



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

FELIPE DANZMANN ROBOREDO SANCHES

**ANÁLISE METODOLÓGICA PARA EXECUÇÃO DE BLOCOS DE TERRA
COMPACTADOS ATIVADOS ALCALINAMENTE**

João Pessoa

2020

Felipe Danzmann Roboredo Sanches

Análise Metodológica para execução de Blocos de Terra Compactados Ativados Alcalinamente

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

S211a Sanches, Felipe Danzmann Roboredo.

Análise Metodológica para Execução de Blocos de Terra Compactados Ativados Alcalinamente. / Felipe Danzmann Roboredo Sanches. - João Pessoa, 2020.
62 f.

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

1. Engenharia Civil. 2. Bloco de Terra Compactado. 3. Ativação Alcalina. 4. Geopolímero. I. Azeredo, Givanildo Alves de. II. Título.

UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO


FELIPE DANZMANN ROBOREDO SANCHES

**ANÁLISE METODOLÓGICA PARA EXECUÇÃO DE BLOCOS DE TERRA
COMPACTADOS ATIVADOS ALCALINAMENTE**

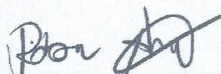
Trabalho de Conclusão de Curso em 01/04/2020 perante a seguinte Comissão Julgadora:



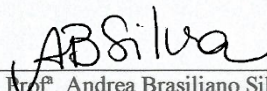
Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB



Prof. Dr. Primo Fernandes Filho
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB



Prof. Mestre Robson Santos
Instituto Federal da Paraíba – Campus Cajazeiras



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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus, por sua infinita graça e amor, sem ele não sou nada. Em seguida aos meus pais Enio Roboredo Sanches e Elaine Cristina Danzmann Fioravante e Marco Antônio Fioravante meu padrasto, pois sem eles não poderia chegar aonde cheguei, sendo meus verdadeiros motivadores para seguir em frente. Gostaria de agradecer aos meus avós Maria de Nazareth Danzmann, Lourenço Gilberto Danzmann e Francisca Maria Coelho Roboredo, pois igualmente me ajudaram e compartilharam seu amor e zelo por mim em todos os momentos, agradeço também a minha bisavó Teresinha de Jesus Arraes Oliveira cujo empenho em me ajudar sempre foi visível. Gostaria de agradecer a Vitoria Maria Regis de Oliveira Lima Barbalho sendo minha auxiliadora e companheira que me permitiu seguir e concluir este trabalho, sem ela não conseguiria. Gostaria de agradecer aos familiares que mesmo distantes sempre deram votos de apoio e incentivo.

Agradeço a todos os professores que contribuíram para minha formação de maneira inspiradora. Também agradeço a todos que me ajudaram com este trabalho, especialmente ao meu professor orientador Givanildo Alves de Azeredo, ao amigo e colega de pesquisa Raul Muniz e ao professor João Jarllys bem como a todos os funcionários do Labeme. Por fim aos amigos e colegas de curso, que permitiram muitos momentos de alegria em meio a rotina corrida da universidade. A todos os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Em meio aos materiais de construção usualmente utilizados, como é o caso do cimento Portland ou dos tijolos cerâmicos, as técnicas de construção com terra apresentam baixo custo energético de produção bem como características menos nocivas ao meio ambiente, sendo uma alternativa para os mesmos. A técnica de Bloco de Terra Compactado vem se destacando no cenário da construção com terra, sendo utilizada pequenos percentuais de cimento para sua estabilização, entretanto tem-se pesquisado na ativação alcalina uma nova forma de estabilizar os blocos. Todavia, ainda não existe um método bem estabelecido de execução dos blocos ativados alcalinamente, além disso existem diversas dificuldades encontradas com a rápida pega da solução bem como a ocorrência de empelotamento da mistura. Dessa forma, este trabalho busca comparar duas metodologias de execução, a primeira com os ativadores em solução e a segunda com os ativadores misturados com os sólidos, a fim de avaliar aquela mais adequada para a confecção dos blocos por meio de ensaios de compressão e absorção de água. A partir dos resultados pode-se observar que ambas as metodologias possuem pontos positivos, contudo a metodologia da solução ativadora apresentou resultados de compressão significativo apontando um possível norte para futuros trabalhos.

Palavras-chave: Terra; Blocos de Terra Compactado; Ativação Alcalina; Geopolímero.

ABSTRACT

Among the construction materials usually used, as Portland cement or ceramic bricks, earth building techniques has low energy production costs as well as characteristics that are less harmful to the environment, being an alternative for that materials usually used. The Compacted Earth Block technique has stood out in the scenario of construction with earth with small percentages of cement being used for its stabilization, however, a new way of stabilizing the blocks has been researched in alkaline activation. There is still no well-established method of executing the alkaline activated blocks, furthermore there are several difficulties found in the fast set time of the solution as well as the occurrence of the lump of the mixture. Thus, this work seeks to compare two execution methodologies, the first with the activators in solution and the second with the activators mixed with the solids, trying to find the most suitable for making the blocks, testing compression and water absorption. From the results it can be seen that both methodologies have positive points, however the methodology of the activating solution showed significant compression results pointing a possible guideline for future work.

Keywords: Earth, Compressed Earth Blocks, Alkaline Activation, Geopolymer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fissuras nos blocos confeccionados com Cal Virgem Frente C	25
Figura 2: Prensa Hidráulica	28
Figura 3: BTC cortados e capeados	29
Figura 4: Ensaio de Compressão	30
Figura 5: Hidróxido de Sódio não reagido envolvido pera terra	32
Figura 6: Amostra feita com Hidróxido de Sódio triturado.	33
Figura 7: Comparativo entre a aparencia da mistura nas duas metodologias.....	33
Figura 8: Visualização da interferência do tempo de pega.....	34
Figura 9: Bloco impregnado na máquina	35
Figura 10: Uso da terra como lubrificante sólido	35
Figura 11: Mistura empelotada do traço 10A.....	37
Figura 12:exemplo de perda de massa dos blocos.....	46

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	OBJETIVO.....	12
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1.	Terra como Material de Construção.....	12
3.2.	Bloco de Terra Compactado.....	15
3.3.	Ativação Alcalina.....	16
3.4.	BTC Estabilizados com Ativação Alcalina.....	20
4.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	22
4.1.	MATERIAIS.....	22
4.2.	MÉTODO.....	23
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
5.1.	OBSERVAÇÕES METODOLÓGICOS.....	32
5.2.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	36
5.2.1.	COMPARATIVO ENTRE AS FRENTES.....	39
5.3.	ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	45
5.4.	ENSAIO DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO.....	49
6.	CONCLUSÃO.....	52
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
	REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

Atualmente os materiais de construção usualmente utilizados são os materiais industrializados, destacando-se o uso do cimento Portland e do tijolo cerâmico. Apesar da produção em larga escala e da sua ampla abrangência no cenário global em pesquisas, a produção destes materiais demanda alto gasto energético e emite valores elevados de CO₂ proveniente das altas temperaturas para sua fabricação.

