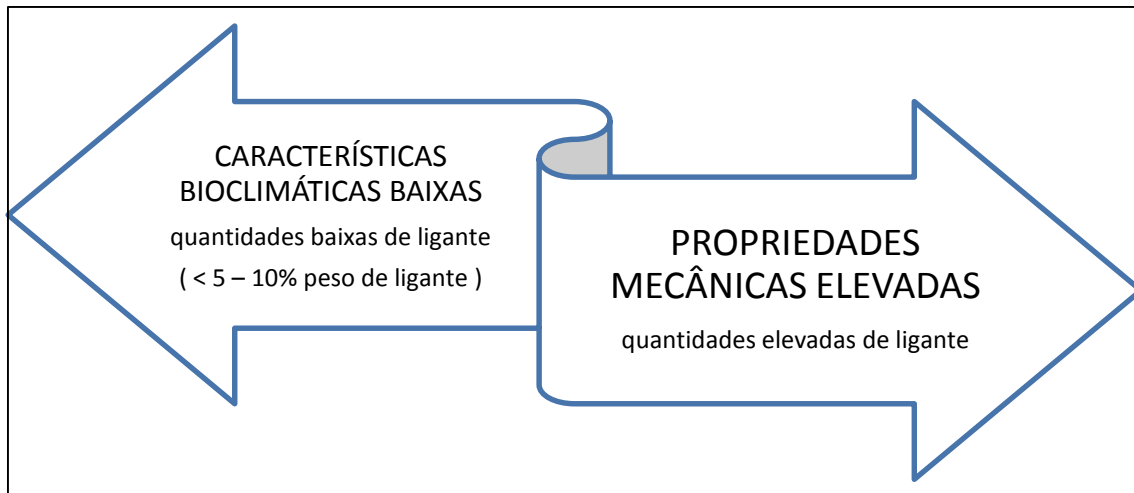
- Criação de um esqueleto sólido inerte que se opõe ao movimento dos grãos: é o caso dos ligantes, como o cimento, que promovem uma consolidação por cimentação resultante do preenchimento dos vazios por uma matriz inerte capaz de unir os grãos;

- Criação de uma armadura omnidirecional capaz de reduzir os movimentos dos grãos de solo entre si: é o caso da adição de fibras que, embora não aumentem significativamente a resistência mecânica nem melhore o comportamento à ação da água, conduzem a notável melhoria de ductilidade.

O uso dos ligantes convencionais (cal, cimento, asfalto) na produção de materiais industrializados, além de contribuir de forma negativa para o meio ambiente – geração excessiva de poluentes como: CO₂, poluentes responsáveis pela chuva ácida, e pela geração do efeito estufa – geralmente apresentam sofrível desempenho do ponto de vista do conforto interior (Figura 1).

¹ Pozolana são materiais silicoso ou sílico-aluminosos, naturais ou artificiais, que contém um elevado teor de sílica em forma reativa – não cristalina (vítrea) – finamente pulverizada capaz de reagir, na presença de água e em temperaturas próximas à ambiente, com Ca²⁺ ou com Ca(OH)₂, para formar compostos que possuem poder aglomerante (Santos, 1975; Gomes, 1988).

Figura 1 – Desempenho de materiais industrializados



Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, materiais de construção convencional com boa característica bioclimática e propriedades mecânicas satisfatórias, costumam andar na contramão.

Materiais sílico-aluminosos, denominados de geopolímeros ou polissialatos (PS), apresentam características particulares que conferem grande potencial de aplicação como aglomerante, em substituição ao cimento Portland. Tais materiais foram descritos pela primeira vez em patentes por Davidovits (1982). Segundo Davidovits, trata-se de uma adaptação moderna de processos de estabilização de solos caulíníticos por ativação alcalina com a cal $[Ca(OH)_2]$, produzidos pelos antigos romanos e egípcios para obtenção de aglomerantes estruturais.

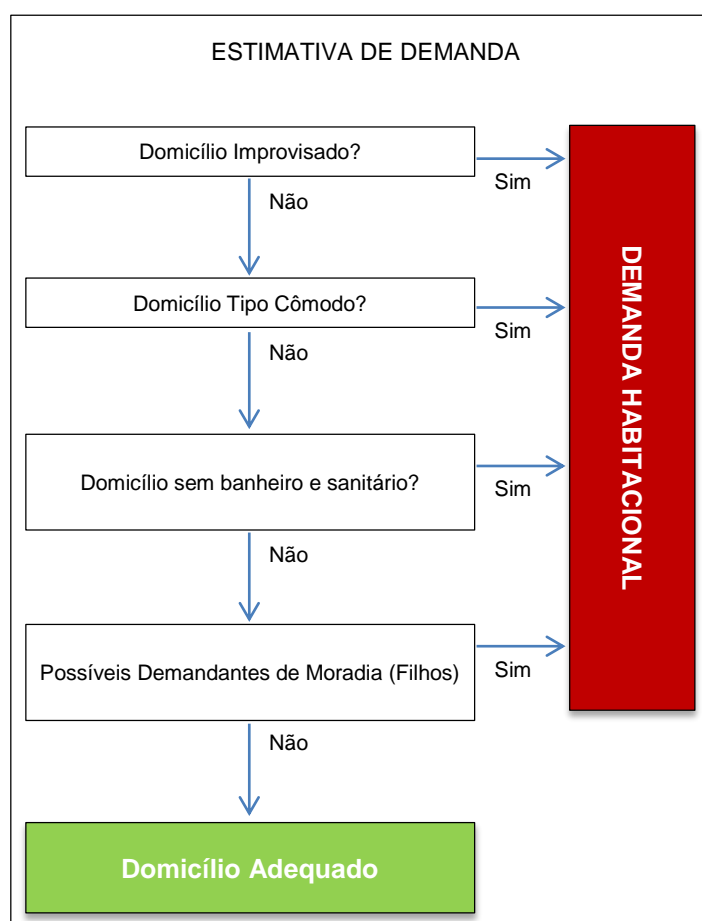
Sendo as argilas de fundamental importância para a construção com terra crua, por ser ela o ligante natural, trabalhos têm sido desenvolvidos com intuito de torná-las auto-estabilizantes. Dessa forma, a estabilização de blocos de terra por ativação alcalina tem ganhado especial atenção uma vez que, a eliminação de agregados, influenciará diretamente no custo do material final além da eliminação de processos caros, de tecnologia complexa e de alto grau poluidor em sua elaboração. Dessa forma, utilizando-se de técnicas similares aos usados na produção de polissialatos, pretende-se produzir materiais auto-

estabilizantes que não carecem da adição de aditivos, além de utilizar tecnologia de baixo consumo de energia.

1.2 Justificativa

A industrialização excessiva trouxe como consequência, o abandono e esquecimento das técnicas de uso dos materiais tradicionais (terra crua, galhos, bambu, palha, ...). Tal efeito leva a associação desses materiais à pobreza e descrédito. O déficit habitacional (Figura 2) é uma fotografia que mostra o excesso de população que necessita de habitações não restritas à falta de moradias, incluindo também as más condições das unidades habitacionais existentes.

Figura 2 – Estimativa de demanda habitacional



Fonte: Adaptado de CAIXA (2011).

Neste sentido, esta pesquisa busca contribuir para a melhoria das técnicas de uso de materiais tradicionais, promovendo iniciativas de uso, como

a adoção do tijolo de adobe, resíduos industriais (como o resíduo cerâmico) e outros, na construção de moradias que atendam a requisitos estruturais e estéticos. A importância ambiental também se torna evidente, seja pela redução de despejos industriais, seja pela reutilização dos resíduos provenientes das indústrias de produção da cerâmica vermelha.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Estudar o comportamento de um solo quimicamente estabilizado através do uso de precursores, fonte de SiO_2 e Al_2O_3 , tais como o resíduo cerâmico (RC) e o metacaulim (MK), ativados alcalinamente, para a obtenção de blocos estruturais de adobe.

1.3.2 Objetivos específicos

- i. Desenvolver mecanismos de autoestabilização de blocos de adobe por meio de ativação alcalina de precursores geopoliméricos;
- ii. Verificar o desempenho mecânico dos blocos de terra de acordo com o tipo de precursor e os parâmetros composicionais de cada síntese;
- iii. Contribuir para oferecer subsídios tecnológicos alternativos para a utilização de materiais de construção não convencionais

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A estabilização da terra consiste em modificar as propriedades do sistema terra-água-ar para obter qualidades permanentes compatíveis com uma aplicação particular: resistência mecânica; desempenho quanto à ação da água, incluindo estabilidade volumétrica; trabalhabilidade e ductilidade. Dessa forma, utilizando-se de técnicas similares aos usados na produção de polissialatos, pretende-se produzir materiais auto-estabilizantes que não carecem da adição de aditivos, além de utilizar tecnologia de baixo custo e de fácil transferência.

2.1 Construção com terra

As leis sobre o uso da terra como material de construção são muito escassas e na maioria dos países desenvolvidos, surgem inúmeros problemas técnicos e legais para a realização de uma construção com este material.

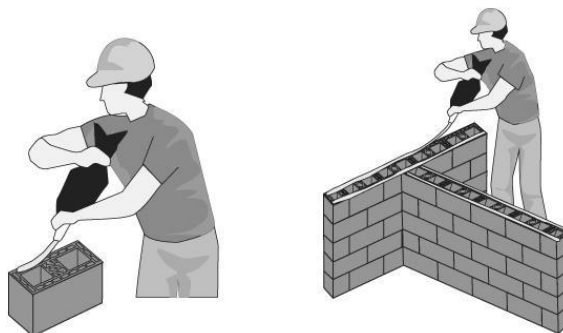
Segundo Cid *et al.* (2011), cerca de 79% das normas internacionais se destinam a uma única técnica construtiva: bloco de terra comprimida (BTC). Tais normas podem ser observadas no ANEXO A (relação de normas e regulamentos por país). Com isso, verifica-se que o conteúdo mais específico voltado para o adobe é encontrado apenas na norma peruana NTE E0.80 (2000). Esta norma define o adobe como um bloco sólido de terra, não cozido, que pode conter palha ou outro material, para melhorar a sua estabilidade contra agentes externos. No caso de adobe estabilizado, a norma peruana descreve como sendo adobe que incorporou outros materiais (asfalto, cimento, cal, etc.) a fim de melhorar a sua resistência à compressão e de estabilidade em presença da humidade.

2.1.1 Técnicas de construção com terra

Dentre as técnicas de construção com terra, as mais conhecidas são: alvenaria, monolítica e mista. Estas técnicas baseiam-se na maneira em que as

paredes são erguidas. Na alvenaria, blocos ou tijolos são unidos entre si através de argamassa (Figura 3).

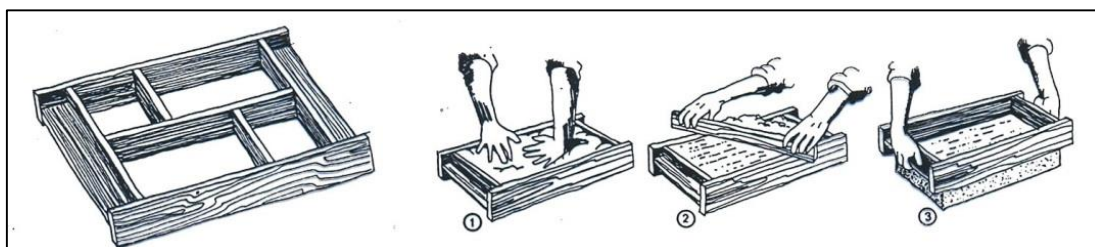
Figura 3 – Assentamento de blocos com aplicação de argamassa.



Fonte: <http://www.selectablocos.com.br/alvenaria_estrutural_detalhes_construtivos_24.html> Acesso em jan. 2013

O adobe é um bloco feito de barro, compactado manualmente em formas de madeira, postos a secar à sombra durante alguns dias e depois ao sol (Figura 4). O barro deve conter dosagem correta de argila, areia e água, para não ficar quebradiço, nem demasiadamente plástico. Para melhorar sua resistência, pode-se acrescentar fibras vegetais. Os blocos assim confeccionados são assentados com barro, e revestidos com reboco de argamassa de cal e areia. Muitas construções coloniais de qualidade, espalhadas por todo o país, foram feitas com a terra crua. Minas Gerais (Figura 5) é ainda um exemplo vivo do bom uso que se pode fazer desse material.

Figura 4 – Confeção de blocos de adobe.



Fonte: <<https://coisasdaarquitectura.files.wordpress.com/2010/06/tijolos-de-adobe0001.jpg>> Acesso em jan. 2013

Figura 5 – Construção colonial. Igreja em Santa Rita Durão.– MG



Fonte : <http://3.bp.blogspot.com/-nnkt0wRF_0k/Tp82hH3nMAI/AAAAAAACmE/lqB6U6p5KSw/s1600/DSC01332.JPG> Acesso em jan. 2013

A técnica monolítica consiste no apiloamento de solo moído e peneirado dentro de formas grandes. À medida que o solo vai sendo compactado, as formas vão sendo preenchidas com mais solo. Quando estão prontas, as formas são retiradas e forma-se então uma parede monolítica de alta durabilidade (Figura 6).

Figura 6 – Execução de uma parede monolítica.



Fonte: <http://www.recriarcomvoce.com.br/blog_recriar/category/geral/page/4/>
Acesso em jan. 2013

Por fim, na técnica mista, a terra serve de enchimento a uma estrutura, geralmente de madeira ou bambu, e não tem função estrutural (Figura 7).

Figura 7 - Execução de uma parede de pau a pique.



Fonte: 14th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2013) – mar. 2013

2.2 Propriedades da terra

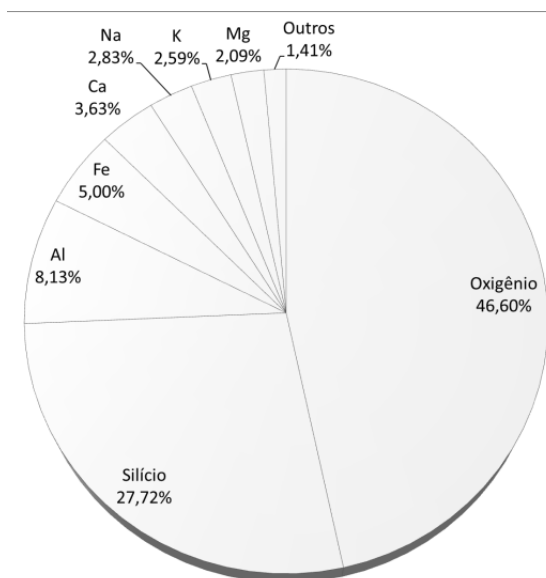
Neste item, são abordados alguns aspectos do material terra em geral, sempre se tendo em conta seu emprego como material de alvenaria.

2.2.1 Composição química

Segundo Mason & Moore (1982), na crosta terrestre, os elementos químicos mais abundantes são o oxigênio (46,60 % em massa), silício (27,72%), alumínio (8,13%) e ferro (5,0%), seguindo-se cálcio, sódio, potássio, magnésio, etc., como mostrado na Figura 8. Tais elementos, normalmente

apresentam-se na forma de óxidos, que é a forma mais estável na natureza. Com efeito, os principais componentes químicos encontrados na terra são sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), hematita (Fe_2O_3), entre outros. A percentagem desses compostos é bem variável de um local para outro. Em geral, a sílica é majoritária; porém, nos solos lateríticos, o teor de alumina pode se aproximar da sílica, sendo a coloração avermelhada devida ao teor de ferro bastante elevado.

Figura 8 – Elementos químicos mais importantes na crosta terrestre.



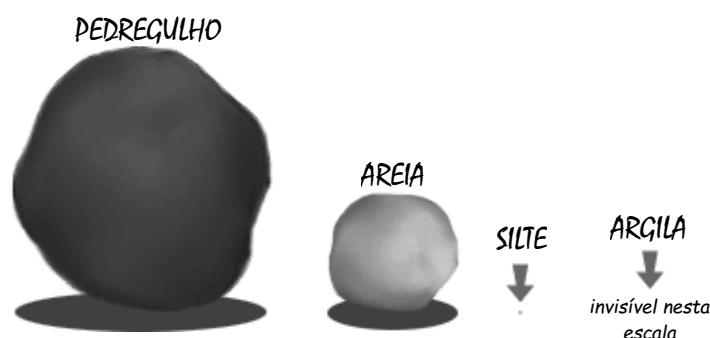
Fonte: Baseado em Mason & Moore (1982)

2.2.2 Composição granulométrica

O comportamento mecânico depende das dimensões das partículas que compõe a terra (Figura 9). Entretanto, como podemos observar na Os componentes do solo de maior dimensão, pedregulho e areia (grossa, média e fina) podem ser obtidos por peneiramento em ensaio normalizado NBR 7181 (ABNT, 1984). A percentagem de silte e de argila são determinadas, comumente, pelo ensaio de sedimentação, cujo procedimento é indicado também na citada norma.

Tabela 1, a falta de padronização internacional e a escassez de normas traz divergências entre as normas de diversos países.

Figura 9 – Tamanhos relativos de cascalho, areia, silte e argila.



Disponível em: <<http://water.me.vccs.edu/concepts/velocitysusp.htm>>. Acesso em jul. 2013.

Os componentes do solo de maior dimensão, pedregulho e areia (grossa, média e fina) podem ser obtidos por peneiramento em ensaio normalizado NBR 7181 (ABNT, 1984). A percentagem de silte e de argila são determinadas, comumente, pelo ensaio de sedimentação, cujo procedimento é indicado também na citada norma.

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

Partícula	Brasil (ABNT, 1995)	USA (AASHO)	França	Inglaterra
Pedregulho	2 a 60 mm	2 a 50 mm	2 a 20 mm	2 a 60 mm
Areia	60 μ m a 2 mm	75 μ m a 2 mm	20 μ m a 2 mm	60 μ m a 2 mm
Silte	2 a 60 μ m	5 a 75 μ m	2 a 20 μ m	2 a 60 μ m
Argila	<2 μ m	<5 μ m	<2 μ m	<2 μ m

Fonte: Barbosa e Ghavami (2007); ABNT (1995)

Segundo Barbosa e Ghavami (2007), dos constituintes granulométricos apresentados acima, os três primeiros são quimicamente inertes (pedregulho, areia e silte), ou seja, não reativos quando postos em presença de cal ou cimento. O pedregulho e a areia, constituem o esqueleto sólido do material terra. A fração arenosa apresenta grande capacidade de mobilizar atrito interno, desde que haja contato entre os grãos. No estado compactado, é praticamente incompressível. Já nos tijolos de terra crua e nas paredes

monolíticas, a presença da areia é indispensável para lhes dar a estrutura resistente aos esforços mecânicos.

