



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

VITÓRIA MARIA REGIS DE OLIVEIRA LIMA BARBALHO

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS METODOLÓGICOS E EXPERIMENTAIS NOS  
BLOCOS DE TERRA COMPACTADOS ESTABILIZADOS PELA ATIVAÇÃO  
ALCALINA DO METACAULIM**

João Pessoa

2020

Vitória Maria Regis de Oliveira Lima Barbalho

**Influência de Parâmetros Metodológicos e Experimentais nos Blocos de Terra Compactada Estabilizados pela Ativação Alcalina do Metacaulim**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa-PB, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Givanildo Alves de Azeredo, Dsc.

João Pessoa

2020

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

B228i Barbalho, Vitoria Maria Regis de Oliveira Lima.  
Influência de Parâmetros Metodológicos e Experimentais  
nos Blocos de Terra Compactada Estabilizados pela  
Ativação Alcalina do Metacaulim / Vitoria Maria Regis  
de Oliveira Lima Barbalho. - João Pessoa, 2020.  
61 f. : il.

Orientação: Givanildo Alves de Azeredo.  
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Bloco de Terra Compactada. 2. Estabilização. 3.  
Ativação Alcalina. 4. Metodologia. 5. Metacaulim. 6.  
Cura. I. Azeredo, Givanildo Alves de. II. Título.

UFPB/BC

## FOLHA DE APROVAÇÃO

VITÓRIA MARIA REGIS DE OLIVEIRA LIMA BARBALHO

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS METODOLÓGICOS E EXPERIMENTAIS NOS  
BLOCOS DE TERRA COMPACTADA ESTABILIZADOS PELA ATIVAÇÃO  
ALCALINA DO METACAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso em 10/08/2020 perante a seguinte Comissão Julgadora:



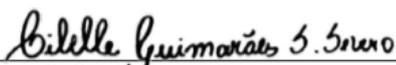
Givanildo Alves de Azeredo  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Aprovado



Primo Fernandes Filho  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Aprovado



Cibelle Guimarães Silva Severo  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Aprovado



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

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e pela sabedoria a mim concedida para percorrer essa caminhada. Agradeço a Ele pelas pessoas que Ele colocou em minha vida que foram usadas como instrumentos em Suas mãos para me motivar, auxiliar, orientar e fortalecer. Agradeço a minha mãe, Denise Regis de Oliveira Lima, e minha Avó, Zélia Régis de Oliveira Lima que sempre me motivaram e dentro de suas limitações não mediram esforços para me auxiliar me dando condições de concluir este processo, agradeço aos meus demais familiares, tios e primos pelo constante apoio e pelo exemplo e inspiração que são para mim, a Felipe Danzmann Roboredo Sanches, que em todo processo deste trabalho esteve ao meu lado me apoiando e possibilitando o desenvolvimento prático, e a minha Conexão pelas orações e palavras de incentivo.

Dedico agradecimentos também aos meus colegas de curso que dividiram comigo todas as lutas enfrentadas ao decorrer desse período de universidade tornando esse tempo mais leve, aos técnicos do LABEME pelo auxílio e facilitação no desenvolvimento das atividades necessárias para este trabalho, aos meus professores e mestres pelos aprendizados passados e ao meu professor orientador, Givanildo Alves de Azeredo, que ao longo de três anos me auxiliou a desenvolver pensamento crítico, sendo um grande acréscimo à minha vida profissional.

## RESUMO

A estabilização dos Blocos de Terra Compactados por meio da ativação alcalina é ainda uma área muito nova, porém já consegue-se perceber o crescente número de pesquisas envolvendo o tema. Em sua maioria, as pesquisas que envolvem esse tipo de estabilização apontam para ótimos valores de resistência. No entanto, observa-se também em algumas pesquisas certa dificuldade no processo de amassamento e moldagem. Assim, este trabalho visa realizar o estudo de alguns parâmetros que influenciam na mistura dos materiais, na moldagem dos blocos e posteriormente em sua resistência à compressão mecânica. Os parâmetros estudados foram: metodologia de acréscimo do metacaulim e silicato de sódio, porcentagem de metacaulim e tempo de cura em estufa. Ademais, pôde-se também ao longo do desenvolvimento metodológico realizar algumas observações quanto à quantidade de água ideal necessária para a moldagem dos blocos. Por fim os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, obtendo-se misturas com boa trabalhabilidade e blocos em sua maioria capazes de serem aplicados em alvenaria de vedação, além de conclusões que podem auxiliar para o desenvolvimento de um método consistente para a confecção dos blocos de terra compactados estabilizados com ativação alcalina.

### **Palavras-chave:**

Bloco de Terra Compactada, Estabilização, Ativação Alcalina, Metodologia, Metacaulim, Cura.

## ABSTRACT

The Compacted Earth Blocks stabilization by alkaline activation still a very new area, however it is already able to perceive a growing number of researches involving the theme. Most researches involving this type of stabilization points to excellent resistance values, however, some research also shows some difficulty in the kneading and molding process. Thus, this work aims to carry out the study of some parameters that influence the mixing of materials, the molding of the blocks and later their mechanical compressive strength. The parameters studied were: methodology for adding metakaolin and sodium silicate, metakaolin percentage and curing time in an oven. Furthermore, during the methodological development, it was also possible to make some observations regarding the ideal amount of water needed to mold the blocks. Finally, the results obtained were quite satisfactory, obtaining mixtures with good workability and blocks mostly capable of being applied in sealing masonry, and also conclusions that can assist in the development of a consistent method to make compacted earth blocks stabilized by alkaline activation.

### **Keywords:**

Compacted Earth Block, Stabilization, Alkaline Activation, Methodology, Metacaolin, Curing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos de grandes construções com Terra.....	4
Figura 2: Alguns patrimônios da UNESCO construídos com Terra .....	5
Figura 3: Execução da Taipa .....	8
Figura 4: Blocos de Adobe .....	9
Figura 5: Bloco de Terra Compactada .....	9
Figura 6: Casa familiar, EUA 2005. ....	11
Figura 7: Escola Primária nas Filipinas, 2013.....	12
Figura 8: Centro para Arquitetura com Terra, por Francis Kere localizado em Mopti, Mali.....	12
Figura 9: Esquema de execução dos Traços do planejamento 1 .....	24
Figura 10: Execução dos traços com Metacaulim na Terra.....	25
Figura 11: Execução dos traços com o Metacaulim misturado na Solução.....	25
Figura 12: Prensa Hidráulica.....	26
Figura 13: Blocos preparados para ensaio de Compressão Mecânica .....	27
Figura 14: Blocos confeccionados para determinação da quantidade de água.....	28
Figura 15: Teste para verificação da umidade.....	29
Figura 16: Misturas Homogeneizadas.....	31
Figura 17: Impregnação na prensa.....	31
Figura 18: Blocos produzidos com 5% (acima) e 15% (abaixo) de metacaulim .....	42

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVO .....	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1.	<b>Construção com Terra</b> .....	4
3.2.	<b>Bloco de Terra Compactado</b> .....	10
3.3.	<b>Ativação Alcalina</b> .....	13
3.4.	<b>Blocos de Terra Compactados Estabilizados com Ativação Alcalina</b> .....	18
4.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	21
4.1.	<b>Materiais Utilizados</b> .....	21
4.2.	<b>Métodos</b> .....	23
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	30
5.1.	<b>Etapa 1: Variáveis Metodológicas</b> .....	30
5.2.	<b>Discussões sobre a Quantidade de Água</b> .....	32
5.3.	<b>Etapa 2: Variáveis Experimentais</b> .....	37
6.	CONCLUSÃO .....	42
7.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	45
	REFERÊNCIAS.....	46

## 1. INTRODUÇÃO

A terra é o mais antigo material de construção utilizado pela humanidade (Ponte, 2012) e passou por diversas mudanças de paradigmas ao longo do tempo. Apesar de ter sido um material amplamente usado na antiguidade, a terra foi perdendo seu valor ao longo da evolução da história humana e passou a ser compreendida como um material frágil, muito associada a construções arcaicas e para pessoas de baixo poder aquisitivo, de modo que foi sendo substituída pelos materiais industrializados.

No entanto, tem-se visto uma nova mudança de compreensão da terra devido à sua sustentabilidade, assunto que muito tem se discutido atualmente. Além disso, diversas são as vantagens que o material oferece à construção por ser um material ecológico, econômico, resistente ao fogo e que fornece um elevado conforto térmico, acústico e higroscópico (Ponte, 2012).

Assim, a terra tem sido amplamente estudada nos mais diversos lugares do mundo como por exemplo na França com o laboratório CRATerre e na Alemanha com os cursos oferecidos sobre o tema em algumas universidades (Torgal e Jalali, 2012). Desse modo, antigas técnicas de construção com terra têm sido melhoradas e adaptadas às tecnologias existentes e também se tem desenvolvido formas de adequar algumas características da terra às normas de construção vigente por meio da estabilização do material.

A estabilização da terra pode acontecer de quatro formas: mecânica, física, química e mista. Existem diversas técnicas de construção com terra e elas podem ser associadas aos tipos de estabilizações acima citados. A alvenaria de adobe, técnica de construção com terra usada nas construções antigas de Jericó na Cisjordânia e tradicional em Portugal, pode ter em sua fabricação o acréscimo de fibras, caracterizando uma estabilização física, ou cimento sendo neste caso uma estabilização química que também existe quando é usado a cal.

A técnica de se comprimir a terra possui duas vertentes: uma monolítica representada pela Taipa de pilão e uma de alvenaria representado pelos Blocos de Terra Compactados; em ambas existe a estabilização mecânica caracterizada pela compactação da terra a ser usada nos componentes construtivos, no caso do BTC em alvenaria, ou já formando o próprio componente construtivo, no caso da taipa de pilão.

Além disso, pode-se associar a esta estabilização outros tipos caracterizando-se uma estabilização mista.

Os Blocos de Terra Compactados vem sendo utilizados amplamente com acréscimo de 8% de cimento para sua estabilização originando os BTC solo-cimento. No entanto, no quesito sustentabilidade, o cimento agrega ao BTC alto valor energético e poluente. Além disso Sore et al (2017) diz que o acréscimo de cimento altera as propriedades térmicas da terra. Assim, têm-se buscado na Ativação Alcalina uma alternativa ao cimento para estabilizar os Blocos de Terra Compactados.

A estabilização dos BTC's por meio da ativação alcalina é um método relativamente novo mas que basicamente tem o intuito de agregar ao BTC as vantagens que se obtém com um geopolímero, que são: elevada resistência à compressão, baixa retração, resistência a ácidos e ao fogo e baixa condutividade térmica (Severo et al, 2013).

Apesar dos benefícios que a ativação alcalina pode vir a agregar ao BTC, por ser nova a técnica, existem poucas pesquisas na área e diversos são os percalços enfrentados devido à sua rápida pega da mistura, seu empelotamento (Teixeira, 2017) e a sensibilidade quanto à variação nas características dos componentes (Oliveira, 2014). Dentre as referências sobre os BTC ativados alcalinamente destaca-se a de França et al (2019) que analisou quatro artigos sobre o tema e verificou algumas lacunas nas pesquisas, dentre elas a falta de estudos sobre o processo de cura. Neste cenário, este trabalho visa o estudo dos Blocos de Terra Compactados Estabilizados com Ativação Alcalina do Metacaulim discutindo-se sobre fatores que influenciam no processo de amassamento e moldagem e também sobre formas de potencializar os resultados, além de apontar observações importantes para o desenvolvimento de futuras pesquisas.

## 2. OBJETIVO

Tendo em vista a novidade técnica dos Blocos de Terra Compactados Ativados Alcalinamente, o presente trabalho tem como objetivo principal melhorar o entendimento deste novo método de estabilização buscando analisar a influência de variáveis pertinentes ao processo.

Assim, busca-se:

- Entender a influência do momento em que o silicato e o metacaulim são acrescentados na mistura na sua trabalhabilidade e nos resultados finais;
- Analisar a variação da resistência mecânica quando se altera a porcentagem de metacaulim utilizado na mistura;
- Verificar a influência do tempo de cura em estufa na performance dos blocos;
- Procurar entender a relação da quantidade de água em função da quantidade de terra e de metacaulim.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Construção com Terra

A construção com terra está amplamente presente na história da humanidade. Todas as culturas antigas usaram a terra como material de construção seja para moradia ou para edifícios com fins religiosos (Minke, 2006). Não existe um consenso de quando se iniciou o uso da terra como material de construção, pode ter sido há 9000 anos no Turkmenistan entre os anos 8000 e 6000 a.c. (Minke, 2006) ou há mais de 10.000 anos na bacia do Rio Tigre onde foi encontrado o bloco de adobe mais antigo que data 7500 a.c. (Berge, 2009). Esta informação, entretanto, não é relevante segundo Torgal e Jalali (2012) que dizem que a construção com terra deve ter se iniciado junto com as primeiras sociedades agrícolas sendo, segundo Ponte (2012), o primeiro material de construção utilizado pela humanidade.

Existem cidades antigas inteiras construídas com terra como Jericó na Cisjordânia e Catal Huyuk na Turquia, ambas construídas de adobe; além disso existem também grandes construções como os Zigurates na Mesopotâmia (Figura 1A), o Templo de Ramsés no Egito (Figura 1B) e até a muralha da China possui trechos construídos de terra. Algumas dessas construções sobrevivem até hoje comprovando a resistência do material (Ponte, 2012). Além disso, 17% das construções que foram classificadas como patrimônio da UNESCO são feitas de terra, a exemplo tem-se as Torres de Djenné no Mali, Ksar de Ait Bem Hadu em Marrocos, Alhambra na Espanha e a cidade de Bam no Irã mostradas na Figura 2 (Oliveira, 2014).