Segundo Torga et al. (2005) o cimento Portland é o material de construção civil mais utilizado no mundo, gerando impacto no desenvolvimento econômico global. Contudo, para a produção de 1 tonelada de cimento precisa-se de cerca de 1,7 toneladas de matéria prima e são necessários cerca de 5 GJ de energia para a sua produção (Struble e Godfrey, 2004). Ademais, segundo o *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*, em 2018, o setor cimentício era o terceiro maior consumidor de energia industrial do mundo, sendo responsável por 7% do consumo energético industrial e por 7% das emissões de CO₂ do mundo.

A terra apresenta-se como alternativa em meio à poluição e ao gasto energético gerados pelos materiais convencionais. A utilização da terra como material de construção é datada de mais de 8.000 a.c. onde a cidade de Jericó na Cisjordânia foi totalmente feita com adobe; outra cidade que utilizou a técnica de tijolos secos ao sol foi a cidade de Çatal Huyuk situada na Turquia.

Além dos exemplos da antiguidade pode-se observar edificações feitas com técnicas de construção com terra em diversos países em desenvolvimento: como Peru, Angola, Moçambique, Iêmen, Irã, Índia e China (Silva et al., 2015).

Apesar destas evidências no último século, a construção com terra caiu em desuso devido à pouca informação da população em geral, que compreendia que a terra era um material frágil e que construções com terra eram usadas apenas por populações de nível socioeconômico mais baixos.

Contudo, atualmente, devido à maior conscientização da população sobre sustentabilidade, a procura de materiais alternativos aos convencionais e a busca por benefícios construtivos para as edificações, as técnicas de construção com terra têm ganhado espaço e sendo revalorizadas.

Segundo Lourenço (2001), a terra é uma matéria prima abundante na crosta terrestre. Além de apresentar pouco gasto energético para os seus processos de transformação, a terra também proporciona uma boa inercia térmica e é um material reciclável e reutilizável. Diversas são as

técnicas de construção com terra, dentre elas destacam-se a alvenaria de adobe, taipa de pilão e a alvenaria de blocos de terra compactados (BTC).

Todavia, para a sua utilização como material de construção, a terra necessita de estabilização para adquirir as características necessárias para uma performance adequada. As estabilizações se dividem em quatro (4) tipos: a estabilização mecânica, na qual a terra é compactada por meio de prensa mecânica ou de forma manual; a estabilização física, onde se acrescentam materiais inertes; estabilização química, na qual são acrescentados materiais que reagem no meio; estabilização mista, sendo a combinação de duas ou mais estabilizações.

Os BTC têm ganhado destaque. Desde 1970 o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) vem utilizando-os com adição de porcentagens de cimento para lhes fornecer resistência e durabilidade. Na estabilização do solo com cimento, ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes da terra, conferindo-lhe resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado. (MILANI, FREIRE, 2006).

Entretanto, ainda que o cimento seja utilizado em pequenos percentuais para estabilização da terra, busca-se por outras soluções. Diante deste panorama, existem linhas de pesquisa sobre materiais alternativos para substituir parcial ou totalmente o cimento Portland, matérias estes chamados de matérias suplementares.

Um material suplementar que vem ganhando destaque devido à sua resistência inicial muitas vezes maior que a dos concretos convencionais é o geopolímero. Ele também possui características menos nocivas ao meio ambiente; isso ocorre pois o geopolímero não exige a calcinação em altas temperaturas, como é o caso do cimento Portland (Davidovits, 2002).

Davidovits (1976) foi o primeiro a introduzir o termo geopolímero. Entretanto, consiste em uma ativação alcalina, formando um gel de grande cadeia molecular constituída de sílica, alumina e oxigênio que apresenta uma estrutura amorfa à semicristalina.

Desta forma, como objetivo deste trabalho, busca-se estabilizar aos BTC com ativação alcalina, sendo uma alternativa ao uso convencional de cimento Portland, e dessa forma gerar acréscimos de resistência ao material. Também se dedica a analisar metodologias de execução da mistura da terra com o geopolímero, verificando sua trabalhabilidade e execução.

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho consiste em produzir BTC tendo como estatizante químico a ativação alcalina, por meio de duas metodologias distintas e assim verificar os efeitos da ativação na trabalhabilidade da mistura bem como analisar a sua resistência mecânica e absorção de água.

Objetivos específicos:

- Testar duas metodologias de execução dos blocos;
- Investigar a influência da razão molar de Hidróxido de Sódio sobre a trabalhabilidade e acréscimo de resistência;
- Verificar se a cal hidratada pode ser um ativador alternativo da reação, analisando a trabalhabilidade na hora da confecção dos blocos;
- Avaliar o gesso na solução com possível retardador de pega;
- Analisar a influência do silicato de sódio sobre a resistência das amostras.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, busca-se apresentar uma síntese de trabalhos acadêmicos relacionados com o tema em estudo do presente trabalho de conclusão de curso.

O conteúdo está organizado da seguinte forma: Terra como material de construção; Blocos de Terra Compactados (BTC); Ativação Alcalina; BTC estabilizados com Ativação alcalina.

3.1. Terra como Material de Construção

A partir do momento que o Homem descobre a agricultura e torna-se sedentário é que tem a necessidade de construir abrigos fixos e delimitar seu espaço (PONTE, 2012). Assim a terra serviu para o homem não apenas como provedor de alimento bem como fonte de matéria prima para a construção de abrigos.

Não existe consenso sobre a data em que o homem começou a utilizar a terra como material de construção. Alguns autores como Minke (2006) apontam que isso pode ter ocorrido mais de 9000 anos atrás. Outros autores datam o início desta utilização entre 8000 e 6000 a.c. Contudo,

existe convergência no fato de que a terra começou a ser usada como material de construção no início da sociedade agrícola, quando o homem se estabeleceu em regiões próximas de rios para desenvolver a agricultura e fixar moradia. Segundo Torgal (2011), não é muito relevante saber se a construção com terra data de 9000 ou mais de 10000 anos atrás, mas não está longe da verdade que o início de sua utilização como material de construção começa com o início da agricultura.

As técnicas de construção com terra estão presentes em quase todas as civilizações antigas e segundo Neves e Faria (2011) estas técnicas distintas expandiram-se por meio das invasões e colonizações realizadas ao longo da história humana; assim, as técnicas nativas sofreram um processo de modificação.