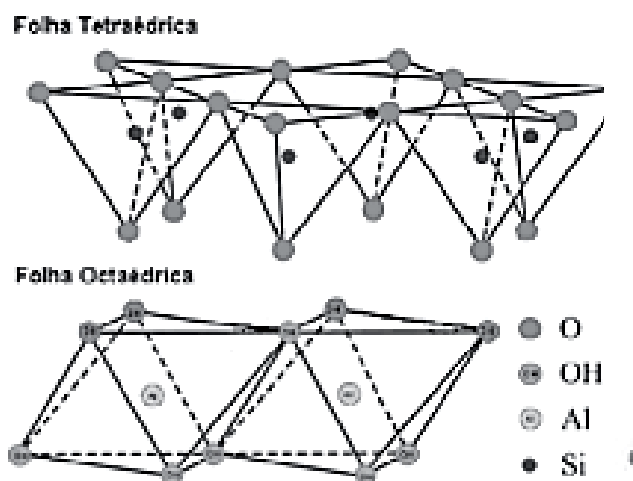
O silte consegue absorver água em seus poros, permitindo tanto uma diminuição do atrito interno dos grãos, quanto seu rearranjo, preenchendo os vazios quando o solo sofre uma pressão de compactação.

A argila, sendo o último estágio de fracionamento da terra, é formada de partículas de forma lamelar, com uma superfície específica muito superior à dos demais componentes do solo. É quimicamente ativa, reagindo com a cal e com componentes do cimento. Em qualquer tecnologia de construção com terra, esta é manipulada sempre com a presença de água. A existência de argila é necessária para dar a requerida coesão à terra úmida, se comportando, pois, como um ligante. Como as argilas são fundamentais para a construção com terra, algumas considerações a mais serão feitas a respeito delas.

2.2.3 Argilas

Argila é um material natural de textura terrosa e de baixa granulometria, que desenvolve plasticidade quando misturado com uma quantidade limitada de água (Santos, 1975). Apresenta forma lamelar, composta essencialmente pela combinação de duas monocamadas básicas. Uma, formada por folhas tetraédricas de SiO_4 e outra, formada por folhas octaédricas de um metal (Al, Mg, ou Fe) envolto por seis átomos de oxigênio nos vértices (Figura 10).

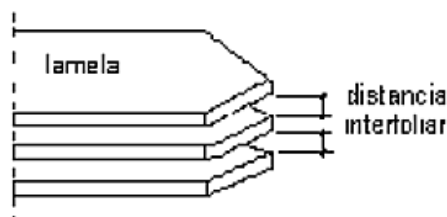
Figura 10 – Representações esquemáticas das folhas tetraédrica e octaédrica, unidades estruturais dos argilominerais.



Fonte: Coelho *et al.* (2007)

Um cristal de argila é composto por um grupo de lamelas separadas por uma distância dita distância interfoliar (Figura 11). Entre as lamelas podem existir íons de elementos alcalinos ou alcalino-terrosos. 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 11 – Representação de um cristal de argila.



Fonte: Barbosa e Ghavami (2007).

Dentre os tipos de argilas existentes na natureza, três espécies se destacam: caulinita, illita e montmorilonita. Suas características estruturais são sintetizadas na Tabela 2

Tabela 2 – Principais tipos de argilas.

Tipo	Composição das lamelas	Razão da estrutura	Distância interplanar basal (angstrom)*	Ligação entre lamelas	Adsorção interfoliar
Caulinita	Tetraedros de sílica (SiO_2) ligada a octaedros de alumina (Al_2O_3)	1 : 1	7 Å	Forte	Pouca ou nenhuma
Ilita	Uma camada octaédrica de alumina envolvida por duas camadas tetraédricas de sílica. Íons de magnésio ou de ferro podem substituir, em parte, o alumínio na camada central	2 : 1	9 - 10 Å (íons potássio fixos energeticamente)	Forte (porém, inferior a da caulinita)	Pouca ou nenhuma
Montmorilonita	Idem a ilita, mas dentro da camada octaédrica central, os íons de alumínio podem ser permutados por íons de outros elementos químicos: magnésio, ferro, manganês, níquel.	2 : 1	14 – 20 Å	Fraca com distância variável	Alta
* 1 Å = 10^{-10} m					

Fonte: Barbosa e Ghavami (2007).

Por conta da propriedade de expansibilidade, solos com muita montmorilonita não são convenientes para as construções com terra crua, sendo mais utilizados os solos cauliníticos.

2.2.4 Água no solo

A umidade ideal é função do tipo de terra que se utiliza e da técnica construtiva (adobe, BTC, taipa, etc.), influenciando de maneira considerável na qualidade do produto final. Para o adobe, é necessária uma plasticidade tal que permita o preenchimento do molde com facilidade, ocupando todo o seu volume (sobretudo cantos e arestas) sem, no entanto, ocorrer sua deformação no desmolde.

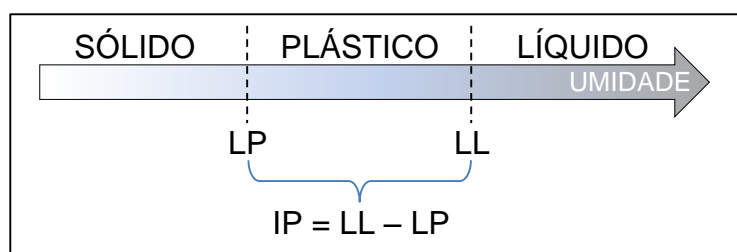
Dessa forma, a água contida no solo pode ser classificada em: Água de constituição – faz parte da estrutura molecular das partículas sólidas; Água adsorvida – mantida na superfície dos grãos de um solo por esforços de atração molecular, sendo que os dipolos H_2O orientam-se perpendicularmente à superfície dos grãos; Água livre – enche os vazios grandes entre os grãos, sendo submetido apenas à ação da gravidade; Água higroscópica – se

encontra no solo seco ao ar livre; Água capilar – fica nos vazios do solo, submetida à ação de capilaridade. A água livre, higroscópica e capilar são as que podem ser totalmente evaporadas pelo efeito do calor ($>100^{\circ}\text{C}$) (Barbosa e Ghavami, 2007; ABNT, 1995).

2.2.4.1 Plasticidade

Conforme seu teor de umidade, o solo pode apresentar-se líquido, plástico ou sólido (Figura 12). O aspecto e a consistência dos solos e, em particular das argilas presentes, variam de maneira muito nítida conforme a quantidade de água contida.

Figura 12 - Estado do solo em função do seu teor de umidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A determinação do limite de plasticidade (LP) e do limite de liquidez (LL) do solo, chamados de Limites de Atterberg, podem ser obtidos através de ensaios normalizados no Brasil pelas normas NBR 7180 (ABNT, 1984) e NBR 6459 (ABNT, 1984). Os limites de liquidez e de plasticidade dependem, geralmente, da quantidade e do tipo da argila presente no solo. No entanto, o índice de plasticidade (IP) (ABNT, 1984), é unicamente dependente da quantidade de argila. Na prática, pode-se caracterizar o solo por seu índice de plasticidade e seu limite de liquidez conforme (Tabela 3).

Tabela 3 – Índice de Plasticidade e Limite de Liquidez para caracterização do tipo de solo.

Tipo de Solo	IP (%)	LL (%)
Arenoso	0 a 10	0 a 30
Siltoso	5 a 25	20 a 50
Argiloso	>20	>40

Fonte: CRATerre (1979).

Por meio desses parâmetros, é possível ter uma noção sobre a adequação ou não da terra para uso na construção.

2.2.4.2 Densidade Seca

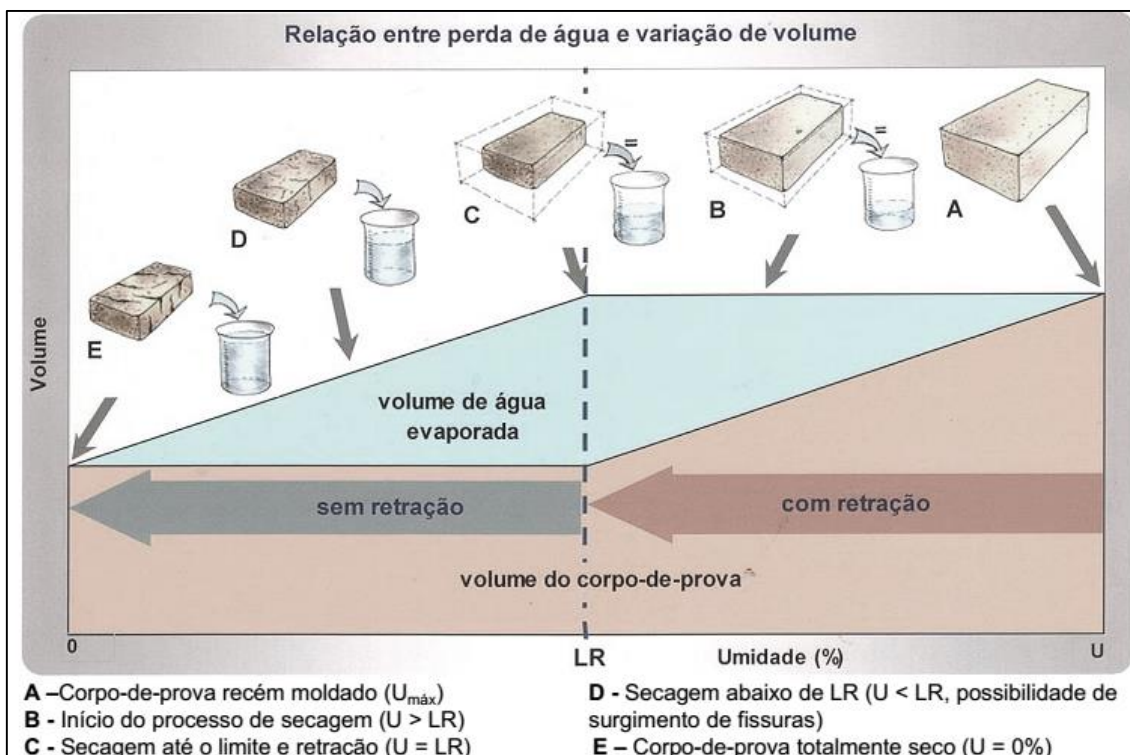
A densidade seca do solo (γ_d), também chamada de peso específico aparente do solo seco, corresponde ao peso da fração sólida dividida pelo volume total da amostra, ou seja, é a densidade tendo sido eliminada a água (livre, higroscópica e capilar).

2.2.4.3 Retração da terra

Segundo Eves *et al.* (2005), a quantidade e o tipo da argila presente no solo, representados essencialmente pelos argilominerais, são responsáveis pelos movimentos de retração e expansão, que se observam quando há variação da umidade. Nas paredes de terra, os movimentos de retração e expansão da argila provocam fissuras, que podem gerar lesões internas e ou superficiais e permitem a penetração de água, e a ocorrência de patologias que conseqüentemente contribuem para a perda de resistência do material e a degradação da parede.

O limite de retração (LR) marca a passagem do estado sólido com retração para o estado sólido sem retração, e é determinado pelo teor de umidade a partir do qual o volume do solo permanece constante quando se processa a evaporação da água. A evaporação da água abaixo do limite de retração mantém o volume de solo, mas a retração sucede com a abertura de trincas (Figura 13).

Figura 13 – Relação entre o limite de retração (LR) e as variações de volume da terra e da água evaporada, durante o processo de secagem.



Fonte: Eves, *et al.* (2005)

2.3 Adobe

Define-se adobe como um bloco maciço de terra crua, o qual pode conter palha ou outro material que melhore sua estabilidade, frente a agentes externos (NTE, 2000). O bloco de adobe, utilizado há milhares de anos, é certamente um dos primeiros materiais de construção desenvolvidos pelo homem e ainda hoje é empregado em muitos países, a exemplo da África Ocidental (Figura 14) que o utiliza na construção de habitações a mais de 5000 anos (CRATerre, 1979).

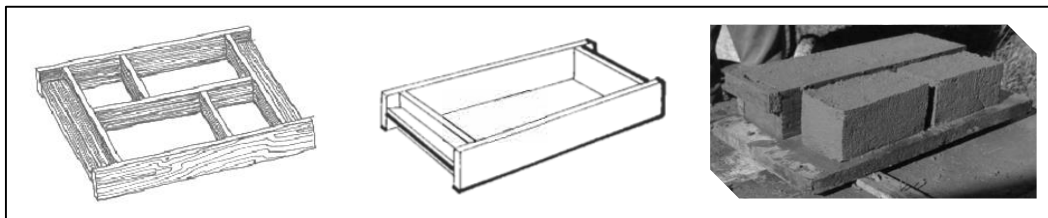
Figura 14 – Produção de adobes – Nigéria.



Fonte: CRATerre (1979).

O adobe pode ser preparado em formas de madeira de dimensões variadas (Figura 15). A moldagem é totalmente manual conforme verificado na Figura 16 e os blocos devem ser postos a secar sobre superfície plana e com fina camada de areia que permita seu deslocamento devido à retração quando da secagem.

Figura 15 – Formas para preparo de adobe.



Fonte: <<https://kdcs.wordpress.com/category/diario/>> Acesso em jan. 2013

Figura 16 – Moldagem manual de adobe .



Fonte: CRATerre (1979).

No Brasil, ainda não existe normalização para a construção com adobe. Uma referência sobre o tema é tratada por Barbosa *et al.* (2005) onde se propõe critérios e procedimentos para o correto tratamento deste material.

Neste sentido, o principal parâmetro de controle da qualidade dos blocos de adobe é a resistência à compressão. Comparada com a de outros materiais de construção industrializados, normalmente ela não é alta, sendo da ordem de 0,6 Mpa a 2,0 MPa. No entanto, essas resistências relativamente baixas são compatíveis com construções bem projetadas (Barbosa & Ghavami, 2007).

2.4 Tecnologia Apropriada

Segundo Freire e Beraldo (2003), para a produção de novas tecnologias de construção civil, os seguintes fatores de inclusão devem ser levados em conta:

- Integração com o ecossistema: a tecnologia deve exercer o menor impacto ambiental;
- Autonomia local: a tecnologia utiliza matérias primas e energias locais;
- Baixo custo: a tecnologia necessita de pouco capital;
- Absorvedora de mão de obra;
- Capacitação acessível: a tecnologia não requer níveis muito específicos de capacitação de mão de obra;
- Menos burocracia: a tecnologia é de domínio público, não havendo preocupações com pagamentos de patentes ou royalties;
- Adaptabilidade e simplicidade: a tecnologia deve ser de fácil entendimento e absorção, sendo assimilada culturalmente com rapidez.

Apesar dos desafios, muitos materiais alternativos têm sido estudados nas últimas décadas. Dentre esses, alguns tem ganhado especial destaque pelo mundo (Spence, 1993): Cimento com fibras; Blocos de solo estabilizados; Pozolanas; Cimentos produzidos em fábricas de pequeno porte; Resíduos industriais e agroindustriais como materiais de construção. Deste modo, a

possibilidade de uso da ativação alcalina na obtenção de novos materiais ou tecnologias de construção civil, levando em conta, além da pesquisa que viabilize sua utilização, mas também, fatores colocados pelas tecnologias apropriadas como: integração das esferas técnicas, sociais, políticas, econômicas, éticas, ambientais e estratégicas, tornando-se acessíveis a população, deixando de ser uma utopia encoberta pela *imposição* do uso dos materiais convencionais, tornam-se cada vez mais tangíveis.

2.5 Ativação alcalina de aluminossilicatos

A principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante. Deste modo, a ativação alcalina de aglomerantes hidráulicos à base de cimento Portland e escórias de alto-forno, vem sendo realizada com sucesso desde o século passado em vários países do mundo. A potencialidade do uso dos álcalis abre novas oportunidades para a obtenção de cimentos especiais, com propriedades distintas daquelas apresentadas pelo cimento Portland convencional.

Nesse aspecto, uma tecnologia vem se desenvolvendo e ganhando destaque na obtenção de materiais álcali-ativados de propriedades cimentantes, os geopolímeros ou polissialatos.

Na década de 1930, álcalis, tais como: hidróxido de sódio e hidróxido de potássio, foram originalmente usados para testar o ponto certo de adição da escória de alto forno ao cimento Portland. No decorrer de estudos para ensaios de teste com escória, o cientista belga Purdon (Tabela 4) descobriu que a adição de álcali produzia um novo ligante de rápido endurecimento. Cimentos de escória álcali-ativadas (*Trief Cement*) foram utilizados na construção em larga escala no início dos anos 1950. Em 1957, Victor Glukhovsky, um pesquisador da Ucrânia no KICE (Kiev Institute of Civil Engineering in the USSR) investigando o problema das pastas de escória álcali-ativadas, nas décadas de 1960 e 1970, fez grande contribuição na identificação de ambos os hidratos de silicato de cálcio, e hidratos alumino-silicatos de cálcio e sódio

(zeólitas²) como produtos de solidificação. Davidovits (1972) também observou que rochas e minerais de argila reagem durante o tratamento alcalino para formar alumino-silicatos de sódio hidratados (zeólitas), confirmando trabalhos anteriores realizados na reatividade das argilas (Tabela 4). Os concretos produzidos por Glukhovsky com esta tecnologia, foram chamado de “*soil-silicate concrete*” (1959) e os ligantes de “*soil cements*” (1967).

Em 1972, no laboratório CORDI em Saint-Quentin, Davidovits desenvolveu uma tecnologia baseada em geosínteses, que tem sido divulgada em várias patentes publicadas sobre as aplicações do assim chamado “processo de *Siliface*” (Davidovits e Legrand, 1974).

Tabela 4 – Breve histórico da química dos aluminosilicatos.

	Zeolite molecular sieve	Alkali-activation (slag)	Hydrosodalite (kaolin)	Geopolymer
1930			1934 : Olsen (Netherland)	
1940		1940 : Purdon (Belgium)	1945 : US Bureau of Standard (USA) 1949 : Borchert, Keidel (Germany)	
1950	1945 : Barrer (UK) 1953 : Barrer, White (UK) 1956 : Milton (USA)	1953: Trief Cement (USA) 1957: Glukovsky (Ukraine) <i>soil-silicate concrete</i>		
1960			1963 : Howell (USA) 1964 : Berg <i>et al.</i> (USSR) 1969 : Besson <i>et al.</i> (France)	
1970			1972 : Davidovits (France) <i>Siliface Process</i>	1976 : Davidovits (<i>IUPAC terminology</i>) 1979 : Davidovits (France) <i>Geopolymer</i>

Fonte: Davidovits (2011).