Figura 1: Exemplos de grandes construções com Terra



A) Fonte: <https://incrivelhistoria.com.br/zigurate/> B) Fonte: <https://incrivelhistoria.com.br/templo-sol-ramses/> Acesso em: 18 de Julho de 2020

Figura 2: Alguns patrimônios da UNESCO construídos com Terra



A) Fonte: <https://quatrocantosdomundo.files.wordpress.com/2015/05/djennemosque.jpg> B) Fonte: <http://www.ksarljanoub.com/attraction/our-beaches/> C) Fonte: <https://escola.britannica.com.br/artigo/Alhambra/606897> D) Fonte: <http://www.wikiwand.com/pt/Bam> Acesso em: 18 de Julho de 2020

Ao longo do tempo criou-se um certo preconceito com a terra que passou a ser vista como um material de baixa resistência e pouco durável associado a construções de baixa renda e de fraca qualidade, de modo que a falta de sua confiança é evidente (Ponte, 2012). É sabido que a terra tem reduzida durabilidade em contato com a água e que sua resistência mecânica é baixa quando comparada aos materiais convencionais (Oliveira, 2014). No entanto, a cidade de Shibam no Yemen erguida com tijolos secos ao sol possui prédios de até 30m de altura; outras cidades como Ait Benhaddou no Marrocos e as casas Hakka Toulos na China provam o potencial da terra como material de construção, o que mostra que o preconceito gerado deveu-se a questões culturais, a falta de conhecimento sobre o material e a falta de investimento em normas que regulamentem as construções e passem um sentimento de segurança (Ponte, 2012).

Atualmente, a maior parte das construções com terra encontra-se nos países em desenvolvimento já que o déficit habitacional pode ser suprido com a utilização de material e mão de obra local (no estilo faça você mesmo) (Minke, 2006). Entretanto, em países desenvolvidos, há uma crescente conscientização sobre a importância desse tipo de construção (Torgal e Jalali, 2012) e há também um avanço nas técnicas

de construção com terra, mostrando seu valor não só para construções que utilizam mão de obra não especializada mas também para construções mais elaboradas (Minke, 2006).

A sustentabilidade proporcionada pelas construções com terra é uma das grandes vantagens que levam à busca por este tipo de material, já que sua preparação, transporte e manuseio requer apenas 1% da energia requerida nos materiais convencionais como tijolo cerâmico e concreto (Minke, 2006). Além disso, a terra também precisa de pouca ou nenhuma transformação para ser utilizada sendo então facilmente reabsorvida ao meio ambiente, gerando poucos resíduos. Outro destaque que se deve dar a terra é sua elevada inércia térmica (Minke, 2000) e capacidade de proporcionar uma boa qualidade ao ar do ambiente (Wargocki et al, 1999).

Contudo, dependendo do tipo de terra e da aplicação que lhe será dada, ela precisa passar por um processo de estabilização, para garantir que suas características como resistência mecânica e durabilidade em contato com água estejam de acordo com as normas de construção vigente. Assim, define-se estabilização como sendo a modificação das propriedades de um solo para melhorar suas características (Santiago, 2001).

Segundo Minke (2000), a modificação das características da terra apenas é necessária quando esta for usado em situações especiais, já que adições podem melhorar algumas propriedades e piorar outras. Santiago (2001) tem o mesmo pensamento e diz que a estabilização deve ser feita apenas se o material estiver sujeito à ação da água ou caso haja real necessidade de melhorar sua resistência à compressão ou sua massa unitária tornando-a mais leve ou mais pesada.

A estabilização pode acontecer de diversas formas, sendo elas, mecânica, física, química ou mista.

A estabilização mecânica consiste em rearrumar as partículas do solo sem adição de qualquer outra substância, podendo acontecer por exemplo por meio da compressão com o auxílio de algum equipamento (Santiago, 2001); assim, a estabilização mecânica aumenta a densidade do material e diminui a sua porosidade (Ponte, 2012).

Na estabilização física ocorre a mudança na textura do solo que pode acontecer através de uma correção granulométrica (Ponte, 2012) pela mistura controlada de grãos. Além disso, a adição de fibras e o tratamento térmico (desidratação e congelamento) também são considerados métodos de estabilização física (Santiago, 2001).

Quando um produto químico é misturado ao solo e altera suas características iniciais ocorre então a estabilização química por meio de reações que formam uma matriz que liga as partículas (Santiago, 2001); exemplos comuns de estabilizantes químicos são a cal e o cimento.

Por fim, quando se combina um ou mais dos tipos de estabilização citados acima tem-se a estabilização mista.

Vale-se ressaltar que por existir uma grande variedade de solos nenhum método será eficiente para todos os tipos, de modo que o ideal é que se façam ensaios laboratoriais específicos para que se conheça os resultados que se pode atingir (Santiago, 2001). Para garantir os melhores resultados possíveis é preciso conhecer bem as características do solo a ser usado, a técnica de construção a ser adotada e as melhorias que se pretende alcançar (Houben e Guillaud, 2008).

As características da terra são determinadas pelos materiais que a compõe, sendo estes as partículas de tamanhos variados que se encontram misturadas entre si (Oliveira, 2014). Para a construção, as frações de areia e argila são as principais pois funcionam em conjunto como agregado e aglomerante respectivamente (González, 2006).

Além da granulometria as principais características do solo a serem estudadas quando se trata da sua aplicação na construção civil são: coesão, plasticidade e permeabilidade (derivada da porosidade). Assim, pode-se classificar a terra quanto à sua capacidade construtiva realizando-se testes empíricos e/ou laboratoriais; contudo, uma análise sensorial pode ser suficiente (Figueira, 2016). Santiago (2001) afirma que em geral solos com boa coesão são adequados para a construção mas que para uma escolha ideal deve-se saber o que será construído, qual o local da obra, qual a função do elemento construtivo a ser executado, a existência de meios disponíveis para a estabilização e a técnica a ser usada.

Diversas são as técnicas existentes para construção com terra. Segundo a CRATerre, elas podem ser divididas de acordo com o processo construtivo que a terra pode materializar seja como material primário nos sistemas monolítico portante e alvenaria portante, ou como material de recobrimento ou enchimento de uma estrutura de suporte (González, 2006). O grupo Auroville Earth Institute divide as técnicas em 4 categorias de acordo com o estado físico em que o material é utilizado podendo ser seco ou sólido, úmido, plástico e líquido (Figueira, 2016).

Dentre as técnicas existentes destacam-se a taipa de pilão, o adobe e os blocos de terra comprimidos (Houben e Guillaud, 2006).

A taipa de pilão é uma técnica monolítica que usa a terra no seu estado úmido. A terra com características arenosas, levemente argilosa, podendo ter pedregulho, é apiloada em camadas dentro de formas como pode ser visto na Figura 3. Esta técnica produz paredes de pelo menos 60 cm de largura (Santiago, 2001).

Figura 3: Execução da Taipa



Fonte: [http://www.recriarcomvoce.com.br/blog\\_recriar/tecnicas-construtivas-com-terra/](http://www.recriarcomvoce.com.br/blog_recriar/tecnicas-construtivas-com-terra/) Acesso em: 20/04/2020

O Adobe (Figura 4) é o nome dado aos blocos de terra secos ao sol ou a sombra; podem ser feitos com ou sem moldes e assim apresentam formas e dimensões variadas. Para blocos de adobe, a terra deve ser mais argilosa e deve estar no estado plástico (Santiago, 2001) e segundo a classificação da CRATerre a técnica está compreendida no processo construtivo de alvenaria portante.

Figura 4: Blocos de Adobe



Fonte: [http://www.recriarcomvoce.com.br/blog\\_recriar/tecnicas-construtivas-com-terra/](http://www.recriarcomvoce.com.br/blog_recriar/tecnicas-construtivas-com-terra/) Acesso em: 20/04/2020

O Bloco de Terra Compactado (Figura 5) está classificado quanto ao processo construtivo como alvenaria portante e a terra é utilizada no estado úmido. Por ser objeto de estudo deste trabalho, esta técnica será mais bem descrita no tópico seguinte.

Figura 5: Bloco de Terra Compactada



Fonte: [http://www.recriarcomvoce.com.br/blog\\_recriar/tecnicas-construtivas-com-terra/](http://www.recriarcomvoce.com.br/blog_recriar/tecnicas-construtivas-com-terra/) Acesso em: 20/04/2020

### 3.2. Bloco de Terra Compactado

Os Blocos de Terra Compactados vistos como a atualização dos métodos de construção com terra tradicionais foram definidos pela CRATerre como:

*“Pequenos elementos de alvenaria com características regulares e verificadas, obtidos pela compactação estática ou dinâmica da terra num estado úmido, desmoldados imediatamente a seguir”* (CRATerre – EAG/ODA, 1998).

François Cointeraux, o desenvolvedor do método no início da industrialização, adaptou a metodologia da Taipa de pilão para ser feita em moldes pequenos (Figueira, 2016). Assim, a terra passou a ser compactada em unidades básicas de alvenaria assumindo um volume mais manuseável. Rigassi, em 1985, caracterizou a técnica como a descendente moderna dos blocos de terra modulados ou do adobe.

Apesar da técnica de compactação para melhorar a qualidade e performance da terra não ser nova e existir há pelo menos 6.000 anos sendo vista no seu modelo monolítico (Taipa) na cidade de Uruk, na antiga Suméria (Prussin, 1997), a invenção da prensa mecânica em 1955 por Raul Ramirez deu origem a uma nova etapa tecnológica de se comprimir a terra (Guillaud, 1993).

A evolução da máquina de compressão possibilitou uma produção minuciosamente controlada e adaptada ao mercado. Segundo González (2006), a alvenaria de BTC se torna o mais promissor dos métodos de construção com terra atual (Figueira, 2016) e também favorece a aceitação social da terra como material de construção pois na produção dos blocos pode-se aplicar o controle de qualidade para que estes atendam aos requisitos das normas de construções (Rigassi, 1985).

Atualmente existem normas para fabricação e utilização dos blocos de terra compactados em países como França, Nova Zelândia e Austrália, além de alguns países da América Latina (Silva, 2015). No Brasil existem as normas NBR 10833 (ABNT, 2012), NBR 10836 (ABNT, 2013) e NBR 10834 (ABNT, 2012), que referem-se ao processo de moldagem dos blocos, aos métodos de ensaios e aos requisitos para a sua utilização respectivamente, sendo eles avaliados com relação às dimensões, resistência à compressão e absorção de água.

O princípio básico para a confecção dos blocos de terra comprimidos é a terra apenas úmida ser compactada em unidades isoladas dentro de moldes de forma manual ou mecânica. Após a produção, os blocos podem ser assentados normalmente com argamassas, o que proporciona uma grande variedade de forma de utilização (Santiago, 2001) e nisso se assemelham aos elementos de alvenaria tradicionalmente utilizados como os tijolos cerâmicos e os blocos de concreto (Rigassi, 1985).

Segunda Silva (2015), para a obtenção de um BTC com qualidades adequadas, o processo de produção dos blocos é determinante. Ademais, o mesmo autor orienta que a terra utilizada deve ser argilosa e arenosa com granulometria extensa, a mistura a ser compactada deve estar com o teor de umidade próximo do ótimo e conclui que a pressão de compactação influencia significativamente no desempenho dos blocos.

Para melhorar as características da terra no BTC como a resistência à água e à compressão mecânica, tem-se utilizado bastante o cimento e a cal (sendo o primeiro mais amplamente usado) na estabilização dos blocos. Os blocos de solo cimento são fabricados com uma porcentagem de cimento que varia em torno de 4 a 10% segundo o manual de produção de BTC da CRATerre (Rigassi, 1958). No entanto esses valores são apenas um guia já que o valor exato não pode ser definido devido à elevada e complexa heterogeneidade dos solos. Segundo Silva (2015), a estabilização da terra é essencial quando se refere à durabilidade e vantajosa quanto à resistência, além de melhorar propriedades como a porosidade. Assim, o BTC já é aplicado em diversas construções atualmente, como pode ser visto nas Figuras 6, 7 e 8

Figura 6: Casa familiar, EUA 2005.



Fonte: Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios, Silva (2015)

Figura 7: Escola Primária nas Filipinas, 2013



Fonte: <https://eartharchitecture.org/?cat=79> Acesso em: 26/05/2020

Figura 8: Centro para Arquitetura com Terra, por Francis Kere localizado em Mopti, Mali.



Fonte: <http://eartharchitecture.org/?tag=compressed-earth-block> Acesso em: 26/05/2020

Apesar da estabilização da terra com cimento mostrar-se muito eficaz, este agrega alto valor enérgico e poluente ao BTC diminuindo assim suas características sustentáveis. Além disso, estudos mostram que o acréscimo de cimento é prejudicial às propriedades térmicas oferecidas pela terra (Silva, 2015 e Sore et al, 2017).

Por isso, busca-se na ativação alcalina uma nova forma de agregar qualidades ao BTC sem diminuir principalmente sua característica sustentável.

### 3.3. Ativação Alcalina

A ativação alcalina é um processo químico que transforma estruturas parcial ou totalmente amorfas em estruturas com propriedades cimentícias (Palomo et al, 1999). Vassalo (2013) define a ativação alcalina como a reação de um material rico em sílica e alumina com um composto alcalino. Severo et al (2013) acrescentam que esta é uma reação de hidratação dos alumino-silicatos com substâncias alcalino ou alcalino terrosos e também diz que a ativação alcalina é a reação de síntese do geopolímero podendo assim ser chamada de Geopolimerização, termo introduzido por Davidovits (1999).