Independente das variâncias das técnicas de construção com terra existentes, pode-se ressaltar algumas que tem um destaque maior devido às suas utilizações recorrentes em edificações:

- Alvenaria de Adobe: Consiste na fabricação de tijolos de terra em seu estado natural secados ao sol. Para tanto, é feita uma mistura de terra com água e colocada no interior de um molde geralmente feito de madeira, buscando a sua melhor planicidade possível. Devido à retração, alguns tijolos sofrem rachaduras e por isso alguns autores sugerem acréscimo de fibras (TORGA, 2011)
- Taipa de Pilão ou simplesmente taipa: nada mais é que a construção de paredes por meio de camadas compactadas de terra úmida no interior de moldes, geralmente de madeira. Para garantir o prumo e a planicidade usam-se guias de madeira que também auxiliam no deslocamento dos moldes.
- Bloco de Terra Compactado (BTC): semelhantemente ao adobe, o BTC é uma mistura de terra com água. No entanto, a terra apenas úmida é colocada em dispositivo específico para comprimir o material dentro do molde. Além disso, pode-se acrescentar algum aglomerante, que usualmente é a cal ou o cimento.

Sobre os BTC, suas características serão mais bem desenvolvidas posteriormente, visto que são objeto de estudo central deste trabalho.

Algumas são as vantagens construtivas da terra. Segundo Fabbri et al. (2016), a principal vantagem é o seu baixo impacto no meio ambiente, sendo pouca ou nenhuma transformação da matéria prima para a construção. Desta forma os resíduos gerados podem ser incorporados, total ou parcialmente, ao meio ambiente. Também é vantajosa pois apresenta-se em abundância sob a crosta terrestre, tendo a possibilidade de extração perto ou no local da obra. Outra característica positiva é a sua elevada inercia térmica, sendo capaz de armazenar e liberar umidade (TORGA, 2011), bem como a diminuição do índice de ruídos sonoros.

A durabilidade destas construções pode ser observada em algumas edificações que perpassam centenas de anos e outras que mesmo em ruínas, devido ao tempo, apresentam estruturas consideravelmente preservadas. Além disso o principal mecanismo responsável pela erosão destas técnicas construtivas é a energia cinética do impacto da chuva (HEATHCOTE, 1995).

Para tanto é necessário realizar algum método de estabilização da terra para garantir sua trabalhabilidade, resistência à compressão e durabilidade à erosão de acordo com as normas de construção vigentes.

Existem 4 métodos de estabilização com terra: Estabilização Mecânica que rearranja as partículas da terra sem colocar outra substância; Estabilização Física em que ocorre interação na textura da terra através da adição de outro material que não reage com a terra ou por tratamento térmico, a Estabilização Química na qual um produto químico é adicionado à terra mudando suas características através de reações; por fim a Estabilização Mista que nada mais é que a combinação de duas ou mais estabilizações (SANTIAGO, 2001).

Atualmente, a maioria das construções com terra se encontra em países menos desenvolvidos, contudo podem ser observadas construções na França, Reino Unido, Estados Unidos e Austrália. Existem alguns centros de pesquisa voltados para o desenvolvimento de técnicas construtivas com terra como é o caso do laboratório francês CRAterre, fundado em 1979; na Alemanha existem cursos ofertados em universidades que oferecem o título de profissional ou mesmo de especialista nesta área (HOUBEN et al. e SCHROEDER et al., 2008). Também é observado que vários países possuem normas específicas de técnicas construtivas com terra como é o caso da Austrália, Alemanha, Espanha, Nova Zelândia e Brasil (TORGA, 2011).

Dessa forma pode-se perceber a importância desta área do conhecimento em meio ao cenário global, visto o crescente estudo e desenvolvimento de normas regulamentadoras a respeito de técnicas construtivas com terra buscando suas vantagens já descritas. Diante disso, os próximos tópicos tratarão do BTC, elemento da técnica de construção com terra Alvenaria de BTC.

3.2. Bloco de Terra Compactado

O bloco terra compactado (BTC) surgiu no início do século XX, sendo considerado como uma evolução do adobe. A terra é umedecida, confinada em um molde, posteriormente é compactada e por fim passa por um processo de cura/secagem. Este processo permite uma boa regularização das superfícies do bloco, permitindo um melhor processo de controle da qualidade de produção e seu processo de construção se assemelha ao do tijolo cerâmico e do bloco de concreto.

Além disso, as prensas tanto manuais quanto elétricas, disponíveis no mercado, permitem a troca de formato dos moldes, permitindo a fabricação de diversos tipos de formas, proporcionando a menor geração de resíduos durante a construção (JALALI & EIRES, 2008)

Segundo Lopes (2012), a compressão realizada na técnica dos BTC's permite a obtenção de blocos de terra mais densos e com maior resistência e durabilidade em comparação com o adobe. Contudo, para que sua durabilidade e resistência sejam mais eficientes, é necessário estabilizar os blocos com cal ou cimento (MINKE, 2000). Assim são acrescentados pequenos percentuais destes no solo antes de serem comprimidos para que seja realizada a estabilização química.

Outra forma de estabilização que é utilizada caso a alvenaria receba grandes esforços é o acréscimo de fibras vegetais na mistura sugerido por Obonyo et al. (2010); trata-se no caso de estabilização física dos blocos.

Contudo, segundo Teixeira (2017), o cimento é o material mais utilizado para a estabilização, devido ao bom desempenho alcançado com esta técnica. Ele ressalta outro nome utilizado para denominar especificamente este método construtivo com terra junto com o cimento para sua estabilização: Blocos-solo-cimento. Geralmente o percentual acrescentado de

cimento Portland para a estabilização do BTC é de 4 a 10%; isto provoca acréscimo significativo de resistência aos blocos (MOREL et al., 2007).

Sob o quesito normativo da utilização dos BTC com cimento, a NBR 8491 (ABNT, 2012) estipula que os blocos de solo-cimento, aos sete dias de cura, tenham resistência média mínima de 2 MPa para blocos de vedação e 4 MPa para blocos estruturais. Em comparação com alvenarias usualmente utilizadas como é o caso de tijolos cerâmicos, os blocos de terra geralmente apresentam maior resistência (SEGANTINI E ALCÂNTARA, 2010).

Morton (2005) indica que o gasto energético de cerâmicas vermelhas chega a ser 80% maior que o dos BTC com cimento. Assim tem-se tornado mais popular a construção de edifícios com BTC, visto o baixo custo de produção, a relativa abundância de matéria prima e o seu menor impacto ambiental gerado (RUIZ et al., 2018)

3.3. Ativação Alcalina

Segundo Shi et al (2006) o primeiro trabalho sobre o uso de ativadores alcalinos como componente construtivo data de 1930, onde Kuhl estudou o comportamento de escória em meio alcalino, adicionando-o parcialmente ao cimento Portland. Purdon (1940) realizou um estudo intensivo de soluções cáusticas e de potássio em cimentos, sem a utilização do clínquer; além dele, Glukhovsky (1959) desenvolveu aglutinantes com baixo teor de cálcio com soluções alcalinas. A partir disso pesquisas e extensivos estudos foram realizados no âmbito de cimentos e concretos ativados alcalinamente (SHI et al.,2006), destacando-se os trabalhos de Davidovits; tem-se então uma nova fase de pesquisa através da criação do termo geopolímero (VASSALO, 2013).