Segundo Davidovits (1994), trata-se de uma adequação de processos de estabilização do solo com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, utilizada pelos antigos romanos e egípcios na confecção de aglomerantes estruturais.

² Os zeólitos são alumino-silicatos hidratados naturais ou artificiais, que possuem uma estrutura aberta que pode acomodar uma grande variedade de íons positivos, como o Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , entre outros. Estes íons positivos estão fracamente ligados à estrutura podendo ser prontamente substituídos por outros em solução de contato.

2.5.1 Geopolímero

Geopolímeros ou polissialatos (PS) são terminologias adotadas para abreviatura dos poli-sílico-aluminatos descritos em patentes de Davidovits (1982), onde são apresentadas várias misturas de reagentes e processos de obtenção. Os polissialatos apresentam características particulares que revelam o seu grande potencial de aplicação como aglomerante, em substituição ao cimento Portland.

2.5.1.1 Aplicações

Existe uma ampla variedade de aplicações potenciais e existentes para os geopolímeros. Algumas das quais, ainda estão em desenvolvimento, enquanto outros já são industrializados e comercializados. Algumas das principais aplicações relatadas pelo *Geopolymer Institute* (2013) podem ser verificadas na relação abaixo, onde é apresentada uma lista com as principais categorias:

- Resinas geopoliméricas e ligantes
 - Materiais resistentes ao fogo, isolamento térmico, espumas;
 - Telhas cerâmicas de baixo consumo de energia, refratários;
 - Resina de alta tecnologia, tintas, ligantes e rejuntas;
 - Biotecnologia (materiais para aplicações medicinais);
 - Indústria de fundição (resinas);
 - Compósitos para reparação de infraestruturas e reforço, resistente ao fogo e compósitos de fibra de carbono de alta tecnologia resistente ao calor para interior de automóveis e aeronaves;
 - Contenção de resíduos radioativos e tóxicos;
- Cimentos geopoliméricos e concretos
 - Materiais de construção de baixa tecnologia (tijolos de argila),
 - Cimentos e concretos com baixa emissão de CO₂;
- Artes e Arqueologia
 - Artefatos decorativos de pedra, artes e decoração;
 - Patrimônio cultural e arqueologia.

2.5.1.2 Terminologia

O termo geopolímero, foi introduzido por Davidovits devido estes materiais apresentarem uma estrutura análoga à de polímeros orgânicos, denominando-os de polissialatos para descrever o encadeamento de SiO_4 e AlO_4 ligados, alternadamente, pelo compartilhamento de átomos de oxigênio (Tabela 5). O termo poli-sialato é uma abreviatura de silício-oxo-aluminato, estabelecida pela IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) em Estocolmo, 1976 (Davidovits, 1982).

Tais materiais são polímeros inorgânicos cuja obtenção se dá pela polimerização de matérias primas naturais de origem geológica contendo alumino-silicatos. O processo de polimerização envolve a reação química, sob condições altamente alcalinas, de minerais contendo silício e alumínio, produzindo uma ligação polimérica $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$, cuja fórmula empírica é descrita abaixo:



onde M é um cátion monovalente, tal como o K^+ ou Na^+ ; z assume valores entre 1, 2 ou 3 e n é o grau de polimerização. O produto formado pode ser considerado uma rocha sintética cuja estrutura contém uma rede tridimensional amorfa de átomos de silício e alumínio. A composição química dos materiais do geopolímero é similar a das zeólitas cristalinas, mas eles revelam uma estrutura atômica amorfa.

Tabela 5 – Estruturas dos polissialatos.

Nomenclatura	Fórmula	Estrutura	Ratio (Si : Al)	Ratio ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)
Polissialato (PS)	$-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-$	$\left(\begin{array}{cc} \text{O} & \text{O} \\ & \\ -\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}- \\ & \\ \text{O} & \text{O} \end{array} \right)_n$	1	2
Polissialato Siloxo (PSS)	$-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{Si}-\text{O}-$	$\left(\begin{array}{ccccc} \text{O} & \text{O} & \text{O} & \text{O} \\ & & & \\ -\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}- \\ & & & \\ \text{O} & \text{O} & \text{O} & \text{O} \end{array} \right)_n$	2	4
Polissialato Disiloxo (PSDS)	$-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$	$\left(\begin{array}{cccc} \text{O} & \text{O} & \text{O} & \text{O} \\ & & & \\ -\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}- \\ & & & \\ \text{O} & \text{O} & \text{O} & \text{O} \end{array} \right)_n$	3	6

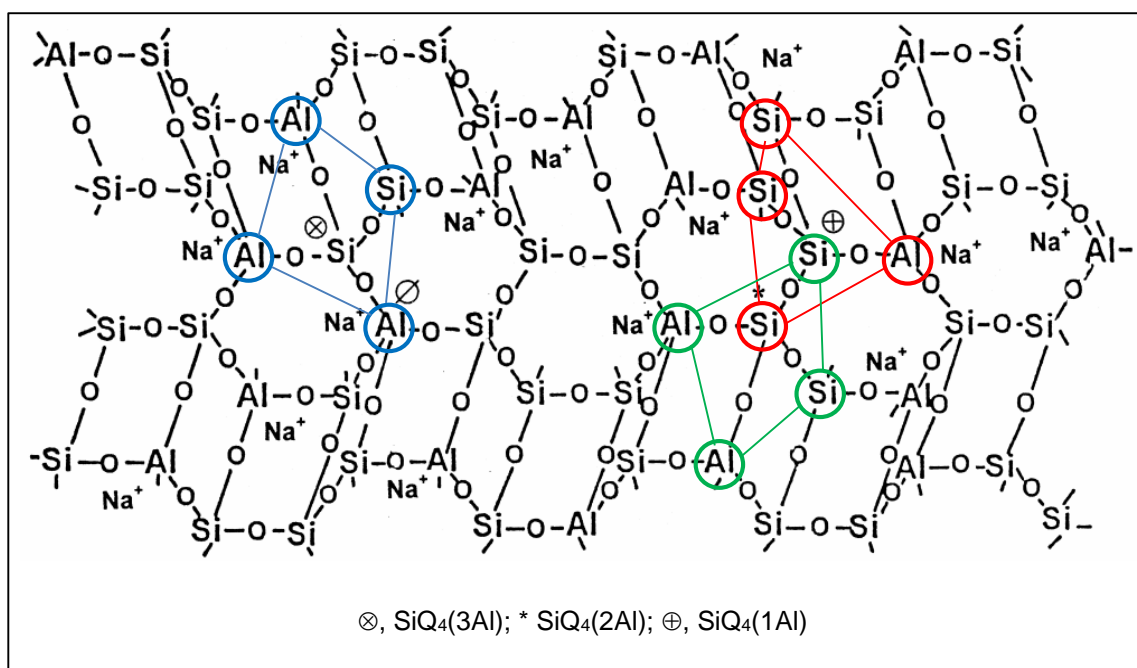
Fonte: Davidovits (1982).

Pouco tempo depois de Davidovits ter criado a designação polissialato para estruturas geopoliméricas, outra notação para as estruturas dos sistemas alumino-silicatos alcalinos foi apresentada:

$$Q^n(mAl),$$

onde $0 \leq m \leq n \leq 4$; n é o número de coordenação do silício central e o símbolo m representa o número de Al vizinhos, sendo usado para descrever a conectividade de tetraedros de silício interligados por oxigênio ao alumínio e outros centros de silício. Esta notação, descrito pela primeira vez por Engelhardt (1982) pode ser usado para caracterizar sistemas de aluminosilicatos. A base tridimensional da notação $Q^n(mAl)$ é ilustrada na Figura 17, onde $n = 4$ corresponde à geometria tetraédrica observado em geopolímeros.

Figura 17 – Estrutura tri-dimensional para o Na-polissialato.



Fonte: Barbosa *et al.* (2000).

Na estrutura acima é possível observar tetraedros de silício interligados por oxigênio a um alumínio e três centros de silício [SiQ₄(1Al)]; a dois alumínio e dois centros de silício [SiQ₄(2Al)] e três alumínio e um centros de silício [SiQ₄(3Al)].

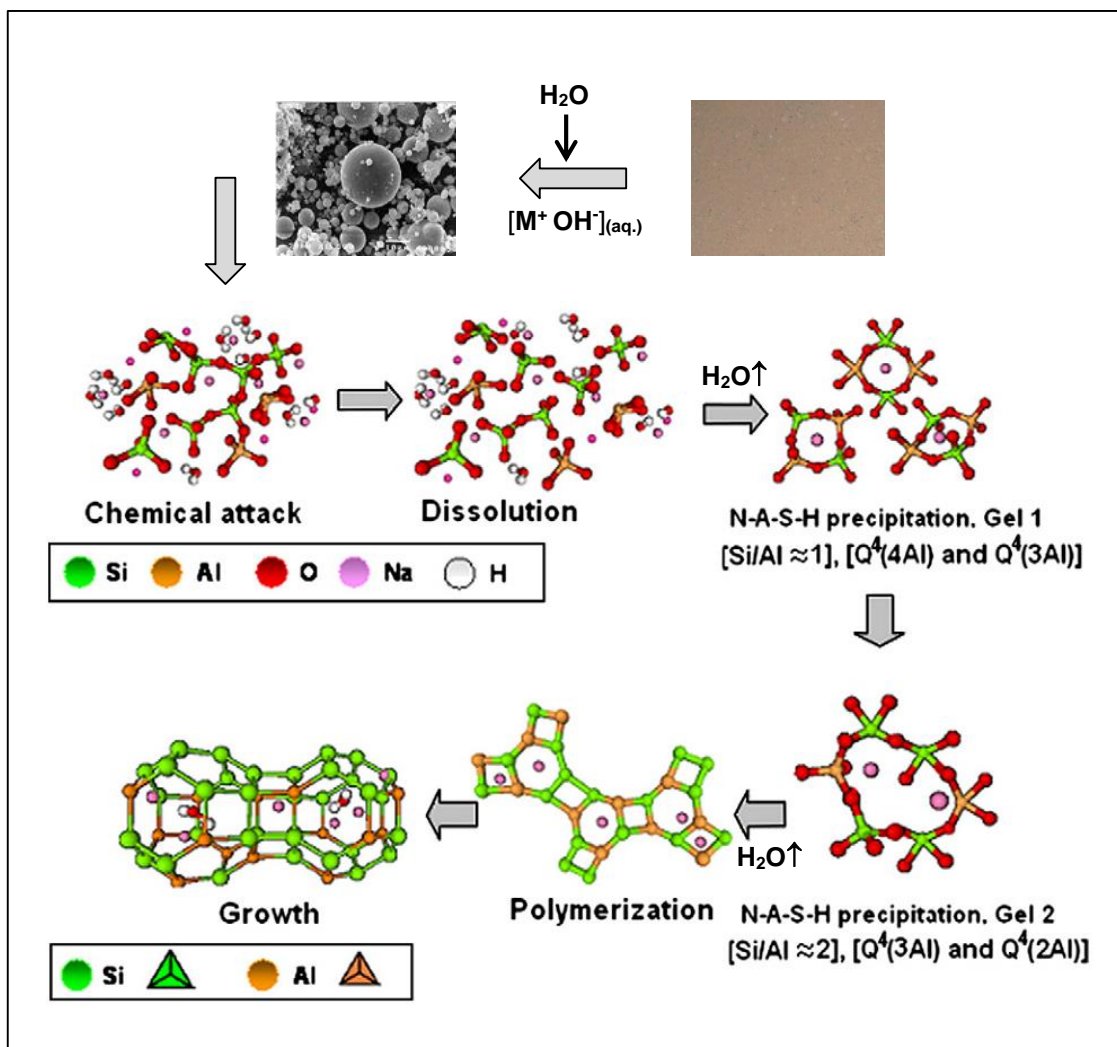
2.5.1.3 Geopolimerização

Fundamentalmente, a ativação de um material sílico-aluminoso pode ser descrita como uma mistura de um líquido (com uma concentração altamente alcalino) e um sólido (com as proporções adequadas e reativas de silicato e aluminato). O sólido e o líquido podem ser misturados em proporções variáveis (com razões líquido:sólido variando entre 0,2 e 1,0) e, dependendo da finura dos materiais sólidos (quanto mais fino o material, maior a demanda de água). A pasta resultante se conforma e endurece como um cimento Portland.

De acordo com Glukhovsky (1959), o processo de ativação alcalina é dividida em três estágios: (1) Destruição – Coagulação; (2) Coagulação – Condensação; (3) Condensação – Cristalização. No entanto, mais recentemente, diversos autores têm estendido as teorias de Glukhovsky, utilizando os conhecimentos acumulados sobre zeólitos sintéticos para discorrer sobre os processos de geopolimerização.

Um mecanismo de reação mais atual pode ser verificado na Figura 18, por meio de estudos realizadas em artigos mais atuais como em Duxson (2007) e Shi *et al.* (2011). Neste processo, uma fonte de aluminosilicatos, na presença de solução fortemente alcalina se dissocia por hidrólise alcalina; Com isso, aluminatos e silicatos (provavelmente na forma monomérica) são incorporados na fase aquosa que já pode ter silicatos presentes na solução de ativação; A complexa mistura de silicatos, aluminosilicatos e aluminatos é assim formada; A dissolução de aluminosilicato é rápida em pH alto, resultando em uma solução supersaturada de aluminosilicatos, que se conforma como gel de oligômeros, formando grande redes de condensação; Neste ponto, começa a liberação da água que inicialmente desempenhou um meio de reação, mas reside nos poros do gel; Após gelatinar, o sistema continua com o rearranjo e reorganização, crescendo as pontes/redes do gel, resultando em uma configuração tri-dimensional de aluminosilicato geralmente denominado de geopolímero.

Figura 18 – Modelo proposto para ativação alcalina de aluminosilicatos



Fonte: Shi *et al.* (2011)

O crescimento é a fase a qual os núcleos atingem um tamanho crítico e os cristais começam a desenvolver. Este processo de reorganização estrutural determina a microestrutura e distribuição dos poros do material, que são críticos na determinação de muitas propriedades mecânicas.

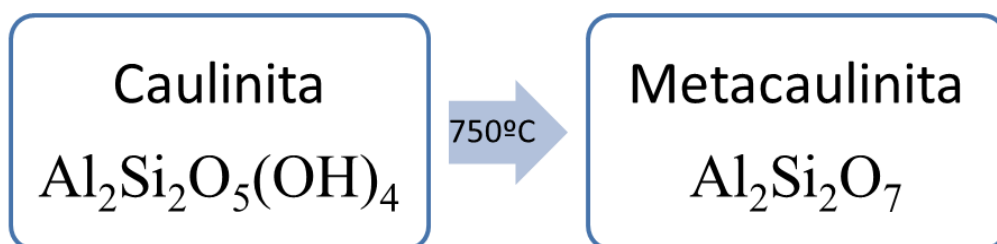
2.5.1.4 Precursores Geopoliméricos

Os precursores mais utilizados como precursores geopoliméricos são: metacaulinita, cinzas volantes (*fly ash*) e escoria de alto forno (resíduos das indústrias siderúrgicas e termoeletrônicas).

A metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$) é um produto amorfo resultante do processo de desidroxilação da caulinita, através da calcinação em temperaturas controladas (Figura 19). Segundo Kakali *et al.* (2001), o desenvolvimento das propriedades

pozolânicas do metacaulim depende da natureza de seu precursor (caulim), da abundância do argilomineral, além das condições de calcinação e da finura dos grãos. Seu uso como adição pozolânica moderna para argamassas e concreto tem-se popularizado nos últimos anos e sua aplicação é regida pela NBR 15894 (ABNT, 2010), sendo também uma das matérias-primas de melhor resultado em sínteses de geopolímeros.

Figura 19 – Obtenção de metacaulinita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.5.1.5 Resíduo Cerâmico (RC)

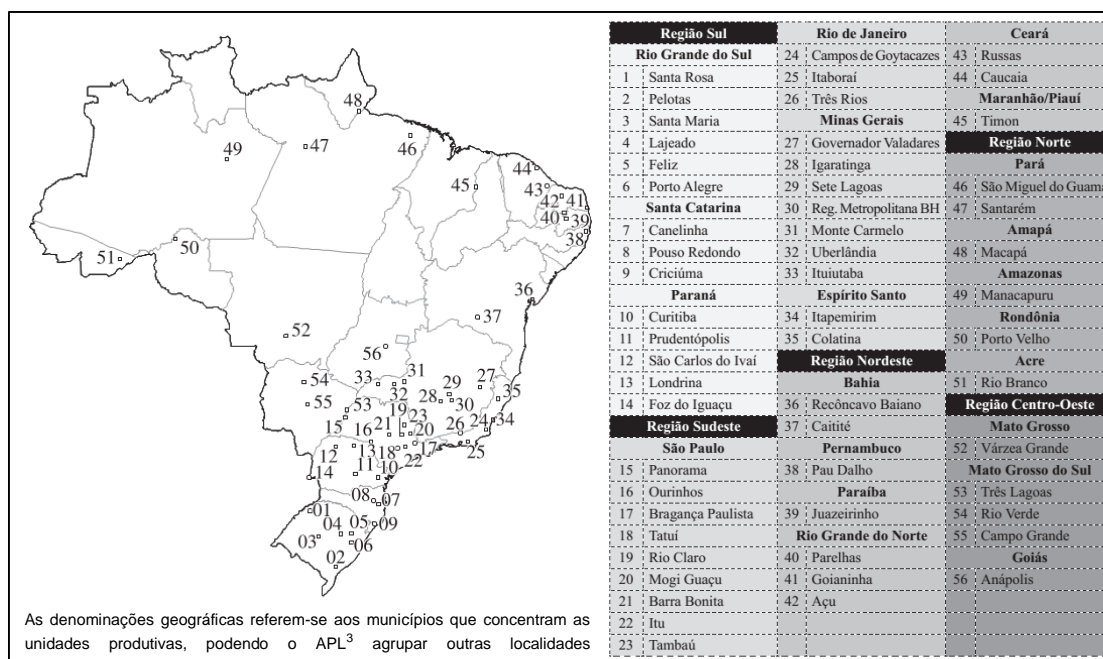
A cerâmica vermelha compreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e alguns de uso doméstico e afins (ABC, 2013).