A nomenclatura geopolimerização foi dada pois o processo se assemelha com a síntese dos polímeros orgânicos pois nela ocorre a condensação dos materiais cimentícios complementares que possuem atividade pozolânica que são ativados alcalinamente para a obtenção do geopolímero (Pinto, 2004). Além do termo geopolímero, Severo et al (2013) citam outras formas de nomear os materiais ativados alcalinamente sendo elas: cimento ativado alcalinamente, cerâmica alcalina, geocimento e concreto de polímero orgânico para se referir aos materiais ativados alcalinamente. Segundo Palomo et al (2009), este produto é uma pasta capaz de aglomerar e endurecer adquirindo resistência mecânica e durabilidade similares ou superiores aos materiais cimentícios tradicionais.

No entanto, apesar de o geopolímero ser bastante conhecido como o produto da ativação alcalina (Severo et al 2013 e Pinto 2004), Davidovits (2014) destacou uma diferença entre o geopolímero e os materiais álcali ativados. Ele disse que os materiais álcali ativados não são necessariamente geopolímeros uma vez que estes são estáveis e aqueles não. Nos materiais álcali ativados pode ocorrer a migração dos álcalis na forma de lixiviação quando em contato com a água, sendo isso em termos de propriedades físico-químicas muito perigoso. Davidovits (2014) ainda verificou que a ativação alcalina seria apenas o primeiro passo da geopolimerização que deve ser continuada e finalizada (Caballero, 2017). Osório (2006) considera ativação alcalina uma nomenclatura mais abrangente que contém a geopolimerização.

Sobre os geopolímeros, estes são polímeros inorgânicos que possuem uma estrutura tridimensional formada por tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e  $\text{AlO}_4$  ligados alternadamente (Davidovits, 1991 apud Caballero, 2017). São geralmente um material sólido e estável (Duxson et al, 2005) e também recebem o nome de polissialato, termo

dado por Davidovits em 1976 sendo uma abreviatura para poli-silico-aluminatos que diz respeito a uma cadeia molecular de estrutura amorfa à semicristalina contendo silício, alumínio e oxigênio (Davidovits, 1976 apud Vassalo, 2013).

As principais qualidades dos materiais geopoliméricos são resistência ao fogo e a ácidos, boa trabalhabilidade e coesão, elevada resistência mecânica e dureza superficial (Pinto, 2004), além de baixa retração e baixa condutividade térmica (Cunha, 2012). Por esses motivos, recentemente os geopolímeros aparecem como uma alternativa ao cimento convencional (Middendorf e Singh, 2020).

Tendo em vista as vantagens fornecidas, o maior empecilho para os ligantes geopoliméricos é o seu custo. Torgal et al (2005), mostraram que um concreto geopolimérico de baixo custo é mais caro que um concreto tradicional. Entretanto, por ser uma opção sustentável, os ligantes geopoliméricos podem se tornar competitivos caso se englobe o custo ambiental na produção dos ligantes tradicionais como é o caso do cimento. (Torgal et al, 2005).

A síntese do geopolímero consiste basicamente de dois componentes, o primeiro material é fonte de Silica e alumina amorfa chamado de precursor e o outro é o ativador alcalino de alto pH (Caballero, 2017). Segundo Severo et al (2013), diversos são os materiais sílico aluminosos que são possíveis de serem submetidos a esse tipo de reação; entretanto, Duxson (2006) diz que mesmo com as semelhanças moleculares dos possíveis precursores, é evidente sua influência nas diferenças de propriedades dos geopolímeros.

Sobre os ativadores alcalinos, segundo Costa et al (2013), estes devem ser escolhidos baseando-se nas características do precursor a ser utilizado na ativação. Como o processo de geopolimerização deve ocorrer em ambiente de alta alcalinidade, soluções de hidróxidos e silicatos de sódio e potássio são as mais relatadas na literatura, podendo ser usadas individualmente, caracterizando um ativador simples, ou combinados uns com os outros, sendo assim um ativador composto (Santa, 2012).

Quando ocorre a interação do precursor com o ativado alcalino inicia-se a dissolução do Al e do Si no meio alcalino seguida de uma policondensação formando um gel que dará origem a uma rede tridimensional (Vassalo, 2013). Glukhovsky (1959) dividiu este processo em 4 etapas: dissolução, coagulação, condensação e cristalização. Outros autores como Davidovits (1988) e Jaarsveld (1999) fizeram a

divisão em três etapas, sendo a primeira a dissolução da sílica e as outras duas o transporte e a policondensação que ocorreriam simultaneamente.

A dissolução acontece quando o pH da solução alcalina aumenta e consiste na quebra das ligações covalentes existentes no precursor e assim a mistura é transformada em uma fase coloidal (Glukhovsky, 1959). A dissolução ocorre por hidrólise alcalina, de modo que ocorre o consumo de água e a produção de aluminatos e silicatos (Caballero, 2017); estes se acumulam e interagem entre si para formar uma estrutura coagulada, e por isso Glukhovsky (1959) nomeia a fase seguinte de coagulação. A fase de dissolução junto com a coagulação cria uma solução supersaturada de aluminossilicatos e por isso ocorre a formação de um gel (Caballero, 2017). Neste momento, já se iniciou a etapa de condensação, descrita por Glukhovsky (1959) como a geração de uma estrutura condensada. Segundo Weng e Sagoe-Crentsil (2007), os mecanismos envolvidos nesta etapa ainda não são claramente entendidos. Duxson et al (2006), explicaram esse momento como uma reorganização do sistema que resulta em uma estrutura tridimensional de aluminossilicatos.

Na fase de condensação, ocorre a liberação da água que foi consumida durante a dissolução (Duxson et al, 2006). Segundo Wallah et al (2006), esta água é benéfica ao desempenho dos geopolímeros pois elimina os nano-poros da matriz. A condensação do aluminato e do silicato é a responsável pelo endurecimento do geopolímero (Pinto, 2002). Com o tempo e a temperatura pode ocorrer ainda a fase de cristalização (Glukhovsky, 1959).

Diversos são os fatores que influenciam na reação da ativação alcalina. Destaca-se como importante para explicação neste trabalho a razão de Silica/Alumina proveniente do precursor podendo ser alterada com a adição de silicatos na solução, que é outro aspecto que exerce influência na performance dos materiais junto com a razão molar da solução ativadora. Ademais, outro ponto que vale ser ressaltado são as características de cura como temperatura e tempo em estufa.

A razão de Si/Al é um fator que afeta diretamente a dissolução, hidrólise e condensação dos geopolímeros, sendo um dos parâmetros mais importantes para sua síntese (Lima, 2018). Vassalo (2013) diz que o alumínio tem função importante na regulação do tempo de pega da reação enquanto o Silício é o responsável pela resistência. Assim, com o aumento das relações de Si/Al ocorre um incremento na

resistência mecânica (Lima, 2018); no entanto, valores muito elevados diminuem a estabilidade química e favorecem a ocorrência de eflorescência (HE et al., 2016).

Alguns autores propõem valores ótimos para a razão de Sílica/Alumina. Dentre eles, Duxson et al (2005) dizem que melhores propriedades são obtidas com razões que variam de 3,0 a 3,8. Já Rashad (2013) sugere que os valores ótimos estão entre 3,5 e 5,5 dependendo do tipo de ativador e do estado de cura. Por fim, Lemounga et al (2016) dizem que para geopolímeros a serem aplicados em obras de engenharia com fins estruturais, esses valores devem estar entre 3,3 e 4,5.

Em alguns casos, como por exemplo na utilização do metacaulim, o precursor por si só não atinge os valores propostos de Si/Al e assim é preciso complementar a quantidade de sílica que geralmente ocorre com o acréscimo de Silicatos na solução que, segundo Weng e Sagoe-Crentsil (2007), resulta em produtos com propriedades e estruturas distintas.

Criado et al (2005) dizem que a reação geopolimérica gerada por ativadores com silicato é acelerada pois a sílica inicia a reação com a alumina livre favorecendo o processo. Pinto (2004) e Fernandez-Jimenez & Palomo (2003) relataram um aumento considerável da resistência mecânica em soluções com Silicato de Sódio. Van Jaarsveld (1997) e Kirschner (2004) disseram que a resistência mecânica em geopolímeros, usando o metacaulim como precursor e solução ativadora de NaOH e Silicato de Sódio, aumenta quando a relação molar  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  diminui.

Além da razão de Si/Al vale-se ressaltar também a importância da razão molar do ativador na solução pois é responsável por dissolver a sílica e a alumina controlando os mecanismos iniciais da reação e promovendo as demais etapas (Eduok, 2016). Segundo Gasteiger et al. (1992) a solubilidade da sílica e da alumina aumentam com o aumento da concentração de íons hidróxidos. No entanto, Alonso & Palomo (2001) dizem que a elevada concentração pode limitar a mobilidade dos íons causando um retardo na formação da estrutura coagulada e conseqüentemente atrasando na formação do geopolímero. Eduok (2016) diz que por aumentar a velocidade da reação o aumento da concentração do ativador gera um material menos poroso e mais resistente; no entanto existe um limite para essa concentração de modo a não ocorrer o efeito inverso.

Para Lee (2002), o valor limite para o ganho de resistência com o aumento da concentração molar é de 10mol/l. Weng et al. (2005) observaram experimentalmente que dentro do intervalo de 4 a 12 mol/L, a resistência à compressão aumenta com o aumento da concentração de NaOH. Sathonsaowaphak et al. (2009) verificaram que com o aumento da concentração de NaOH, ocorre o aumento da resistência. Porém, ocorre também uma diminuição na trabalhabilidade. Pinto (2004) já havia observado esse fator e concluiu experimentalmente que a razão molar de 15mol/L conduz a uma boa trabalhabilidade da mistura bem como a bons resultados de resistência mecânica. Ainda sobre a solução ativadora, Midderdorf e Singh (2020) sugeriram concentrações molares variando de 8 a 16 mols/L e apontaram a sua necessidade de ser preparada 24h antes do acréscimo do precursor.

Outro fator que influencia na performance dos geopolímeros e que será discutido aqui é o tempo e a temperatura de cura. Para Severo et al (2013) os geopolímeros podem ser curados a temperatura ambiente; no entanto, o aumento adequado da temperatura pode conduzir a melhorias significativas nas propriedades do material. A temperatura não pode ser muito elevada para não prejudicar a umidade (Mustafa Al Bakri et al, 2011). Muñiz-Villarreal et al (2011) obtiveram em produtos feitos com metacaulim, Hidróxido de Sódio e Silicato de sódio, melhores propriedades quando curados a 60°C. Van Jaarsveld (1999) observou que a cura a 70°C aumenta substancialmente a resistência quando comparada a cura à 30°C. Kirschner & Harmuth (2004) verificaram que a cura submersa para geopolímeros à base de metacaulim provoca redução na resistência e encontraram valores máximos para cura a 75°C durante 4h.

Além da temperatura então, deve-se considerar o tempo em que o material é submetido a tal temperatura. Heah (2011) disse que curas prolongadas melhoram o processo de geopolimerização, sempre atentando à temperatura para evitar perda de água. Para Thakur et al. (2009), alcança-se uma resistência máxima para geopolímeros à base de cinza volante à temperatura de 85° por um período de 4 a 72h. Já Hardjito et al (2004) dizem que a temperatura ótima está entre 30° e 90° para um tempo de 6 a 96h. Estes valores podem servir de parâmetro também para geopolímeros à base de metacaulim pois a influência desses fatores é semelhante aos obtidos com aqueles à base de cinza volante (Severo et al, 2013).

### 3.4. Blocos de Terra Compactados Estabilizados com Ativação Alcalina

A estabilização da terra por meio da ativação alcalina é um método de estabilização do tipo química que tem como objetivo melhorar as características do BTC por meio da adição de elementos que gerem uma reação de ativação alcalina e formem um geopolímero que venha ter função de um aglomerante que una as partículas da terra. O objetivo do uso desse tipo de estabilização é usar um estabilizante mais sustentável que o cimento e que possa aumentar a resistência mecânica da terra e melhorar algumas de suas propriedades sem afetar negativamente outras, a exemplo da inércia térmica.

A aplicação da ativação alcalina para estabilização dos blocos de terra compactados é uma área nova, de modo que poucas são as literaturas sobre o tema. Dentre as literaturas encontradas destaca-se abaixo as observações e conclusões pertinentes feitas pelos autores que se propuseram a discutir sobre o tema.

Silva et al (2015) testou BTC's estabilizados por meio da ativação alcalina de cinza volante nas porcentagens de 10% e 15%. Os testes foram realizados após um período de cura de 180 dias em temperatura ambiente. Dentre os ensaios realizados os BTC's foram testados quanto à compressão mecânica no seu estado seco e saturado; os resultados alcançados chegaram a 12MPa no bloco testado em seu estado seco com 15% de cinza, o que mostra que maior porcentagem de precursor resulta em maiores valores de resistência. No trabalho citado os BTC's ativados alcalinamente obtiveram resultados superiores àqueles requeridos pelas normas internacionais e apesar da presença da água afetar negativamente a resistência dos blocos, os resultados ainda foram de acordo com a norma.

