



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ VICTOR ALVES FERNANDES

**ATIVAÇÃO ALCALINA EM BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDOS  
UTILIZANDO COMO PRECURSOR O METACAULIM**

JOÃO PESSOA

2020

JOSÉ VICTOR ALVES FERNANDES

**ATIVACÃO ALCALINA EM BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDOS  
UTILIZANDO COMO PRECURSOR O METACAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso de Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal da  
Paraíba – Campus I – para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo.

JOÃO  
PESSOA 2020

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

F363a Fernandes, Jose Victor Alves.

ATIVAÇÃO ALCALINA EM BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDOS  
UTILIZANDO COMO PRECURSOR O METACAULIM / Jose Victor  
Alves Fernandes. - João Pessoa, 2020.

50 f. : il.

Orientação: Givanildo Azeredo.  
Monografia (Graduação) - UFPB/Tecnologia.

1. Terra. 2. Metacaulim. 3. Geopolímero. 4. Ativação  
Alcalina. I. Azeredo, Givanildo. II. Título.

UFPB/BC

# FOLHA DE APROVAÇÃO

**JOSÉ VICTOR ALVES FERNANDES**

## **ATIVACÃO ALCALINA EM BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDOS UTILIZANDO COMO PRECURSOR O METACAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso em 26/03/2020 perante a seguinte Comissão Julgadora:



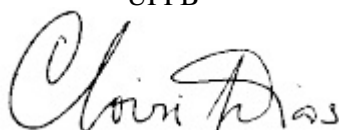
---

Givanildo Alves de Azeredo  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB



---

Primo Fernandes Filho  
UFPB



---

Clovis Dias  
UFPB



---

Prof.ª Andrea Brasiliano Silva  
Matrícula Siape: 1549557  
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Dedico este trabalho a todos aqueles que fizeram parte desta caminhada,  
por todo apoio e orações.

**“Se um dia lá na frente a vida der uma ré, recupere sua fé e recomece novamente”.**

**B. B. Uchoa**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me fortalecido durante toda esta jornada.

Agradeço aos meus pais, Humberto e Gislaine, que dedicaram suas vidas na busca desta realização. Sou grato à minha namorada, Thayana, à minha irmã, Bruna, ao meu cunhado, Alan, e à minha sobrinha, Maria Alice, que dividiram comigo diversos momentos de lutas e realizações.

Agradeço ao meu orientador e amigo Professor Givanildo de Azeredo, que tem parcela importante na minha trajetória acadêmica.

Agradeço a todos os companheiros do LABEME, que me deram todo apoio nesta pesquisa.

Agradeço a meus amigos de curso Lucas, Pedro, Jéssica, Diego, Matheus e Iury que tiveram grande importância durante toda minha caminhada.

## RESUMO

A terra como material de construção civil é um dos mais antigos utilizados pelo homem, porém com o tempo e o crescimento da tecnologia, tem sido cada vez menos utilizada. Na atualidade, tal recurso surge como alternativa aos materiais convencionais, visando o menor gasto de energia e bens disponibilizados pelo planeta Terra. Uma forma alternativa para uso deste material são os Blocos de Terra Comprimidos (BTC), que comumente são estabilizados com cimento Portland e/ou cal, o que ainda demanda certa quantidade de energia. Este trabalho apresenta como possibilidade a estabilização da terra através da ativação alcalina do metacaulim, tomando como ativadores o Hidróxido de Sódio e o Silicato de Sódio, sendo estudado o efeito das variações da razão molar, da relação Sílica/Alumina e da temperatura de cura dos blocos. O objetivo é, através dos blocos confeccionados, estudar a resistência à compressão e a sua durabilidade. O resultado obtido, mesmo com as dificuldades encontradas durante a realização da pesquisa, remete que o material pode apresentar um grande potencial para a construção civil, sendo ainda necessárias pesquisas mais avançadas sobre o tema.

**Palavras chaves:** Terra. Metacaulim. Geopolímero. Ativação alcalina.



## **ABSTRACT**

The earth as building material is one of the oldest used by man, however with time and the growth of technology, it has been less widely used. Nowadays, this resource appears as an alternative to conventional materials, aiming at the lowest energy and goods spent by the planet Earth. An alternative way to use this material is the Compressed Earth Blocks, which are usually stabilized with Portland cement and / or lime, which still requires a certain amount of energy. This work presents as a possibility the stabilization of the earth through the alkaline activation of metakaolin, taking as activators the Sodium Hydroxide and Sodium Silicate, and the effect of the variations of the molar ratio of hydroxides and aluminosilicates present in the solution of the ratio Silica / Alumina and the curing temperature of the blocks. The objective is, through the blocks made, to study the resistance of the same, the compression and its durability. The result obtained, even with the difficulties encountered during the research, points out that the material can present a great potential for the civil construction, being still necessary, more advanced research on the subject.

**Keywords:** Earth. Metakaolin. Stabilization. Alkaline activation.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1- Forte de Oman em terra crua. ....   | 17 |
| Figura 2 - Favela em Jacarta, Indonésia. ....   | 18 |
| Figura 3 - Limites de consistência. ....  | 20 |
| Figura 4 - Maneira prática de se determinar a consistência do material em adobes. ....                                  | 20 |
| Figura 5 - Métodos construtivos com terra. a) blocos de terra comprimidos; b) parede monolítica; c) técnica mista. .... | 21 |
| Figura 6 - Prensa para fabricação de BTC's. ....  | 22 |
| Figura 7 - Tipos de polissialatos. ....   | 25 |
| Figura 8 - Esquema de mistura. ....   | 28 |
| Figura 9 - Mistura para BTC's ativados alcalinamente. ....  | 28 |
| Figura 10 - Terra peneirada acondicionada em tambores de 200L. ....   | 31 |
| Figura 11 - Pulverização da solução no material sólido. ....  | 34 |
| Figura 12 - Prensa hidráulica Ecobrava. ....  | 35 |
| Figura 13 - Descarregamento na caixa de prensagem. ....   | 35 |
| Figura 14 – Empreguinação da mistura na prensa. ....  | 36 |
| Figura 15 - Blocos envolvidos por lona plástica. ....   | 36 |
| Figura 16 - Blocos em cura na estufa. ....  | 37 |
| Figura 17 - Blocos estocados após cura em estufa. ....  | 37 |
| Figura 18 - Teste de absorção por capilaridade. ....  | 38 |
| Figura 19 - Blocos capeados para o ensaio de compressão simples. ....   | 38 |

## **LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Classificação das partículas do solo segundo sua granulometria. .... | 19 |
| Tabela 2 - Variáveis do planejamento experimental. ....                         | 33 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 - Composição química da matriz terra.....  | 31 |
| Quadro 2 - Caracterização da terra quanto à granulometria e aos Limites de Attenberg..... | 31 |
| Quadro 3 - Composição química do metacaulim. ....   | 31 |
| Quadro 4 - Características do silicato de sódio. ....                                     | 32 |
| Quadro 5 - Resultados do ensaio de absorção por capilaridade. ....                        | 39 |
| Quadro 6 - Resultados do ensaio de compressão simples. ....                               | 42 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1 - Análise de Pareto para absorção por capilaridade. ....  | 40 |
| Gráfico 2 - Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na absorção por capilaridade para uma razão de Si/Al=3,0.....   | 40 |
| Gráfico 3 - Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na absorção por capilaridade para uma razão de Si/Al=2,75.....  | 41 |
| Gráfico 4 - : Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na absorção por capilaridade para uma razão de Si/Al=2,5..... | 41 |
| Gráfico 5 - Análise de Pareto para ensaio de Compressão simples. ....   | 42 |
| Gráfico 6 - Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na compressão mecânica para uma razão de Si/Al=3,0. ....        | 43 |
| Gráfico 7 - Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na compressão mecânica para uma razão de Si/Al= 2,75. ....      | 43 |
| Gráfico 8 - Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na compressão mecânica para uma razão de Si/Al=2,5. ....        | 44 |

## SUMÁRIO

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                  | 14 |
| 1.1      | JUSTIFICATIVA .....                                      | 14 |
| 1.2      | OBJETIVOS .....  | 15 |
| 1.2.1    | <b>Gerais</b> .....                                      | 15 |
| 1.2.2    | <b>Específicos</b> .....                                 | 16 |
| <b>2</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....                         | 17 |
| 2.1      | CONSTRUÇÕES COM TERRA .....                              | 17 |
| 2.1.1    | <b>Blocos de terra comprimidos (BTC)</b> .....           | 22 |
| 2.2      | GEOPOLÍMEROS .....                                       | 23 |
| 2.2.1    | <b>Influência da matéria-prima e da composição</b> ..... | 25 |
| 2.2.2    | <b>Mistura dos componentes</b> .....                     | 27 |
| 2.2.3    | <b>Temperatura de cura</b> .....                         | 29 |
| 2.3      | ATIVAÇÃO ALCALINA EM BTC'S .....                         | 29 |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b> .....                                 | 30 |
| 3.1      | MATERIAIS .....  | 30 |
| 3.2      | MÉTODOS .....  | 32 |
| 3.2.1    | <b>Planejamento experimental</b> .....                   | 32 |
| 3.2.2    | <b>Produção dos blocos</b> .....                         | 34 |
| 3.2.3    | <b>Processo de cura</b> .....                            | 36 |
| 3.2.4    | <b>Ensaios</b> .....                                     | 37 |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                     | 39 |
| 4.1      | ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....                  | 39 |
| 4.2      | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....                   | 42 |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO</b> .....                                   | 45 |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                 | 46 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O uso da terra crua ressurge como elemento alternativo aos ditos materiais convencionais da sociedade moderna. Sua utilização está pautada no que tange a assuntos ambientais, bem como ao déficit habitacional que assola algumas regiões do planeta.

O homem usufrui desse recurso natural em edificações desde a pré-história, sendo as primeiras datadas há cerca de dez mil anos. Assim, a terra foi utilizada por variadas populações ao longo do tempo em construções de diferentes portes, sendo conhecidas cidades inteiras, desenvolvidas por esse método construtivo, que perduram até hoje, resistindo às intempéries ao longo de sua existência. Contudo, tal matéria-prima foi dando espaço para os ditos materiais convencionais, tendo visibilidade, principalmente em relação à constituição das alvenarias de vedação, os chamados blocos cerâmicos e os blocos de concreto. Todavia, atualmente a terra vem retomando aos poucos seu lugar, tendo em vista seus benefícios de caráter ambiental, econômico e social.

A construção civil e a sua indústria são responsáveis por parcela significativa da poluição mundial. Dessa forma, é notória a necessidade da busca por materiais que além de boas características técnicas tenham atribuídos a si valores ambientais. Nesse contexto, o cimento Portland e produtos cerâmicos exigem altas temperaturas para a sua produção, o que requer elevado consumo de energia, sendo assim lançadores de exarcebadas quantidades de poluentes no meio ambiente. Segundo Torgal et al. (2005), sua produção é responsável pelo lançamento de três bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre. Em contrapartida, a terra crua necessita de baixa utilização de energia para a fabricação de suas mais variadas formas de utilização em edificações.