As argilas de queima vermelha ou argilas comuns são as que mais se destacam entre as substâncias minerais, em função do volume de produção e do maior consumo, sendo especialmente utilizadas na produção de cerâmica vermelha e de revestimento. Devido ao grande número de jazidas de argilas que possui, o Brasil é um grande produtor de matérias primas cerâmicas (Figura 20).

Segundo Bustamante e Bressiani (2000) a cerâmica estrutural (vermelha) movimenta cerca de 60.000.000 toneladas de matérias primas ao ano, com reflexos nas vias de transportes, e no meio ambiente de lavra de argila. No entanto, uma questão que merece atenção é a percepção crescente das indústrias cerâmicas como não-sustentáveis e prejudiciais ao meio ambiente

devido a dificuldade de destinação adequada tanto dos resíduos da produção quanto dos resíduos pós-transporte, pós-armazenamento e pós-uso.

Figura 20 – Principais aglomerações produtivas mínero-cerâmicas brasileiras.



Fonte: Cerâmica Industrial (2012) <<http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2014.005>>

Acesso em abr. 2013

Nesse sentido, várias pesquisas têm sido realizadas no intuito de reutilizar os resíduos cerâmicos (RC) gerados pelas indústrias cerâmicas, em substituição parcial do cimento Portland. Tais pesquisas ressaltam as qualidades pozolânicas de elevada atividade, as quais conferem maior resistência à compressão dos materiais produzidos (Toledo Filho *et al.*, 2001; Farias Filho *et al.*, 2000).

Contudo, segundo Vieira (2005), embora o uso do resíduo cerâmico moído pareça favorável, seu manuseio como pozolana no desempenho de concretos, em especial com relação a sua microestrutura e propriedades relativas a durabilidade, ainda são uma lacuna a ser explorada.

³ O Sebrae define APL's - Arranjos Produtivos Locais - como aglomerados de empresas localizadas em um mesmo território, que apresentam especialização produtiva e mantêm vínculos de articulação, interação, cooperação e aprendizagem entre si e com outros atores locais, tais como: governo, associações empresariais, instituições de crédito, ensino e pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na fundamentação teórica, foram abordadas algumas generalidades sobre as técnicas de construção com terra, propriedades dos materiais empregados e a escassez de normas para padronização do setor. Segundo Barbosa (2005), o abandono dessas técnicas de construção milenar, bem como dos materiais tradicionais, promovem a chamada *perda de tecnologia*.

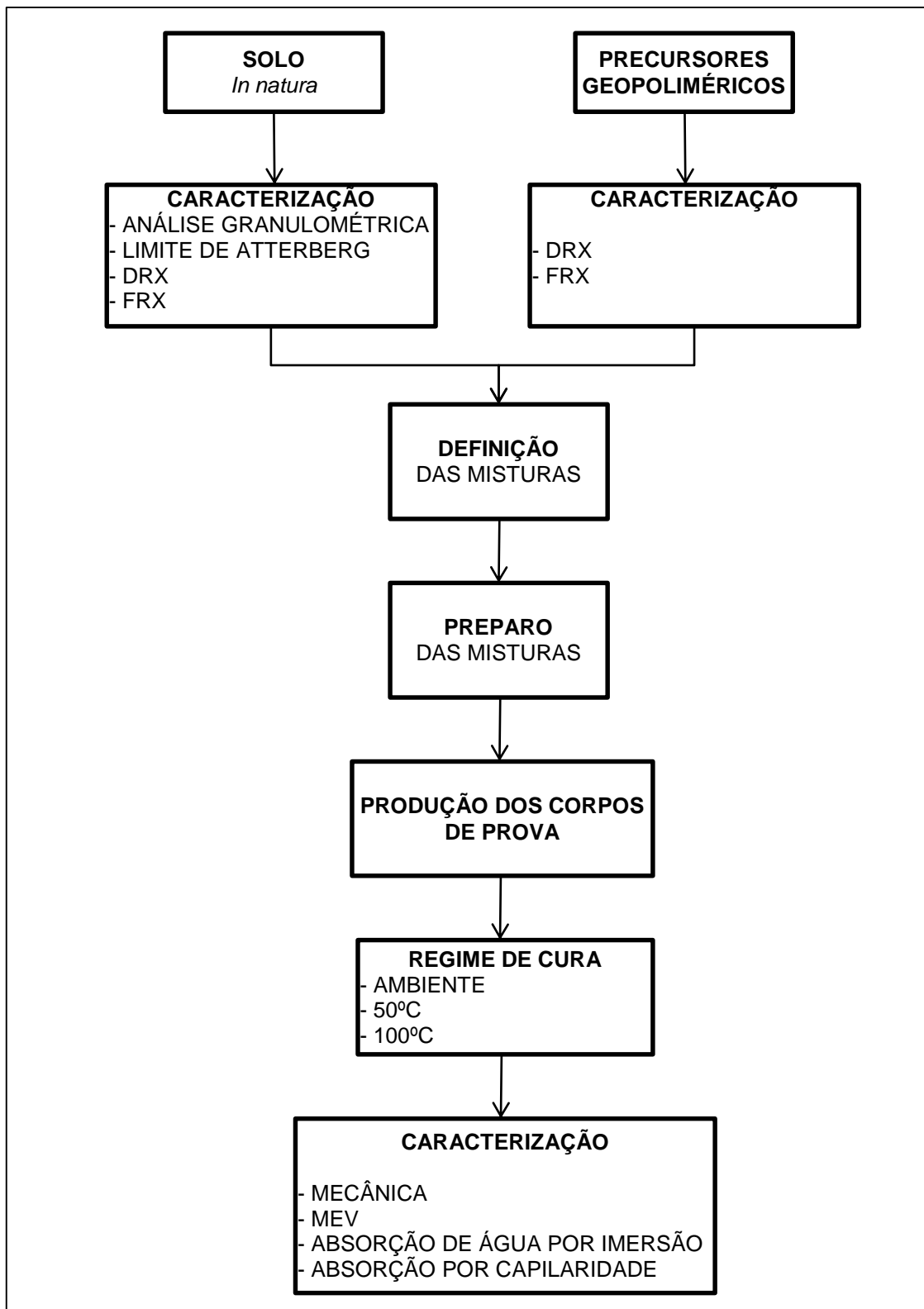
Também foram tratados alguns aspectos importantes acerca de tecnologias emergentes, como a síntese de geopolímeros, suas aplicações em diversos ramos tecnológicos, a abrangência de aplicações existentes e em potencial dos geopolímeros, inclusive na elaboração de materiais de características cimentantes.

Com isso, buscando desenvolver *tecnologias apropriadas*, utilizando-se de materiais ditos *não convencionais* e objetivando a melhoria e aperfeiçoamento de técnicas de construção com adobe através da auto estabilização por ativação alcalina, foi estabelecido o seguinte programa experimental:

- i. Seleção da fonte de aluminosilicato e do ativador alcalino;
- ii. Caracterização das matérias-primas escolhidas;
- iii. Avaliação da influência da temperatura de cura;
- iv. Caracterização do produto final em termos de seu comportamento mecânico.

A Figura 21 apresenta o planejamento experimental executado na pesquisa:

Figura 21 – Planejamento Experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 Caracterização dos Materiais

A caracterização dos materiais precursores foi realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) e no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) da UFPB.

3.1.1 Difração de Raios-X (DRX)

A difração de raios X foi realizada no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) para valores de 2θ entre 5 e 60° e passo $0,02^\circ/\text{seg}$. O aparelho produtor de raios-X apresenta as seguintes características: anti-cátodo em cobre (Cu) e radiação característica $K\alpha$.

3.1.2 Florescência de Raios-X (FRX)

Foi realizada análise química de cada precursor geopoliméricos (metacaulim e resíduo cerâmico). O aparelho utilizado foi o Sequential X-ray Fluorescence Spectrometer, Modelo XRF-1800 da Shimadzu. Através de Fluorescência de raios-X foi possível obter os percentuais de SiO_2 , Al_2O_3 e M_2O ($\text{M} = \text{K}$ e Na) de cada precursor geopolimérico. Com os dados obtidos da análise química e as concentrações dos ativadores foram definidas as quantidades de materiais usadas em cada formulação.

3.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a análise MEV utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura com analisador químico (EDS). As amostras foram embutidas em resina e posterior cobertura de ouro.

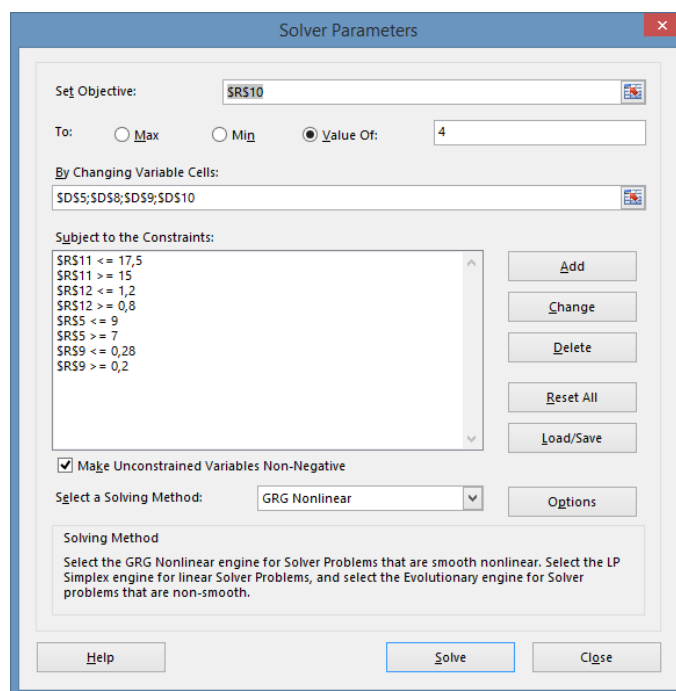
3.1.4 Resistência à Compressão Simples

A resistência à compressão, dos blocos de adobe estabilizados por ativação alcalina, foi feita conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007). Os ensaios foram realizados em um equipamento de ensaios universais da Shimadzu e os corpos de prova receberam uma camada de capeamento com espessura entre (1 a 2)mm para realização dos testes. Para cada ensaio, foram utilizadas 3 amostras cilíndricas de dimensões 10 x 10 cm (diâmetro x altura), com fator de correção $h/d = 0,87$.

3.1.5 Ferramenta para teste de hipóteses - SOLVER

No decorrer da pesquisa, foi utilizado a ferramenta SOLVER (Figura 22) para auxiliar na tomada de decisão quanto as frações molares dos ativadores. Assumindo como “restrições” os valores das razões molares entre os óxidos das misturas reativas para produção de NaKPSS adotados por Davidovits (1982), calculou-se as melhores porções de cada insumo na reação.

Figura 22 – Ferramenta de teste de hipóteses – SOLVER.



Fonte: Elaborado pelo autor

O Solver é um suplemento do Microsoft Excel utilizado para teste de hipóteses. Com o Solver, é possível encontrar um “valor ideal” (máximo ou mínimo) para uma fórmula em uma célula — chamada célula de objetivo — conforme restrições, ou limites, sobre os valores de outras células de fórmula em uma planilha. O Solver trabalha com um grupo de células, chamadas variáveis de decisão ou simplesmente de células variáveis, que participam do cálculo das fórmulas nas células de objetivo e de restrição. O Solver ajusta os valores nas células variáveis de decisão para satisfazer aos limites sobre células de restrição e produzir o resultado desejado para a célula objetiva.

Entretanto, vale lembrar que o intervalo das razões molares sugerida por Davidovits (1982), depende da quantidade dos constituintes mineralógicos encontrados nos precursores. Com isso, devido o precursor resíduo cerâmico utilizado na pesquisa conter razão molar ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) igual a 3,37, ou seja, quase duas vezes maior que a encontrada no metacaulim ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,82$), os valores encontrados para preparo do ativador alcalino com precursor resíduo cerâmico ficaram um pouco fora do intervalo ideal indicado para preparo de NaKPSS (Figura 23)

Figura 23 – Resultado de otimização com uso da ferramenta SOLVER para o precursor resíduo cerâmico.

U28							
	A	B	C	O	P	Q	R
2	MATERIAL	Quantidade (%)	Quantidade (g)		%SOLO	100	Concentração NaOH _(aq)
3		em relação ao solo	para preparo		%ATIVADOR	3,00	no ativador
4	SOLO	100%	6000		%ÁGUA _{L.F.}	10,00	
5	RC		120,45		ÁGUA TOTAL (%)	10,73	8,65 M
6	MK		0,00				
7	SPJ#200		0,00				
8	SILICATO DE SÓDIO	3%	0,00				
9	NaOH		15,66				
10	H ₂ O _{dest}		43,89				
11	H ₂ O _{L.F.}	10%	600				
12	TOTAL	-	6780				

TABELA C. DAVIDOVITS (1992)		FABRICAÇÃO DE NaKPSS	
RAZÃO MOLAR	PADRÃO	VALOR	SITUAÇÃO
(Na ₂ O, K ₂ O)/SiO ₂	0,20 - 0,28	0,20	✓
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,5 - 4,5	5,74	✗
H ₂ O/(Na ₂ O, K ₂ O)	15 - 17,5	9,32	✗
(Na ₂ O, K ₂ O)/Al ₂ O ₃	0,8 - 1,2	1,17	✓

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Materiais

Na Tabela 6 estão listados os materiais utilizados na pesquisa.

Tabela 6 – Materiais utilizados na pesquisa

Material		Fornecedor / Fonte
Solo		Região de Santa Rita – PB
Precursores geopoliméricos	Metacaulim	Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda
	Resíduo Cerâmico	Cerâmica Ceraminas, município de Santa Rita – PB. Proveniente da pesquisa de Vieira (2005)
Ativadores	Hidróxido de sódio (NaOH)	VETEC Química Fina Ltda
	Silicato de sódio alcalino	Pernambuco Química S.A.

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1 Solo

O solo utilizado, proveniente da cidade de Santa Rita – PB, foi previamente destorroado e peneirado em peneira de malha 4,8mm conforme Figura 24, sendo posteriormente estocado em tambor plástico fechado.

Figura 24 – Solo peneirado em malha 4,8mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a caracterização do solo, foram executados os ensaios indicados na Tabela 7.

Tabela 7 – Ensaio de caracterização do solo.

Ensaio	Norma
Análise Granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 1984) e NBR 6502 (ABNT, 1995)
Limites de Atterberg:	
Limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 1984)
Limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 1984)
Massa específica dos grãos	NBR 6508 (ABNT, 1984)
Compactação do solo	NBR 6508 (ABNT, 1984)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Hidróxido de sódio

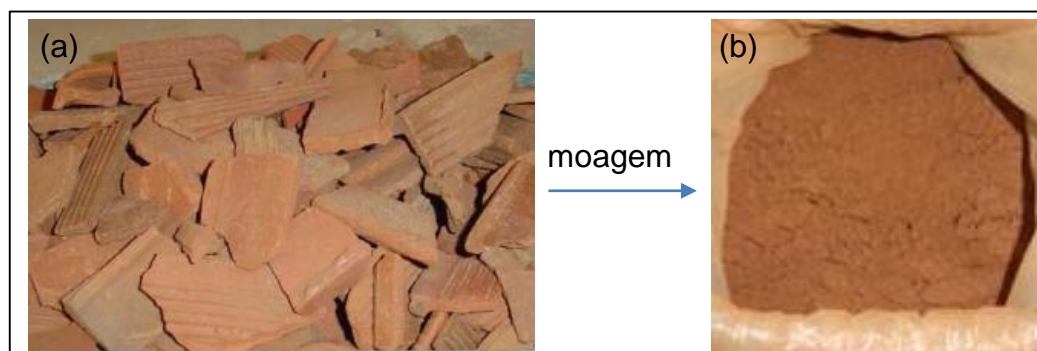
Foi utilizado hidróxido de sódio (NaOH) tipo P.A. fornecido pela VETEC Química Fina Ltda.

O grau de pureza é de 97,0%. Sendo 1g de NaOH equivalente a 0,775g de Na₂O.

3.2.3 Resíduo Cerâmico

Proveniente da pesquisa de Vieira (2005), o resíduo cerâmico é resultante da moagem em moinho de bolas, de fragmentos de cerâmica vermelha como tijolos e telhas, fornecidos pela cerâmica Ceramidas – Santa Rita – PB (figura 25):

Figura 25 – Resíduo Cerâmico: (a) antes da moagem; (b) após moagem em moinho de bolas.



Fonte: Vieira (2005).

3.2.4 Silicato de Sódio Alcalino

Foram utilizados dois tipos de silicato de sódio alcalino ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,1\text{SiO}_2$). Todos fornecidos pela Pernambuco Química S/A, contendo a mesma relação ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,1$), diferenciando entre eles da quantidade de sólidos totais, viscosidade e densidade (Anexo B).

Para diferenciá-los no trabalho, foi designado os termos PQ1.56 e PQ1.65 para os silicatos de densidades 1,56g/mL e 1,65g/mL respectivamente.

3.2.5 Geopolímero

O geopolímero aqui citado é referente à parte composta por precursor geopolimérico (fonte de aluminossilicatos), hidróxido de sódio, silicato de sódio e água destilada. O silicato de sódio tem a função de complementar a solução alcalina, bem como a quantidade de silicatos necessários a reação.

3.3 Metodologia aplicada para autoestabilizar os blocos de adobe

Tendo em vista a escassez de trabalhos voltados para a estabilização de blocos de adobe que, não levassem em conta a adição de cimento Portland ou outro aditivo industrializado e mais ainda, não necessitando do uso de meios mecânicos como a prensagem para a obtenção de um material com boa conformação e resistência mecânica, foram pegas como referencial para a pesquisa, metodologias aplicadas para estabilização de materiais por meios de ativação alcalina.

Inicialmente, foi realizada uma mistura experimental para verificação de como os materiais se interagiam. Para tanto, foi utilizado uma composição de solo + ativador alcalino (geopolímero) adaptada do trabalho de Souza (2011) e descritos na Tabela 8 a seguir:

Tabela 8 - Quantitativos de solo + ativador alcalino utilizados.

% Solo	% Ativador Geopolimérico					% Água _{pot.}
	Precursor ¹	Silicato de Sódio (PQ1.65)	NaOH (P.A.)	Água destilada	%Total	
100	0	0	0	0	0	13,5
	1,12	1,10	0,12	0,66	3	
	2,24	2,20	0,24	1,33	6	
	3,73	3,67	0,40	2,22	10	

¹ Precursores utilizados: metacaulim (MK) e resíduo cerâmico (RC).