Oliveira (2014) usou a mesma metodologia de Silva et al (2015) e observou que pequenas variações nas características das matérias-primas e nas condições de cura podem afetar a resistência do produto final; observou também que a resistência cresce ao longo dos primeiros 21 dias tendo uma queda a partir do 21º dia até o 28º a partir do qual a resistência fica constante e volta a crescer após 90 dias da confecção estabilizando após 150 dias. Aos 180 dias obteve-se resistência máxima de 7MPa.

Ainda, Silva et al (2015) perceberam que a evolução da resistência à compressão do BTC ativado alcalinamente é lenta quando os blocos são curados em condições ambiente de modo que a resistência à compressão aos 28 dias, apesar de

estar dentro dos requisitos mínimos exigidos para materiais de terra, mostra-se distante da resistência máxima passível de ser alcançada com os blocos.

Teixeira (2017) confeccionou blocos de terra compactados estabilizados pela ativação alcalina do metacaulim se propondo a analisar aspectos metodológicos da fabricação dos blocos e os parâmetros de partida que influenciariam nos resultados. Assim, o autor fez blocos variando a razão molar do ativador, a razão de Si/Al e a temperatura de cura em estufa, e apresentou grande dificuldade na etapa de amassamento e moldagem; entretanto, apontou o potencial da técnica fazendo algumas observações pertinentes.

Dentre as observações feitas destaca-se a influência da temperatura nos resultados de compressão mecânica sendo apontado o aumento da resistência mecânica com o aumento da temperatura de cura. Segundo Teixeira (2009), o fator água/sólidos e a forma com que a água é adicionada na mistura exerce grande influência no processo de amassamento e moldagem sendo este uma das grandes dificuldades enfrentadas pelo autor que influenciaram diretamente nos resultados de absorção por capilaridade, devido à possibilidade de alguns blocos serem mais adensados que outros.

Sore et al (2018) fizeram algumas comparações entre BTC sem estabilizante, estabilizado com 8% de cimento e estabilizado com 5%, 10%, 15% e 20% de geopolímero a base de metacaulim. Foi observado que em termos de resistência à compressão, os blocos com mais de 10% de geopolímero alcançaram resistência de pelo menos 4 MPa, sendo crescente quando também é crescente a porcentagem de geopolímero. Outra observação pertinente é que apesar de, em termos de resistência, apenas os blocos com 20% de geopolímero ter ultrapassado aqueles estabilizados com cimento, o acréscimo de resistência aos blocos estabilizados por meio da ativação alcalina não alteraram suas propriedades térmicas ficando elas próximas às dos blocos sem estabilizante, diferentemente dos blocos estabilizados com cimento que tem suas propriedades térmicas alteradas.

Sanches (2020) testou duas metodologias para confecção dos BTC's estabilizados por meio da ativação alcalina sendo elas os ativadores em solução e estes misturados no estado sólido e percebeu que a primeira promoveu melhores resultados; no entanto, a segunda é mais eficiente em termos de produtividade. Além

disso, ressaltou-se o benefício do acréscimo de Silicato de Sódio na solução ativadora e ainda mostrou-se a possibilidade do uso da Cal Hidratada para potencializar os resultados. Sanches (2020) acrescentou o metacaulim na solução, mas não apresentou justificativas para o fato.

Ainda, França et al (2019) realizaram uma revisão bibliográfica com 4 artigos que retratam sobre BTC estabilizado com ativação alcalina, alguns deles citados acima e apontou para algumas lacunas nestas pesquisas dentre elas a falta de estudos sobre as condições de cura dos blocos, mesmo sendo este um assunto bastante estudado na área de materiais da construção civil quando diz respeito a outros materiais e principalmente ao geopolímero.

Por fim, a Tabela 1 foi elaborada a fim de apresentar algumas variáveis utilizadas bem como observações pertinentes feitas nos trabalhos acima citados.

Tabela 1: Resumo com informações importantes dos trabalhos de BTC estabilizados com ativação alcalina

AUTOR	PRECURSOR UTILIZADO	MELHOR RESULTADO	DADOS SOBRE O MELHOR RESULTADO			Informações Pertinentes
			% DE PRECURSOR	CONDIÇÕES DE CURA	TEMPO DE ENSAIO	
Oliveira (2014)	Cinza Volante	7 MPa	15%	Condições Ambiente	180 dias	Pequenas variações nas características dos materiais e nas condições de cura podem afetar a resistência final.
Silva et al (2015)	Cinza Volante	12 MPa	15%	Condições Ambiente	180 dias	Maior porcentagem de precursor resulta em maior valores de resistência.
Silva et al (2015)						Evolução da resistência a compressão é lenta quando os blocos são curados em condições ambientes.
Teixeira (2017)	Metacaulim	4,55 MPa	8%	24h a temperatura ambiente e 7h em estufa a 80°	7 dias	o fator água/sólidos e a forma que a água é adicionada na mistura exerce grande influência no processo de amassamento e moldagem.
Sore et al (2018)	Metacaulim	8,95 MPa	20%* de geopolímero	7 dias a temperatura ambiente e 7 dias em estufa a 60°	14 dias	acrescimento de resistência com aumento da porcentagem de geopolímero.
Sanches (2020)	Metacaulim	5,22 MPa	8%	24h a temperatura ambiente e 5h em estufa a 70°	7 dias	O melhor traço teve também acréscimo da Cal Hidratada, e o metacaulim foi acrescentado na solução.

A partir dessas informações foram desenvolvidos os métodos e as variáveis usadas na metodologia experimental como descritos no tópico seguinte.

## 4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 4.1. Materiais Utilizados

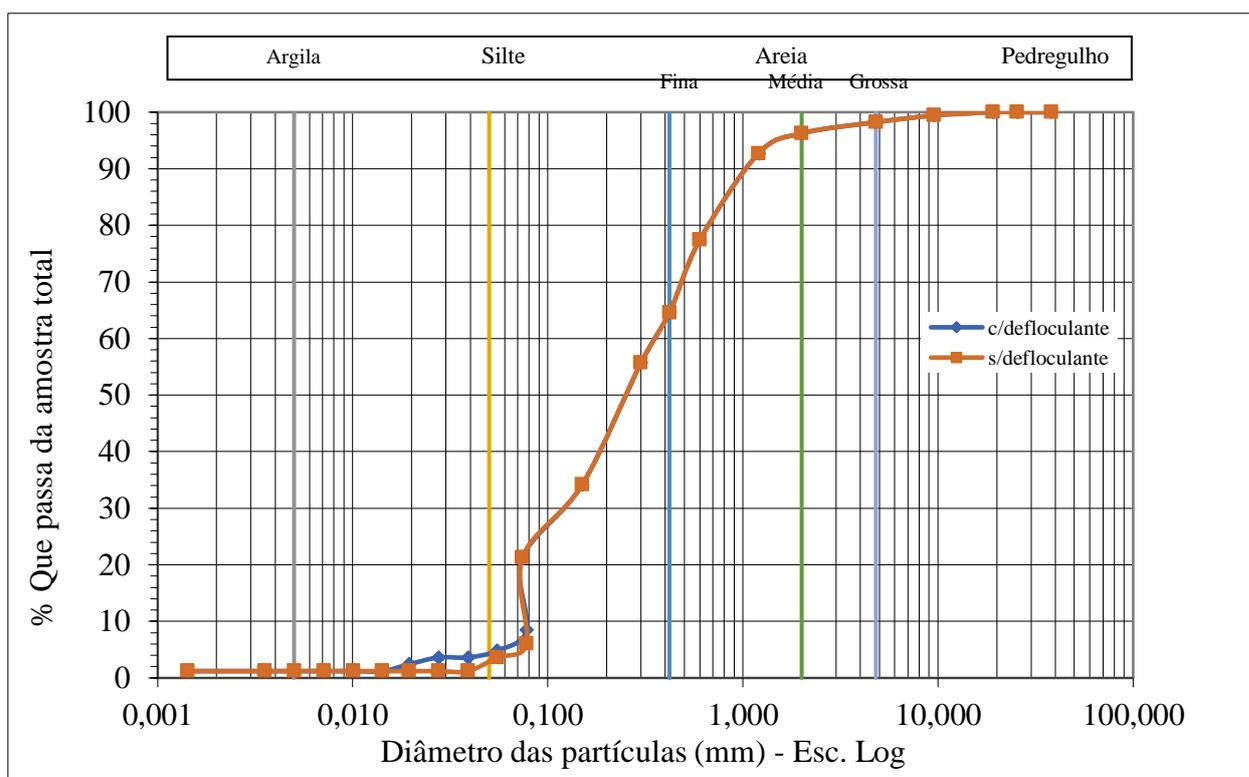
Os materiais utilizados para desenvolvimento do presente trabalho foram:

- Terra proveniente de bota fora do município de João Pessoa;
- Metacaulim Rosa fabricado pela indústria BBM Minérios;
- Hidróxido de Sódio com índice de pureza 98%, fabricado na Indústria Química Bandeirante Brazmo;
- Silicato de Sódio obtido na indústria Pernambuco Química, em Recife – PE.

Para ser utilizada no desenvolvimento do trabalho a terra foi peneirada e testada quanto à granulometria por meio da NBR 7181 (ABNT, 2016) pelo ensaio de peneiramento de sedimentação e quanto aos limites de Atterberg conforme as normas NBR 7180 (ABNT, 2016) e NBR 6459 (ABNT, 2016).

O solo caracterizado obteve acurva granulométrica mostrada no Gráfico 1.

Gráfico 1: Granulometria da terra utilizada



A porcentagem passante na peneira nº4 (4,8) foi de 98,22% estando próximo ao estabelecido pela NBR 10833 (ABNT, 2012), já a porcentagem passante na peneira nº 200 foi de 21,24% que está dentro do estabelecido pela mesma norma.

Quanto aos limites de Atterberg, a terra estudada obteve valores dentro do previsto pela NBR 10833 (ABNT, 2018) como pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 2: Limites de Atterberg

Limite de Liquidez	30,9%
Limite de Plasticidade	20,9%
Índice de Plasticidade	10,0%

O metacaulim foi caracterizado quanto sua composição química através do ensaio de fluorescência de raio X, apresentado na Tabela 2.

Tabela 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>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO
%	56,707	24,211	12,838	3,053	2,592	0,042

A caracterização do Silicato de Sódio foi obtida a partir dos dados fornecidos pela indústria fabricante e pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 4: Propriedades do Silicato de Sódio

Fórmula	Na <sub>2</sub> O.nSiO <sub>2</sub>
Aspecto	Líquido viscoso levemente turvo
Cor	Incolor a levemente amarelado
Alcalinidade com Na <sub>2</sub> O (em %)	16,0% - 19,0%
Sílica com SiO <sub>2</sub> (em %)	33,0% - 38,0%
Solubilidade	Solúvel em água
Relação SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> 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

## 4.2. Métodos

A metodologia experimental aplicada para este trabalho consistiu em confeccionar blocos de terra compactados estabilizados por meio da ativação alcalina do metacaulim observando a sua trabalhabilidade para em seguida realizar o teste de compressão mecânica e avaliar a influência das variáveis analisadas no desempenho do bloco.

Para falar sobre as variáveis analisadas convém dividir a metodologia em duas etapas: a primeira possui variáveis metodológicas que podem influenciar no desempenho do BTC ativado alcalinamente, sendo elas a ordem e o momento de acréscimo dos materiais, Metacaulim e Silicato de Sódio, respectivamente. A segunda etapa consiste em analisar variáveis que influenciam na ativação alcalina e na sua eficiência como forma de estabilização, como a porcentagem de metacaulim utilizada na mistura e o tempo de cura dos blocos.

Baseado na literatura, alguns parâmetros foram considerados constantes para todas as etapas propostas, sendo eles:

- Razão de Si/Al de 4,5 (Lemougna et al, 2016 e Davidovits, 1982), baseada também na razão proveniente do metacaulim e alterada com acréscimo de Silicato de Sódio;
- Solução de água + NaOH feita um dia antes do dia da confecção dos blocos (Midderndorf e Singh, 2020);
- Razão Molar da solução ativadora (água + NaOH) de 15mols/L (Pinto, 2004, Teixeira, 2017 e Sanches, 2020);
- Cura em estufa a 70°C (Van Jaarsveld, 1999 e Teixeira, 2017).