Davidovits (1999) sugeriu o termo geopolímero pra se referenciar a aglomerantes ativados alcalinamente, termo adotado por muitos outros pesquisadores. Pinto (2004) afirma a semelhança dos aglomerante alcalinos com a síntese dos polímeros orgânicos, através da condensação e utilização de materiais cimentícios suplementares. Outro termo usado é o chamado “polissialato”, sendo a abreviação de poli-silico-aluminato. Pacheco e Torga et al. (2008) referenciam essas estruturas como sendo “aglomerante ou cimento álcali-ativado”. Li et al. (2010) denominam este novo aglomerante como cimento de terceira geração, sendo uma alternativa ao cimento Portland, devido ao fato de apresentar características positivas de resistência mecânica e desempenho ambiental.

Os geopolímeros são polímeros inorgânicos (PALOMO et al., 1999). Segundo Pinto (2004), a ativação alcalina tem como base um material cimentício suplementar que é ativado alcalinamente resultando em um gel.

O exato mecanismo de reação dos geopolímeros ainda não está totalmente desvendado, contudo os cimentos álcali-ativados podem ser entendidos por meio de três fases, a primeira de dissolução da sílica e alumina quando misturada com uma solução alcalina ativadora (dissolução), a segunda é a formação de uma estrutura em forma de gel (agregação), e a terceira fase é a sua policondensação, onde ocorre a polimerização e o endurecimento dos produtos da reação (TORGA et al., 2005).

Segundo Feng et al. (2012), os geopolímeros podem ser definidos como estruturas formadas pela condensação de unidades tetraédricas de aluminossilicato, possuindo íons de metais alcalinos equilibrando as cargas das estruturas tetraédricas de alumínio. Estas estruturas são organizadas em arranjo tridimensional onde os átomos de silício (Si) alternam com os de alumina, compartilhando os oxigênios (VASSALO, 2013).

Os aglomerantes ativados alcalinamente normalmente possuem dois componentes: um componente cimentício (também identificado como precursor) e um ativador alcalino (definido como ativador). Ambos influenciam diretamente no produto da reação.

No quesito da produção do geopolímero, Pacheco-Torga et al. (2008), por meio de um apanhado de outras pesquisas, apontam uma ordem mais adequada para a fabricação. Primeiro é preparado separadamente a solução ativadora, e em seguida os precursores são acrescentados e misturados.

Singh e Middendorf (2019), baseando-se em outras pesquisas, criaram uma tabela contendo os precursores e ativadores da síntese geopolimérica, que está transcrita na Tabela 1.

Tabela 1: Precursores e Ativadores da Ativação Alcalina

Material contendo Aluminossilicatos	Ativadores Alcalinos
Argilas calcinadas, cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, escoria, resíduos de vidro, rejeito de minas de cobre, zeolíticos, $Al_2O_3 - 2SiO_2$ puro e Na_2SiO_3 em pó, minerais contendo magnésio	NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$ NaOH + Na_2CO_3 , K_2CO_3 + $Ca(OH)_2$ Silicato de sódio (outros silicatos também)

Fonte: Singh e Middendorf (2019)

O precursor da reação geopolimérica necessariamente deve ser fonte de aluminossilicatos em seu estado amorfo. Segundo Silva et al. (2007) a alumina entra na ativação alcalina como reguladora da pega e a sílica como responsável por dar resistência ao geopolímero.

Resíduos agrícolas, industriais e materiais naturais ou sintéticos servem de matéria prima para a formação dos cimentos álcali-agregados, destacando-se o uso do metaculim, cinza volante, escoria de alto-forno, casca de arroz e cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Segundo Filho (2012) indústrias de beneficiamento como a do caulim e da cerâmica vermelha possuem potencial comprovado para uso de seus resíduos como precursores de ativação alcalina. A indústria agrícola também apresenta este potencial, e alguns estudos são feitos para analisar os resíduos gerados deste setor, como é o caso da indústria da cana-de-açúcar e a do arroz.

Do ponto de vista técnico isso permite gerar valor agregado aos mais diversos subprodutos da indústria, sendo um ponto positivo para a sustentabilidade e gerenciamento de resíduos, devendo-se fomentar pesquisas nesta área.

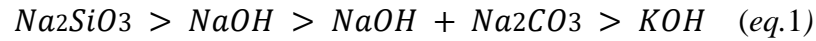
Entretanto, cada precursor possui sua peculiaridade sob a ativação alcalina, visto suas características reológicas distintas, bem como as razões molares de sílica/alumina presente em cada material que varia sensivelmente os resultados mecânicos do produto gerado (VASSALO 2013). A exemplo, Duxson et al. (2006) apontam que geopolímeros derivados de metacaulim demandam muita água, apresentando maior porosidade, e possuem algumas aplicações importantes na construção civil.

De maneira geral, Davidovits (1999) elencou alguns critérios necessários para a formação eficiente do geopolímero:

- A razão molar de $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ deve estar na solução aquosa entre 4:1 e 6,6:1, onde M é um cátion de metal alcalino ou alcalino terroso;
- O alumínio presente no precursor deve ser rapidamente solúvel;
- A razão molar de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ deve estar compreendida entre 5,5:1 e 6,5:1

Aquino et al. (2001) e Temuujin et al. (2009), citados por Vassalo (2013), estudaram o efeito das razões molares de Si/Al nos geopolímeros produzidos pela ativação do metacaulim. Ambos trabalharam com razões de Si/Al entre 1,2 e 2,5 e chegaram à conclusão que a razão ideal de Si/Al estava entre 1,5 e 2 e que valores superiores diminuíram suas propriedades mecânicas.

As concentrações dos ativadores alcalinos governam o processo de polimerização da estrutura a ser formada. O potencial, principalmente em termos de resistência à compressão, dos diversos ativadores (levando em conta concentrações molares iguais) é representado no Equação 1 (KOMLJENOVIC et al., 2010).



Segundo Pacheco-Torga et al. (2008), em geral o íon OH^- é responsável pela catalização da reação, e o cátion de metal alcalino pela formação estrutural do elemento.

Vários autores relatam que a relação SiO_2/Na_2O_2 modifica significativamente o grau de polimerização dissociada na solução, estabelecendo uma relação direta com as propriedades do geopolímero sintetizado (DUXSON et al., 2006).

Singh e Middendorf (2019), apontam para a necessidade de se preparar a solução alcalina ativadora (de concentração molar entre 8 e 16 mols/L) 24 horas antes de ser acrescentado o precursor para a formação do geopolímero.