No preparo das amostras, para efeito comparativo, foram utilizadas proporções com 0% (padrão de referência), 3%_{op/p}, 6%_{op/p} e 10%_{op/p} de ativador em relação à quantidade de solo utilizado.

Foram preparados corpos de prova prismáticos com medidas (5x5x5)cm (CxLxH) e adensados com auxílio de vibrador conforme Figura 26.

Figura 26 – Corpos de prova produzidos em forma cúbica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, os corpos de prova preparados foram acondicionados em saco plástico lacrado por três dias para preservação da umidade (Figura 27),

após os três dias, os sacos foram removidos e, completado o período de 7 dias de cura, sendo logo em seguida realizado o teste de compressão (ver capítulo 4 Resultados e discussões).

Figura 27 – Corpos de Prova Acondicionados em Saco Fechado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificado o comportamento do material, algumas questões precisaram ser ajustadas como: teor de água para trabalhabilidade do material e formato do molde mais prático e adequado para preparo dos corpos de prova. Para isso, tomando como referencial a norma ABNT/NBR 5738 (2003) que trata de procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova aplicados para concreto, foi adotado a forma cilíndrica para o molde, este formato permitiu a utilização de materiais de fácil aquisição para confecção do molde, como foi o caso do uso de pedaços de cano de PVC rígido.

Feito as devidas considerações, um novo preparo foi realizado, desta vez com uso de molde cilíndrico e com quantidades de água ajustados para que o material tivesse conformação dentro do índice de plasticidade (IP). O material obtido foi de fácil moldagem e o adensamento passou a ser manual (Figura 28):

Figura 28 – Preparo de material em molde cilíndrico feito com cano de PVC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após vários ensaios, buscou-se refinar as formulações utilizando como parâmetro a metodologia sugerida por Davidovits (1982) para geração de compostos do tipo NaPSS (sódio polissialatosiloxo). Este método compreende a preparação de uma mistura de alumino silicatos em solução alcalina onde a composição da mistura de reagente, em termos de porções molares dos óxidos, esteja dentro dos intervalos mostrados na tabela 9.

TABELA 9 - Razões Molares dos Óxidos da Mistura Reagente

Razões molares	Porções Molares indicadas (Davidovits, 1982)
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,20 a 0,28
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3,50 a 4,50
$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	15,00 a 17,50
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,80 a 1,20

Fonte: Elaborado pelo autor.

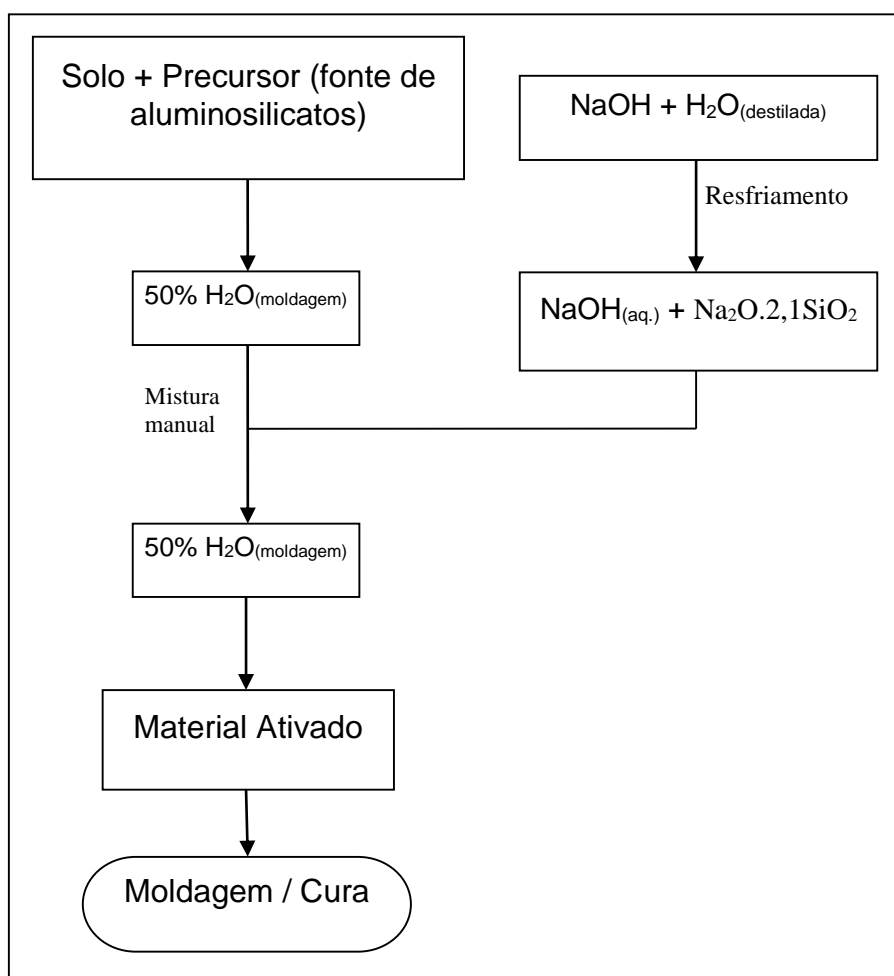
Nesta fase, além dos precursores testados anteriormente, também foi iniciado experimentos com uso da cinza de bagaço de cana e repetição dos demais experimentos com variação na dosagem dos precursores. Com isso, foram trabalhadas as seguintes composições:

- Solo + água (padrão de referência)
- Solo + geopolímero (com precursor cinza de bagaço de cana)

- Solo + geopolímero (com precursor metacaulim)
- Solo + geopolímero (com precursor resíduo cerâmico)

Para cada dosagem, foi variado o tempo e a temperatura de cura. Posteriormente, foram realizados testes de resistência para verificar a qualidade do material processado. O preparo segue os procedimentos descritos na Figura 29:

Figura 29 – Reação de ativação alcalina



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na elaboração das receitas, buscando usar quantidades de ativadores com precursores ajustados o mais próximo possível dos intervalos da tabela 9, foi utilizado a ferramenta SOLVER para auxílio na determinação de razões molares dos óxidos. Tais valores foram propositalmente projetados para se ter um comparativo no uso de ativadores alcalinos com quantidades distintas de SiO₂ e Al₂O₃.

Os materiais obtidos foram adensados de forma manual em corpo de prova cilíndrico conforme Figura 30. Em seguida, os corpos de prova preparados foram acondicionados em saco plástico lacrado por três dias para preservação da umidade (Figura 31), após os três dias, os sacos foram removidos e completado o período de cura empregado (7 e 28 dias).

Figura 30 – Blocos de Terra Adensados Manualmente em Corpos de Prova Cilíndricos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Corpos de Prova Acondicionados em Saco Fechado



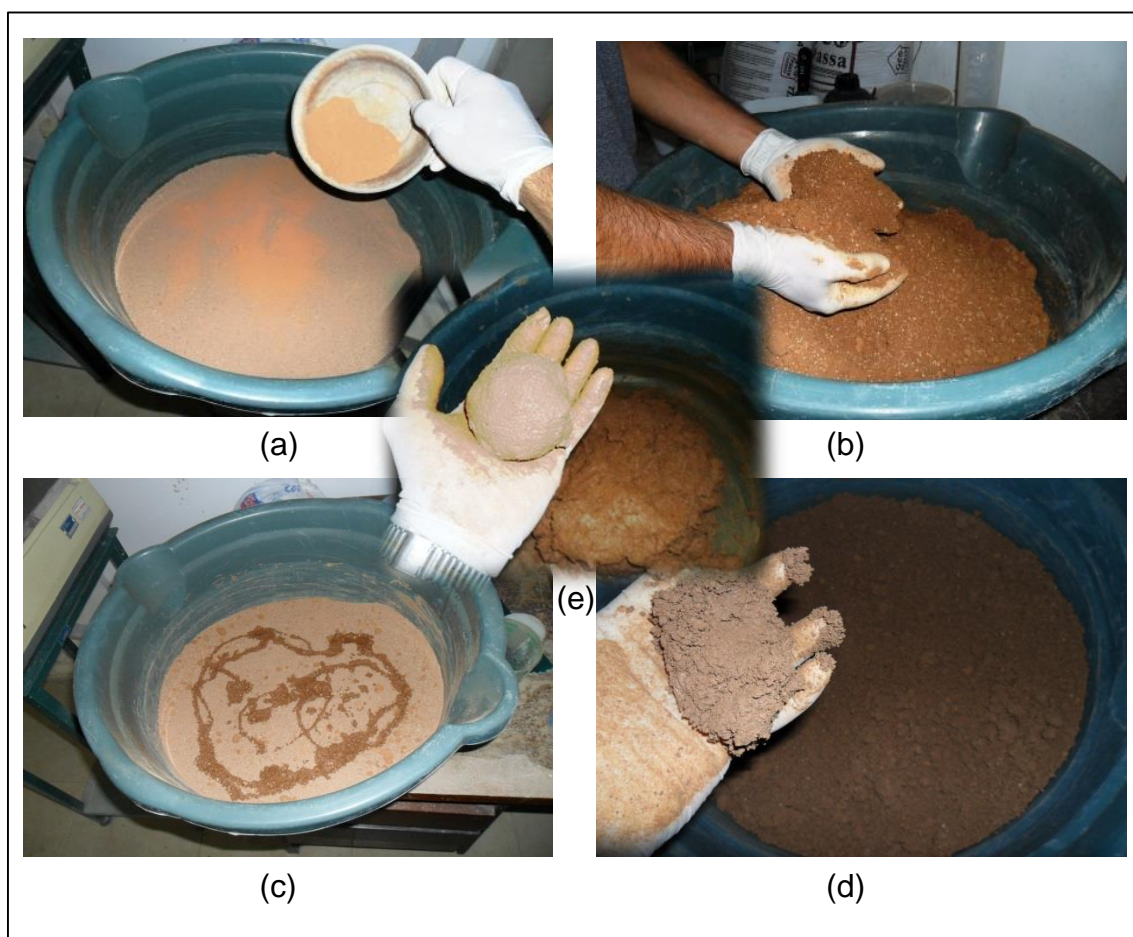
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.1 Preparo dos blocos de terra estabilizados

Inicialmente todos os materiais foram pesados em balança digital e separados. Os materiais secos (solo e precursor) foram previamente misturados até completa homogeneização (Figura 32.a).

Para elaboração da solução aquosa alcalina, foi dissolvido hidróxido de sódio em água destilada em béquer e homogeneizado manualmente com auxílio de um bastão de vidro. Após resfriamento da solução alcalina, foi acrescido o silicato de sódio e homogeneizado novamente com auxílio de bastão de vidro sendo reservado para uso posterior.

Figura 32 – Preparo dos corpos de prova: (a) mistura de materiais secos; (b) adição de água; (c) adição de solução alcalinizante; (d) mistura homogeneizada; (e) material pronto para moldagem.



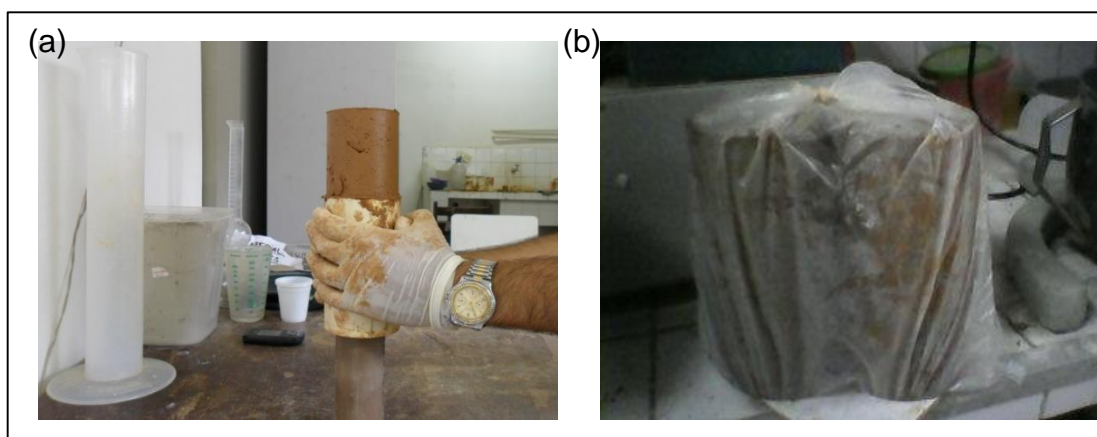
Fonte: Elaborado pelo autor.

Prosseguindo no preparo, parte da água de adição é acrescida a mistura e novamente homogeneizada (Figura 32.b); A etapa seguinte é a adição da

solução alcalina à mistura, sempre aos poucos com mexidas intercaladas (Figura 32.c); o índice de plasticidade é tênue, e obtido com uma diferença mínima de adição de água (Figura 32.d e e). Conforme observado, cerca de 4 a 8% a mais de água pode fazer a diferença entre o limite sólido e plástico e mais do que 15%, o sistema pode sair da fase plástica para líquida.

Entretanto, os efeitos da ativação alcalina são imediatos, o material recém-processado tende a enrijecer com rapidez, devendo ser moldado de imediato (em cerca de 30 minutos). A técnica aqui aplicada para moldagem foi a mesma utilizada na confecção de blocos de adobe. Com tudo, para efeitos práticos de pesquisa, foram utilizadas formas cilíndricas confeccionadas a partir de tubos de PVC rígido e compactação manual (Figura 33.a). Após o desmolde, é possível observar a exsudação excessiva no corpo de prova (Figura 33.b) que é de imediato posto em saco plástico para início do regime de cura.

Figura 33 – Moldagem dos corpos de prova: (a) moldes cilíndricos de PVC rígido; (b) exsudação excessiva após desmolde.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Regime de cura

Objetivando observar a influência da temperatura nas propriedades mecânicas, sem que fosse necessário o uso de temperaturas muito elevadas que tornasse inviável a obtenção de um material de baixo custo, foram utilizados dois regimes de cura conforme apresentado na Tabela 10. No entanto, conforme verificado no item

2.5.1.3 (Geopolimerização), após a saturação de aluminossilicatos dissolvidos na mistura, inicia-se a formação de uma grande rede de condensação com consequente liberação de água. Para que esta água não seja liberada rapidamente do sistema, os materiais processados foram acondicionados em sacos plásticos nos primeiros 3 dias de cura sendo, posteriormente, retirados dos sacos plásticos para completarem os tempos de cura estabelecidos. Conforme a Figura 34, podemos observar a grande quantidade de água que é liberado do sistema.

Figura 34 – Regime de cura dos corpos de prova. (a) primeiras 72h em embalagem fechada; (b) após as 72h iniciais, os corpos de prova continuam a cura expostos ao ar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Regimes de cura adotados (Tempo (h) acumulado).

Tipo	3 dias (72 h)	7 dias (168 h)	28 dias (672 h)
I	Temp. Ambiente		
II	50°C		Temp. Ambiente

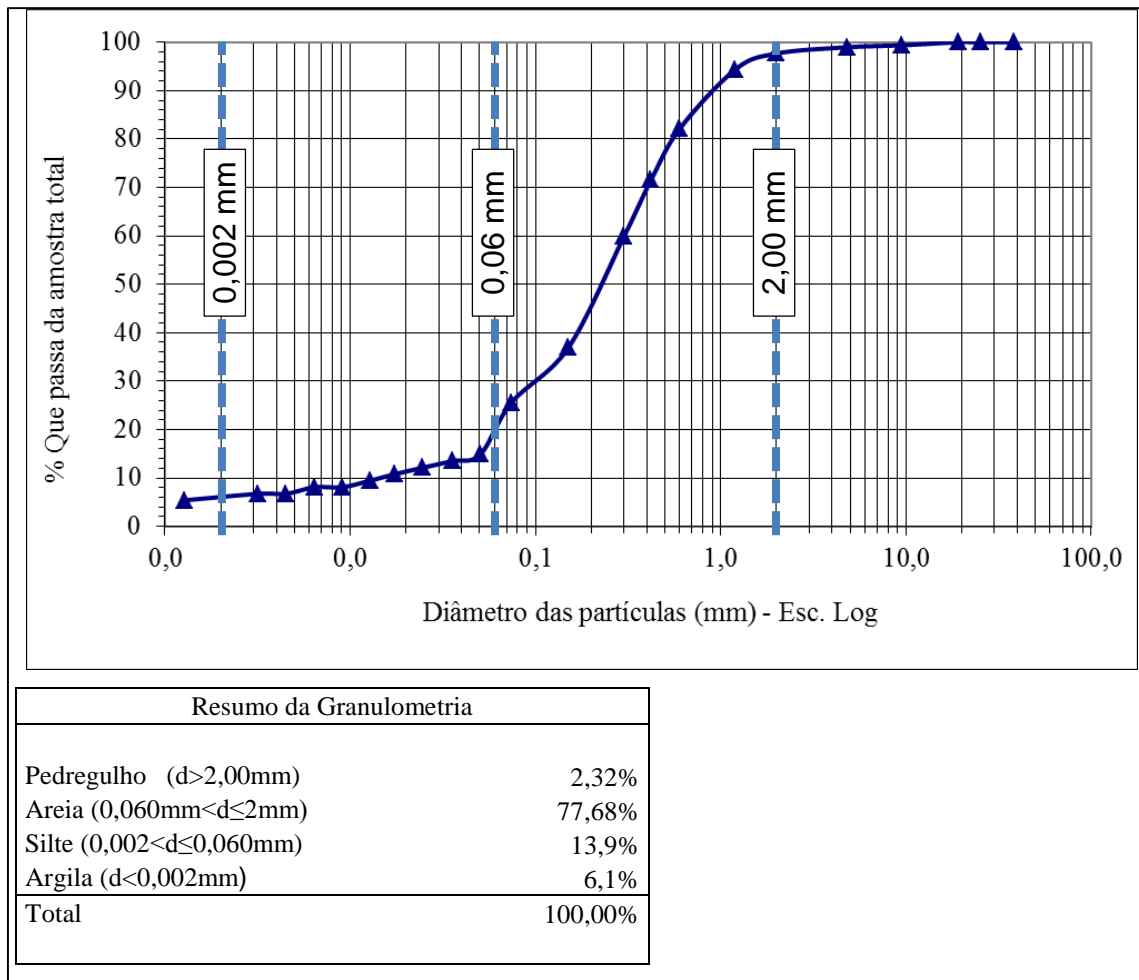
Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Solo

A composição granulométrica do solo é verificada na Figura 35:

Figura 35 – Curva de distribuição granulométrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

CRATerre (1979), indica a seguinte composição como ideal para o preparo de blocos de adobe: areia: 55 a 75%; silte: 10 a 28% e argila: 15 a 18%.