Além do seu baixo custo energético, vários são os benefícios oriundos da utilização da terra como matéria-prima, dentre eles: grande disponibilidade, garantindo o acesso à maioria dos povos; adequada condutibilidade térmica, restringindo a troca de calor entre os compartimentos; climatização do ambiente, através da interação com a umidade do ar; facilidade de reciclagem, melhorando a sua visão ambiental; fácil transmissão de conhecimentos, não necessitando de mão de obra especializada para a sua produção (OLIVEIRA, 2015).

No que diz respeito ao caráter social, moradias construídas com alvenaria de vedação ou até estrutura com a matriz terra é uma alternativa de baixo custo, quando feita em multirão,

ao problema do déficit habitacional. Tal insuficiência tem sido gerada por vários fatores, dentre eles está a crescente desigualdade de renda, o que leva as famílias de menor aptidão financeira a se abrigarem em locais sub-humanos, gerando um exagerado adensamento populacional. No ano de 2017, o Brasil atingiu o número superlativo de 7,7 milhões de residências necessárias a serem edificadas para que seu povo encontre condições de vida decentes, como também tenha acesso ao direito humano à habitação, segundo pesquisa publicada pela ABRAIN (2019).

São diversos os métodos construtivos que utilizam a terra como elemento principal, cada qual com sua técnica de fabricação, bem como com sua necessidade de composição do material, dentre eles pode-se destacar: taipa de pilão, adobe e Blocos de Terra Comprimidos (BTC).

O presente trabalho busca focalizar na técnica do BTC, que tem como característica relevante o uso de prensa na fabricação de seus blocos, que além de executar a forma do produto, incorpora um aumento de resistência mecânica pela eliminação dos vazios, traduzindo-se na elevação da interação entre as partículas (MOREIRA, 2009).

No emprego da terra como material construtivo, é necessário o uso de estabilizantes, buscando adquirir características exigidas pelas normas vigentes, tais como: resistência mecânica, trabalhabilidade e ductibilidade. Nesse contexto, são utilizados como principais aditivos o cimento Portland e a cal. Tais elementos, ainda que aplicados em pequenas quantidades, atribuem maior gasto energético ao resultado final obtido. Tomando como base a busca por alternativas ao convencional, o presente trabalho estuda a estabilização dos BTC's através da ativação alcalina no metacaulim, contornado pela expectativa de caráter técnico e ambiental.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Gerais

O objetivo geral deste trabalho é estudar os parâmetros da ativação alcalina do metacaulim e os fatores de fabricação e cura que possam influenciar nas propriedades dos BTC's.



### 1.2.2 Específicos

1. Avaliar a influência da razão molar do NaOH e da relação Si/Al, variando os teores de hidróxido de sódio e silicato de sódio, na trabalhabilidade, resistência mecânica e absorção de água em BTC's.
2. Avaliar a influência da temperatura de cura na resistência mecânica e absorção de água em BTC's.
3. Analisar a interação entre as três variáveis citadas anteriormente visando melhores resultados de trabalhabilidade, resistência mecânica e absorção de água em BTC's.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 CONSTRUÇÕES COM TERRA

Desde a pré-história o homem utiliza a terra em seu estado natural, como elemento essencial para construção de suas habitações, esse ato foi oriundo da necessidade dos povos da época em estocar suas colheitas. Assim, há cerca de dez mil anos, com o advento da agricultura, os pré-históricos passaram a se interessar mais pelo conhecimento do solo.

Com o passar do tempo, a evolução do ser humano e as mudanças culturais propuseram novas formas de construções com o material em questão, sendo elas de variados portes e finalidades. Segundo Jalali e Eires (2008), um terço da população mundial vive em edificações à base dessa matéria-prima, que vão desde casas simples a luxuosos castelos. A Figura 1 retrata um exemplo de grandes construções em terra crua.

Figura 1- Forte de Oman em terra crua.



Fonte: Moreira (2008)

Com o advento de materiais industrializados, reduziu-se a utilização da terra como matriz construtiva. Segundo Barbosa, Mattone e Mesbah (2002), dentre os elementos que assumiram o mercado, os principais consumidos são as diversas variações do concreto à base de cimento Portland. Contudo, mesmo com o surgimento de insumos que dão maior interatividade ao mercado, o uso da terra para esse propósito, ao contrário de grande parte do pensamento popular, não se tornou obsoleto e aos poucos está retomando o seu espaço. Tal resgate é apoiado pelo apelo de caráter sustentável, bem como pela necessidade em minimizar o déficit habitacional.

A atual utilização da terra em edificações é caracterizada pela sua dualidade construtiva, podendo ser feita de um modo industrializado, para grandes obras, ou de uma

forma que necessite apenas de uma formação técnica e de pessoas que desejem construir as suas próprias casas, sendo assim observado o seu caráter social. Segundo Joan Clos, na Assembleia Geral da Onu (2017), no ano de 2017, cerca de 1,6 bilhões de pessoas viviam em moradias inadequadas, das quais 1 bilhão viviam em comunidades subnormais ou assentamentos informais. Assim, o material em estudo aparece como um possível combatente à carência habitacional existente representada na Figura 2.

Figura 2 -Favela em Jacarta, Indonésia.



Fonte: ONU Habitat (2017)

No que se apresenta um proveito ambiental, métodos que usam a terra como matriz construtiva utilizam de menor quantidade de energia, assim ocorre uma geração mínima de poluição, bem como tem a vantagem de fácil reincorporação no ambiente. Segundo Barbosa e Ghavami (2007), além dos benefícios de caráter sustentável, podem ser citados, principalmente: a grande disponibilidade; as excelentes propriedades térmicas; o controle da umidade do ambiente e a facilidade de disseminação da técnica de fabricação.

Na condição térmica, componentes à base da matriz terra apresentam um desempenho superior relativo aos outros materiais. Em pesquisa realizada por Garzon (2002), foi observado que em uma placa, a carga térmica que atravessa uma alvenaria de espessura 20 centímetros e rebocada nas duas faces é três vezes menor ao utilizar preenchimento em blocos de solo-cimento que em tijolos cerâmicos vazados, sendo considerado o mesmo tempo em ambos casos.

Com todos esses benefícios, é preciso conhecer o material que será empregado e buscar características que sejam adequadas a tal método construtivo; dentre elas se destacam a

composição: a presença de argila do tipo montmorilonita é um inconveniente, por não ser estável à água, é considerada altamente expansiva; e granulometria do solo: influência direta sobre o comportamento mecânico. Segundo Barbosa, Mattone e Mesbah (2002), é desejável que a terra tenha os seguintes teores: argila - 10% a 20%; silte – 10% a 20%; e areia – 50% a 70%.

Segundo Barbosa e Ghavami (2007), pedregulho, areia e silte são quimicamente inertes. Diante disso, a fração arenosa nos blocos prensados é indispensável para compor a estrutura resistente aos esforços mecânicos; o silte é responsável pela diminuição do atrito interno dos grãos e por seu rearranjo, tendo em vista a sua capacidade de absorção de água; a argila além de desenvolver plasticidade quando em contato com água é quimicamente ativa, reagindo com a cal e com os elementos cimentícios. Assim, a fração argilosa se comporta como um ligante, sendo importante para dar a requerida coesão à areia úmida. Na Tabela 1, é exposta a classificação de tamanho das partículas em normas de diferentes países.

Tabela 1 - Classificação das partículas do solo segundo sua granulometria.

| <b>Partícula</b> | <b>Brasil<br/>(ABNT 1995)</b> | <b>USA<br/>(AASHO)</b> | <b>França</b> | <b>Inglaterra</b> |
|------------------|-------------------------------|------------------------|---------------|-------------------|
| Pedregulho       | 2 a 60 mm                     | 2 a 50 mm              | 2 a 20 mm     | 2 a 60 mm         |
| Areia            | 60µm a 2 mm                   | 75 µm a 2 mm           | 20 µm a 2 mm  | 60 µm a 2 mm      |
| Silte            | 2 a 60 µm                     | 5 a 75 µm              | 2 a 20 µm     | 2 a 60 µm         |
| Argila           | < 2 µm                        | < 5 µm                 | < 2 µm        | < 2 µm            |

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

Além das características prévias já citadas, é importante atentar ao controle da quantidade de água no material. Segundo Neves et al. (2010), três aspectos devem ser observados: umidade ótima de compactação, a qual tem influência sobre a resistência do solo, relevante em métodos que utilizam do apiloamento, como é o caso da taipa de pilão; consistência do solo, que segundo o grau de umidade pode ser classificado como sólido, plástico ou líquido, depende, geralmente, do tipo e da quantidade de argila contida no solo; e retração, que pode ser a causa de fatores patológicos pela infiltração de água através das fissuras causadas pelos movimentos observados quando há variação de umidade, dependente também das características da argila presente no material. Tais limites são representados na Figura 3.

Figura 3 - Limites de consistência.



Fonte: Neves (2010)

Todos esses atributos podem ser verificados em laboratório, e alguns deles por testes práticos. Existe uma técnica de observação da umidade de forma analítica do material após lançamento de parte dele ao chão, que indica se a amostra está na consistência ideal para a realização da produção, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Maneira prática de se determinar a consistência do material em adobes.



Fonte: Barbosa e Ghavami (2007)

São diversos os processos de construção em terra em seu estado natural, porém são considerados três grupos: alvenaria, monolítico e misto. No primeiro, blocos ou tijolos são arranjadosse unidos por outro elemento, a argamassa, que é o caso do adobe e do BTC; o segundo consiste do apiloamento de solo levemente umedecido entre duas formas de madeira *in loco*; o preenchimento ocorre à medida que o material é compactado, assim é produzida uma parede em peça única de alta durabilidade; dessa classificação faz parte a taipa de pilão; no terceiro a matriz serve apenas de enchimento, não realizando função estrutural, essa geralmente sendo exercida por madeira ou bambu, no Brasil é conhecida como taipa de mão, ou simplesmente, taipa (OLIVEIRA, 2015).

Figura 5 - Métodos construtivos com terra. a) blocos de terra comprimidos; b) parede monolítica; c) técnica mista.



- a -

- b -

- c -

Fonte: Barbosa e Ghavami (2007)

De qualquer maneira, independente da técnica empregada, a construção com terra requer o emprego junto a outro material para se fazer durável. Segundo Moreira (2008), os principais objetivos da estabilização da matriz é a elevação da resistência mecânica, o aumento da coesão e da resistência à erosão e a redução da porosidade e da variação de volume.

Para o mesmo autor, existem três métodos de estabilização da terra, são eles: mecânica, realizada através da compactação mecânica ou da adição de fibras; física, dada pela alteração da textura da terra através do controle da composição e da granulometria das partículas, bem como por tratamentos térmicos ou elétricos; e química, pela modificação das características da terra através da adição de produtos que geram reações químicas necessárias.