Ainda, Singh e Middendorf (2019) citando outro autor, afirma que com o aumento da razão molar de NaOH, a solubilidade de Si e Si/Al aumenta, e dessa forma espera-se o aumento da resistência à compressão. Contudo, valores muito altos de concentração de NaOH causam rápida precipitação do geopolímero, que conseqüentemente diminui o grau de geopolimerização, reduzindo a resistência mecânica das amostras.

Temuujin et al. (2009) analisou o efeito na resistência de geopolímeros contendo óxido de cálcio (CaO) presente em cinza volante, e relatou que o cálcio presente em amostras com cura ambiente favoreceu o acréscimo de resistência, enquanto que amostras curadas a 70° C o efeito foi o contrário. Isso ocorre devido aos geopolímeros apresentarem menor densidade e maior porosidade, pois a água na matriz polimérica precipita mais rapidamente. Eles ainda destacam que a presença de $Ca(OH)_2$ é mais benéfico que CaO em termos de resistência mecânica e concluíram que o $Ca(OH)_2$ é um constituinte reativo na geopolimerização, ou seja um ativador.

Outros fatores que podem condicionar o comportamento mecânico dos geopolímeros são a temperatura e o tempo de cura das amostras (PALOMO et al.,1999). Davidovits (1999) e Hardjito et al. (2004) observaram que não houve acréscimo significativo de resistência para temperaturas acima de 60° C e nem após 48 horas de exposição

Okoye et al. (2015) e Yuan et al. (2016), citados por Singh e Middendorf (2019), apontaram amostras feitas a temperatura de 90° e relataram que esta temperatura é ainda maior dentro dos

moldes, devido à reação exotérmica de geopolimerização, causando rachaduras internas em detrimento das tensões geradas.

Existem outros métodos de cura, como é o caso do endurecimento por micro-ondas ou a cura em ambiente no qual o sol serve de estufa natural para o processo de cura. Contudo, Ranjbar et al. (2017) apresentaram em sua pesquisa um método chamado de prensa a quente, no qual as amostras de geopolímero são aquecidas a temperaturas próximas de 350° C combinadas a pressões elevadas. Segundo os autores, os poros de ar presos na matriz geopolimérica são removidos, gerando aumento de densidade da amostra.

Assim, sabendo-se combinar as razões molares e as características de cura adequados, pode-se obter geopolímeros com propriedades mecânicas e térmicas positivas. Do ponto de vista ambiental, resíduos da indústria, antes sem destinação, podem ser usados na síntese alcalina; dessa forma, pode-se imobilizar a geração de resíduos tóxicos e até mesmo radioativos (PALOMO, 2003). Comparando o gasto energético da fabricação do geopolímero (no máximo 350° C) com a do cimento Portland (1450°) ou a da cal (950°), o cimento álcali agregado possui temperaturas menores, além disso não ocorre geração de gases tóxicos como o CO₂. Filho (2011) aponta para o desenvolvimento de regiões com menor atividade econômica, visto que podem ser usados diversos materiais e sub produtos da indústria como precursores da ativação alcalina.

Desta forma, para este trabalho, busca-se, devido às características vantajosas do geopolímero, adicioná-lo como estabilizante aos BTC, ansiando um melhoramento das propriedades dos BTC.

3.4. BTC Estabilizados com Ativação Alcalina

São poucas as pesquisas realizadas na área da estabilização da terra por meio da ativação alcalina. França et al (2019), usando software e metodologia para análise sistemática de artigos, fizeram um estudo cujo tema principal era os BTC ativados alcalinamente; por meio de vários processos eles chegaram ao total de 28 artigos, os quais ainda tiveram seus resumos avaliados. Por fim eles selecionaram um portfólio bibliográfico com quatro artigos mais relevantes ao tema de estudo, que estão na Tabela 2. Estes artigos utilizaram como precursores da reação, cinzas dos mais diversos tipos.

Tabela 2: Artigos selecionados para o portfólio bibliográfico

CHEN, C. et al. Feasibility of manufacturing geopolymers bricks using circulating fluidized bed combustion bottom ash. Environmental technology , 2012.
SILVA, R. et al. CEBs stabilised with geopolymeric binders: mechanical performance of dry-stack masonry, WASCON 2015 , 2015.
SILVA, R. et al. Mechanical characterization of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation. Construction and Building Materials , 2015.
VENUGOPAL, K.; SASALATTI, V. Ambient Cured Alkali Activated Flyash Masonry Units. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering , 2016.

Fonte: 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

Silva et al. (2015), utilizando cinza volante (como precursor) e hidróxido de sódio (como ativador) com razão molar de 12,5 mols/l, chegaram a resultados de compressão após 180 dias de 12 MPa, podendo serem usados como blocos estruturais, comprovando a possibilidade de uso da ativação alcalina como estabilizante dos BTC. Sobre a cura dos blocos, eles fizeram a cura em ambiente (sem estufa) em um período muito longo, obtendo valores muito promissores de resistência mecânica.

Outro trabalho realizado foi o de Teixeira (2017), que utilizou a porcentagem de 8% da massa da terra de metacaulim (precursor) em solução ativadora de hidróxido de sódio (NaOH) com razões molares que variavam de 10 a 15 mols/l, o que apresentou valores de compressão de 5,8 MPa. A cura dos blocos se deu por meio de estufa, variando a sua temperatura entre 40° e 80° C. Entretanto, os resultados de compressão não foram consistentes, por dificuldades metodológicas de execução dos traços, o que aponta a necessidade de mais pesquisas sobre o tema.

Sore et al. (2018) realizaram uma pesquisa comparativa entre BTC sem estabilização, blocos solo-cimento e BTC estabilizados alcalinamente tendo como precursor o metacaulim e ativador NaOH, passando por processo de cura a 60° C. Eles chegaram a valores de resistência à compressão de 1,36 MPa, 8,1 MPa e 8,9 MPa, respectivamente, demonstrando que este novo método de estabilização da terra com a ativação alcalina possui resultados promissores. Além disso, eles também relataram que as propriedades mecânicas agregadas pelo geopolímero não alteraram significativamente as propriedades térmicas (inércia térmica elevada).

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados foram:

- Terra proveniente de bota fora
- Metacaulim Rosa fabricado pela Industria BBM Minérios
- Hidróxido de Sódio com índice de pureza de 98%, fabricado na Indústria Química Bandeirante Brazmo
- Cal Hidratada adquirida em comércio local
- Cal virgem doada pela Indústria Cal Norte e Nordeste S.A. localizada em Baraúna – RN
- Silicato de Sódio sólido proveniente da Representações Ltda
- Silicato de Sódio líquido obtido na indústria Pernambuco Química, em Recife - PE.
- Gesso comercial

A terra foi caracterizada quanto à sua composição química através da fluorescência de raio x (FRX) e os valores obtidos encontram-se na Tabela 3

Tabela 3: Composição química da matriz terra.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	ZrO ₂	Outros
%	49,22	16,18	25,28	6,83	1,20	0,56	0,73

O Metacaulim rosa também foi caracterizado através do FRX e assim determinou-se sua composição química que está descrita na Tabela 4.