Com base nos resultados obtidos para o solo utilizado na pesquisa, é possível verificar que o mesmo não apresenta uma composição adequada para produção de adobes. A presença elevada dos constituintes considerados quimicamente inertes (pedregulho, areia e silte) se contrapondo ao baixo teor

de argila, necessária para dar a requerida coesão à terra úmida, podem interferir diretamente no comportamento mecânico do material final.

A caracterização do solo pode ser feita por seu índice de plasticidade e seu limite de liquidez. Com base nos dados da tabela 11, o solo tem características entre o arenoso e o siltoso. Tal característica está relacionado ao baixo teor de argila existente.

Para que a moldagem do adobe seja realizada com facilidade, é necessária uma plasticidade ideal que permita a ocupação de todo o seu volume (sobretudo cantos e arestas) sem, no entanto, ocorrer sua deformação no desmolde. Tais valores foram determinados e constam na Tabela 11:

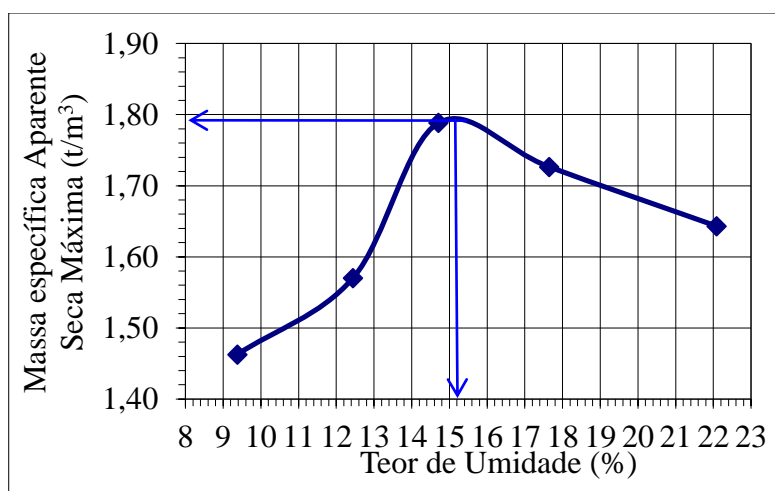
Tabela 11 – Limites de Atterberg

Limites de Atterberg (%)	
Limite de Plasticidade	23,34
Limite de Liquidez	28,50
Índice de Plasticidade	5,16

Fonte: Elaborado pelo autor.

O teor de umidade determinado foi de 15,2% (ver Fonte: Elaborado pelo autor.). Variações desse valor podem resultar em alterações no volume do solo por retração e consequente surgimento de fissuras quando se processa a evaporação da água.

Figura 36 - Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca Máxima.

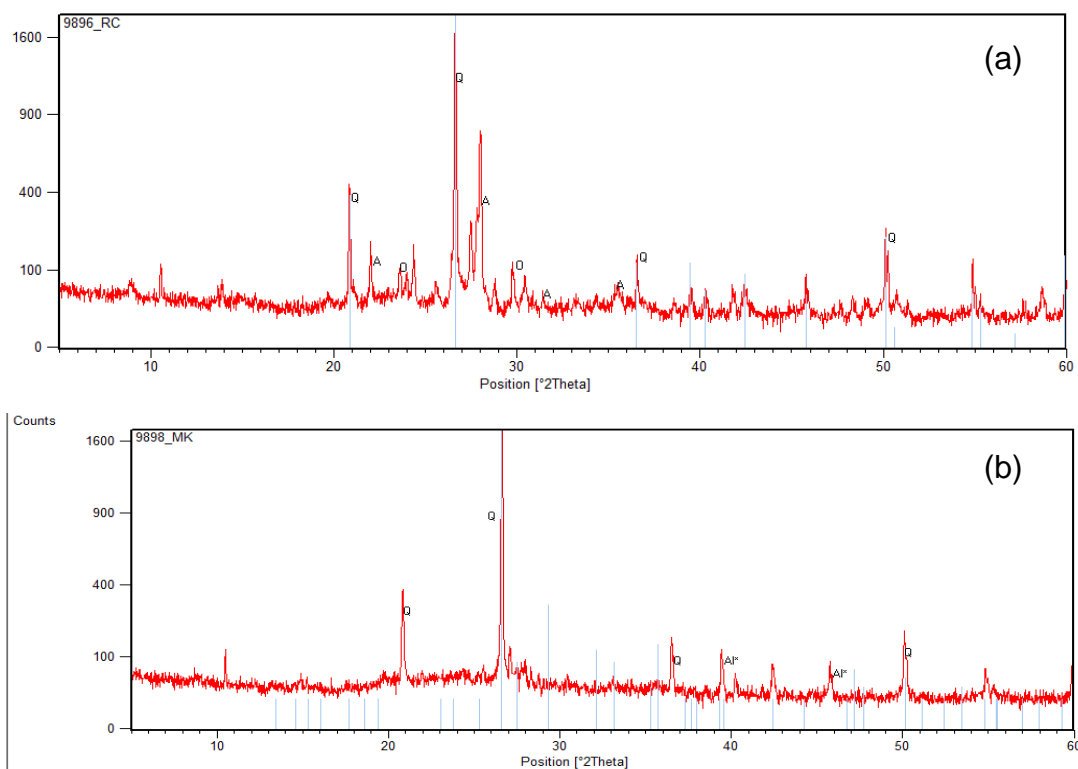


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Precursores geopoliméricos

Os precursores geopoliméricos foram avaliados por Difração de Raios-X (DRX)

Figura 37 - Difração de Raio-X para (a) resíduo cerâmico e (b) metacaulim.



Legenda: Q: óxidos de silício / quartzo; A: albita; O: Orthoclase; Al: complexos com alumínio.

Pelo difratograma da Figura 37.a, observamos que o resíduo cerâmico apresenta, além da fase predominante de óxido de silício (SiO_2), outros complexos aluminosilicatos como a albita e a orthoclase. Já no caso do metacaulim, tivemos presença do óxido de silício (SiO_2) e alguns complexos de alumínio com fosfato, manganês, vanádio entre outros (Figura 37.b).

A Tabela 12 mostra o quantitativo dos óxidos presentes nos precursores:

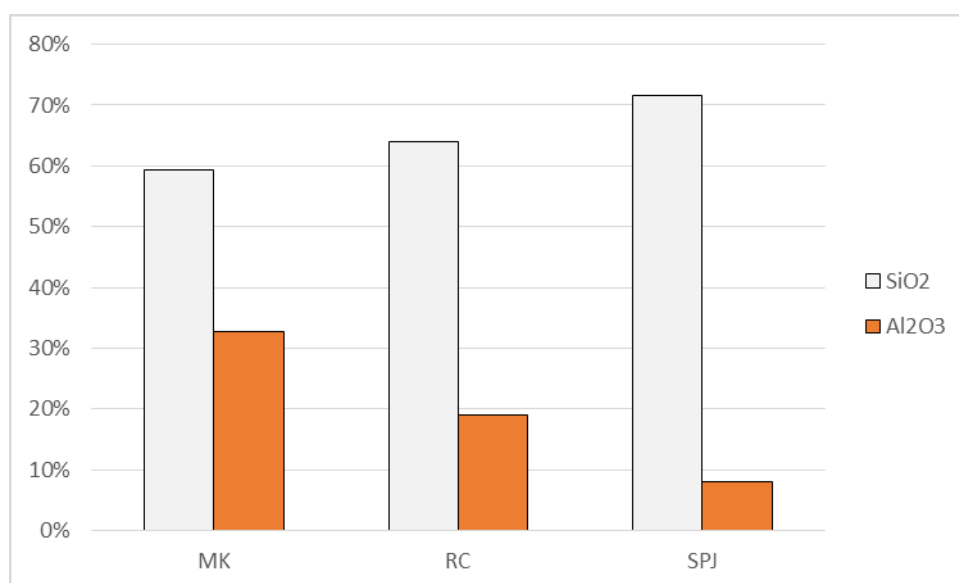
Tabela 12 – Análise dos precursores por FRX.

[Quantitative Result]			
Analyte	METACAULIM	RESÍDUO CERÂMICO	CINZA SPJ#200
SiO ₂	59.37 %	63.90 %	71,60%
Al ₂ O ₃	32.69 %	18.94 %	7,92%
Fe ₂ O ₃	4.38 %	7.71 %	2,97%
K ₂ O	0.89 %	3.46 %	6,66%
TiO ₂	0.80 %	1.27 %	0,44%
P ₂ O ₅	0.45 %	0.26 %	2,78%
MgO	0.44 %	1.49 %	2,74%
CaO	0.36 %	1.31 %	4,41%
OUTROS	0.63 %	1.67 %	0,48%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A NBR 12653 (1992) estabelece, dentre outras exigências, que para um material ser classificado como pozolânico, a quantidade de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ deva ser de no mínimo 70%. Para os precursores analisados, este valor foi atingido com 96,43% (MK), 90,55% (RC) e 82,49% (SPJ). No entanto, mesmo estando bem acima do mínimo necessário para uma ação pozolânica, tais valores não revelam qual precursor terá melhor reatividade na geopolimerização, haja vista que os teores de sílica e alumina variam bastante de uma amostra para outra, conforme observa-se na Figura 38.

Figura 38 – Percentuais de SiO₂ e Al₂O₃ para cada precursor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para serem utilizados no preparo de NaKPSS, os precursores foram avaliados em termos das razões molares dos óxidos, molaridade do NaOH_(aq.) no ativador e teor da água de adensamento.

4.3 Ativação de blocos de terra

Foram empregadas diferentes dosagens dos materiais. Primeiro foi realizado experimentos com dosagens variadas dos componentes da ativação alcalina sem levar em consideração a razão molar dos óxidos existentes. Em seguida, com a evolução dos conhecimentos adquiridos na formação dos compostos e a adequação da estequiometria, molaridade da solução ativadora e quantidade de água de adensamento, os materiais foram tomando forma mais definida quanto a sequência de preparo.

Para os corpos de prova prismáticos foram utilizadas as quantidades descritas na Tabela 13, onde buscou-se variar o total de ativador alcalina entre (3, 6 e 10)%_{p/p}.

Tabela 13 – Preparo de C.P. de solo + ativador alcalino.

MATERIAL	%Total					
Solo	100		100		100	
Precursor ⁽¹⁾	1,12	3%	2,24	6%	3,72	10%
Silicato de sódio PQ1.65	1,10		2,20		3,67	
NaOH	0,12		0,24		0,40	
H ₂ O _{dest}	0,66		1,32		2,20	
H ₂ O _{adensam.}	13,5%		13,5%		13,5%	
Molaridade do NaOH _(aq.)	6,84 mol/L		6,84 mol/L		6,84 mol/L	

¹ Precussores utilizados: metacaulim (MK) e resíduo cerâmico (RC).

¹ Precursores utilizados: metacaulim (MK) e resíduo cerâmico (RC).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foi realizado ensaios buscando analisar o comportamento de diferentes precursores na ativação alcalina, testes foram iniciados com uso de cinza de bagaço de cana (SPJ) e os corpos de prova passaram a ser feitos em molde cilíndrico. Na tabela 14, consta a dosagem experimental feita para este precursor.

Tabela 14 – Preparo de C.P. de solo + ativador alcalino R.C. e SPJ

Sem adição de silicato de sódio – Segundo experimento

MATERIAL	3RC.SPJ8M	
Solo	100%	
Precursor R.C.	1,07%	3%
Precursor SPJ	0,56%	
NaOH	0,34%	
H ₂ O _{dest}	1,03%	
H ₂ O _{adensam.}	13,5%	
Molaridade do NaOH _(aq.)	8,02 mol/L	

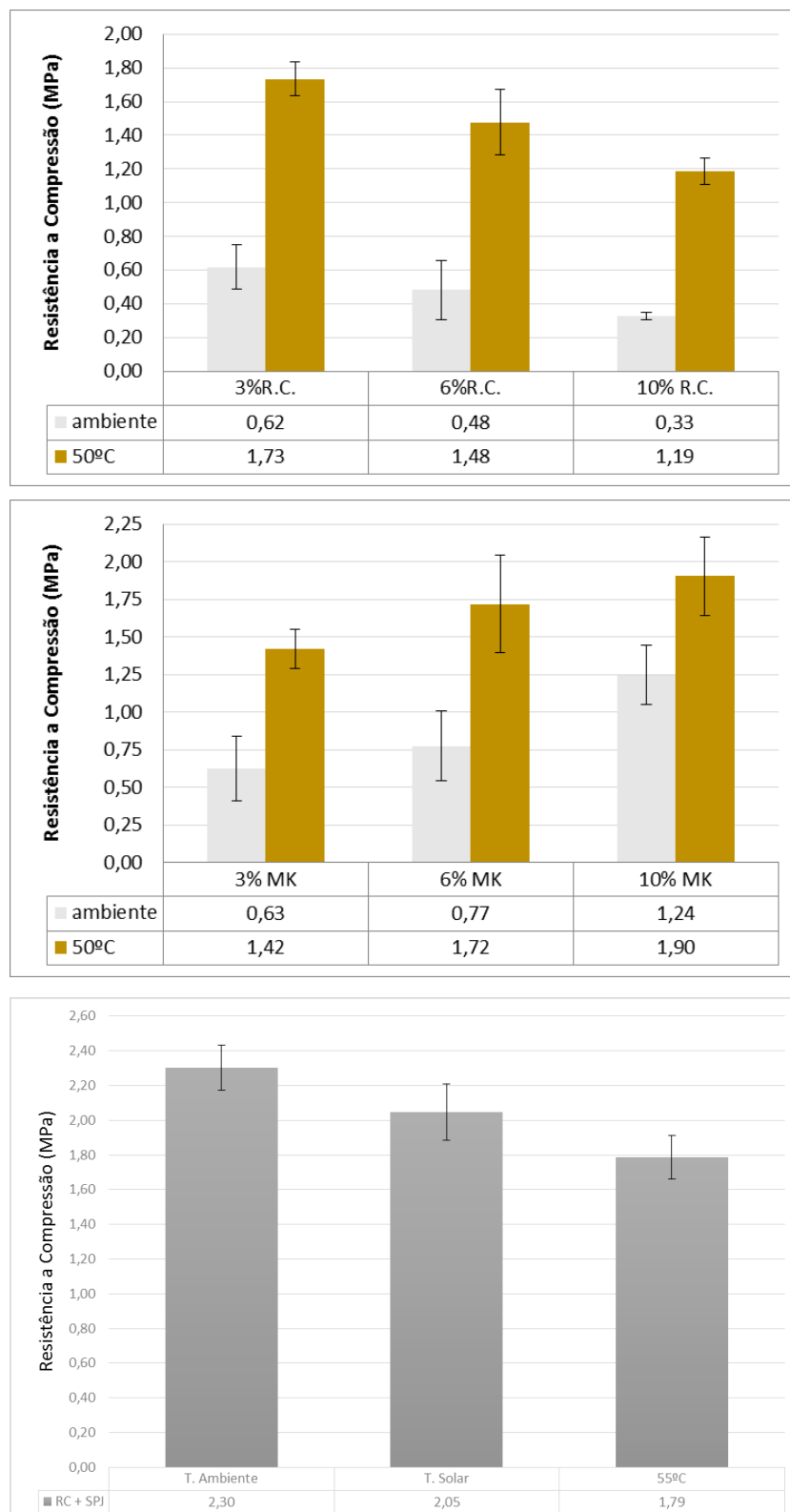
Fonte: Elaborada pelo autor.

A apresenta os resultados de resistência a compressão após 7 dias de cura. Tais valores demonstraram baixa resistência a compressão nos materiais obtidos com precursor RC e MK, sobretudo na temperatura ambiente. Esse comportamento provavelmente foi atribuído ao excesso de água usado no adensamento, provocando retardo na ativação do material enquanto fechado com saco plástico.

Já para o material feito com a combinação de RC e SPJ, sem adição de silicato, a resistência à compressão teve uma melhora significativa. Contudo, depois de submerso em água, este último (RC + SPJ) não se mostrou estável (Figura 40).

As razões para isso ocorrer podem ser inferidas ao fato de que a composição experimental não teve suas razões molares devidamente ajustadas para os intervalos estequiométricos desejados para produção de NaKPSS conforme observado na Tabela 15. Segundo Davidovits (1982), relações maiores que 1,0 para a razão molar: (Na₂O, K₂O)/Al₂O₃ e maiores que 4,0 para a razão molar: SiO₂/Al₂O₃, induzem a uma alcalinidade livre no polímero solidificado causando migração de silicato alcalino, que pode perturbar as propriedades físicas e mecânicas dos produtos minerais resultantes.

Figura 39 – Resistência a Compressão (MPa). MK: Metacaulim e RC: Resíduo Cerâmico
SPJ: Cinza de bagaço de cana



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 - Amostras imersas em água.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Razões molares dos óxidos na ativação alcalina

RAZÃO MOLAR	DESEJADO	Com precursor RC	Com precursor MK	Com precursor RC + SPJ
$(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})/\text{SiO}_2$	0,20 - 0,28	0,28	0,26	0,29
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3,5 - 4,5	8,50	4,69	7,45
$\text{H}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})$	15 - 17,5	14,07	15,58	10,93
$(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,8 - 1,2	2,36	1,23	2,16

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificado a quantidade elevada de silicatos na amostra. Decidiu-se por fazer um novo experimento, desta vez com variação nas quantidades de ativador com precursor R.C. e sem a adição de silicato de sódio (identificado como RC_NaOH). A tabela 16 mostra a dosagem experimental feita. O volume de água usado para adensamento do material também foi ajustado para atender ao seu índice de plasticidade e teor de umidade ideal.

Tabela 16 – Preparo de C.P. de solo + ativador alcalino R.C.