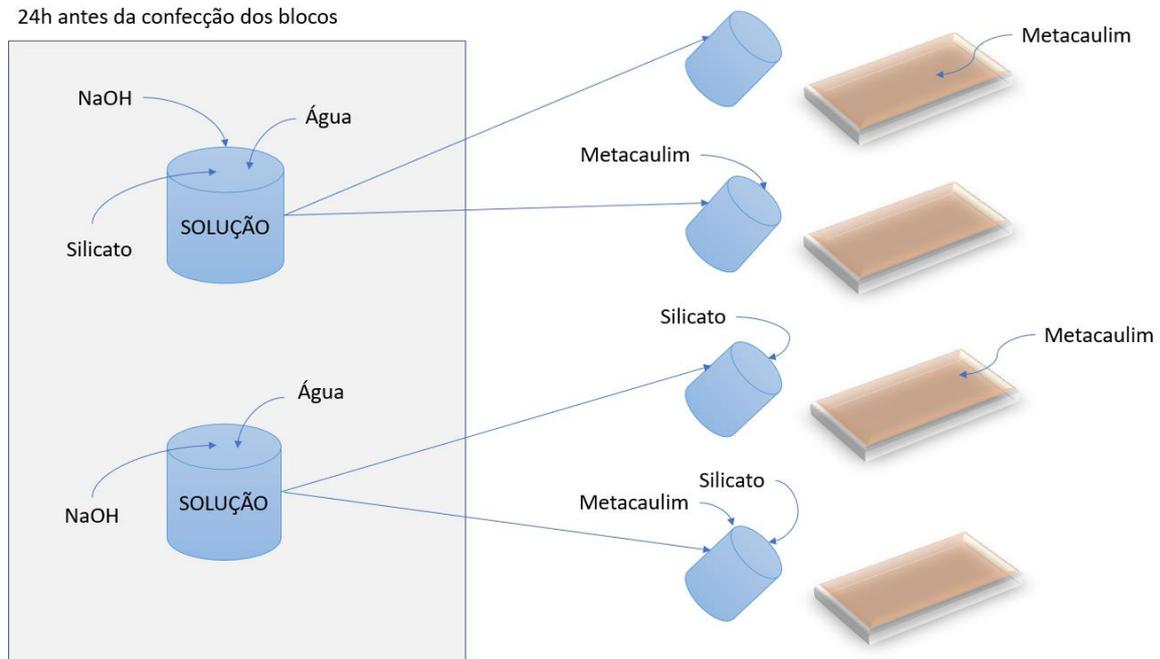
Os traços confeccionados na primeira etapa experimental podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 5: Traços a serem executados na primeira etapa

TRAÇO	SILICATO	METACAU LIM
1	Na solução um dia antes da confecção dos blocos	Na terra
2	Na solução um dia antes da confecção dos blocos	Na solução
3	Na solução no dia da confecção dos blocos	Na terra
4	Na solução no dia da confecção dos blocos	Na solução

Para cada traço foram confeccionados 3 blocos por meio de mistura manual utilizando uma das metodologias correspondente na tabela. O Fluxograma apresentado na Figura 9 mostra o desenvolvimento das metodologias de cada traço.

Figura 9: Esquema de execução dos Traços do planejamento 1



Fonte: Acervo Pessoal

Assim, as soluções de água e hidróxido eram confeccionadas 24h antes da confecção dos blocos sendo que, para os traços 1 e 2 também era acrescentado o silicato. Para os traços 3 e 4 o silicato era acrescentado apenas no dia da confecção dos blocos.

Em relação ao metacaulim, este era misturado na terra como mostrado na Figura 10, ou acrescentado na solução que em seguida era misturada na terra (Sanches, 2020) como mostrado na Figura 11.

Figura 10: Execução dos traços com Metacaulim na Terra



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 11: Execução dos traços com o Metacaulim misturado na Solução



Fonte: Acervo Pessoal

Nesta etapa, além dos parâmetros pré-definidos citados acima, a porcentagem de metacaulim também foi fixada, sendo 8% da massa da terra (Teixeira, 2017); o tempo de cura em estufa foi de 5h (Kirschner & Harmuth, 2004 e Sanches, 2020).

Para a realização da segunda etapa proposta, foi feito um planejamento experimental com as duas variáveis sugeridas (porcentagem de metacaulim e tempo

de cura em estufa). Assim, foram confeccionados 4 traços distintos além de dois pontos centrais como podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 6: Traços a serem executados na segunda etapa

TRAÇO	% METACAULIM	TEMPO EM ESTUFA
1	15%	72h
2	15%	24h
3	5%	72h
4	5%	24h
5	10%	48h
6	10%	48h

A variação da porcentagem de metacaulim foi decidida baseando-se nos trabalhos de Silva et al (2015) e Oliveira (2014), além de Sore et al (2018). Os tempos em estufa foram variados segundo os valores propostos por Thakur et al. (2009) e Hardjito et al (2004) baseando-se em considerações feitas por Severo et al (2013).

A metodologia utilizada para a confecção dos blocos foi baseada na melhor metodologia obtida na primeira etapa realizada; entretanto, a mistura foi feita utilizando uma betoneira de 400 Litros e foram confeccionados 6 blocos por traço.

Em ambas as etapas, a mistura era compactada utilizando a prensa hidráulica fabricada pela Eco Brava mostrada na Figura 12.

Figura 12: Prensa Hidráulica



Fonte: Acervo Pessoal

Os blocos produzidos eram curados 24h em condições ambiente cobertos por uma lona plástica e em seguida colocados na estufa. Após o tempo de cura, os blocos eram retirados da estufa a fim de serem preparados para o ensaio que foi realizado com 14 e 7 dias após a confecção dos blocos para a primeira e segunda etapa, respectivamente.

O ensaio de resistência à compressão mecânica foi feito baseado na norma NBR 10836 (ABNT, 2013). Assim, os blocos foram cortados ao meio e colados com uma pasta de cimento; também foram capeadas ambas as faces do bloco para sua regularização como mostrado na Figura 13 e 24h após este procedimento, os blocos foram submetidos à compressão a uma velocidade de 10 mm/s.

Figura 13: Blocos preparados para ensaio de Compressão Mecânica



Fonte: Acervo Pessoal

Para o desenvolvimento da metodologia acima citada enfrentou-se certa dificuldade na determinação da quantidade de água ideal a ser usada em cada traço da segunda etapa do planejamento.

Inicialmente calculou-se a quantidade de água baseando-se na primeira etapa do planejamento utilizando uma relação linear e foram confeccionados os traços 1 e 3 com a quantidade de água calculada; estes não obtiveram bom desempenho de modo que foram nomeados de traços 1\* e 3\* pois precisaram ser refeitos posteriormente e assim adotou-se também como parte da metodologia deste trabalho a busca por meios para determinação da quantidade de água adequada antes de continuar com o desenvolvimento da segunda etapa.

Para isso, utilizando cada porcentagem de metacaulim determinada foi feito um bloco a fim de verificar a quantidade de água ideal para a sua confecção (Figura 14). O bloco foi confeccionado com todos os parâmetros acima citados para a segunda etapa do planejamento com exceção da razão de Si/Al que não foi alterada, de modo que não houve adição de Silicato de Sódio. Os blocos também não foram curados em estufa, já que o principal objetivo desse experimento era definir a quantidade de água necessária para confeccionar um bloco.

Figura 14: Blocos confeccionados para determinação da quantidade de água



Fonte: Acervo Pessoal

Após feito esse experimento foi dado seguimento à segunda etapa do planejamento de modo que a água foi determinada empiricamente. Além da solução a ser acrescentada, era feito também uma solução extra de modo que, se houvesse necessidade, mais solução poderia ser acrescentada e assim foram feitas observações ao longo da confecção dos blocos. Para cada traço confeccionado, a água foi colocada cuidadosamente a fim de obter uma mistura próxima da umidade ótima.

A verificação da umidade foi feita por meio de teste simples e visual (Figura 15).

Figura 15: Teste para verificação da umidade



Fonte: Acervo Pessoal

A quantidade de água colocada em cada traço foi registrada a fim de se obter informações que pudessem orientar a quantidade de água ideal necessária para um bom desempenho da mistura em função da quantidade de terra e de metacaulim usada. Além da quantidade de água, ao longo do desenvolvimento metodológico outros pontos importantes foram observados e discussões pertinentes foram levantadas e serão apresentadas no tópico 5 deste trabalho.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Etapa 1: Variáveis Metodológicas

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão mecânica dos blocos confeccionados na primeira etapa do desenvolvimento metodológico podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados de Compressão Mecânica: Etapa 1

	MK	SILICATO	1 (MPa)	2 (MPa)	3 (MPa)	MÉDIA (MPa)
T1	na terra	1 dia antes	5,22	5,17	3,74	4,71
T2	na solução	1 dia antes	4,56	4,58	4,73	4,62
T3	na terra	no dia	4,57	4,81	4,77	4,72
T4	na solução	no dia	3,64	4,14	3,03	3,60

Devido à grande variação de resultado no Traço 1 do bloco 3 para os demais blocos do mesmo traço, o resultado do bloco 3 deste traço foi desconsiderado e as observações foram feitas considerando, para o traço 1, apenas os resultados dos blocos 1 e 2.

Percebe-se que a diferença entre os resultados do T1, T2 e T3 é pequena, e que apenas o T4 obteve uma resistência à compressão menor que os demais traços.

Quando o silicato foi misturado na solução um dia antes da confecção dos blocos, os resultados obtidos mostraram-se melhores. Quanto ao metacaulim, percebeu-se que os melhores resultados são alcançados quando este é acrescentado na terra.

No entanto, pretende-se aqui não apenas avaliar os resultados de compressão mecânica, mas também o processo de amassamento e moldagem. Vale-se ressaltar também que misturas feitas à mão se comportam diferente daquelas feitas em betoneira.

Assim, apresenta-se aqui algumas fotos tiradas no dia da confecção dos blocos a fim de realizar uma análise visual da metodologia aplicada.

Figura 16: Misturas Homogeneizadas



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 17: Impregnação na prensa



Fonte: Acervo Pessoal

Observa-se em sua maioria que todas as misturas tiveram boa homogeneização; isso se deve ao maior controle proporcionado pela mistura manual, o que não acontece em traços feitos na betoneira. A mistura referente ao Traço 1 apresentou-se bastante empelotada, a sua trabalhabilidade foi classificada como média, pois a mistura foi colocada manualmente na prensa, mas não grudou tanto no recipiente de moldagem.

As misturas dos traços T2, T3 e T4 mostraram-se mais dispersas e com menos pelotas. Para as três misturas foi possível utilizar o recipiente da prensa em que o material cai em uma gaveta que corre para o molde, o que melhorou a produtividade destes traços; entretanto, foi vista impregnação da mistura na prensa durante as moldagens dos blocos dos traços T3 e T4, o que não aconteceu com tanta intensidade no traço T2.

Por fim, ressalta-se aqui que quando se considera a homogeneidade da mistura, na betoneira alcança-se uma melhor homogeneização e dispersão do

metacaulim quando este é acrescentado na solução. Além disso, essa metodologia também evita perdas do material fino quando a betoneira entra em movimento.

Assim, a partir dos resultados, das análises e das considerações feitas, optou-se pela metodologia adotada no traço T2 para dar seguimento ao planejamento deste trabalho.

## 5.2. Discussões sobre a Quantidade de Água

A quantidade de água utilizada na primeira etapa do planejamento e as quantidades definidas por meio de relação linear para os traços 1 e 3 da segunda etapa podem ser vistas na tabela 8 junto com as massas de terra e metacaulim utilizadas nos respectivos traços.

Tabela 8: Valores Calculados Para os traços 1\* e 3\*

	TRAÇO	% Metacaulim	Terra (kg)	Metacaulim (kg)	TERRA + MK	Água (kg)
3 blocos	ETAPA 1	8%	9	0,72	9,72	0,85
6 blocos ETAPA 2	1*	15%	18	2,7	20,7	1,85
	3*	5%	18	0,9	18,9	1,65

A quantidade de água definida para o traço 1\* não foi suficiente, já para o traço 3\* a água definida deixou a mistura bastante úmida e pouco trabalhável, chegando à conclusão de que a quantidade de água em função da massa de metacaulim e terra não é uma relação linear ressaltando a necessidade de buscar outras formas de defini-la.

Ainda, na tentativa de moldar o traço 1\* acrescentou-se mais 0,85kg de solução feita na hora; no entanto, com essa quantidade adicional a mistura ficou bastante úmida, e, junto com o rápido tempo de pega, atrapalhou a trabalhabilidade do material. Com muita dificuldade os blocos foram moldados, colocados na estufa por 72h e ensaiados. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9: Resultado de Compressão Mecânica do Traço 1\*

TRAÇO	% Metacaulim	Tempo em Estufa	1 (MPa)	2 (MPa)	3 (MPa)	Média (MPa)
1*	15%	72h	2,89	2,81	2,89	2,87

Com relação ao teste feito para determinação da quantidade de água para confecção de um bloco, os resultados de massa de água obtidos em função do metacaulim encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10: Quantidade de água para a confecção de 1 bloco

% Metacaulim	Terra (kg)	Metecaulim (kg)	TERRA + MK	Água (kg)
0%	3	0	3	0,18
5%	3	0,15	3,15	0,30
8%	3	0,24	3,24	0,34
10%	3	0,3	3,3	0,35
15%	3	0,45	3,45	0,41

Para determinar por meio destes traços a quantidade de água necessária, precisa-se ainda considerar a água presente no silicato, já que este não foi acrescentado. Assim por meio de informações do fabricante, sabe-se que a quantidade de água presente no silicato varia de 51% a 43% de sua massa total; desse modo, pôde-se calcular a quantidade de água necessária para a confecção de 6 blocos, multiplicando os dados de massa de água da Tabela 10 por 6 e subtraindo da água presente no silicato segundo apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Quantidade de água para a confecção de 6 blocos com as devidas porcentagens de Metacaulim

% Metacaulim	Quantidade de água para <u>6 blocos</u> (kg)	Quantidade de Silicato a ser usada (g)	Quantidade de Água presente no silicato (51% a 43%) (g)		Quantidade de água efetivamente necessária (kg)	
5%	1,80	0,41	0,17	0,21	1,59	1,63
10%	2,10	0,81	0,35	0,41	1,69	1,75
15%	2,46	1,22	0,52	0,62	1,84	1,94

Observa-se que os intervalos definidos da quantidade de água a ser acrescentada condizem com as observações feitas a partir dos resultados obtidos na Tabela 8 apenas para o traço 3\*, pois nesse traço foi utilizado 1,65 kg de água e verificado que foi muita água, o que de fato é mostrado na tabela 11, já que o valor limite máximo determinado nela é 1,63 kg de água. Para o traço 1\*, o valor usado de 1,85 kg de água não foi suficiente para umedecer todo o material, o que não condiz com o apresentado na Tabela 11, pois 1,85 kg está dentro do intervalo estipulado e assim deveria ser suficiente.