Tabela 4: Composição química do Metacaulim

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO
%	56,707	24,211	12,838	3,053	2,592	0,042

Já o silicato de sódio líquido foi caracterizado pela indústria no qual foi fabricado segundo especificado na Tabela 5.

Tabela 5: Propriedades do Silicato de Sódio Alcalino

Fórmula	Na ₂ O.nSiO ₂
---------	-------------------------------------

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

O silicato de sódio sólido também foi caracterizado pela indústria fabricante e possui as características apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Propriedades do Silicato de Sódio sólido

Fórmula	Na ₂ O(SiO ₂) ₂
Aspecto	Pó branco
CAS	1344-09-8
Alcalinidade com Na ₂ O (em %)	23,3%
Sílica com SiO ₂ (em %)	50,9%
Solubilidade	Solúvel em água
Relação SiO ₂ /Na ₂ O	1,95
Ph	11,00 – 13,00
Densidade (g/ml) a 20°C	600 g/L – 750 g/L
H ₂ O	19,00 – 22,00%

Fonte: Representações Ltda.

4.2. MÉTODO

A metodologia foi dividida em três frentes de trabalho, baseadas em observações feitas em pesquisas anteriores, com o intuito de analisar a pega e melhorar a trabalhabilidade da mistura:

- Frente A: Inicialmente teve como objetivo estudar a função do gesso como um retardador de pega da ativação alcalina e verificar a possibilidade de uso da cal virgem (posteriormente

substituída por cal hidratada) como ativador alternativo da reação de geopolimerização. Nesta frente os ativadores foram usados em solução.

- Frente B: semelhante à frente A, o objetivo foi estudar o gesso como possível retardador de pega, bem como a possibilidade do uso da cal virgem (posteriormente substituída por cal hidratada) como outra fonte de ativação da reação. Foi utilizado Silicato de Sódio líquido como ativador e também para corrigir a razão de Si/Al. Nesta frente, os ativadores foram usados em solução.
- Frente C: Esta frente teve o intuito de estudar a mistura dos ativadores em estado sólido, bem como o uso de cal hidratada como possível ativador da solução. Outro objetivo foi variar a Razão de Si/Al por meio do Silicato de Sódio sólido.

Ao longo da execução das frentes foram feitas algumas observações que desencadearam em alterações no planejamento inicial:

- Para as frentes A e B percebeu-se que a cal virgem quando misturada na solução gerava uma reação extremamente exotérmica, o que dificultava a manipulação da solução, de modo que se optou por utilizar a cal hidratada em lugar da cal virgem
- Também foi realizado um teste na frente C utilizando cal virgem; contudo, como nas outras duas frentes, a reação exotérmica da cal virgem dificultou o manuseio da mistura. Além disso, os blocos que foram moldados logo após alguns minutos apresentavam fissuras e desmanchavam devido à rápida perda de água (Figura 1). Desta forma manteve-se o planejamento na frente C utilizando-se a cal hidratada.

Figura 1: Fissuras nos blocos confeccionados com Cal Virgem Frente C



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Feitas as devidas observações partiu-se para o planejamento de execução do trabalho. Com objetivo de analisar a resistência mecânica e a absorção de água nos blocos, foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de resistência mecânica; ensaio de absorção por capilaridade e ensaio de absorção por imersão. Para isso foram separados 3 blocos para cada ensaio e foi acrescentado mais um bloco devido às possíveis perdas, chegando a 10 blocos por traço.

Foi utilizado o método de Planejamento Estatístico Experimental com três variáveis para cada frente, assim 8 traços diferentes por frente mais 3 pontos centrais, chegando no total de 330 blocos no trabalho, com 11 traços por frente, cada traço com 10 blocos. A seguir a descrição detalhada das variáveis de cada frente.

- Frente A

Para a frente A buscou-se variar a razão de mols/l de NaOH que segundo Pinto (2004) concentrações próximas de 15 mol/l geraram melhores resultados para a resistência à compressão bem como melhor trabalhabilidade da mistura; desta forma foi variada a razão molar de NaOH em 0; 7,5 e 15 molar.

Outra variável foi a razão molar de cal hidratada Ca(OH)_2 ; o parâmetro para sua escolha foi a comparação com o hidróxido de sódio (NaOH), pois o objetivo era analisar a possível utilização de cal como ativador, segundo Temuujin et al.(2009), como é o caso do hidróxido. Assim sendo, a razão molar de Ca(OH)_2 variou de 0; 7,5 e 15.

Por último, o gesso, cuja variação em relação à massa de terra de cada traço foi de 0, 5 e 10%. Dessa forma os traços representados encontram-se na Tabela 7:

Tabela 7: Descrição dos traços confeccionados na frente A

TRAÇOS	Razão Molar de Ca(OH)_2	Razão Molar de NaOH	Gesso
1	0	0	0%
2	15	0	0%
3	0	15	0%
4	15	15	0%
5	0	0	10%
6	15	0	10%
7	0	15	10%
8	15	15	10%
9	7,5	7,5	5%
10	7,5	7,5	5%
11	7,5	7,5	5%

- Frente B

As variáveis adotadas para esta frente foram as mesmas que a frente A, de modo que os traços podem ser encontrados na Tabela 5. Contudo, diferente da frente anterior, esta buscou corrigir a razão de Si/Al de 3,95 presente no metacaulim por meio da adição do Silicato de Sódio líquido chegando a razão de 4,5.

- Frente C

Para esta frente as razões de NaOH e de cal hidratada também variaram conforme justificativa dada anteriormente, sendo a variação de 0, 7,5 e 15 para ambas. A outra variável

foi a razão de Si/Al, parâmetro este que nas outras duas frentes eram constantes, nesta optou-se por variá-lo buscando verificar a interferência do Silicato de Sódio sólido adicionado, sendo esta interação as seguintes 3,92, 4,22 e 4,5. Os traços desta frente encontram-se demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8: Descrição dos traços confeccionados na frente C

TRAÇO	Razão Molar de NaOH	Razao Molar de Ca(OH) ₂	Si/Al
1	15	15	4,5
2	0	15	4,5
3	15	0	4,5
4	0	0	4,5
5	15	15	3,95
6	0	15	3,95
7	15	0	3,95
8	0	0	3,95
9	7,5	7,5	4,22
10	7,5	7,5	4,22
11	7,5	7,5	4,22

Para as três frentes de trabalho a molaridade do hidróxido de sódio (NaOH) da solução foi determinada a partir de valores próximos aos adotados nos trabalhos de Dimas(2017), Vassalo (2013) e Pinto (2004); os valores de razão molar de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) foram determinados com base nas razões de NaOH. Foi trabalhado com metacaulim rosa e sua razão de sílica/alumina é de 3,92; também esta razão foi variada e ficou dentro do parâmetro recomendado por Davidovits (1982).