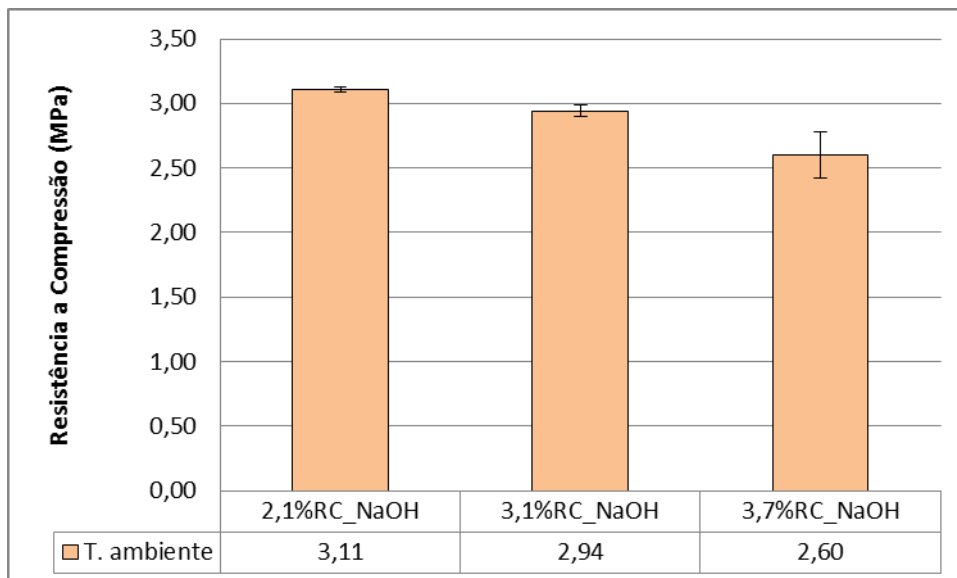
Sem adição de silicato de sódio – Terceiro experimento.

MATERIAL / Código	2.1RC.NaOH		3.1RC.NaOH		3.65RC.NaOH	
Solo	100		100		100	
Precursor R.C.	1,12		1,67		2,23	
Silicato de sódio	0		0		0	
NaOH	0,34	2,1%	0,34	3,1%	0,34	3,65%
$\text{H}_2\text{O}_{\text{dest}}$	0,66		1,08		1,07	
$\text{H}_2\text{O}_{\text{adensam.}}$	13,75%		12,9%		13,4%	
Molaridade do $\text{NaOH}_{(\text{aq.})}$	12,52 mol/L		7,73 mol/L		7,76 mol/L	

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ajuste feito na redução da concentração de silicatos permitiu um aumento significativo na resistência mecânica do material obtido com precursor R.C., conforme observado na Figura 41.

Figura 41 – Resistência a Compressão – Terceiro experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Usando precursor RC.NaOH (sem silicato de sódio).

Com o restante dos corpos-de-prova tipo RC.NaOH, foi realizado análise de absorção de água seguindo a metodologia da ABNT/NBR 8492 (1984). Nesta análise, as amostras foram colocadas em estufa a 105°C até constância de massa. Quando o material atingiu a temperatura ambiente, foi determinado a massa M_1 . Em seguida, os corpos-de-prova foram imersos em tanque com água durante 24h. Decorrido o tempo determinado, o material foi retirado do tanque, tirado superficialmente o excesso de água com pano úmido e feito a pesagem obtendo a massa saturada M_2 . Os valores individuais de absorção de água, expressos em porcentagem, foram obtidos pela expressão:

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$$

Os resultados alcançados para absorção de água nestas amostras estão indicados na tabela 17. Os valores obtidos, de resistência a compressão e absorção de água, são compatíveis com os exigidos na NBR 7171 (1992) para blocos cerâmicos de alvenaria classe 25. O que indica o potencial do material ativado para uso em construções.

Tabela 17 - Absorção de água (%A) para corpo de prova ativado com resíduo cerâmico

Material	Massa seca (M ₁)	Massa úmida (M ₂)	Absorção de água (%A)
2,1%RC_NaOH	1436,0g	1616,7g	12,58%
3,1%RC_NaOH	1427,8g	1609,0g	12,69%
3,65%RC_NaOH	1421,8g	1600,1g	12,53%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Prosseguindo, foram preparados mais corpos de prova sendo feito ajustes na estequiometria dos precursores e diminuição da água de adensamento. O uso de 10%(+0,5%) foi suficiente para que as amostras chegassem ao índice de plasticidade ideal. Uma amostra padrão de adobe (solo + água) também foi preparado para ser usado como padrão de referência na medida do aumento da resistência mecânica dos blocos ativados. A Tabela 18, contém os quantitativos de precursores inferidos na ativação, variando as dosagens em 3 e 6%_{op/p} e temperaturas ambiente e a 50°C. Os materiais obtidos foram investigados quanto a resistência a compressão, capilaridade e absorção de água.

Tabela 18 – Preparo de C.P. de solo + ativador alcalino R.C.

Sem adição de silicato de sódio – Segundo experimento

MATERIAL / Cód.	ADOBE	3RC746M		6RC746M		3MK709M		6MK709M	
Solo	50%	100%		100%		100%		100%	
Precursor RC	-	1,47		2,94		-		-	
Precursor MK	-	-		-		1,25		2,50	
Silicato de sódio	-	0,39	3%	0,78	6%	0,70	3%	1,40	6%
NaOH	-	0,25		0,51		0,20		0,41	
H ₂ O _{dest}	-	0,88		1,77		0,84		1,68	
H ₂ O _{adensam.}	~50% _{op/p}	~10%		~10%		~10%		~10%	
Molaridade do NaOH(aq.)	-	7,46 mol/L		7,46 mol/L		7,09 mol/L		7,09 mol/L	

Fonte: Elaborado pelo autor.

As razões molares dos óxidos utilizados na ativação deste quarto experimento estão descritos na Tabela 19

Tabela 19 - Razões molares dos óxidos na ativação alcalina – quarto experimento

RAZÃO MOLAR	DESEJADO	Com precursor RC	Com precursor MK
$(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})/\text{SiO}_2$	0,20 - 0,28	0,28	0,28
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3,5 - 4,5	6,49	4,0
$\text{H}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})$	15 - 17,5	12,19	15,0
$(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,8 - 1,2	1,82	1,12

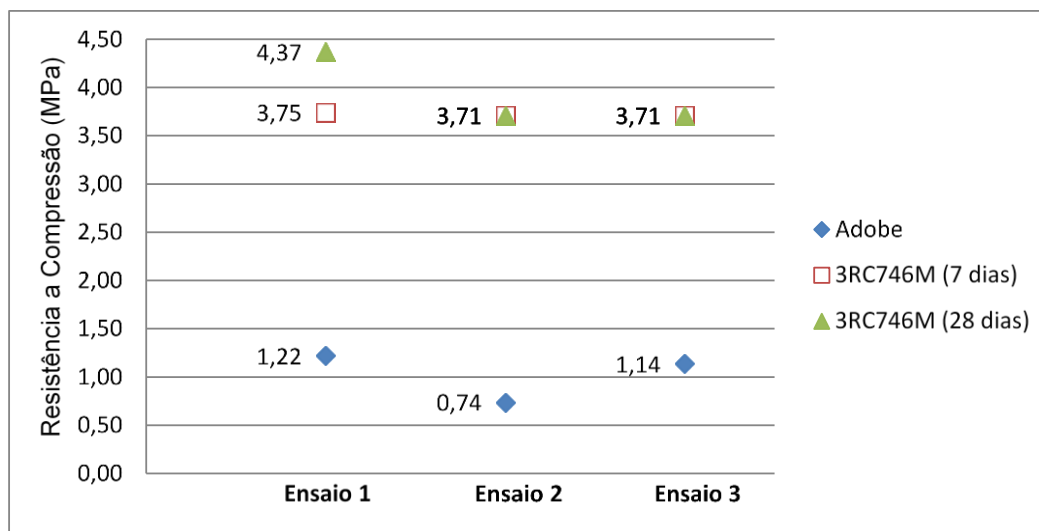
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de resistência à compressão para o quarto experimento estão apresentados na Figura 42

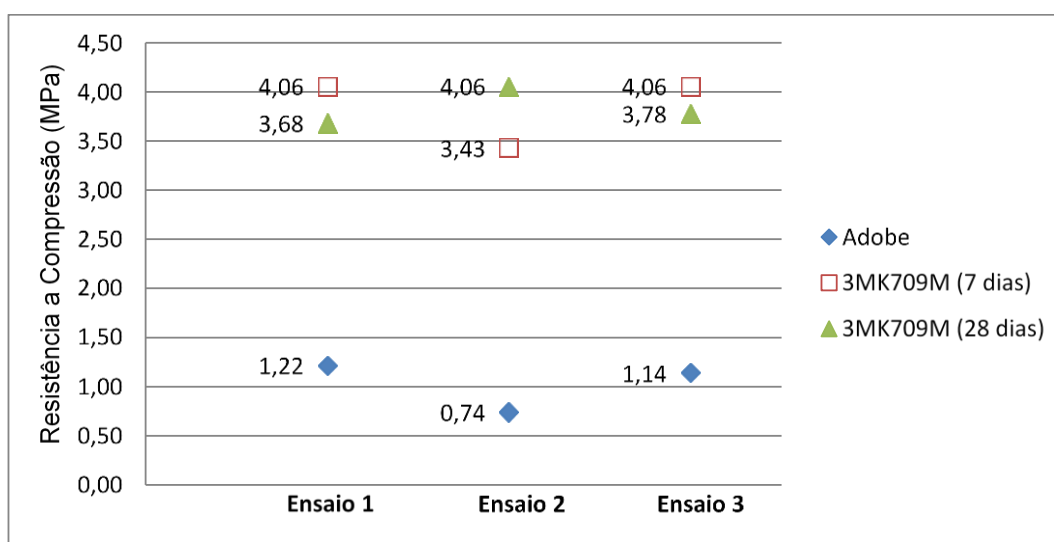
. Nos gráficos, é possível observar que o aumento de ativador não necessariamente aumenta a resistência do material. Para os blocos com 3% de ativador alcalino, apenas com sete dias de cura, o aumento da resistência a compressão foi superior a 250% em relação ao bloco de adobe padrão. Já nos blocos com 6% de ativador, esse valor chegou a 180% após 28 dias de cura.

Os percentuais de absorção de água estão descritos na tabela 20, sendo possível observar uma variação de 12,9% a 13,6% para os blocos com 3% de ativador e 15,2% a 16,8% para os blocos com 6% de ativador. A Figura 43 mostra alguns corpos de prova imersos em água para realização do ensaio.

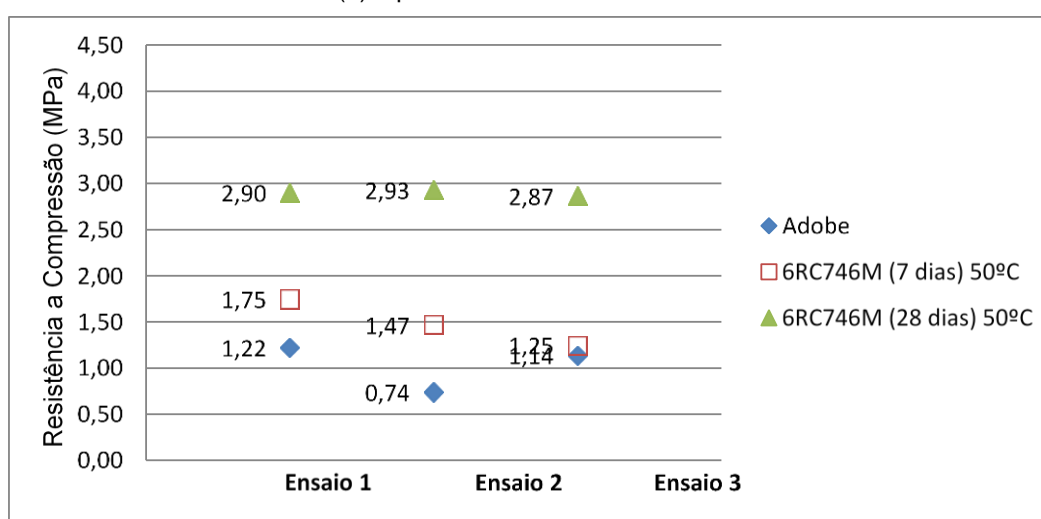
Figura 42 - Resistência a compressão - quarto experimento.



(a) – precursor 3RC746M - T_{ambiente}



(b) – precursor 3MK709M - T_{ambiente}



(c) – precursor 3RC746M – 50°C

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 - Absorção de água (%A) – quarto experimento

Material	Massa seca (M ₁)	Massa úmida (M ₂)	Absorção de água (%A)
3RC746M	1047,2	1180,1	12,9%
3RC746M-50°C	1046,4	1186,7	13,6%
6RC746M	983,7	1131,0	15,2%
6RC746M-50°C	989,6	1151,5	16,8%
3MK709M	1385,7	1567,3	13,2%
3MK709M-50°C	1400,3	1586,4	13,4%

Figura 43 – Teste de Absorção de água - quarto experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 44 mostra o ensaio de absorção de água por capilaridade realizado. Seguindo metodologia descrita na NBR 9779 (1995) a absorção de água foi determinada através da ascensão capilar do corpo de prova. Os corpos de prova, após secos em estufa (105°C) e resfriados a temperatura ambiente, foram pesados para determinação da massa seca. Em seguida, houve a imersão parcial do material, estando sob suportes que deixaram a face inferior dos C.P. cerca de 5mm do nível d'água. Durante o ensaio, foram determinados a massa dos corpos-de-prova em 6 intervalos horários conforme resultados observados na Tabela 21

Figura 44 – Ensaio de capilaridade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21 - Absorção de água por capilaridade

Material	M ₁ Seco	M ₂ 3:00h	M ₃ 6:30h	M ₄ 23:15h	M ₅ 47:00h	M ₆ 71:30h	Resultado g/cm ²
3RC746M	1044,5	1085,8	1095,6	1132,5	1161,5	1174,0	0,033
3RC746M-50°C	1046,3	1092,2	1103,2	1142,3	1172,9	1184,0	0,034
6RC746M	979,1	1038,3	1053,4	1109,1	1131,5	1133,7	0,039
6RC746M-50°C	981,3	1052,0	1069,4	1130,3	1143,2	1145,6	0,041
6MK709M-50°C	1387,1	1491,4	1517,7	1599,2	1600,5	1603,0	0,029

Fonte: Elaborado pelo autor.

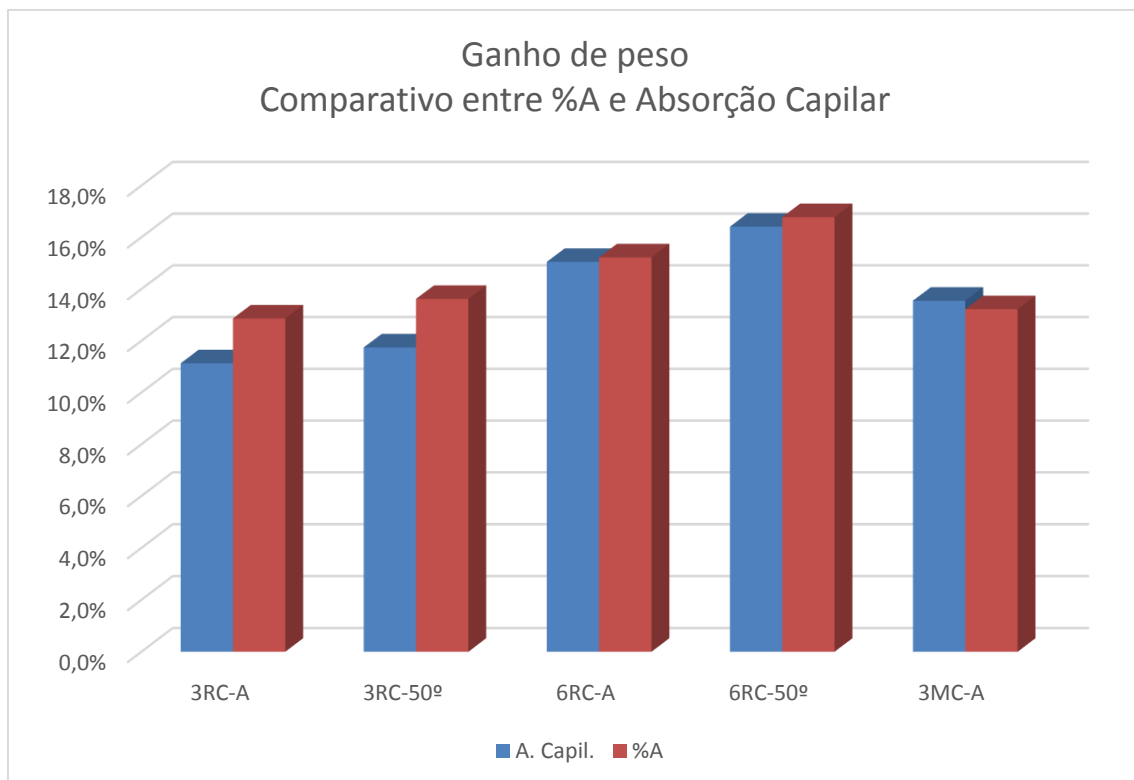
Após a última etapa da determinação de capilaridade, os corpos-de-prova foram rompidos por compressão diametral, de modo a permitir a anotação da distribuição da água no seu interior. A Figura 45 demonstra o rompimento diametral dos corpos de prova e a distribuição de água foi visualmente uniforme. Esta característica é importante para determinação de um material que possa conferir conforto térmico no ambiente. Realizando um comparativo entre as duas metodologias de determinação da absorção de água (imersão X capilaridade - Figura 46), também é observado a regularidade do material quanto a distribuição interna de água nos dois casos estudados. O que reforça o fato desse material ser um bom regulador de térmico para ambientes.

Figura 45 – Rompimento dos corpos de prova por compressão diametral.



Fonte: Elaborado pelo autor.

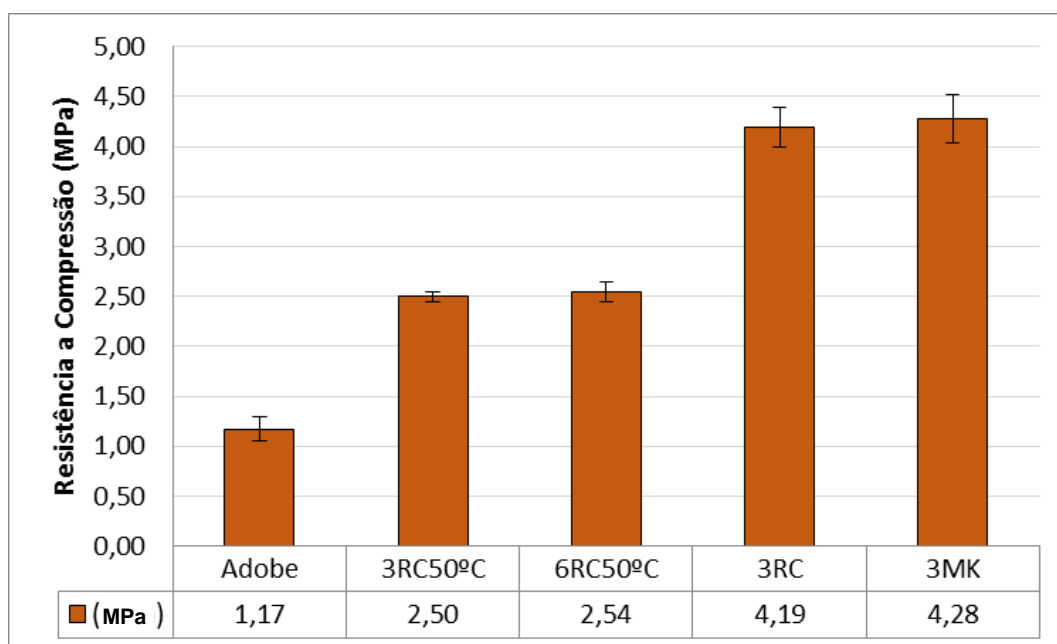
Figura 46 - Comparativo do aumento de peso em função da absorção de água



Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalizando o trabalho, a Figura 47 mostra uma análise de compressão de corpos de prova em idade avançada (70 meses). Novamente, os resultados demonstram que a ativação alcalinas feitas a temperatura ambiente e com percentuais não superiores a 3% de ativador, conferem os melhores resultados de resistência mecânica para o material.