Além dessas observações, foi calculado também a quantidade de água para confecção de 3 blocos com 8% de metacaulim multiplicando os valores obtidos na Tabela 10 por 3 e fazendo os devidos decréscimos pela utilização do silicato, os valores obtidos foram condizentes com a quantidade de água usada na etapa do projeto 1 ( 0,85 kg de água ) como pode ser visto na Tabela 12.

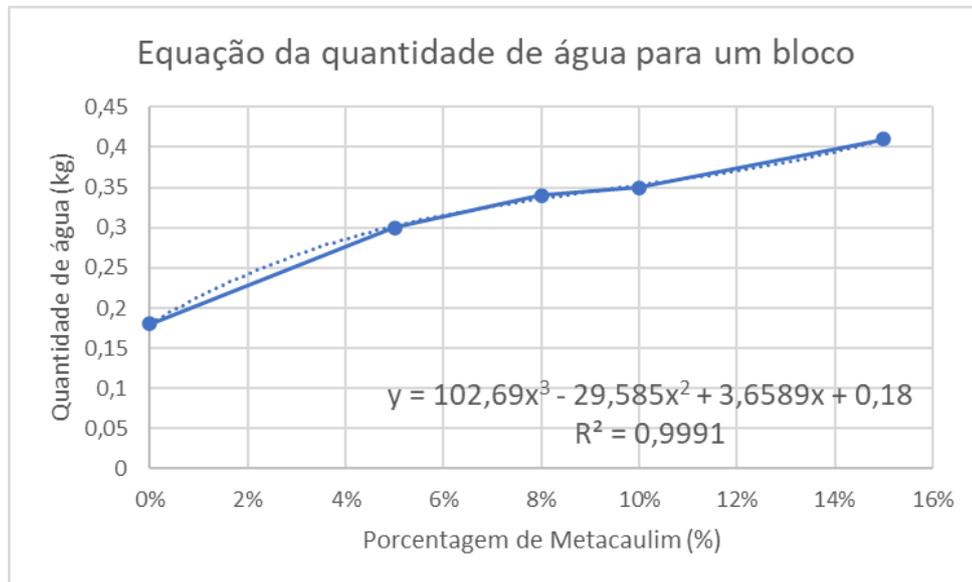
Tabela 12: Quantidade de água para confecção de 6 blocos com 8% de metacaulim

% Metacaulim	Quantidade de água para 3 blocos (kg)	Quantidade de Silicato a ser usada (g)	Quantidade de Água presente no silicato (53% a 49%) (g)		Quantidade de água efetivamente necessária (kg)	
8%	1,02	0,32	0,14	0,17	0,85	0,88

A partir desses resultados buscou-se encontrar uma função que descrevesse a quantidade de água necessária em função da quantidade de metacaulim e de terra, no entanto devido à pouca quantidade de valores e a não representatividade destes resultados em um universo maior isso não foi possível. Além disso, diversos são os fatores que influenciam na quantidade água, já que como visto esta depende da quantidade de silicato a ser acrescentado e esse valor depende das características dos materiais utilizados sendo específicos para cada situação.

Entretanto, uma equação geral da quantidade de água necessária para confeccionar um bloco sem utilização de silicato em função da porcentagem de metacaulim foi definida e pode ser vista no Gráfico 2.

Gráfico 2: Gráfico representativo da quantidade de água em função da porcentagem de metacaulim para a confecção de um bloco



Ressalta-se aqui que, do valor obtido com a função descrita acima é necessário retirar a quantidade de água presente no silicato, caso este seja adicionado na mistura.

Os blocos confeccionados para a determinação da quantidade de água foram ainda testados, após 15 dias quanto à compressão mecânica e os valores obtidos podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados de Compressão Mecânica dos blocos confeccionados para a determinação da quantidade de água

% Metacaulim	Resultado (Mpa)
5%	2,01
8%	2,10
10%	2,90
15%	2,59

Como foi confeccionado apenas um bloco para cada traço e não houve cura em estufa, estes resultados não são passíveis de serem analisados com precisão; no

entanto, eles servem para apontar a possibilidade de cura em condições ambiente para a obtenção de blocos com resistência suficiente para serem usados em alvenaria de vedação após 15 dias.

Quanto à definição da quantidade de água necessária, por não ter sido possível defini-la precisamente para cada traço, optou-se por fazer observações empíricas ao longo da confecção dos blocos da segunda etapa do planejamento, verificando se os valores obtidos ficaram dentro dos intervalos determinados na Tabela 11.

Para os traços confeccionados na 2 etapa deste trabalho, com as porcentagens de metacaulim apresentadas, a quantidade de água utilizada poder ser vista na Tabela 14.

Tabela 14: Quantidade de água utilizada para confecção dos blocos da Etapa 2

TRAÇO	% Metacaulim	Água (kg)
1	15%	1,94
2	15%	1,86
3	5%	0,87
4	5%	1,17
5	10%	1,46
6	10%	1,37

A partir desses resultados percebeu-se que apenas o traço 1 e 2 obtiveram valores de água dentro dos intervalos limitados na Tabela 11. Vale-se ressaltar que para os demais traços, a fim de garantir a umidade adequada, parte da solução feita não foi acrescentada e assim consequentemente parte do silicato também o que pode ter afetado os resultados. Além disso, em alguns traços foi percebida certa umidade na terra o que também pode ter alterado a quantidade necessária de modo que outra variável entra no sistema sendo esta a umidade do local onde a terra estiver armazenada.

Assim, a dificuldade em estabelecer uma relação que defina a quantidade de água deve-se às diversas variáveis que influenciam no processo e ao fato de que nesse método de estabilização não é considerado apenas a água mas sim a solução como um todo de modo que a não utilização de parte da solução interfere diretamente em outras variáveis do problema. Além disso, pode-se considerar que a quantidade

de água não depende apenas de fatores físicos como a quantidade de material sólido, mas também de fatores químicos envolvidos com a reação da ativação alcalina que em certo momento absorve água e em outro momento libera água (Duxson et al, 2006).

### 5.3. Etapa 2: Variáveis Experimentais

Os resultados obtidos na segunda etapa do desenvolvimento do trabalho podem ser vistos na Tabela 15.

Tabela 15: Resultados de compressão mecânica obtidos na Etapa 2

TRAÇO	% METACAULIM	TEMPO EM ESTUFA	1 (MPa)	2 (MPa)	3 (MPa)	4 (MPa)	5 (MPa)	6 (MPa)	MEDIA (MPa)
1	15%	72h	5,31	4,31	5,11	4,71	5,27	4,98	4,95
2	15%	24h	3,91	3,68	3,47	4,36	4,06	2,85	3,72
3	5%	72h	1,37	1,28	1,82	1,73	2,18	2,41	1,80
4	5%	24h	2,50	1,93	2,92	2,72	2,20	3,13	2,57
5	10%	48h	3,47	4,41	4,43	5,31	4,15	4,19	4,32
6	10%	48h	4,30	3,56	2,44	4,69	2,71	3,49	3,53

Observa-se em sua maioria que os resultados obtidos foram satisfatórios, apresentando com exceção do traço 3 blocos capazes de ser aplicados em alvenaria de vedação segundo a NBR 10834 (ABNT, 2012). Além disso, destaca-se o traço 1 e 5 que obtiveram resultados maiores que 4MPa podendo assim serem usados como blocos de alvenaria estrutural.

Para melhor análise dos dados utilizou-se do software *Statistica* para elaboração de alguns gráficos. Para a análise destes gráficos precisa-se considerar os maiores valores das variáveis (15% e 72h) como sendo igual a 1, os menores valores (5% e 24h) igual a -1 e os valores médios (10% e 48h) igual a zero. No Gráfico 3 o eixo x corresponde à porcentagem de metacaulim e o eixo y ao tempo em estufa; já no Gráfico 4, os eixos x e y seguem correspondendo às mesmas variáveis e o eixo z corresponde à resistência à compressão. Dessa análise, foram gerados os Gráficos 3, 4 e 5.

Gráfico 3: Resultados de Resistência para as variáveis estudadas

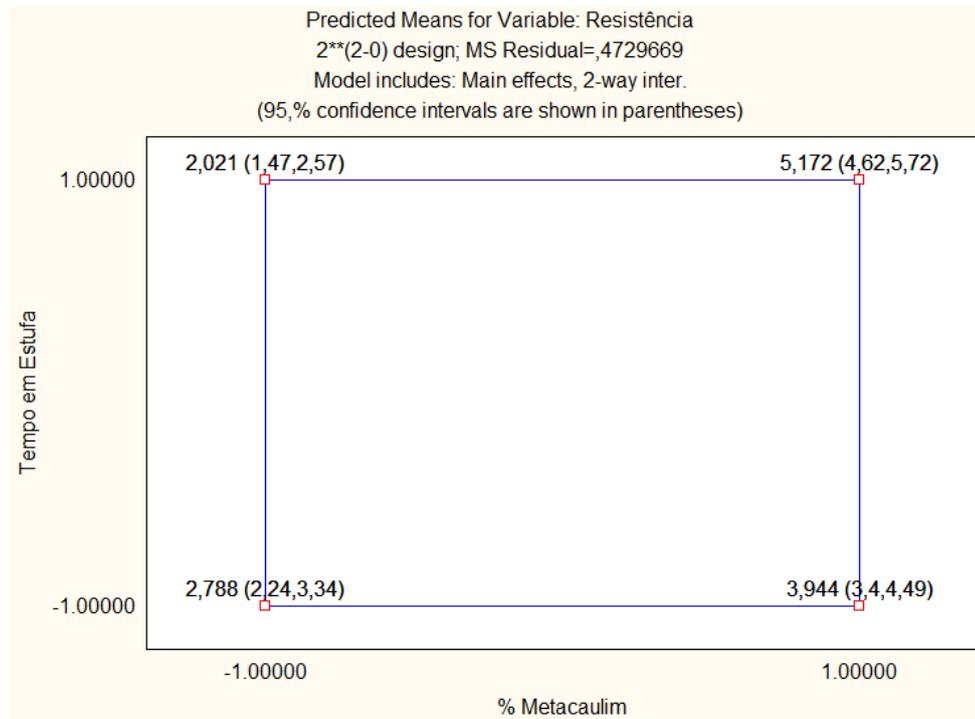
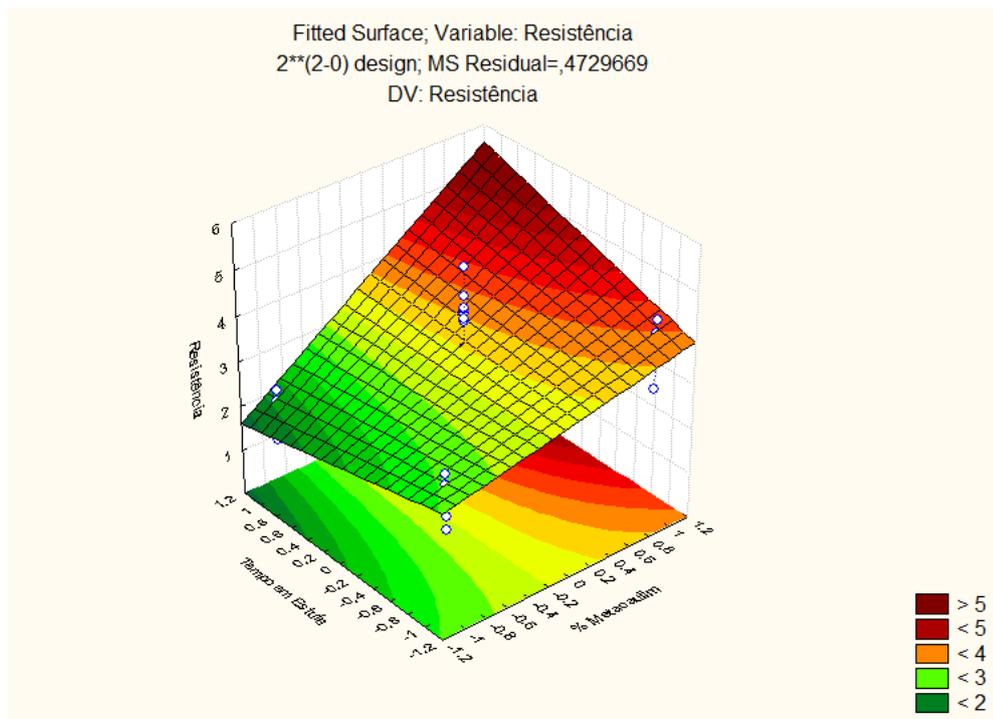


Gráfico 4: Variação da resistência em função das variáveis estudadas



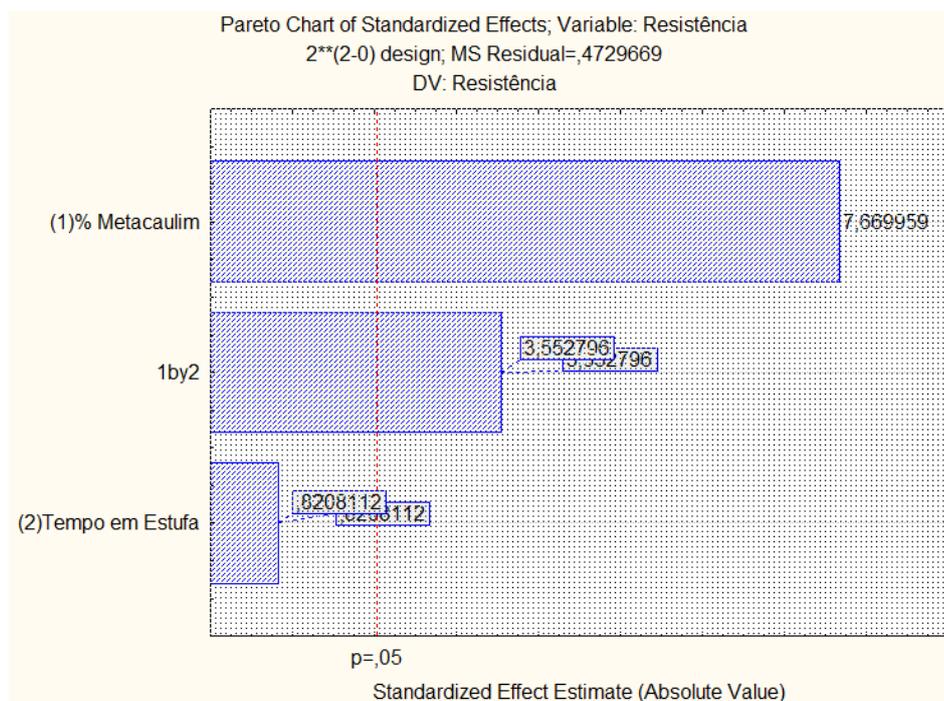
Observa-se por meio dos gráficos 3 e 4 uma relação crescente de resistência quando se combina maiores porcentagens de metacaulim com tempos mais prolongados em estufa.