Dentre as maneiras de estabilizar a terra quimicamente, a mais usual é a que utiliza a adição do cimento Portland nos chamados blocos de solo-cimento. Segundo Texeira (2017), essa técnica ocorre ao aliar as reações físico-químicas da hidratação do cimento com a compactação do material. Com elevada demanda de tal artifício, as condições para sua produção em prensas manuais chegaram a ser normatizadas. Segundo a NBR ABNT 10832 (1989), estes são os critérios de escolha do solo para a fabricação de blocos:

|  |           |
|--|-----------|
| Percentual que passa na peneira 4,8 mm (n° 4) .....  | 100%      |
| Percentual passante na peneira 0,075mm (n° 200)..... | 10% a 50% |
| Limite de Liquidez .....                             | ≤ 40%     |
| Indice de plasticidade .....                         | ≤ 18%     |

Tendo em vista as limitações do cimento Portland, se faz necessária a busca por elementos alternativos à estabilização da matriz terra. Nesse contexto, o uso de ligantes obtidos através da ativação alcalina de materiais tipo aluminossilicatos vem ganhando espaço; dentre eles estão a escória de alto-forno e o metacaulim. Segundo Torgal e Jalali (2010), estes apresentam melhores resistência mecânica, térmica e ao meio ácido, sendo assim

considerados mais duráveis que aqueles; além disso, são responsáveis por menor emissão de dióxido de carbono para a atmosfera.

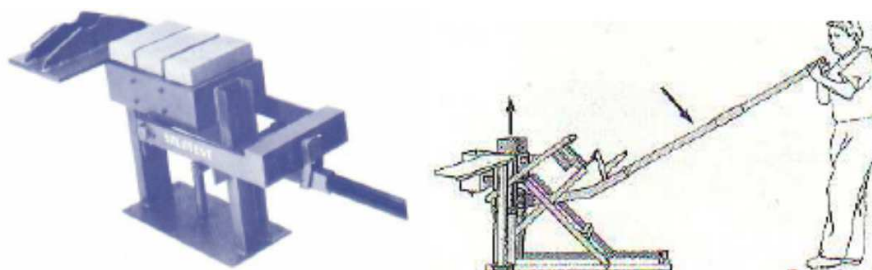
### 2.1.1 Blocos de terra comprimidos (BTC)

Se construções à base de terra são datadas da pré-história, pode-se dizer que a técnica de tijolos prensados é moderna. Tal método surgiu nos anos 50 do século XX com o desenvolvimento da primeira prensa manual pelo pesquisador colombiano G. Ramirez, batizada de CINVA-RAM. Segundo Barbosa e Ghavami (2007), atualmente existem variadas formas de prensas hidráulicas que podem produzir tijolos de resistência que chegam aos 8 MPa. Assim, a NBR 8491 (ABNT, 2012) normatiza para blocos de solo-cimento aos sete dias, como resistência média mínima, uma tensão de 2 MPa, e nunca inferior a 1,7 MPa por unidade.

O BTC necessita ser estabilizado. Sua compactação gera uma estabilidade física pela acomodação das partículas, porém não é suficiente. Segundo Neves et al. (2010), geralmente utiliza-se da estabilização granulométrica, pela mistura de proporções de diferentes solos, e/ou química através principalmente do cimento ou da cal para a melhoria das características de resistência à compressão e à ação abrasiva dos ventos, impermeabilização e durabilidade.

Dentre as técnicas construtivas já citadas, o BTC se destaca como uma solução prática. Em tal processo, a terra umedecida é posta em um molde de prensa e compactada, sendo em poucos instantes desmoldada; a cura ocorre em poucos dias. Segundo Teixeira (2017), o processo gera blocos com regularidade dimensional, além de ter o benefício de gerar poucos resíduos.

Figura 6 - Prensa para fabricação de BTC's.



Fonte: Barbosa e Ghavami (2007)

Segundo Neves et al. (2010), o BTC pode ser usado tanto como alvenaria de vedação como alvenaria estrutural, desde que sejam atendidas as exigências de projeto. As paredes podem ser revestidas ou aparentes (quando não exposta à chuva). Além disso, a



técnica construtiva de alvenaria apresenta as mais variadas vantagens: fácil fabricação; regularidade volumétrica e controle das resistências.

Segundo Borges e Colombo (2009), além das vantagens citadas, outras são evidenciadas como: a alta produtividade, o baixo consumo de água e a área de produção reduzida. A menor umidade é um benefício, pois resulta em um menor índice de retração, por outro lado, faz com que seja mais bem elaborado o amassamento do material na busca por se obter uma maior homogeneidade.

## 2.2 GEOPOLÍMEROS

Os geopolímeros são sintetizados a partir de materiais aluminossilicatos em soluções alcalinas, sendo assim obtidos ligantes alcalinos. Segundo Jalali e Torgal (2010), são elementos que são conhecidos por sua menor emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono. Para os mesmos autores, a elevada resistência a ações mecânicas, térmicas e em meios ácidos são características que confirmam sua maior durabilidade em relação ao cimento Portland.

Na busca pelo conhecimento do novo material, que em muito se assemelha a elementos encontrados na natureza, vários pesquisadores buscaram entender o processo dos ligantes obtidos por ativação alcalina. Inicialmente, Purdon (1940) utilizou escórias, sendo essas ativadas com hidróxido de sódio. Para o autor existe um processo que pode ser descrito em duas etapas: liberação de sílica, alumina e hidróxido de cálcio ocasionada pela dissolução do hidróxido de sódio, e uma segunda etapa que é relacionada à formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratado por meio da regeneração dos compostos que foram dissolvidos. Tal investigação levou a concluir que o hidróxido funciona como catalisador.

Diante da curiosidade de entender a durabilidade de grandes obras como o Coliseu de Roma e outros templos na cidade, além das pirâmides egípcias, o pesquisador Glukhovsky (1959) analisou os ligantes de tais construções históricas, tendo como conclusão que o material é composto por aluminossilicatos cálcicos hidratados, semelhantes aos que ocorrem no cimento Portland moderno, e fases cristalinas do tipo zeólita analcite, a qual é uma rocha natural, que seria a responsável pela longevidade dos templos.

Diante disso, Glukhavsky nomeou um novo material ao qual chamou de “solo-cimento”. A primeira nomenclatura é referente às características naturais do material, e a segunda é relacionado ao poder de ligante que o mesmo tinha. O “solo-cimento” era obtido pela mistura de aluminossilicatos minerais moídos e escórias industriais, que são ricas em



álcalis.

O mercado, como um todo, busca por produtos que alinhe características físico-químicas e custos. Nesse contexto, os concretos de cimento Portland são altamente competitivos pelo seu baixo investimento. Em contrapartida, levando em conta o conceito de mercado de emissões de carbono, a elevada geração de CO<sub>2</sub> leva à redução da competitividade de tal material. Segundo Davitovits (1990, 1999), a ativação alcalina gera 0,184 toneladas do poluente por tonelada de ligante, obtendo uma melhoria de aproximadamente 370% em relação à produção daquele material já citado.

Grande parcela das pesquisas relacionadas à ativação alcalina toma como precursor as escórias de alto-forno. Segundo Torgal e Jalali (2009), essas são subprodutos da produção do ferro gusa, o qual tem em sua composição abundância de cálcio, provenientes do carbonato de cálcio usado como fundente.

Em continuidade às pesquisas anteriores, Glukhovsky (1981) classificou os ativadores alcalinos em seis grupos, onde a letra M caracteriza um íon alcalino:

- 1) Álcalis cáusticos, MOH;
- 2) Sais ácidos fracos, M<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, M<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, M<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, MF;
- 3) Silicatos, M<sub>2</sub>O.nSiO<sub>3</sub>;
- 4) Aluminatos, M<sub>2</sub>O.nAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- 5) Aluminosilicatos, M<sub>2</sub>O.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.(2-6)SiO<sub>2</sub>;
- 6) Sais ácidos fortes, M<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

As pesquisas sobre ativação alcalina tomaram um novo rumo quando Davitovits(1979) estudou e desenvolveu patentes referentes à ativação alcalina do caulim e do metacaulim, que seriam isentos ou com baixa quantidade e cálcio em sua composição, tendo criado o termo “geopolímero”.

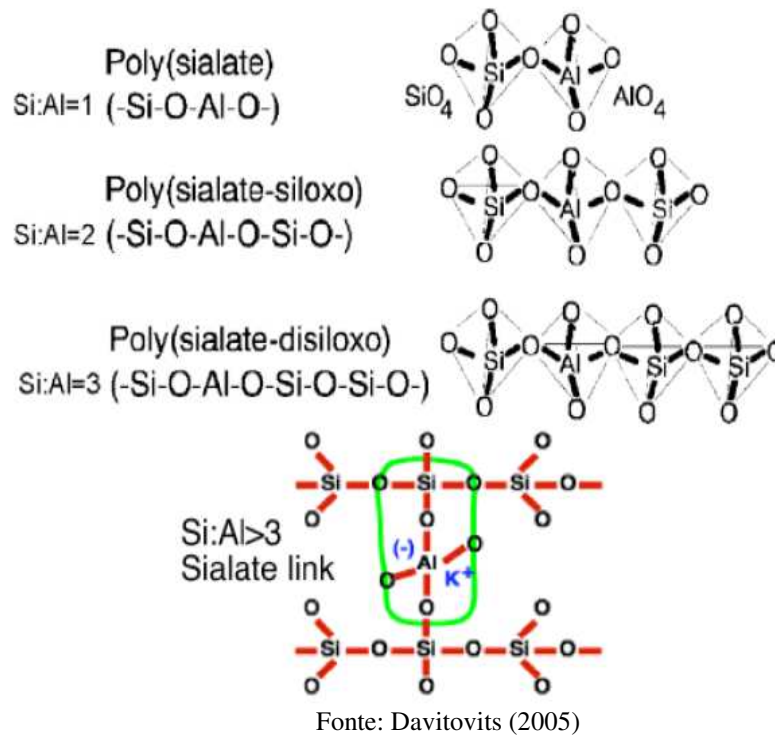
Para Davitovits (1979), que retornou ao foco das construções romanas e egípcias, em tais obras não se utilizou rochas naturais, mas sim ligantes produzidos pela ação humana. Tal hipótese foi baseada em estudos químicos e mineralógicos, com amostras retiradas das pirâmides, os quais constataram que os blocos não são compostos por pedras da natureza, mas sim por ligantes obtidos a partir da mistura de calcário com NaOH, este sendo produzido pela mistura de cal, carbonato de sódio e água.

Os caulins são aluminossilicatos naturais provenientes de alterações químicas dos feldspatos, os mesmos para melhores resultados sofrem um tratamento térmico chamado calcinação. Segundo Pinto (2006), tal processo tem em vista a desidroxilação e alteração da coordenação do alumínio e do oxigênio; com isso o material perde grande parte de sua

estrutura cristalina, gerando um estado quase amorfo, conferindo-lhe uma elevada capacidade para combinar-se quimicamente. O autor confirma em tal pesquisa a pequena quantidade de cálcio na composição dos caulins, fugindo assim à linha tradicional de ligantes em que tal elemento tem um papel predominante, reafirmando com isso os resultados de Davitovits.