Figura 47 – Ensaio de compressão (MPa) com tempo de cura de 70 meses.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Considerações finais

Os experimentos demonstraram que é possível realizar ativação alcalina de blocos de terra, tornando-os resistente a água e elevando sua resistência mecânica à compressão. Na caracterização do solo utilizado, foi possível observar que o mesmo, sem uso de aditivos, não tinha potencial de uso no preparo de blocos de adobe e, após a ativação alcalina, tal material passou a apresentar propriedades de resistência a compressão e absorção de água, compatíveis com os exigidos na NBR 7171 (1992) para blocos cerâmicos de alvenaria classe 25. Os precursores utilizados demonstram reações diferentes à medida que se alterava a estequiometria do ativador, sobretudo nas relações $(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})/\text{SiO}_2$; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ e $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e de concentração mol.L^{-1} da solução ativadora. Contudo, se faz necessário avaliar as variações de composição química dos precursores, bem como a reação dos mesmos em solos com teores mineralógicos distintos, haja visto que podem influenciar nos aspectos referentes às propriedades mecânicas dos materiais sintetizados.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar ativação alcalina de diferentes tipos de solo, que apresentem variações em sua composição mineralógica e relações distintas de areia-silte-argila.
2. Utilizar outros precursores, fonte de alumino-silicatos na ativação alcalina, de forma pura ou combinada, para se obter relações apropriadas dos óxidos na mistura.
3. Estudar o comportamento de ativadores alcalinos frente a variações distintas de hidróxido de sódio e hidróxido de potássio, avaliando seu papel na reação geopolimérica.
4. Verificar se ocorre influência na reação de ativação devido a presença de outros.

6 REFERÊNCIAS

1. Associação Brasileira de Cerâmica (ABC). <<http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=4>> Acesso em JUL/2013
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Informação e documentação – Trabalhos Acadêmicos – Apresentação. NBR – 14.724, 2011.
3. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Bloco Cerâmico para Alvenaria – NBR – 7171, 2005.
4. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – NBR – 5739, 2007.
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Materiais Pozolânicos – Especificação – NBR 12653, 2012.
6. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – NBR – 15894, 2010.
7. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rochas e Solos – NBR – 6502, 1995
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Solo – Análise Granulométrica – NBR – 7181, 1984.
9. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Solo – Determinação do Limite de Liquidez – NBR – 6459, 1984
10. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Solos – Determinação do Limite de Plasticidade – NBR – 7180, 1984
11. Barbosa N.P. Ghavami K. Terra Crua para Edificações. São Paulo: IBRACON, 2007, v. 2, p. 1505-1538
12. Barbosa, N.P. Considerações sobre Materiais de Construção Industrializados e Não Convencionais. UFPB\CT\Dep. Tecnologia da Construção Civil. 2005
13. Barbosa, V.F.F.; MacKenzie, K.J.D, Thaumaturgo, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials. pp. 309 – 317. 2000.
14. Bustamante, G. M.; Bressiani, J. C. A indústria cerâmica brasileira. Cerâmica Industrial, São Carlos, v.5, n.3, maio/jun., 2000. Disponível em: <<http://ceramicaindustrial.org.br/main.php>>. Acesso em: mar. 2013.
15. Caixa Econômica Federal (CAIXA). Demanda habitacional no Brasil. Brasília, 2011.
16. Cerâmica Industrial. São Carlos, SP: Atual, v. 17, 2012. < <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2014.005>>. Acesso em: Jul/2015.
17. Cid, J.; Mazarrón, F. R.; Cañas, I. Las normativas de construcción con tierra en el mundo. In Informes de la Construcción, ISSN 0020-0883, vol. Vol. 63, 523, (2011), p. 159-169.
18. Coelho, A. C. V.; Santos, P. de S.; Santos, H. de S. Argilas especiais: argilas quimicamente modificadas - uma revisão. Quím. Nova vol.30 no.5 São Paulo. 2007.
19. CRATerre – Centre de Recherche et D’Application – Terre. Construire en terre. Paris: CRATerre. 270 p. 1979.

20. Davidovits, J. Mineral polymers and methods of making them. US Patent 4.349.386 (1982). 14 Set 1982.
21. Davidovits, J. Geopolymer Chemistry and Applications. 3^a ed. Institut Géopolymère. França. jul. 2011. ISBN:9782951482050.
22. Davidovits, J. Geopolymers – Inorganic polymerie new materials. Journal of Thermal Analysis, 37:1633-1656, 1991.
23. Davidovits, J. Properties of Geopolymer Cements. PROCEEDINGS. 1th International Conference on Alkaline Cements and Concretes. Kiev, Ucrânia,. pp. 131-149. 1994.
24. Davidovits, J.; Legrand, J.J. Patente FR 2,324,427. França. Enviado em 11 de jan. 1974.
25. 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).
26. Engelhardt, G., Hoebbel, D., Tarmak, M., Samoson, A.; Lippmaa, E. “²⁹Si-NMR-Untersuchungen zur Anionenstruktur von kristallinen Tetramethylammonium-alumosilicaten und -alumosilicatlösungen.” Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie 484: 22-32 (1982).
27. Eves, C. M. M.; Faria, O. B.; Rotondaro, R.; Cevallos, P. S.; Hoffmann, M. Seleção de solos e métodos de controle em construção com terra – práticas de campo. In: IV SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO DE CONSTRUÇÃO COM TERRA, PROTERRA-CYTED. 1 CD-ROM. p. 1-31. 2005.
28. Farias Filho, J.; Rolim, J. S.; Toledo Filho, R. D. Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande – PB. v.4 n.3 UFPB, p. 437 – 444. 2000.
29. Freire, W. J.; Beraldo, A. L. Tecnologias e materiais alternativos de construção. Editora da UNICAMP. Campinas, São Paulo, 2003.
30. Geopolymer Institute. 1996-2013. Disponível em: <<http://www.geopolymer.org/about/business-fellows>>. Acesso em: Jul/2013.
31. Glukhovskiy V.D. Soil silicates. Gosstroyizdat, Kiev, 154pp. 1959.
32. Gomes, C. F. Argilas – O que são e para que servem. Fundação Calouste Gulbenkian – Lisboa. 1988.
33. Kakali, G.; Perraki, T.; Tsivilis, S.; Badogiannis, E. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity, Applied Clay Science, Volume 20, pp. 73-80, ISSN 0169-1317, <[http://dx.doi.org/10.1016/S0169-1317\(01\)00040-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00040-0)>. 2001.
34. Mason, B.; Moore, C. B. Principles of geochemistry. 4. ed. New York, John Wiley. (1982). 344 p
35. Norma Técnica del Reglamento Nacional de Edificaciones (NTE). NTE E.080 – ADOBE. Lima – Peru. p. 310 – 316. 2000.
36. Palomo A, Varela MTB, Granizo MT, Puertas F, Varquez, T, Grutzeck MW. Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. Cement and Concrete Research 29 (7) 997–1004. 1999.
37. RIGASSI, Vincent – Blocs de Terre Comprimée. Manual de Production. Vol. 1. CRATerre – EAG, Grenoble, France, 1995
38. Santos, P. S. Tecnologia de Argilas. v. 1. Edgard Blucher. São Paulo. 1975.
39. Santos, P. S. Tecnologia de Argilas.. v.2: Edgard Blücher. São Paulo. 1975.
40. SENCICO: Adobe. NTE E 0.80. Reglamento Nacional de Construcciones, Lima, 2000.

41. Shi, C.; Fernández Jiménez A.; Palomo A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 750–763.
42. Silva, K. C. G. Potencial de Ativação Alcalina de Materiais Residuais Aluminosilicosos no Desenvolvimento de Matrizes Cimentícias. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFPB, João Pessoa, 2008.
43. Souza, S. M. T. Resíduos Líquidos de Biodiesel na Ativação Alcalina de Blocos Estruturais de Terra Crua Prensada. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, UFPB, João Pessoa, 2011.
44. Spence. R.; Wells, J.; Dudley, E. Jobs from housing. Londres: Intermediate Technology Publications, 1993.
45. Toledo Filho, R. D. *et al.* Potencial of crushed waste calcined-clay brick as a partial replacement of Portland cement. American Concrete Institute. ACI SP-202, p. 147 – 160. 2001.
46. Van Jaarsveld JGS, Van Deventer JSJ, 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.
47. VIEIRA, A.A.P. Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), UFPB, João Pessoa, 2005.

ANEXO A – RELAÇÃO DE NORMAS E REGULAMENTOS POR PAÍS

País	Norma/Reglamento	ORG	EST	Adobe	BTC	Tapial	Notas
Brasil	NBR 8491, 1986.	ABNT	X		X		BTC estabilizado con cemento especifica, métodos de ensayo.
	NBR 8492, 1986.						
	NBR 10832, 1989						
	NBR 10833, 1989						Procedimiento fabricación BTC con prensa manual/hidráulica
	NBR 10834, 1994.						
	NBR 10835, 1994						Especificaciones y métodos de ensayo de bloques de suelo- cemento
	NBR 10836, 1994						
	NBR 12023, 1992						
	NBR 12024, 1992						
	NBR 12025, 1990						Métodos de ensayo para suelo-cemento
	NBR 13554, 1996						
	NBR 13555,1996						
	NBR 13553, 1996					X	Tapia con cemento
Colombia	NTC 5324,2004	ICONTEC	X		X		Estabilizado con cemento
EEUU	NMAC, 14.7.4, 2004	CID		X	X	X	Reglam. Estatal de Nuevo México.
	ASTM E2392 M-10	ASTM		X		X	
España	UNE 41410:2008	AENOR			X		Primera norma Europea
Francia	XP P13-901,2001	AFNOR			X		Norma experimental
India	IS 2110 : 1980	BIS	X			X	Paredes de suelo-cemento
	IS 1725 : 1982.	BIS	X			X	
	IS 13827 : 1993	BIS		X		X	Directrices resistencia a terremotos
Italia	Ley nº 378, 2004			X	X	X	Leyes para la conservación del patrimonio de tierra
	L.R. 2/06 2 2006						
Kenya	KS 02-1070: 1999.	KEBS	X		X		
Nigeria	NIS 369:1997.	SON	X		X		
Nueva Zelanda	NZS 4297, 1998.	SNZ			X	X	
	NZS 4298, 1998.				X	X	
	NZS 4299, 1999.						
Perú	NTE E 0.80, 2000	SENCICO			X		
	NTP 331.201, 1979	INDECOP I	X	X			
	NTP 331.202, 1979.						
	NTP 331.203, 1979.						
Regional África	ARS 670, 1996	ARSO			X		
	ARS 671, 1996						
	ARS 672, 1996						
	ARS 673, 1996						
	ARS 674, 1996						
	ARS 675, 1996						
	ARS 676, 1996						
	ARS 677, 1996						
	ARS 678, 1996						
	ARS 679, 1996						
	ARS 680, 1996						
	ARS 681, 1996						
	ARS 682, 1996						
	ARS 683, 1996						
Sri Lanka	SLS 1382-1:2009	SLSI	X		X		Bloques de suelo comprimido estabilizados
	SLS 1382-2:2009						
	SLS 1382-3:2009						
Túnez	NT 21.33:1996	INNORPI			X		En francés
	NT 21.35:1996						En francés
Turquía	TS 537, 1985.	TSE	X				En turco
	TS 2514, 1985.			X			
	TS 2515, 1985.						
Zimbabue	SAZS 724, 2001.	SAZ				X	

Abreviaturas: ORG (Organismo); EST (Estabilização, se contempla a utilização de solo estabilizado). Fonte: Adaptado de Cid *et al.* (2011).

ANEXO B – LAUDOS DE PRODUTOS QUÍMICOS

 Pernambuco Química S/A	☎81. 2123.1400
PRODUTO	SILICATO DE SÓDIO ALCALINO PQ – 1.56

Serve principalmente para preparar detergentes em pó e sabões. Seguem-se outros tensoativos, assim como papel, celulose e moldes e macharia em fundições pelo processo de CO_2 . É também defloculante de massas (cerâmicas, mineração etc.); em operações de branqueamento, alvejamento, choque alcalino (têxtil). Obtém-se de sílica com elevado grau de pureza. É produzido em condições especiais de elevadas temperatura e pressão. Sua viscosidade (1.000 a 3.000 cPs) é indicada em bombeamento e transporte em caminhões-tanque.

ESPECIFICAÇÕES	PARÂMETROS
Fórmula	$\text{Na}_2\text{O}.2,1\text{SiO}_2$
Aspecto	Líquido viscoso levemente turvo
Cor	Incolor a levemente amarelado
Alcalinidade como Na_2O (%)	15,0% a 16,0%
Sílica como SiO_2 (%)	30,0% a 34,0%
Solubilidade	Solúvel em água
Relação $\text{Na}_2\text{O}.2,1\text{SiO}_2$	2,1
PH	11,0 a 13,0 (solução a 1%)
Densidade (g/ml) a 20°C	1,57 g/ml a 1,61 g/ml
Concentração (°Be) a 20°C	51 a 53
Viscosidade (Brookfield) a 20°C	1.000 a 3.000 cPs
Sólidos totais (em %)	45,0% a 50,0%

Embalagem

Tambores de ferro (peso líquido = 300 kg), ou caminhões-tanque de aço carbono ou inox.

Armazenamento

Em embalagens e locais indicados, pode-se armazená-lo por períodos até 2 anos, preferencialmente.

MANUSEIO/CUIDADOS

No manuseio se utilizam equipamentos de proteção individual (EPI) recomendados para alcalinos líquidos (óculos, máscara, luva, avental e bota de borracha). Se o produto contatar a pele, deve-se lavá-la com água abundante. A depender da gravidade do contato, os EPI's devem ser logo postos para limpeza completa ou descartados.



Pernambuco Química S/A

☎81. 2123.1400

PRODUTO

SILICATO DE SÓDIO ALCALINO PQ – 1.65

Sua mais importante área de utilidade é a fabricação de sabões, mas é amplamente empregado em defloculação de massas cerâmicas, minerações, detergentes junto com os tensoativos e se inicia na carcinicultura (camarões). Atua em braqueamento, alvejamento, choque alcalino (têxteis), sílica gel e metassilicato de sódio (indústria química), na preparação de moldes de alta resistência para fundição e siderúrgica (processo CO_2). Produz-se de sílica com elevado teor de pureza processados em condições especiais de elevadas temperatura e pressão.

ESPECIFICAÇÕES	PARÂMETROS
Fórmula	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,1\text{SiO}_2$
Aspecto	Líquido viscoso levemente turvo
Cor	Incolor a levemente amarelado
Alcalinidade como Na_2O (%)	16,00% a 19,00%
Sílica como SiO_2 (em %)	34,00% a 38,00%
Solubilidade	Solúvel em água
Relação $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$	2,1
PH	11,00 a 13,00 (solução a 1%)
Densidade (g/ml) a 20°C	1,63 g/ml a 1,67 g/ml
Concentração (°Be) a 20°C	55 a 58
Viscosidade (Brookfield) a 20°C	≥ 5.000 cPs
Sólidos totais (em %)	50,00% a 57,00%

Embalagem

Em tambores de ferro (peso líquido = 320 kg). Dependendo da concentração em °Be, pode ser transportado em caminhões-tanque de aço carbono ou inox.

Armazenamento

Em embalagens e locais indicados, pode-se armazenar por períodos até 2 anos, preferencialmente.

MANUSEIO/CUIDADOS

Utilizar equipamento de proteção individual (EPI) recomendado para alcalinos líquidos (óculos, máscara, luva, avental, botas de borracha). Se o produto contatar a pele, deve-se lavá-la com água abundante. A depender da gravidade do contato, os EPI's devem ser logo postos para limpeza completa ou descartados.

1. Identificação do produto e da empresa

- Produto: Metacaulim de Alta Reatividade / Caulim calcinado
- Marca dos produtos compreendidos: Metacaulim HP / Metacaulim HP-Branco / Metacaulim HP-XW / Metacaulim HP-ULTRA / Metacaulim HP-SP / Metaveda;
- Código interno de identificação do produto, respectivamente: HP-01 / HPB-01 / HPXW-01 / HP-ULTRA-01 / HP-SP-01 / MV-01;
- Nome da empresa: Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda.
- Endereço: Av. Humberto Cereser, 5530 – Caxambu – Jundiaí, SP – 13218-711
- Telefone da empresa: (11) 4584 5327
- Telefone para emergências: (11) 4584 5327
- Fax: (11) 4584 1475
- E-mail: fabrica@metacaulim.com.br

9. Propriedades físico-químicas

- Estado físico: sólido;
- Forma: pó seco;
- Massa específica (média): 2,60 g / cm³;
- Massa unitária (para efeito de estocagem): 600 kg / m³;
- Cor: branco, rosa, laranja ou avermelhado;
- Composição química típica:

SiO ₂ :	50,0% a 56,0%	Al ₂ O ₃ :	35,0 a 44,5%
Fe ₂ O ₃ :	< 5,0%	MgO:	< 0,1%
CaO:	< 0,5%	SO ₃ :	< 0,1%
Álcali Totais	< 1,5%	P.F.:	<4,0%

- Odor: inodoro;
- pH: 5,0 a 6,5;
- Ponto de ebulição: não aplicável;
- Faixa de temperatura de ebulição: não aplicável;
- Ponto de fusão: não aplicável;
- Temperatura de decomposição: não aplicável;
- Temperatura de auto-ignição: não aplicável.