Percebe-se também que o acréscimo de resistência com o aumento do tempo em estufa acontece apenas à medida que a porcentagem de metacaulim aumenta; para pequenas porcentagens de metacaulim pode ocorrer inclusive uma leve queda de resistência com o aumento do tempo em estufa. Esse comportamento pode ter tido a influência de outras variáveis como a quantidade de solução, pois como mostrado acima, no traço 3 foi acrescentado menos solução que no traço 4 e isso pode ter afetado a resistência já que para os pontos centrais, o traço 5, que obteve maior resultado, possuía mais solução que o traço 6, que obteve menor resultado.

Quanto à porcentagem de metacaulim, houve grande influência sua na resistência dos blocos, de modo que com o aumento da quantidade do material aumenta-se as resistências mecânica à compressão, sendo este aumento mais acentuado quando combinadas com tempos mais prolongados em estufa e mais leve em tempos menores em estufa.

Outro gráfico que auxilia na análise dos resultados é o gráfico de Pareto que pode ser visto no Gráfico 5.

Gráfico 5: Análise de Pareto



Por meio desse gráfico, percebe-se quais variáveis estudadas são significativas para os resultados analisados. Como resposta, a porcentagem de metacaulim mostrou-se ser uma variável bastante significativa, diferentemente do tempo em estufa, que não se mostrou significativa para os resultados, exceto quando combinada com o metacaulim (1by2).

Essas observações implicam que para porcentagens de metacaulim muito baixas não adianta aumentar o tempo em estufa para potencializar os resultados, o que mostra que a quantidade de metacaulim na mistura é decisiva para ocorrência da ativação alcalina, da estabilização dos blocos e conseqüentemente de bons resultados.

Já quando se considera quantidades de metacaulim suficientes para ocorrência da ativação alcalina, aumentar o tempo em estufa funciona como um acelerador da reação de ativação alcalina tornando possível alcançar boas resistências pouco tempo após a confecção dos blocos.

Para analisar melhor a influência do tempo em estufa, convém comparar os resultados desta etapa com os obtidos na primeira etapa no traço T2 que foi confeccionado com a mesma metodologia aqui adotada.

Para isso, obteve-se a Equação 1 de predição dos resultados também pelo programa *Statistica* para estimar os resultados obtidos em traços com 8% de metacaulim para os tempos em estufa estudados.

$$Z = 3,48133 + 1,07672*x + 0,1152267*y + 0,4987467*x*y \text{ (Eq. 1),}$$

onde “z” é a resistência e “x” e “y” são os respectivos valores de porcentagem de metacaulim e tempo em estufa que são determinados da seguinte forma:

% de Metacaulim	Tempo em Estufa
15% → x = 1	72h → y = 1
10% → x = 0	48h → y = 0
5% → x = -1	24h → y = -1

Assim, para 8% de metacaulim, x = 0,533, de modo que se obtém os resultados mostrados na Tabela 16.

Tabela 16: Valores previstos de resistência para blocos com 8% de metacaulim

y	z (Mpa)
24h	3,67
48h	4,06
72h	4,44

Primeiramente, os valores mostram que para 8% de metacaulim o aumento da resistência ainda é crescente com o aumento do tempo em estufa. Percebe-se que blocos ensaiados com 7 dias, passando 72h na estufa teriam resistência próxima daqueles ensaiados com 15 dias com apenas 5h na estufa (Traço T2, Tabela 7). Mesmo o valor sendo ainda inferior, percebe-se aqui como o tempo em estufa acelera o ganho de resistência nos blocos estabilizados por meio da ativação alcalina.

Ainda, quanto aos resultados de compressão mecânica quando comparados os resultados apresentados na Tabela 9 com aqueles apresentados na Tabela 15, destaca-se a diferença de resultados do traço 1\* (2,87 MPa) para o traço 1 (4,95 MPa), observando a grande influência do processo de moldagem no desempenho final dos blocos, ressaltando a necessidade da preparação da solução 24h antes da confecção dos blocos e da importância de se definir formas de encontrar a quantidade de água ideal para a confecção.

A trabalhabilidade dos blocos confeccionados nesta etapa foi no geral bastante satisfatória. Para todos os traços, a terra foi acrescentada no recipiente que possibilita que ela escorra direto para o molde. Para os traços com menor teor de metacaulim percebeu-se uma menor impregnação da prensa, que foi limpa após a confecção de 3 blocos consecutivos. Já para os traços com 10% e 15% de metacaulim foi necessário limpar a prensa após a confecção de 2 blocos, e ao longo da execução dos blocos para este traço foi percebido uma maior dificuldade na moldagem (Figura 18), o que aponta para uma pega mais acelerada que nos outros traços, provavelmente devido ao acréscimo do metacaulim na solução com silicato, o que já possibilita a interação da Alumina presente no metacaulim com o Silicato da solução.

Figura 18: Blocos produzidos com 5% (acima) e 15% (abaixo) de metacaulim



Fonte: Acervo Pessoal

## 6. CONCLUSÃO

A partir das metodologias adotadas ao longo do desenvolvimento do trabalho percebeu-se que o estudo da estabilização de Blocos de Terra Compactados por meio da ativação alcalina ainda exige grande esforço no desenvolvimento e aplicação de métodos para sua execução. Diversas são as variáveis envolvidas no processo e pequenas alterações metodológicas podem afetar positiva ou negativamente o processo de mistura e moldagem bem como os resultados.

Dentre as variáveis metodológicas que influenciam no processo pode-se destacar: a metodologia de mistura (se a mistura é feita a mão, na betoneira ou em misturador por exemplo), a ordem e o momento em que os materiais são acrescentados, as características dos materiais utilizados, o tempo em que os materiais são misturados, a quantidade de água utilizada. Além disso existem também as variáveis que influenciam quimicamente na ativação alcalina e conseqüentemente no processo de estabilização dos blocos.

Geralmente, percebeu-se uma relação dependente entre a mistura, a moldagem e os resultados. Uma boa mistura dos materiais facilita o processo de moldagem dos blocos implicando em bons resultados. No entanto essa relação nem sempre acontece dessa forma, algumas variáveis que dificultam a moldagem

potencializam os resultados e alguns métodos que facilitam a mistura influenciam negativamente nos resultados.

Deste modo, é necessário realizar uma análise cuidadosa dos métodos e materiais utilizados. Por exemplo, quando se trata do metacaulim, apesar dos melhores resultados obtidos quando este foi acrescentado na terra, concluiu-se que acrescentá-lo na solução para misturas feitas na betoneira possibilita uma melhor homogeneização e conseqüentemente uma maior facilidade na moldagem dos blocos o que é vantajoso se a resistência obtida ainda esteja dentro dos padrões exigidos na norma mesmo com o pequeno decréscimo que essa metodologia possa implicar.

Com relação ao Silicato de Sódio conclui-se que quando este é acrescentado na solução há um aumento na resistência apesar de acelerar a pega quando combinada com altas porcentagens de metacaulim acrescentadas em solução. No entanto, percebeu-se que a rápida pega neste caso não afeta de forma intensa a moldagem, causando apenas uma leve impregnação do bloco no molde que pode ser solucionada com utilização de lubrificantes líquidos, como óleos, ou sólidos, como a própria terra usada para confeccionar os blocos.

Sobre a quantidade de água pôde-se chegar a algumas conclusões. A relação entre a quantidade de água e a massa dos sólidos (terra e metacaulim) não é linear se a relação metacaulim/terra não for constante. No entanto, quando essa relação é constante, não é possível afirmar com precisão como essa relação se comporta pois diversos são os fatores que influenciam na determinação da quantidade de água ideal; dentre eles destaca-se o próprio mecanismo de reação da ativação alcalina, as condições ambiente de armazenamento dos materiais e a água presente indiretamente em outros materiais acrescentados como é o caso do Silicato de Sódio.

Assim, a determinação da quantidade de água necessária por meios empíricos a partir de simples observações da textura da mistura poderia ser a melhor forma. No entanto, quando se trata da ativação alcalina a água está combinada com outros materiais como o silicato e o hidróxido, de modo que esta determinação empírica está passível de proporcionar alguns erros. Desse modo, ressalta-se a necessidade de estudar as variáveis que influenciam na quantidade de água a ser utilizada para que por meio desse estudo possa-se ter com mais precisão esse valor e melhorar a qualidade das amostras confeccionadas.

Quando se trata da análise do aumento da porcentagem de metacaulim observou-se neste trabalho um comportamento que condiz com o esperado de que mais metacaulim proporcionaria uma maior resistência para os blocos; o que não era esperado era que isso também iria acelerar o tempo de pega como aconteceu. Esse ponto pode ser explicado por dois fatores, o primeiro pelo fato de a maior quantidade de alumina presente no metacaulim iniciar a reação com o silicato presente na solução e além disso, como para todos os traços, a razão de Silica/Alumina foi mantida constante, em traços com maior metacaulim, para que isso ocorresse, era necessário acrescentar mais Silicato, o que também acarretaria em um tempo de pega mais rápido.

Considerando a variável tempo de cura em estufa, esta teve um comportamento diferenciado já que para baixas porcentagens de metacaulim, um maior tempo em estufa foi prejudicial para os resultados; entretanto, outras variáveis podem ter influenciado nesse resultado, sendo estas bastante ligadas à dificuldade de se estabelecer a quantidade de água ressaltando a importância de maiores estudos sobre ela.

Entretanto, certo é que à medida que a porcentagem de metacaulim aumenta, o maior tempo em estufa proporciona um aumento considerável na resistência dos blocos; sendo assim, a definição da proporção de metacaulim a ser adotada é imprescindível para a escolha adequada do tempo em estufa e assim para a obtenção de bons resultados e caso se deseje obtê-los mais rapidamente recomenda-se escolher tempos em estufa mais prolongados.

Por fim, apesar dos percalços enfrentados, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, pois o desempenho da maioria dos blocos confeccionados apontou para possibilidade de uso na construção civil. As discussões feitas ao longo do desenvolvimento metodológico apontam para as possíveis melhorias que podem ser aplicadas no método, sendo pontos muito pertinentes para serem trabalhados em estudos futuros, sendo estes imprescindíveis para o aperfeiçoamento da técnica de construção com Blocos de Terra Compactados estabilizados pela ativação alcalina.

## 7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para desenvolvimento de futuros trabalhos são:

- Estudar a influência da umidade nos resultados dos blocos, vendo como diferentes teores de água afetam os resultados e buscando através deste estudo estipular uma umidade adequada que fornece simultaneamente boa trabalhabilidade e bons resultados;
- Fazer estudos da umidade ótima para a terra usada na confecção dos blocos ativados alcalinamente, utilizando a mesma mistura proposta para os blocos e a própria prensa para compactação do material;
- Verificar a influência da adição de Silicato por meio da quantidade adicionada e não através da razão de Si/Al, fazendo isso para valores diferentes de porcentagens de metacaulim, e mantendo a quantidade de Silicato adicionado como constante e variando a razão de Si/Al, verificando ser o acréscimo de resistência é dado em virtude do aumento da razão de Si/Al ou do simples acréscimo de Sílica no sistema;
- Buscar formas de estudar o tempo de pega da mistura para quantificar como este fator interfere na moldagem dos blocos e a partir disso buscar formas mais eficientes de proceder durante este processo.
- Estudar como a resistência dos BTC's estabilizados com ativação alcalina do metacaulim cresce ao longo do tempo;
- Por fim, sugere-se também estudos que utilizem a cura dos Blocos de Terra ativados alcalinamente em condições ambientes observando quais os parâmetros necessários para que estes tenham suas características dentro dos padrões normativos.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10836**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

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

ALONSO, S; PALOMO, A.; Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. **Materials Letters**, [S.L.], v. 47, n. 1-2, p. 55-62, jan. 2001.

BAKRIA, A.M. Mustafa Al *et al.* The Effect of Curing Temperature on Physical and Chemical Properties of Geopolymers. **Physics Procedia**, [S.L.], v. 22, p. 286-291, 2011.