Para designar quimicamente uma nomenclatura para os geopolímeros, o pesquisador Davitovits(1976) sugeriu o termo Polisialatos, que pode ser entendido como uma abreviação para a cadeia de óxido aluminossilicatado, o qual foi estabelecido pela IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) em encontro realizado em Estocolmo em 1976. Segundo Pinto (2006), a rede é composta ânions tetraédricos de  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  e  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  ligados alternadamente pelo compartilhamento de átomos de oxigênio dos vértices.

Figura 7 - Tipos de polysialatos.

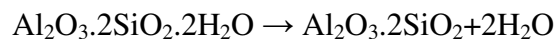


### 2.2.1 Influência da matéria-prima e da composição

Pesquisas apontam que teoricamente qualquer material que tenha composição de sílica e alumina pode ser ativado alcalinamente, os mais estudados são as escórias de alto-forno, as cinzas volantes e os metacaulins, bem como as misturas desses elementos. Xu e Deventer (2000) estudaram 16 minerais naturais aluminossilicatados; todos apresentaram alguma reatividade, porém obteve-se como melhor resultado referente à resistência máxima, a ativação da Stilbite com Hidróxido de Potássio.

Tendo em vista os materiais com maior disponibilidade, segundo Pinto (2004), é necessário um prévio tratamento térmico dos aluminossilicatos, o qual gera uma perda de água e alteração na coordenação do íon alumínio com o oxigênio. Como consequência, tem-se uma modificação da estrutura cristalina, tornando-se praticamente amorfa. Dessa forma, de acordo com o autor, as escórias de alto-forno, as cinzas volantes, as cinzas vulcânicas e o pó de produtos cerâmicos (telha ou tijolo) são potenciais precursores de partida para a ativação alcalina.

Para se obter uma maior reatividade do caulim, é necessário um tratamento térmico que modifique as propriedades estruturantes da caulinita. Segundo Pinto (2004), é preciso aquecer o caulim entre 500 e 900°C durante um período suficientemente longo. Em tal processo ocorre a desidroxilação, perda de hidroxilas que como resultado tem a liberação de molécula de água, e a modificação na coordenação do alumínio. A reação básica é a seguinte:



Para alguns autores as temperaturas de calcinação da caulinita variam, mesmo que pouco, dos valores apresentados por Pinto. Segundo Li et al. (2010), o metacaulim é um material pozolânico cuja ativação térmica ocorre em exposição a temperaturas de 650°C a 800°C. De acordo com Davidovits (1999), tal processo ocorre acima de 600°C e abaixo de 950°C. O autor explica que até 500°C a reação é reversível, isto é, o caulim pode se hidratar novamente; até os 600 °C, devido a um déficit de coordenação do alumínio, a geopolimerização não ocorre de forma satisfatória e após os 950°C verificam-se fases de cristalização de alta temperatura.

Dessa forma, a resistência dos ligantes ativados alcalinamente é altamente dependente do material de partida, obtendo-se resistências menores em aluminossilicatos em estado natural e maiores quando esses recebem um tratamento térmico adequado. Segundo Torgal e Jalali (2009), a reatividade do material está diretamente ligada a não existência de elevado grau de cristalinidade da sílica e alumina, por isso ligada à estrutura interna.

Segundo Pinto (2004), os ativadores mais utilizados na obtenção de geopolímeros são o hidróxido de sódio e potássio, o carbonato de sódio, os silicatos de sódio e potássio e, sobretudo quando há a mistura desses compostos alcalinos. Para o autor, é importante verificar o tipo, a dosagem e concentração do ativador em função do precursor, pois sua composição química e finura estão relacionadas à reação alcalina.

De acordo com Palomo et al. (1999), o ativador alcalino desempenha papel crucial no processo de ativação, desenvolvendo a reação de forma mais rápida e satisfatória quando se é utilizado silicatos solúveis de sódio ou potássio, em vez de se utilizar um ativador simples,

apenas com hidróxido de sódio.

Davidovits (1982) sugere, com base em seu estudo na formação de minerais naturais, limites e razões molares de composição que otimizem os resultados de durabilidade e resistência dos geopolímeros (onde está Na, pode ser também K ou Li) :

1. No ativador –  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,85$
2. No metacaulim –  $0,20 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0,48$   
 $3,30 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4,50$   
 $0,80 < \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,60$
3. Entre o ativador e o metacaulim –  $10 < \text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 25$

Segundo Pinto (2006), os materiais naturais não têm uma composição química que garanta os limites sugeridos por Davidovits, em geral, eles apresentam valores com muita variação na quantidade de sílica ou alumina; assim, são necessárias correções que são normalmente realizadas com adições. Dessa forma, a correção do óxido de sódio se faz importante pela sua característica de deliquescência.

A relação Si/Al é um dos fatores mais estudados por pesquisadores que se dedicam ao tema. Para Duxon et al.(2005), o aumento de tal relação está diretamente relacionado à produção de produtos mais homogêneos e adensados. Nesse sentido, Davidovits (1999) estudou a relação adequada para menor custo na construção civil. Segundo ele, os materiais ativados baseados em metacaulim, escórias granuladas ou cinzas volantes são adequados para tal área, isso porque podem ser elaborados até mesmo com resíduos do próprio meio e da mineração, manuseando relações atômicas Si/Al que variam de 1 a 3.

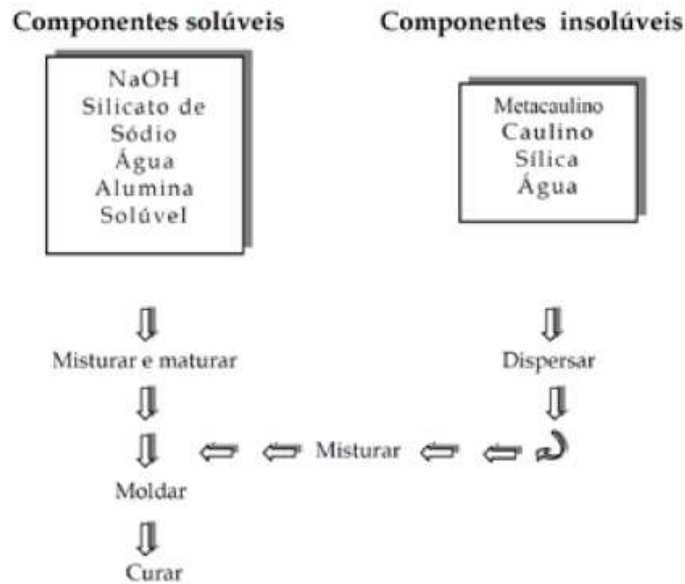
### **2.2.2 Mistura dos componentes**

Uma questão que pode interferir nos resultados obtidos é o processo como é feita a mistura dos reagentes. Segundo Palomo et al. (1999), é ideal que a ativação alcalina se desenvolva em duas fases, sendo essas envolvidas no processo de dissolução dos aluminossilicatos existentes nos materiais usados, a primeira é chamada de gelificação, ocorrendo logo em seguida o processo de polimerização. Palomo e Glasser (1982) concluem que a separação nítida dos dois estágios facilita e potencia o ganho de resistência com base em uma definição mais clara e completa dos pontos de nucleação.

Tendo em vista tal processo, se faz importante a ordem em que cada elemento é aplicado na mistura. De acordo com os mesmos autores, é importante em um primeiro momento misturar e deixar maturar os componentes solúveis, realizando posteriormente em

uma fase mais dispersa, a adição de produtos que são normalmente insolúveis. Para Pinto (2006), não é tão simples alcançar tais objetivos, pois seria necessária a separação da sílica e da alumina as quais estão normalmente contidas no material pozolânico. A Figura 8 representa o esquema dito:

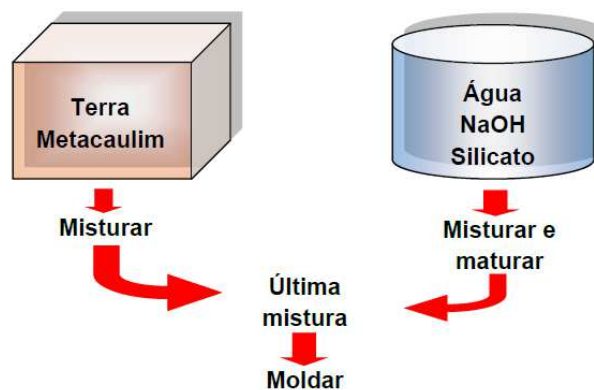
Figura 8 - Esquema de mistura.



Fonte: Palomo e Glasser (1982)

Também para Pinto et al. (1982), na ativação alcalina do metacaulim, a ordem ideal de mistura se obtém quando os sólidos são misturados previamente à parte, e só após são somados aos ativadores. Segundo Xu et al. (2003), a água é um dos agentes e um dos produtos de reação no processo de geopolimerização, sendo assim não pode ser considerada apenas como elemento de amassamento. Com tal ocorrência em vista, Teixeira (2017) propõe o seguinte esquema de mistura para ativação alcalina do metacaulim em BTC's, conforme apresentado na Figura 9:

Figura 9 - Mistura para BTC's ativados alcalinamente.



Fonte: Teixeira (2017)

### 2.2.3 Temperatura de cura

A cura, ou o endurecimento, é um fator de elevada importância na elaboração de ligantes à base da ativação alcalina Segundo Severo et al. (2013), a variabilidade dos resultados pode ser ampla, dependente principalmente do tipo de precursor, da temperatura e do tempo em que os materiais são expostos.

Pinto et al. (2002) observaram a exposição ao ambiente, concluindo que a cura ocorrendo em meio saturado reduz a resistência e, além disso, indicam uma perda de água por evaporação, necessitando assim que os produtos gerados sejam cobertos. Em mesma pesquisa, observou-se o aparecimento de eflorescência nas amostras não protegidas.

Segundo Palomo et al. (1999), o aumento de temperatura e seu tempo de exposição proporcionam uma elevação de resistência mecânica dos geopolímeros à compressão simples. Em pesquisa realizada em combinações de metacaulim e cinza volante, Jaarsveld et al. (2002) confirmam uma elevação de resistência em curas até 70°C; em contrapartida, ocorreu a sua perda em exposições prolongadas à superioridade térmica. Na mesma vertente, Hardjito et al. (2004) não observaram o mesmo ganho em temperaturas acima de 60°C.

Villa et al. (2010) analisaram a influência das razões molares, da temperatura e do período de exposição de cura, em geopolímeros obtidos a partir da ativação alcalina de zeólitas naturais com soluções de silicato e hidróxido de sódio. Os autores obtiveram como resultado que as amostras curadas a 40°C apresentaram maior resistência à compressão, principalmente ao longo do tempo de cura. Em contrapartida, os materiais expostos entre 60° e 80° apresentaram uma elevação nas primeiras idades, porém não se desenvolvendo posteriormente.

## 2.3 ATIVAÇÃO ALCALINA EM BTC'S

Como visto, existem várias pesquisas relacionadas tanto ao uso dos BTC's, como também, ao conhecimento das propriedades da ativação alcalina. Em contrapartida, a utilização de tais blocos tendo como ligante os geopolímeros ainda é um estudo pouco explorado. Teixeira (2017) iniciou a busca por conhecimento de tal material, obtendo como resultado boas influências da temperatura de cura, como também o nível de concentração do NaOH. O autor sugeriu continuidade na pesquisa.