Como já descrito anteriormente foram realizados 10 blocos por traço, sabe-se de maneira experimental que em média usam-se 3 kg de terra por bloco, desta forma foram

utilizados 30 quilos de terra por traço. A quantidade de metacaulim usado por traço foi baseado na quantidade usual de cimento para confecção de blocos solo cimento que fica próximo de 8% da massa da terra; assim foi adotado para o metacaulim esta porcentagem. As quantidades de NaOH e Ca(OH)_2 foram determinadas a partir de cálculos estequiométricos, partindo-se de uma quantidade de água estabelecida a partir de observações feitas em testes para a terra utilizada. Todavia, ao longo da confecção de alguns traços, dependendo da umidade da mistura, visando a melhor trabalhabilidade, bem como para realizar a compressão adequada dos blocos, foi necessário alterar o valor de água pré-estabelecido antes; dessa forma, nem sempre foi possível manter a razão molar calculada.

As quantidades de silicato de sódio a serem adicionadas para atingir as variações descritas anteriormente de Si/Al foram calculadas por meio de cálculos estequiométricos de acordo com a pureza dos materiais.

A partir da determinação dos traços a serem feitos para cada frente, deu-se início à confecção das amostras. Foi utilizada uma betoneira de 400 litros para realizar a mistura nas três frentes, porém como já mencionado a metodologia de confecção para cada frente variou. Também foi utilizada uma prensa hidráulica, fabricada pela *Eco Brava*, que pode ser vista na Figura 2 com capacidade de produção de um bloco por vez.

Figura 2: Prensa Hidráulica



Fonte: *Eco Brava* (2017)

Após a sua confecção, os blocos eram cobertos por lonas durante 24 horas para evitar a rápida perda de água. Depois deste período os blocos eram levados até a estufa para cura, no qual ficavam durante 5 horas por 70° Celsius; este parâmetro foi definido a partir de estudos

feitos por Jaarsveld et al. (2002) e Teixeira (2017). Segundo Pinto (2004), períodos muito longos não oferecem benefícios relevantes aos materiais ativados alcalinamente.

Após a cura os BTC eram estocados por 7 dias para posterior realização dos ensaios de compressão, absorção por capilaridade e absorção por imersão.

O ensaio de compressão foi realizado conforme a NBR 10836. Para tanto, os blocos eram cortados ao meio e colados com argamassa produzida com cimento. A execução de argamassa feita com terra e ativação alcalina se mostrou muito dispendiosa, ficando para uma posterior pesquisa a recomendação de se analisar argamassas ativadas alcalinamente. Após a colagem das duas metades do bloco, uma sob a outra, foi realizado capeamento das duas superfícies de contato que seriam colocadas na prensa para o ensaio, conforme visto na Figura 3.

Figura 3: BTC cortados e capeados



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

A velocidade da máquina usada no ensaio era de 10 mm/s. Após o rompimento do bloco a prensa acusava o valor de pico de compressão do material ensaiado em kgf; em seguida eram realizadas as devidas transformações, dividia-se a força encontrada pela área superior do corpo de prova.

Figura 4: Ensaio de Compressão



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Para o ensaio de absorção por capilaridade a metodologia de ensaio foi baseada no procedimento descrito no manual *Compressed Earth Blocks – Testing Procedures* livro publicado pela editora (CRATerre, 2000). E seguiu-se da seguinte forma: Cada bloco ensaiado foi pesado antes (massa seca – m_d) e depois (massa úmida – m_h) de se realizar o ensaio; uma de suas faces laterais foi medida (S) e colocada em contato com uma lâmina d'água de aproximadamente 5 mm; o tempo de imersão dos blocos na água foi de 1 hora (t) e constantemente foi verificado se a lamina d'água se encontrava em contato com a superfície (S) do bloco; por fim o coeficiente de absorção (C_b) dos blocos foi determinado através da Equação 2:

$$C_b = \frac{100 \times (m_h - m_d)}{S\sqrt{t}} \quad (eq.2)$$

O ensaio de imersão foi realizado de acordo com os procedimentos da NBR 10836, de modo que os blocos eram levados à estufa com a temperatura em 100° Celsius até alcançarem massa constante; sua massa seca era medida (M_1) e em seguida os blocos eram submersos em água por um período de 24 horas. Após este tempo os blocos eram retirados e a massa novamente era medida (M_2). Desta forma o coeficiente de absorção por imersão foi calculado usando-se a Equação 3.

$$A\% = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (eq.3)$$

METODOLOGIA DE CONFECÇÃO

Como dito anteriormente a metodologia de execução das misturas de cada frente variou. Abaixo encontram-se os detalhes da execução de cada metodologia

- Frente A:

Para a frente A, optou-se por preparar a solução ativadora de NaOH e/ou Ca(OH)₂ 24 horas antes da confecção dos traços. No dia seguinte, o precursor da ativação alcalina era acrescentado na solução; posteriormente, a terra era despejada na betoneira e em seguida, ainda com a betoneira em movimento e de maneira cuidadosa, era adicionada a solução ativadora, buscando umedecer a mistura de forma homogênea.

- Frente B

A solução com NaOH, Ca(OH)₂ e Silicato foi feita também 24h antes da confecção dos blocos e no dia do preparo das amostras o metacaulim era adicionado a esta solução. A terra era colocada na betoneira e com esta em movimento a solução já com o metacaulim era derramada aos poucos na terra.

- Frente C

Para esta frente, a terra, o metacaulim, os ativadores (NaOH e Ca(OH)₂) e o Silicato de Sódio sólido eram todos adicionados na betoneira e com esta em movimento a água era adicionada.

Após o preparo da mistura em betoneira, o material era colocado na prensa mecânica da *eco brava* por meio de um compartimento superior com capacidade maior que um bloco no qual a mistura fluía para uma gaveta com volume menor; esta gaveta carregava a forma onde o material era comprimido. No entanto para alguns traços não se pode utilizar este compartimento superior devido à rápida pega da mistura ou ao seu empelotamento. Assim, o material não fluía de maneira adequada para a gaveta e por consequência para o molde onde seriam compactados.

Desta forma, para estes traços, a mistura era colocada manualmente diretamente na forma da máquina, por meio da gaveta, diminuindo a produtividade da execução dos blocos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para este capítulo, busca-se apresentar as observações metodológicas e os resultados dos ensaios de compressão, absorção por capilaridade e absorção por imersão, para cada frente desenvolvida neste trabalho, bem como apresentar observações feitas sobre os ensaios para cada frente, e o posterior apontamento comparativo entre as frentes. Também foi feito o uso do programa *Statistica* para auxiliar nas análises comparativas dos dados.