BERGE, Bjørn. **The Ecology of Building Materials**. 2. ed. Architectural Press, Elsevier Science, 2009. 448 p

BEZERRA, I. M. T.; COSTA, D. L.; VITORINO, J. P. M.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.. Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de

materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 82, p. 101-105, 2013.

CABALLERO, L. R. **Comportamento Físico-Mecânico de Matrizes Geopoliméricas à base de Metacaulim reforçadas com Fibras de Aço**. 2017. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CRIADO, M; PALOMO, A.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. **Fuel**, [S.L.], v. 84, n. 16, p. 2048-2054, nov. 2005.

CUNHA, M. J. F. M. **Durabilidade de Geopolímeros Monofásicos**. 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2013.

DAVIDOVITS, J. "GP Camp 2014." In Geopolymer Camp 2014. University of Picardie, Saint-Quentin, France, 2014

DAVIDOVITS, J.. "Geopolymer Chemistry and Properties. Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer '88." In Geopolymer, 88: p.125–48, 1988.

DAVIDOVITS, J. 1991. "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials." *Journal of Thermal Analysis* 37 (2): 1633–56. [www.geopolymer.org](http://www.geopolymer.org).

DAVIDOVITS, J. Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. **Proceedings of the 2nd International Conference, Géopolymère**, Saint-Quentin, France, p. 9-39, 1999.

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

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.; ***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.

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.

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 Of Materials Science**, [S.L.], v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 19 dez. 2006

DUXSON, Peter. **The structure and thermal evolution of metakaolin geopolymers**. 2006. 355 f. Tese (Phd) - Philosophy In Engineering, Department Of Chemical And Biomolecular Engineering, The University Of Melbourne, 2006.

DUXSON, Peter; PROVIS, John L.; LUKEY, Grant C.; SEPAROVIC, Frances; VAN DEVENTER, Jannie S. J.. <sup>29</sup>Si NMR Study of Structural Ordering in Aluminosilicate Geopolymer Gels. **Langmuir**, [S.L.], v. 21, n. 7, p. 3028-3036, mar. 2005.

EDUOK, E. I.. **Thermal properties of geopolymer materials**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Matemática e Física, – Institutt For Matematikk Og Naturvitskap, Universitet I Stavanger, Stavanger, 2016.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. **Fuel**, [S.L.], v. 82, n. 18, p. 2259-2265, dez. 2003.

FIGUEIRA, A. F. T.. **O caráter vernáculo na construção com terra no panorama contemporâneo**. 2016. 279 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

FRANÇA, S. *et al.* Proknow-c: da seleção de um portfólio de artigos à análise sistemática sobre blocos de terra comprimida. **Pensar Acadêmico**, Manhauçu, v. 17, ed. 3, p. 291-308, 2019.

GASTEIGER, Hubert A.; FREDERICK, William J.; STREISEL, Robert C. Solubility of aluminosilicates in alkaline solutions and a thermodynamic equilibrium model. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S.L.], v. 31, n. 4, p. 1183-1190, abr. 1992.

GONZÁLEZ, F. D. **Geometrias da Arquitectura de Terra**. 10. ed. Lisboa: Universidade Lusíada Editora, 2006. 204 p.

GUILLAUD, H.. Construir em terra crua: técnicas antigas e modernas. In: DETHIER, J.. **Arquitecturas de Terra - Trunfos e potencialidades de um material de construção desconhecido**: europa-terceiro mundo-estados unidos. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. Centro de Arte Moderna José de Azeredo Perdigão, 1993. p. 33-41.

H. HOUBEN. CRATerre - EAG, Boubekeur, S. CDI. **Compressed earth blocks standards, series technologies nr 11**. CDI And CRATerre-EAG/ODA, 1998

HARDJITO, D.; WALLAH, S. E.; SUMAJOUW, D. M. J.; RANGAN, B.V. On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. **Materials Journal**, [S. L.], v. 101, n. 6, p. 467-472, jan. 2004.

HE, J.; ZHANG J.; YU, Y.; ZHANG G. The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study, 2012. **Construction and Building Materials**, Vol. 30, p. 80 – 91.

HE, P.; WANG, M.; FU, S.; JIA, D.; YAN, S.; YUAN, J.; XU, J.; WANG, P.; ZHOU, Y. Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer. **Ceramics International**, v. 42, p. 14416–14422, 2016.

HEAH, C. Y.; KAMARUDIN, H.; BAKRI, A.M. Mustafa Al; BINHUSSAIN, M.; LUQMAN, M.; NIZAR, I. Khairul; RUZAIDI, C. M.; LIEW, Y. M. Effect of Curing Profile on Kaolin-based Geopolymers. **Physics Procedia**, [S.L.], v. 22, p. 305-311, 2011.

HOUBEN, H., GUILLAUD, H. – CRATerre, *Traite de Construction em Terre*. Marseille: Edition Parenthèses, 2006. 353 p.

Houben, H.; Guillaud, H.. **Earth Construction**: a comprehensive guide. Marseille: Practical Action, 2008. 372 p

Jaarsveld, J. G. S van *et al.* The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. **Chemical Engineering Journal**, Austrália, v. 89, p. 63-73, 28 out. 2002.

Kirschner, A. V.; Harmuth, H. Investigation of geopolymer binders with respect to their application for building materials. **Ceramics - Silikáty**, [S. L.], v. 48, n., p. 117-120, out. 2004.

Lee, W. K. W.; Van Deventer, J. S. J., The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [S.L.], v. 211, n. 2-3, p. 115-126, dez. 2002.

Lemougna, Patrick N.; Wang, Kai-Tuo; Tang, Qing; Melo, U. Chinje; Cui, Xue-Min. Recent developments on inorganic polymers synthesis and applications. **Ceramics International**, [S.L.], v. 42, n. 14, p. 15142-15159, nov. 2016.

Lima, J. L.. **Efeito da Relação Molar SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e das Condições de Cura nas Propriedades de Geopolímeros obtidos com Silicato de Cinza da Casca de Arroz**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018

Minke, G.. **Building with Earth**: design and technology of a sustainable architecture. Basel - Berlin - Boston: Birkhäuser Basel, 2006. 199 p.

Minke, G.. **Earth Construction Handbook**: the building material earth in modern architecture. Southampton, Southampton, UK: Wit Pr/computational Mechanics, 2000. 216 p.

Muñiz-Villarreal, M. S.; Manzano-Ramírez, A.; Sampieri-Bulbarela, S.; Gasca-Tirado, J. Ramón; Reyes-Araiza, J. L.; Rubio-Ávalos, J. C.; Pérez-Bueno, J. J.; Apatiga, L. M.; Zaldivar-Cadena, A.; Amigó-Borrás, V.. The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. **Materials Letters**, [S.L.], v. 65, n. 6, p. 995-998, mar. 2011.

OLIVEIRA, J. V. **Comportamento mecânico de blocos de terra compactada ativados alcalinamente**. 2014. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Minho, 2014.

OSORIO, P. **Concepção de um Saferoom Anti-Tornado em Betão geopolimérico**, 2006 - Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, Portugal, 228p.

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

PALOMO, A.; RUIZ-SANTAQUITERIA, C.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.. Cementos de bajo impacto ambiental: activación alcalina de aluminosilicatos. In: X CONGRESSO LATINO AMERICANO DE PATOLOGIA E XII CONGRESSO DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN, 2009, Valparaíso - Chile: Conpat, 2009.

PINTO, A. T.. **Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino**. 2004. 400 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 2004.

PINTO, A. T.; FERNANDES, P.; JALALI, S. Geopolymer manufacture and application – Main problems when using concrete technology. In: GEOPOLYMER INTERNATIONAL CONFERENCE, 2002, Melbourne-Australia, 2002. p. 28-29

PONTE, M. M. C. C. **Arquitetura de terra: o desenho para a durabilidade nas construções**. 2012. 298 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2012.

PRUSSIN, L. Adobe Brick. In: OLIVER, P. **Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World**. NY: Cambridge University Press, 1997. p. 209-210.

PRUSSIN, L. Rammed earth: pisé à terre. In: OLIVER, P. **Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World**. NY: Cambridge University Press, 1997. p. 213-215.

RASHAD, Alaa M.. Alkali-activated metakaolin: a short guide for civil engineer ∴ an overview. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 41, p. 751-765, abr. 2013.

RIGASSI, Vincent. **Compressed Earth Blocks: Manual of Production**. Gate: CRATerre-EAG, 1985.

SANCHES, F. D. R.. **Análise Metodológica para Execução de Blocos de Terra Compactados Ativados Alcalinamente**. 2020. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

SANTA, Rozineide Aparecida Antunes Boca. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. 2012. 135 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SANTIAGO, C. C.. **O Solo como Material de Construção**. 2. ed. Salvador: Edufba, 2001. 72 p.

SATHONSAOWAPHAK, Apha; CHINDAPRASIRT, Prinya; PIMRAKSA, Kedsarin. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 168, n. 1, p. 44-50, 30 ago. 2009

SEVERO, C. G. S. *et al.* Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativado alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [S. L.], v. 82, p. 55-67, 2013.

SEVERO, C. G. S. *et al.* Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativado alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [S. L.], v. 82, p. 55-67, 2013.

SILVA, J. S. (2015). Arquitetura Vernácula, Arquitetura Bioclimática e Eficiência Energética. *Contributos da arquitetura vernácula portuguesa para a sustentabilidade do ambiente construído* (pp. 9-18). Porto: Atas do Seminário reVer.

SILVA, R. A. *et al.* CEBs stabilised with geopolymeric binders: mechanical performance of dry-stack masonry. In: WASCON, 2015.

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

SINGH, N.B.; MIDDENDORF, B.. Geopolymers as an alternative to Portland cement: an overview. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 237, p. 117-455, mar. 2020

SORE, S. O. *et al.* Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binderbased on local materials from Burkina Faso. **Constructio and Building Materials**, v. 165, p. 333-345, 2018.

TEIXEIRA, D. A. A.. **Blocos de Terra Comprimidos Estabilizados com Ativação Alcalina do Metacaulim**: aspectos metodológicos. 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

THAKUR, R.; SMNATH, S. Effect of Mix Composition on Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymer Composites. **ARPN Journal Of Engineering And Applied Sciences**, [S. L.], v. 4, n. 4, p. 68-74, jun. 2009.

TORGAL, F. P.; CARTRO-GOMES, J. P.; JALALI, S. Cimento Portland Normal Versus Ligantes Geopoliméricos: Considerações Econômicas Sobre as Implicações do Mercado do Carbono no Custo dos Betões. **Conferência Engenharia 2005 – Inovação e Desenvolvimento: actas**, Covilhã, 2005.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 512-519, 2012.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LORENZEN, L. The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: part i. theory and applications. **Minerals Engineering**, [S.L.], v. 10, n. 7, p. 659-669, jul. 1997.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J. The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 29, n. 8, p. 1189-1200, ago. 1999.

VASSALO, E. A. S.. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013

Glukhovsky, V. D. "Soil Silicates." Gosstroyizdat, Kiev, 1959. 154p.

WALLAH, S. E.; RANGAN, B. V.. **Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties**. Perth, Australia: Research Report Gc 2 Faculty Of Engineering Curtin University Of Technology, 2006. 97 p.

WANG, H.; LI, H.; YAN, F. Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [S.L.], v. 268, n. 1-3, p. 1-6, out. 2005.

WARGOCKI, P. *et al.* Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity in an Office with Two Different Pollution Loads. **Indoor Air**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 165-179, set. 1999

WENG, L.; SAGOE-CRENTSIL, K. Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: part i.:low si/al ratio systems. **Journal Of Materials Science**, [S.L.], v. 42, n. 9, p. 2997-3006, 9 jan. 2007.

WENG, L.; SAGOE-CRENTSIL, K. **Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I — low Si/Al ratio systems**. J. Mater. Sci. 42, p. 2997–3006, 2007.

INCRÍVEL História: Zigurate, uma relíquia da Antiguidade. 2019. Disponível em: <https://incrivelhistoria.com.br/zigurate/>. Acesso em: 18 jun. 2020.

INCRÍVEL História: O Templo do Sol de Ramsés II. 2019. Disponível em: <https://incrivelhistoria.com.br/templo-sol-ramses/>. Acesso em: 18 jul. 2020.

QUANTRO Cantos de Mundo. Disponível em: <https://quatrocantosdomundo.files.wordpress.com/2015/05/djennemosque.jpg>. Acesso em: 18 jul. 2020

KSAR Aït Benhaddou. Disponível em: <http://www.ksarljanoub.com/attraction/our-beaches/>. Acesso em: 18 jul. 2020.

BRITANNICA Escola. Disponível em: <https://escola.britannica.com.br/artigo/Alhambra/606897>. Acesso em: 18 jul. 2020

WIKIWAND: Bam. Bam. 2004. Disponível em: <http://www.wikiwand.com/pt/Bam>. Acesso em: 18 jul. 2020.

RECRIAR com Você: Técnicas Construtivas com Terra. Disponível em: [http://www.recriarcomvoce.com.br/blog\\_recriar/tecnicas-construtivas-com-terra/](http://www.recriarcomvoce.com.br/blog_recriar/tecnicas-construtivas-com-terra/). Acesso em: 20 abr. 2020.

EARTH Architecture: Primary School Tanouan Ibi. Primary School Tanouan Ibi. Disponível em: <https://eartharchitecture.org/?cat=79>. Acesso em: 26 maio 2020.

EARTH Architecture: Compressed Earth Block. Disponível em: <http://eartharchitecture.org/?tag=compressed-earth-block>. Acesso em: 26 maio 2020.