### 3 METODOLOGIA

A seguir será exposto o roteiro realizado para a execução da presente pesquisa:

- 1) Caracterização do metacaulim e da terra através dos seguintes ensaios: Granulometria a laser, Fluorescência de Raios - X (FRX) e Difração de Raios - X (DRX);
- 2) A partir dos resultados obtidos no item 1, foram definidos os traços e suas razões molares referentes;
- 3) Definição da quantidade de blocos produzidos por traço referentes à quantidade de ensaios necessários, buscando dados significativos na pesquisa;
- 4) Produção dos blocos, com mistura sendo realizada em betoneira de 400 l, com composições e quantidades definidas nos itens 2 e 3, respectivamente;
- 5) Cura do material dividido em duas fases: inicialmente em ambiente aberto, sendo os blocos cobertos por lona, logo após levados à cura em estufa;
- 6) Ensaios de resistência à compressão simples e de absorção por capilaridade dos BTC's.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a pesquisa foram:

- Terra oriunda do município de Santa Rita – PB;
- Metacaulim Rosa fabricado pela Industria BBM Minérios;
- Hidróxido de Sódio com índice de pureza de 98%, fabricado na Indústria Química Bandeirante Brazmo;
- Silicato de Sódio obtido na indústria Pernambuco Química, em Recife - PE.

Em laboratório, a terra foi condicionada a um destorroamento e peneiramento (malha 4 mm) com o intuito de se obter um material qualificado para a prensagem dos blocos. Após peneirada, a terra foi exposta ao Sol, para eliminação da sua umidade. Ao fim, ocorreu o acondicionamento em tambores de 200l, conforme se observa na Figura 10.

Figura 10 - Terra peneirada acondicionada em tambores de 200l.



Como mencionado anteriormente, a matriz terra foi caracterizada por variadas técnicas; a partir disso, pôde-se definir a sua composição química, bem como, a granulometria e os Limites de Attenberg do material. Tais características são apresentadas, respectivamente, nos Quadros 1 e 2.

Quadro 1- Composição química da matriz terra.

| Óxidos | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | ZrO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | Outros |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|-----------------|--------|
| %      | 58,82            | 26,94                          | 9,43                           | 2,79             | 0,20             | 0,18            | 0,64   |

Quadro 2 - Caracterização da terra quanto à granulometria e aos Limites de Attenberg.

| <b>GRANULOMETRIA DO SOLO - in natura (%)</b> |      |
|--|------|
| Areia (0,06 mm a 2,0 mm)                     | 60   |
| Silte (0,002 mm a 0,06 mm)                   | 27   |
| Argila (< 0,002 mm)                          | 13   |
| <b>LIMITES DE ATTERBERG (%)</b>              |      |
| Limite de liquidez                           | 28,2 |
| Limite de plasticidade                       | 19,7 |
| Índice de plasticidade                       | 11,3 |

O metacaulim também teve sua composição química caracterizada com as técnicas FRX e DRX. Tais características estão expostas no Quadro 3:

Quadro 3 - Composição química do metacaulim.

| Óxidos | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | MgO  | Outros |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|------|--------|
| %      | 51,03            | 34,70                          | 10,30                          | 2,48             | 0,56             | 0,56 | 0,37   |



As características do Silicato de sódio foram disponibilizadas pela fabricante do produto, a Pernambuco Química em Recife –PE, que estão dispostas no Quadro 4:

Quadro 4 - Características do silicato de sódio.

|  |   |
|--|---|
| Fórmula  | $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ |
| Aspecto  | Líquido viscoso levemente turvo           |
| Cor  | Incolor a levemente amarelado             |
| Alcalinidade com $\text{Na}_2\text{O}$ (em % ) | 16,0% - 19,0%                             |
| Sílica com $\text{SiO}_2$ ( em % )             | 33,0% - 38,0%                             |
| Solubilidade                                   | Solúvel em água                           |
| Relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$     | 1,74 – 2,37                               |
| Ph   | 12,0 – 14,0 ( solução a 1% )              |
| Densidade (g/ml) a 20°C                        | 1,63 g/ml – 1,67 g/ml                     |
| Viscosidade (Brookfield) a 20°C                | >5000 cps                                 |
| Ferro (ppm)                                    | <100                                      |
| Sólidos Totais (em %)                          | 49,00% - 57,00%                           |

Fonte: Pernambuco Química, 2016

## 3.2 MÉTODOS

A análise da terra, através de sua composição química, revelou que essa se tratava de um material com alguma reatividade, porém os respectivos níveis foram desconsiderados. Assim, todos os cálculos provieram da composição do metacaulim. Em cada mistura, fixou-se a quantidade de oito por cento (8%), fração estudada por Teixeira (2017), do precursor em relação à quantidade da matriz, que foi de dezoito quilos (18 Kg), referentes à confecção de 6 blocos, por traço, e como ativadores alcalinos utilizou-se o Hidróxido de Sódio (NaOH) e o Silicato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). O tempo de cura foi constante para todas as amostras, variando apenas a sua temperatura em estufa. Os teores dos compostos, bem como as temperaturas de cura foram definidas em planejamento estatístico experimental com três variáveis. Determinou-se oito experimentos distintos e mais dois pontos centrais.

### 3.2.1 Planejamento experimental

Tomou-se como variáveis a razão molar, a relação Si/Al e a temperatura de cura. Para cada uma delas, buscou-se basear em dados observados na literatura de construções com terra e da ativação alcalina.

A primeira é dependente da quantidade de água adicionada ao amassamento. Segundo Teixeira (2017), a concentração em um mol por litro de NaOH equivale a 40 gramas de massa

molar desse soluto. Assim, buscou-se variações próximas à estudada por Vassalo (2013). Para a atual pesquisa, utilizou-se como base as seguintes razões molares: 10; 12,5 e 15.

A umidade ótima para moldagem do material do BTC é variável; assim, durante o desenvolver do amassamento era percebido o seu ponto ideal, muitas vezes se tornava necessária a adição de água extra, não variando a quantidade de NaOH. Dessa forma, mesmo tendo valores exatos de razão molar durante a formulação da solução, muitas vezes essa era modificada por tal acréscimo.

Como já citado, os valores referentes a Si/Al da matriz terra foram desprezados, tomando-se como base a relação contida no metacaulim, sendo essa igual a 2,5, a qual foi calculada através dos teores de silício e alumínio contidos no resultado do FRX anteriormente expostos na Quadro 3. Para a variação desse valor, buscou-se a adição do Silicato de sódio, que além de agir como ativador pode fornecer silício à solução. Dessa forma, optou-se por estudar as seguintes frações Si/Al: 2,5; 2,75 e 3,0.

A variável temperatura de cura foi buscada na literatura, fixando o menor valor próximo ao que comumente se é estudado, sendo igual a 60°C. Atentou-se também a busca por extrapolar o máximo recomendado. Assim os pontos estudados foram: 60°C, 80°C e 100°C.

Diante do exposto, tornou-se possível estudar as três variáveis nos pontos demonstrados na tabela 6:

Tabela 2 - Variáveis do planejamento experimental.

|                                 | <b>-1</b> | <b>0</b> | <b>1</b> |
|---------------------------------|-----------|----------|----------|
| <b>Razão molar</b>              | 10        | 12,5     | 15       |
| <b>Si/Al</b>                    | 2,5       | 2,75     | 3,0      |
| <b>Temperatura de cura (°C)</b> | 60        | 80       | 100      |

Dessa forma, foram realizados os seguintes traços:

- T1 e T2 com R.M.=15, Si/Al=3,0; sendo T1 curado com T=100° e T2 com T=60°;
- T3 e T4 com R.M.=10, Si/Al=3,0; sendo T3 curado com T=100° e T4 com T=60°;
- T5 e T6 com R.M.=15, Si/Al=2,5; sendo T5 curado com T=100° e T6 com T=60°;
- T7 e T8 com R.M.=10, Si/Al=2,5; sendo T7 curado com T=100° e T8 com T=60° ;
- Para ponto central, T9 e T10, R.M.=12,5, Si/Al=2,75; e T=80° para ambos.

### 3.2.2 Produção dos blocos

Para a fabricação de blocos de terra compactados normalmente é utilizada a técnica de amassamento manual, a qual é realizada a mistura dos materiais no chão com trabalhadores utilizando pás ou enxadas. Segundo Texeira (2017) esse método não é eficaz para os BTC's ativados alcalinamente; tal negativa está diretamente relacionada à rápida pega dos geopolímeros. Dessa forma, na presente pesquisa utilizou-se de betoneira de 400 l com o intuito de reduzir o tempo do processo.

O processo de mistura foi dividido em três etapas: a primeira estava relacionada à fabricação da solução, sendo realizada em recipientes com volume de 20 litros, obtendo composições com frações, anteriormente calculadas, de água, de hidróxido de sódio e de silicato de sódio; posteriormente buscou-se um agrupamento do metacaulim e da matriz terra com o uso da betoneira; por fim, com a betoneira em movimento, adicionou-se a solução ao composto sólido obtido, por meio da técnica de pulverização, buscando maior homogeneidade da umidade. A Figura 11 retrata o descrito anteriormente.

Figura 11 - Pulverização da solução no material sólido.



Após misturado, o material era submetido à prensagem em prensa hidráulica, fabricado pela Ecobrava, como pode ser vista na Figura 12, a qual tem capacidade para a produção de um bloco por vez.

Figura 12 - Prensa hidráulica Ecobrava.



Fonte: Teixeira (2017)

Tal equipamento dispõe de um depósito superior, acoplado à prensa, com o intuito de recebimento do material que será moldado, já na quantidade adequada.

Com o decorrer da fabricação, observou-se que o material advindo da betoneira não era o ideal para o lançamento no depósito superior. Tal problema estava relacionado com a baixa trabalhabilidade do material que tinha como principais responsáveis a pega acelerada do ligante e a umidade acumulada em algumas pelotas. Assim, optou-se pelo descarregamento da mistura direto na caixa de prensa, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Descarregamento na caixa de prensagem.



A umidade acumulada acarretou em uma dificuldade na retirada dos blocos, pois essa gerou impregnação do material nas partes metálicas da prensa, o que foi tratado como uma negativa pois tornou-se necessária a pausa da fabricação para a limpeza da forma. Assim,

optou-se pela aplicação de óleo diesel com função de desmoldante. A Figura 14 retrata tal processo.

Figura 14–Impregnaçãoda mistura na prensa.



### 3.2.3 Processo de cura

Com essas técnicas citadas, todos os blocos foram produzidos, sendo seis por traço. Após desmolde, os BTC's eram colocados em descanso por 24 horas, envoltos por lona plástica, como pode ser observado na Figura 15, com o intuito de evitar perda de água rápida para o meio ambiente e evitar eflorescências.

Figura 15 - Blocos envolvidos por lona plástica.



Após período de descanso, os blocos foram levados à estufa, como apresentado na Figura 16, para segundo momento de cura com duração de 5 horas, pois segundo Pinto (2004), períodos muito longos não oferecem benefícios relevantes aos materiais ativados alcalinamente. As temperaturas para cada traço foram anteriormente escolhidas em planejamento experimental.

Figura 16 - Blocos em cura na estufa.



Com o fim da cura em estufa, os blocos foram acondicionados ao ar livre, como representado na Figura 17, aguardando 7 dias para que se pudesse realizar os ensaios de compressão mecânica simples e de absorção por capilaridade.

Figura 17 - Blocos estocados após cura em estufa.



### 3.2.4 Ensaios

Para o teste de absorção por capilaridade foram utilizados três blocos por traço, cada um desses foi colocado em contato com uma lâmina d'água de aproximadamente 5 mm, como representado na Figura 18, por um tempo de imersão de 1 hora. Em tal ensaio mediu-se a face em contato com a água, bem como a massa dos BTC's antes e depois do processo.



Figura 18 - Teste de absorção por capilaridade.

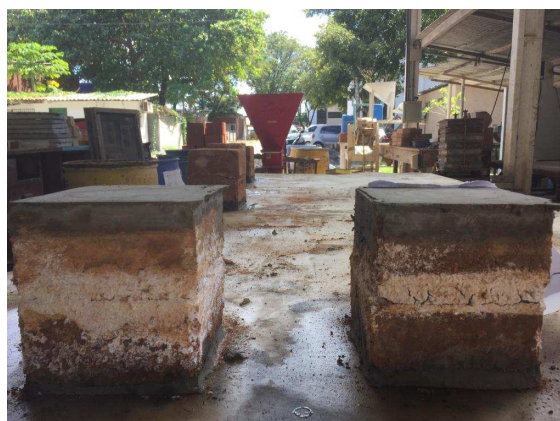


A metodologia utilizada para tal teste teve como base os procedimentos descritos no manual Compressed Earth Blocks – Testing Procedures. Utilizou-se o tempo de imersão ( $t$ ) igual a 60 minutos, bem como necessitou-se dos valores da área de contato com a água ( $S$ ) em centímetros quadrados e das massas seca ( $md$ ) e úmida ( $mh$ ) em gramas, obtendo como resultado o coeficiente de absorção ( $Cb$ ). A equação 1 retrata tal cálculo:

$$Cb = \frac{100 \times (mh - md)}{S\sqrt{t}} \quad (1)$$

Os ensaios de compressão foram feitos segundo a NBR 8492 (ABNT 2012). Utilizou-se novamente três blocos por traço. Com isso, as peças foram cortadas ao meio com o intuito de se obter prismas para a realização do ensaio à compressão simples. Para unir as metades utilizou-se de argamassa produzida com o mesmo material do traço do BTC. Após 24 horas da união, capeou-se uma face do prisma com pasta de cimento, esperando o mesmo intervalo para realizar sobre a segunda face. Assim, 24 horas depois do fim do capeamento realizou-se o ensaio com uma velocidade de deslocamento de 18,5 mm/s. A Figura 19 demonstra tais prismas.

Figura 19 - Blocos capeados para o ensaio de compressão simples.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, dando sequência ao planejamento experimental, serão observados e discutidos os resultados referentes à interação das três variáveis.

### 4.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A partir das metodologias aplicadas e dos ensaios realizados, os resultados obtidos para cada traço encontram-se descritos no Quadro 5.

Quadro 5 - Resultados do ensaio de absorção por capilaridade.

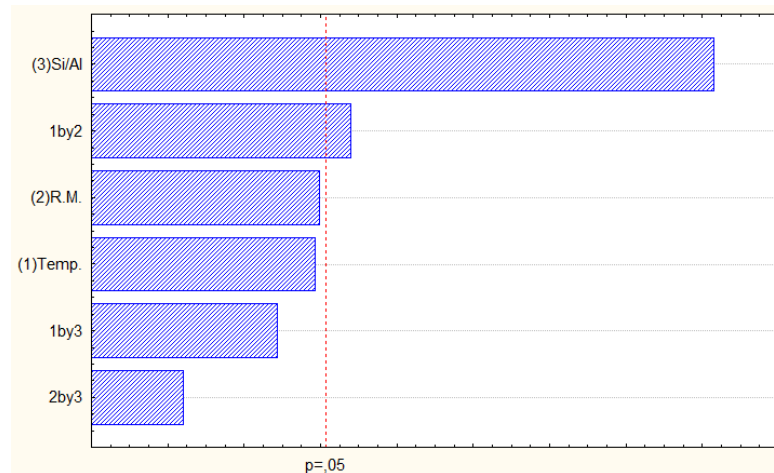
| TRAÇOS | Resultados de absorção (%) |       |      | Média (%) | Temperatura (°C) | Razão Molar | Si/Al |
|--------|----------------------------|-------|------|-----------|------------------|-------------|-------|
|        | 1                          | 2     | 3    |           |                  |             |       |
| 1      | 52,8                       | 39,8  | 54,7 | 49,1      | 100              | 15          | 3,0   |
| 2      | 6,3                        | 13,6  | 10,0 | 10,0      | 60               | 15          | 3,0   |
| 3      | 10,5                       | 18,6  | 31,6 | 20,2      | 100              | 10          | 3,0   |
| 4      | 17,8                       | 13,6  | 15,8 | 15,7      | 60               | 10          | 3,0   |
| 5      | 93,9                       | 112,6 | 50,7 | 85,8      | 100              | 15          | 2,5   |
| 6      | 69,2                       | 71,9  | 65,3 | 68,8      | 60               | 15          | 2,5   |
| 7      | 75,5                       | 40,4  | 57,6 | 57,9      | 100              | 10          | 2,5   |
| 8      | 93,0                       | 47,3  | 64,5 | 68,3      | 60               | 10          | 2,5   |
| 9      | 35,5                       | 35,7  | 23,4 | 31,5      | 80               | 12,5        | 2,75  |
| 10     | 31,6                       | 17,9  | 35,7 | 28,4      | 80               | 12,5        | 2,75  |

Visivelmente os resultados obtidos tiveram absorção elevada, tendo em vista a Norma 10834 (ABNT, 2012), que considera a absorção média máxima para blocos de solo-cimento igual a 22%. Assim, como não existe especificadores que regulamentem BTC's ativados alcalinamente, comparou-se os valores da pesquisa com os prescritos em tal norma. Com isso, observa-se que apenas os traços T2, T3 e T4 se encontram dentro da faixa aceitável. Além disso, os blocos de uma mesma combinação retrataram uma grande disparidade entre os valores obtidos, o que pode ser explicado pela rápida pega do material e pelo empelotamento, que gerou blocos com matérias diferentes dentro de um mesmo traço.

Quanto à influência das variáveis, os dados foram analisados estatisticamente pelo Programa Statistic, no qual foi elaborado o Diagrama de Pareto encontrado no Gráfico 1.



Gráfico 1 - Análise de Pareto para absorção por capilaridade.



Por meio dessa análise, percebeu-se que a característica de principal influência foi a relação Si/Al de forma singular. Observou-se também que as variáveis independentes temperatura e razão molar não foram significativas para os resultados de absorção por capilaridade, porém sua combinação mostrou-se influente para tal ensaio.

Assim, também pelo Programa Statistic, foram elaborados gráficos para observar a interação entre essas duas variáveis, sendo a relação Si/Al mantida constante em cada um dos casos, conforme apresentado nos Gráficos 2, 3 e 4.

Gráfico 2 - Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na absorção por capilaridade para uma razão de Si/Al=3,0.

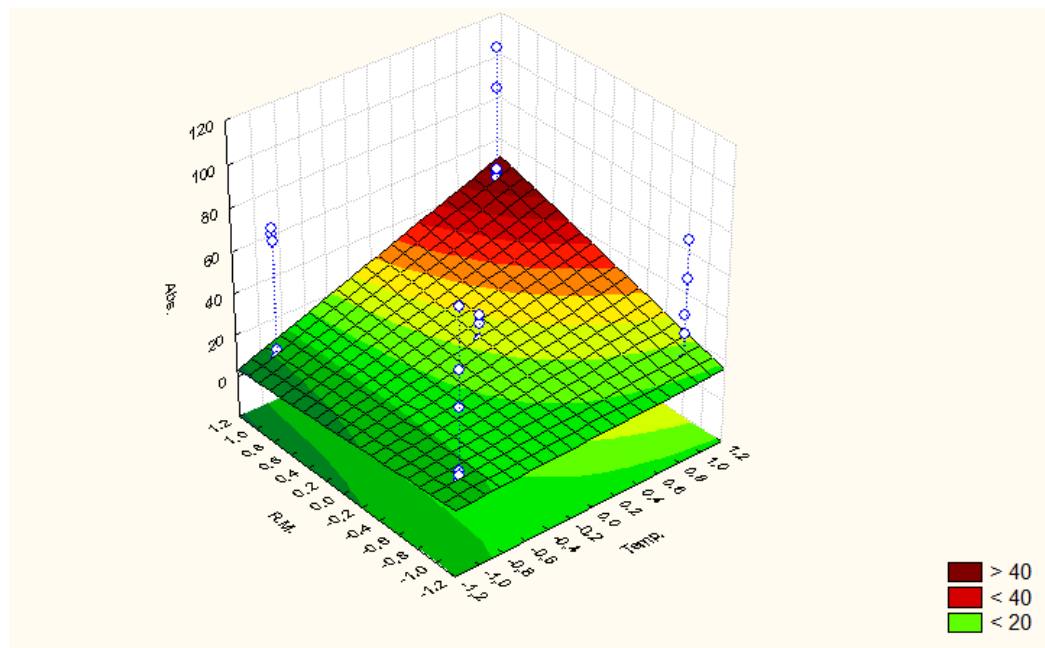


Gráfico 3 - Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na absorção por capilaridade para uma razão de Si/Al=2,75.

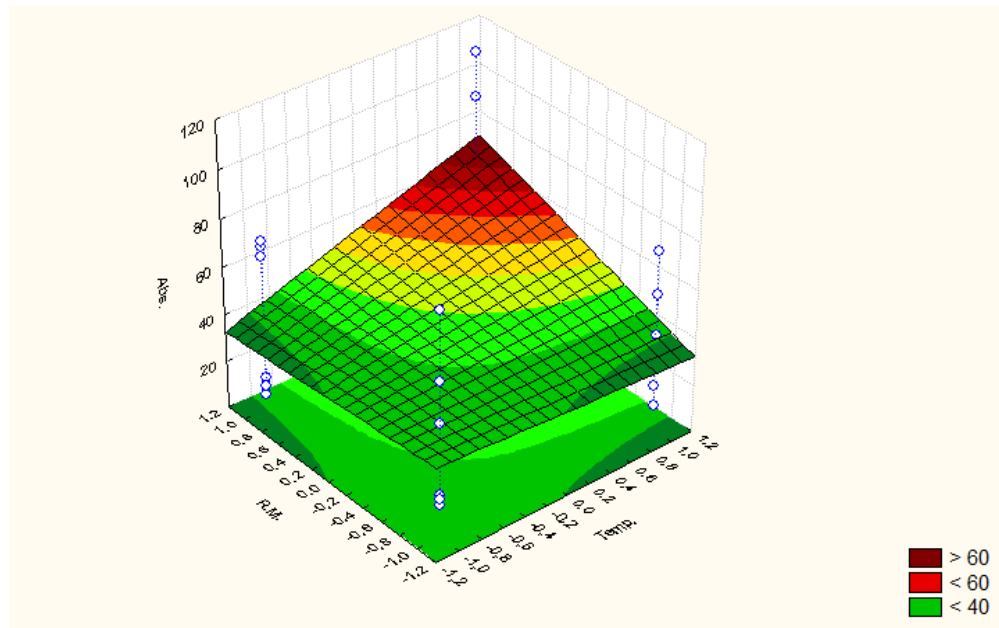
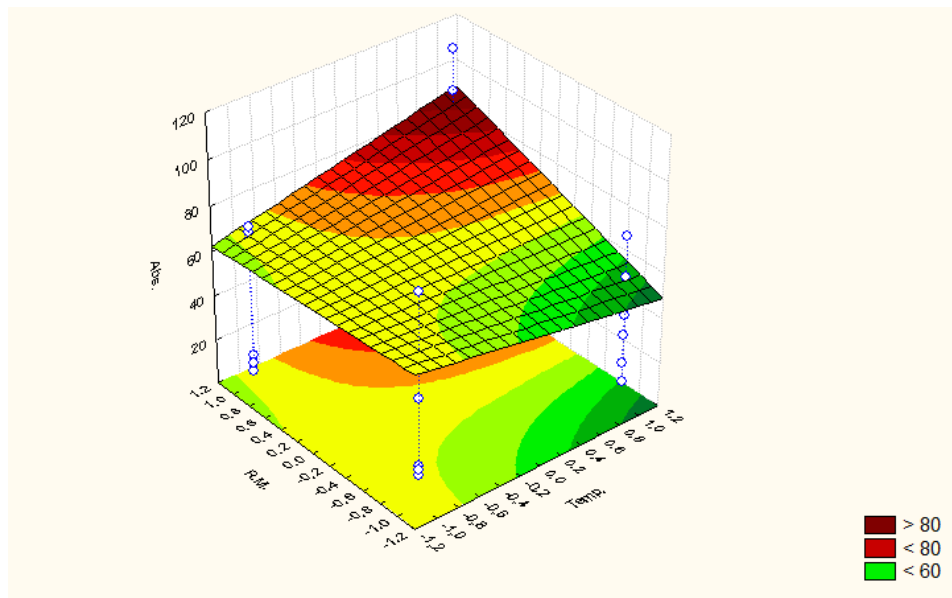


Gráfico 4 - : Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na absorção por capilaridade para uma razão de Si/Al=2,5.



Com tais gráficos, observou-se que temperaturas altas com razões molares elevadas culminam em produzir blocos com grau de absorção indesejáveis. Percebeu-se também que um aumento da relação Si/Al contribui para uma diminuição na absorção de água.

#### 4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os resultados obtidos nos testes de compressão mecânica encontram-se no Quadro 6.

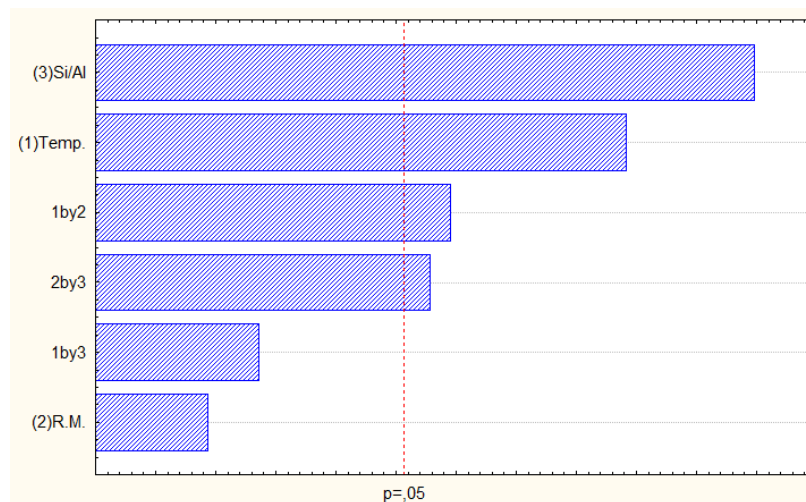
Quadro 6 - Resultados do ensaio de compressão simples.

| TRAÇOS | Resultado Compressão (MPa) |      |      | Média (MPa) | Temperatura (°C) | Razão Molar | Si/Al |
|--------|----------------------------|------|------|-------------|------------------|-------------|-------|
|        | 1                          | 2    | 3    |             |                  |             |       |
| 1      | 0,74                       | 0,87 | 1,14 | 0,92        | 100              | 15          | 3,0   |
| 2      | 0,50                       | 0,54 | 0,51 | 0,52        | 60               | 15          | 3,0   |
| 3      | 2,18                       | 1,98 | 2,33 | 2,16        | 100              | 10          | 3,0   |
| 4      | 0,53                       | 0,59 | 0,39 | 0,51        | 60               | 10          | 3,0   |
| 5      | 5,62                       | 4,42 | 5,20 | 5,08        | 100              | 15          | 2,5   |
| 6      | 1,56                       | 1,40 | 0,69 | 1,22        | 60               | 15          | 2,5   |
| 7      | 1,96                       | 1,93 | 1,81 | 1,90        | 100              | 10          | 2,5   |
| 8      | 2,64                       | 2,81 | 2,28 | 2,57        | 60               | 10          | 2,5   |
| 9      | 2,83                       | 1,78 | 2,11 | 2,24        | 80               | 12,5        | 2,75  |
| 10     | 1,51                       | 2,32 | 1,50 | 1,78        | 80               | 12,5        | 2,75  |

Observa-se que para esse ensaio os resultados também não foram satisfatórios. De acordo com a Norma 10834 (NBR, 2012), blocos de solo-cimento sem função estrutural devem ter uma resistência à compressão mínima de 2,0 MPa na média. Dessa forma, apenas os traços 3, 5, 8 e 9 atenderam à solicitação.

Buscou-se também entender a influência das variáveis, através do Programa Statistic e representado no Gráfico 5 pelo Diagrama de Pareto para o ensaio.

Gráfico 5 - Análise de Pareto para ensaio de Compressão simples.



Os resultados apontaram que no ensaio de absorção por capilaridade a relação Si/Al foi a variável com maior influência na compressão simples. A temperatura de cura também obteve significância para esse ensaio. Em contrapartida, a razão molar, de forma isolada, pouco influenciou, sendo mais efetiva na combinação com as outras duas variáveis.

Assim, também pelo Programa Statistic, foram elaborados gráficos para observar a interação entre as variáveis temperatura de cura e razão molar, sendo a relação Si/Al mantida constante em cada um dos casos, conforme mostrado nos Gráficos 6, 7 e 8.

Gráfico 6 - Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na compressão mecânica para uma razão de Si/Al=3,0.

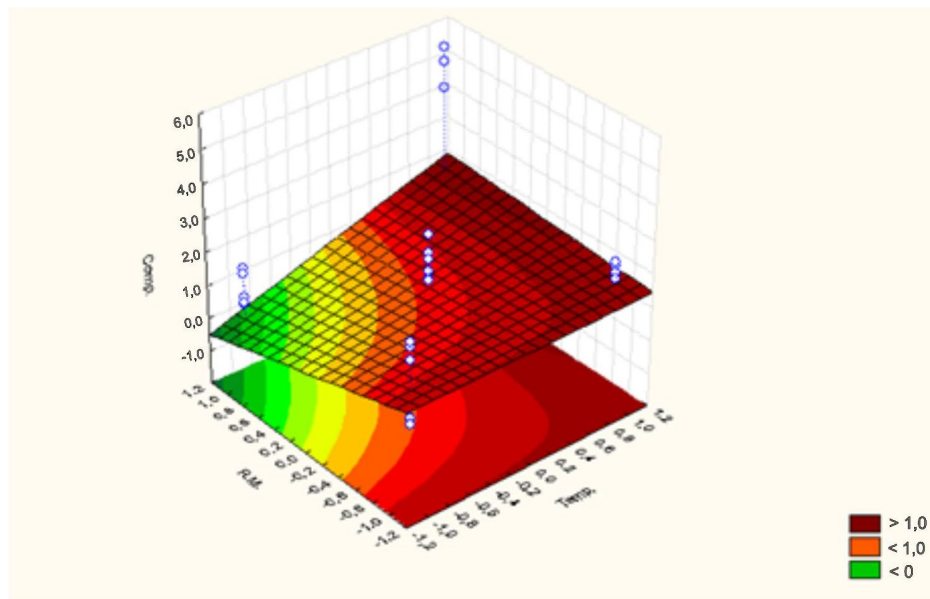


Gráfico 7 - Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na compressão mecânica para uma razão de Si/Al= 2,75.

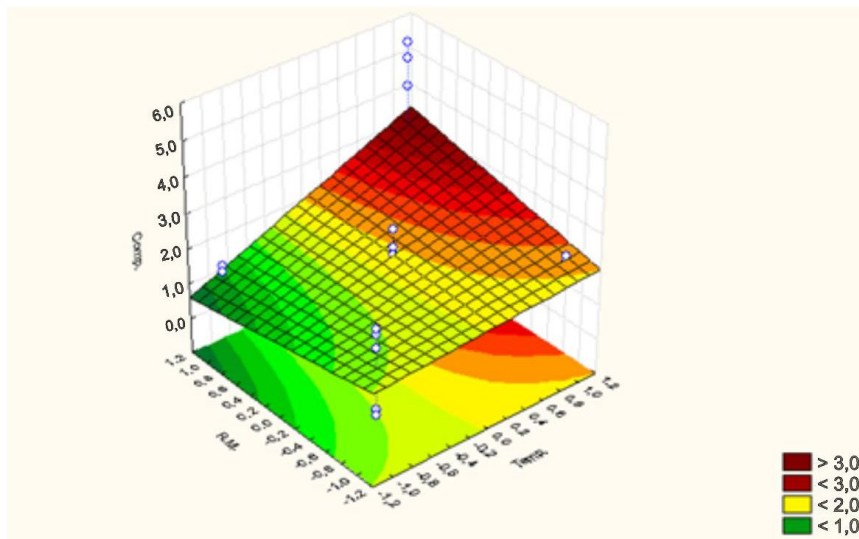
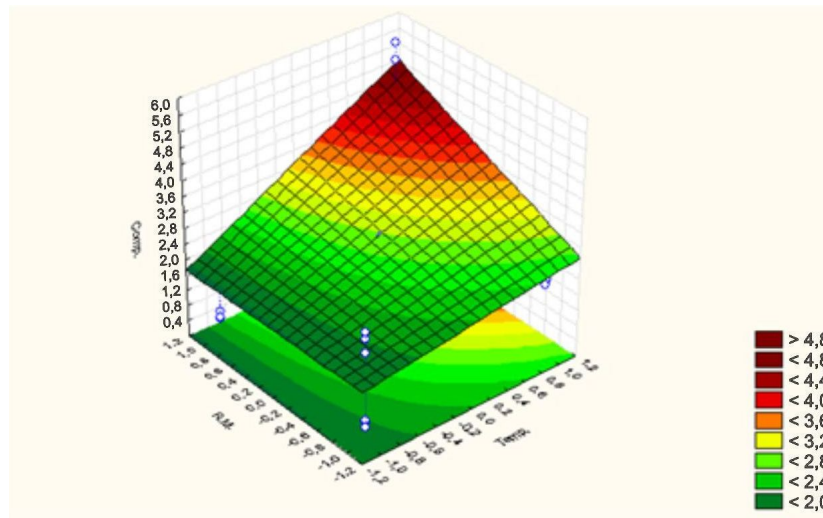


Gráfico 8 - Influência da interação entre a razão molar e a temperatura na compressão mecânica para uma razão de Si/Al=2,5.



Por tais gráficos, observa-se que o aumento da relação Si/Al ocasiona uma diminuição na resistência à compressão, isso pode ser explicado pelo fato que o silicato de sódio acelera a pega; dessa forma gerava-se mais pelotas em tais traços, o que está diretamente relacionado ao maior índice de vazios no bloco que além de afetar a resistência é responsável pela maior ocorrência de eflorescência.

Outro fato importante é a pouca ou nenhuma influência da razão molar em ambos os ensaios. Isso pode ser explicado pela falta de exatidão em tal aspecto, visto que a quantidade de Hidróxido de Sódio era calculada com relação à água, pré-estabelecida, necessária para umedecer a mistura, muitas vezes adicionando-se mais água para se obter a plasticidade ideal.

Também foi discutido a velocidade de compressão, sendo posteriormente observado que a utilizada não foi a adequada para blocos de terra, sendo assim, os resultados obtidos de resistência à compressão podem estar associados a erros sistemáticos, o que futuramente pode ser corrigido.

## 5 CONCLUSÃO

Tomando como base as observações feitas durante a pesquisa, é notória a necessidade de mudança do processo de fabricação dos blocos, tendo em vista que o principal fator prejudicial dos blocos é o empelotamento do material. Sendo assim, se faz necessário em estudos posteriores tal mudança. Foi-se discutido o uso de betoneira com eixo vertical, visando menor impacto e atrito do material com o equipamento. Outro ponto de melhoria é a busca por trabalhar com um aditivo que prolongue o tempo de pega do material, pois esta dificulta a trabalhabilidade dos traços, prejudicando assim a fabricação dos blocos.

Com relação à razão molar, propõe-se uma metodologia para que se mantenha a razão experimentada caso a quantidade de água pré-estabelecida não atenda às condições de trabalhabilidade da mistura. Sugere-se que, caso necessário, adicione-se a solução como um todo e não apenas a água.

Contudo, a variável temperatura de cura mostrou-se como influência significativa nos resultados de resistência mecânica. Assim, cabe estudar outras variações até que se aproxime do seu valor ideal.

Percebeu-se viável buscar meios de variar a razão Si/Al, tendo em vista a sua influência nos resultados, também para menos, para que sua relação seja mais bem estudada. Ainda sugere-se a substituição do Silicato de Sódio pela Sílica ativa, tendo em vista que o primeiro é de difícil absorção pelo meio ambiente, sendo um contra a proposta do projeto.

Por fim, é necessária e promissora a continuidade de pesquisa com tal material, tendo em vista que geopolímeros estão relacionados a resistências superiores ao próprio cimento. Assim, pode vir a melhorar as relações ambientais e visar uma redução no déficit habitacional atualmente existente.

## 6 REFERÊNCIAS

ABRAINC / FGV. **Análise das necessidades habitacionais e suas tendências para os próximos anos.** 2017. Disponível em: <<https://sindusconsp.com.br/estudo-da-abrainc-fgv-projeta-demanda-habitacional-ate-2027/>>. Acesso em 10 de Jan. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10834:** Bloco de solo-cimento sem função estrutural: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 10832** - Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual. Procedimento. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653** – Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 8491** – Tijolo maciço de solo-cimento. Especificação. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 8492** – Determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

BARBOSA, N. P.; MATTONE, R.; MESBAH, A. **Blocos de Concreto de Terra:** Uma Opção Interessante P.ara a Sustentabilidade da Construção. Biblioteca SEBRAE Online. 2002.

BARBOSA, N.P., GHAVAMI, K. **Terra Crua para Edificações.** In: ISAIA G.C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: Ibracon, vol 2. 2007.

BORGES, L. V. S.; COLOMBO, C. R. **Construções com Terra:** Alternativa voltada à sustentabilidade, 2009.

DAVIDOVITS,J.; **Solid-Phase Synthesis of a Mineral Blockpolymer by Low Temperature Polycondensation of Alumino-Silicate Polymers: Na-poly(sialate) or Na-PS and Characteristics.** IUPAC- Symposium on Long-Term Properties of Polymers and Polymeric Materials, Stockholm, p. 2-14, 1976.

DAVIDOVITS,J.; **Mineral polymers and methods of making them,** US Patent 4, p.349-386, 1982.

DAVIDOVITS,J., **Geopolymers: inorganic polymeric new material ;** J. THERM. ANAL., vol.37, p.1633-1656 ,1991.

DAVIDOVITS, J.; **Properties of geopolymer cements,** Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, p. 131–149, 1994 (a).

DAVIDOVITS, J. **High-Alkali Cements for 21st Century Concrete in “Concrete Technology, Past, Present and Future”**, Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium, Editor: P. Kumar Metha, ACI SP- 144, p.383-397, 1994 (b).

DAVIDOVITS,J. **“Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology”**, Proceedings of the Second International Conference Geopolymère “99”,p. 9-40, Saint-Quentin, France, 1999.

DAVIDOVITS, J. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymers Applications**. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Austrália, 2002.

DAVIDOVITS, J. **Keynote Conference Video of State of the Geopolymer R&D 2012** acessado em <http://www.geopolymer.org/camp/gp-camp-2012>, first section: Geopolymer Science as well as the third section Geopolymer Cements, 2012.

DUXSON, P. ; PROVIS, J.L. ; LUKEY, G.C.; SEPAROVIC, F .J.; DEVENTER, VAN. **Study of structural ordering in aluminosilicate geopolymer gels**. Langmuir, vol.21, p.3028-3036, 2005.

EIRES, R.; JALALI, S. **Inovações Científicas de Construção em Terra Crua**. Conferência Internacional - Angola: Ensino, Investigação e Desenvolvimento (EIDAO 08), Braga. 2008.

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

GLUKHOVSKY, V. D. **Durability of Concrete. Aspect of admixtures and industrial products**. Swedish Council for Building Research, Gothengurg, Sweden, p. 53-62, 1989.

HARDJITO, D.; WALLAH, S. E.; SUMAJOUW; M.J.D AND; RANGAN, B. V. **Fly Ash-Based Geopolymer Concrete**. Construction Material for Sustainable Development, Invited Paper, Concrete World: Engineering & Materials, India, p.9-12, 2004.

LI, C. ; SUN, H.; LI, L. **A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements**, Cem. Conc. Res., vol. 40 ,p.1341–1349, 2010.

MOREIRA, A. M. **Terra crua**. Instituto politécnico de Tomar. 2008.

MOREL, J. C.; PKLA, A.; WALKER, P. **Compressive strength testing of compressed earth blocks**. Construction and Building Materials, v. 21, n. 2, p. 303-309. 2007.

NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B.; ROTONDARO, R.; CEVALLOS, P. S.; HOFFMANN, M. V. **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo**. In: Rede Ibero-americana PROTERRA. 2010.

NEVES, C.; FARIA, O. B. **Técnicas de construção com terra**. FEBUNESP/ PROTERRA. Bauru, 2011.

OLIVEIRA, L. S. **Estabilização de blocos de terra crua através de ativação alcalina**. Universidade Federal da Paraíba. 2015.

ONU-HABITAT. **Em dia mundial ONU-Habitat defende políticas habitacionais e moradias acessíveis**. 2020. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/em-dia-mundial-onu-habitat-defende-politicas-habitacionais-e-moradias-acessiveis/>>. Acesso em: 09 de Jan. 2020.



PALOMO, A.; M.W. GRUTZECK, M.T. BLANCO, **Alkali-activated fly ashes: a cement for the future**, Cem. Concr. Res., vol. 29, p. 1323–1329, 1999.

PALOMO A.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; CRIADO M. **“Geopolymers”**: Same Basic Chemistry, different microstructures. Material Construction, vol.54, n° 275, Espanha, 2004.

PALOMO, A., GLASSER, F.P. **“Chemically-bonded Cementitious Materials Based on Metakaolin”**, Br. Ceram. Trans. Journal, 91, pp. 107-112. 1992.

PALOMO, A.; RUIZ-SANTAQUITERIA, C.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; **Cementos de bajo impacto ambiental: activación alcalina de aluminosilicatos**. X Congresso Latino Americano de Patologia y XII Congresso de Calidad en la Construcción.CONPAT 2009. Valparaíso-Chile, 2009.

PINTO, A.T. **Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina do Metacaulino**. Tese Doutorado, Universidade do Minho, Portugal. 2004.

PINTO, A.T. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. Editora UTAD, Portugal, 105 p., 2006.

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

SEVERO, C. G. S. *et al.* **Ativação alcalina de resíduos minerais com NaOH**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 8, n. 2, 2013.

TEIXEIRA, D. A. **Blocos de terra comprimidos estabilizados com ativação alcalina do metacaulim**: aspectos metodológicos. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba, 2017.

TORGAL, F. P.; CASTRO-GOMES, J. P.; JALALI, S. **Cimento Portland Normal Versus Ligantes Geopoliméricos**: Considerações Econômicas Sobre as Implicações do Mercado do Carbono no Custo dos Betões. Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal, 2005.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **Construção em Terra**: o passado, o presente e o futuro. Arte & Construção. p.51-56. Portugal, 2009.

TORGAL, F.P.; JALALI, S. **Ligantes Geopoliméricos. Uma Alternativa ao Cimento Portland**. Universidade do Minho, Guimarães, 2009.

TORGAL, F.P.; JALALI, S. **Ligantes Obtidos por ativação alcalina**. Revista Ingenium, Portugal, p.66-68, 2009.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER J. S. J.; LORENZEN, L. **Factors affecting the immobilisation of metals in geopolymerised fly ash**. Metallurgical and Materials Transactions B, v. 29, p. 283 – 291. 1998.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). 103 p. UNIVERSIDADE FEDERAL DE

MINAS GERAIS, ESCOLA DE ENGENHARIA, Belo Horizonte, 2013.

VILLA, C., E.T. PECINA, R. TORRES, L. GÓMEZ. **Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite.** Construction and Building Materials, vol.24, Issue 11, p. 2084-2090, 2010.

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