5.1. OBSERVAÇÕES METODOLÓGICAS

Foi observado na metodologia da frente C que as partículas de NaOH por serem cristais grandes não reagiram por completo, de modo que foram apenas envolvidas pela terra como mostrado na Figura 5.

Figura 5: Hidróxido de Sódio não reagido envolvido pela terra



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Fez-se um teste pulverizando o hidróxido de sódio e percebeu-se uma melhor homogeneização da mistura como pode ser vista na Figura 6. No entanto foi observado que este procedimento era perigoso; assim, mesmo com o resultado positivo, manteve-se o procedimento com hidróxido em escamas.

Figura 6: Amostra feita com Hidróxido de Sódio triturado.



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Em relação às misturas a serem compactadas, as frentes apresentaram resultados distintos. Para as frentes A e B, no qual existia uma solução ativadora que era acrescentada na betoneira em movimento, observaram-se dificuldades na dispersão, devido a rápida pega da reação apresentando empelotamento na mistura a ser compactada, que pode ser visto na Figura 7.a. Para a frente C no qual os ativadores eram misturados com a terra e por fim era acrescentada água, observou-se que a mistura era mais dispersa e homogênea, podendo ser observado na Figura 7.b.

Figura 7: Comparativo entre a aparência da mistura nas duas metodologias



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Ainda sobre a homogeneidade da mistura, vale-se ressaltar que a umidade também interferiu na trabalhabilidade; observou-se que misturas mais úmidas empelotam mais, tornando o processo de execução bastante artesanal, acrescentando a mistura na prensa de forma

manual, bloco a bloco. Outro ponto a ser destacado é que a homogeneidade da mistura bem como o pouco empelotamento, apesar de melhorarem a trabalhabilidade, não necessariamente geraram resultados melhores para os ensaios de compressão.

Observou-se, assim como em pesquisas anteriores, o rápido tempo de pega da mistura, que no caso deste trabalho dificultava a execução dos blocos. Na Figura 8 os blocos estão, da esquerda para a direita, em ordem de execução e pode-se observar suas diferenças, em que o primeiro bloco se apresentou com melhor trabalhabilidade e com aparência mais homogênea e o último bloco da direita apresentou dificuldade de execução devido à rápida pega.

Figura 8: Visualização da interferência do tempo de pega



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Em pesquisas anteriores ocorria que em alguns traços a mistura se impregnava na forma metálica da prensa após compactar o material; assim, quando se percebia este problema passava-se óleo diesel com o objetivo de diminuir a aderência do material na forma. No entanto o óleo diesel não se apresentou eficaz para alguns traços, como pode ser observado no exemplo da Figura 9.

Figura 9: Bloco impregnado na máquina



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Durante a execução dos traços foi feita uma tentativa de usar lubrificante sólido ao invés de líquido, polvilhando o material sólido sobre a superfície de contato da mistura com a forma metálica. Este teste apresentou resultados muito promissores, facilitando a desforma dos blocos, como mostrado na Figura 10.

Figura 10: Uso da terra como lubrificante sólido



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

A partir dos métodos de execução dos traços já explanados anteriormente, juntamente com os ensaios propostos realizados, apresentam-se (item 5.2) os resultados para cada ensaio das respectivas frentes estudadas:

5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de compressão da Frente A encontram-se na Tabela 9 abaixo juntamente com observações feitas sobre os resultados.

Tabela 9: Resultados de Compressão Frente A

Sem silicato. Si/Al: 3,94				MPa			Média dos resultados
TRAÇOS	Razão Molar (Ca(OH) ₂)	Razão Molar NaOH	Gesso	1	2	3	
1	0	0	0%	1,05	0,8	0,72	0,85
2	15	0	0%	0,25	0,24	0,24	0,24
3	0	15	0%	1,63	1,28	1,66	1,52
4	15	15	0%	2,71	2,37	2,05	2,38
5	0	0	10%	0,34	0,3	0,19	0,28
6	15	0	10%	1,22	1,49	0,93	1,21
7	0	15	10%	1,09	1,09	1,09	1,09
8	15	15	10%	0,98	0,98	0,98	0,98
9	7,5	7,5	5%	1,56	1,35	1,32	1,41
10	7,5	7,5	5%	2,23	2,44	2,78	2,48
11	7,5	7,5	5%	1,46	1,46	1,49	1,47

Por meio deste resultado pôde-se observar que nenhum traço da frente A estaria apto para execução de alvenaria estrutural, sendo o mínimo exigido por norma de 4 MPa NBR 8491 (ABNT, 2012). Apenas os traços 4 e 10 chegaram a resultados acima de 2 MPa e estariam conforme norma NBR15270-1 (ABNT, 2005) para alvenaria de vedação. Os demais traços desta frente não poderiam ser usados como alvenaria devido ao baixo desempenho mecânico.

O traço 10A obteve melhor resultado, contudo durante sua execução ocorreu empelotamento excessivo; isso se deu devido ao maior tempo da mistura na betoneira, onde a terra e a solução ativadora permaneceram em rotação constante por um tempo estimado de 5 a 10 minutos a mais que o tempo médio de execução. O traço apresentou pelotas (Figura 11) maiores que os demais traços desta frente e também foi observada dificuldade de manuseio da mistura na prensa de compactação, demandando um trabalho bastante manual, aumentando assim o tempo médio de execução do traço.

Figura 11: Mistura empelotada do traço 10A



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Ainda sobre o traço 10A, deve-se ressaltar que este é um ponto central, no qual outros dois traços (9A e 11A) foram executados com os mesmos parâmetros e tendo em vista que os resultados variaram muito dos traços 9 e 11 com o referido traço 10, optou-se por não considerar ele como ponto de comparação com as outras frentes e sim o traço 4A.

Para a frente B os resultados de compressão foram estes encontrados na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados de Compressão Frente B

Sem silicato. Si/Al: 4,5				Resistência (Mpa)			Média dos resultados
TRAÇOS	Razão Molar (Ca(OH) ₂)	Razão Molar NaOH	Gesso	1	2	3	
1	0	0	0%	0,17	0,58	0,37	0,37
2	15	0	0%	0,27	0,21	0,33	0,27

3	0	15	0%	2,24	3,36	3,58	3,06
4	15	15	0%	4,53	5,99	5,13	5,22
5	0	0	10%	0,32	0,56	0,35	0,41
6	15	0	10%	0,67	1,3	1,49	1,15
7	0	15	10%	1,54	1,1	1,38	1,34
8	15	15	10%	3,9	4,87	4,76	4,51
9	7,5	7,5	5%	2	1,86	1,95	1,94
10	7,5	7,5	5%	1,89	2,03	1,57	1,83
11	7,5	7,5	5%	2,01	1,78	2,24	2,01

Os resultados desta frente apresentaram valores melhores que a frente A. Ainda pode-se observar que dois traços se enquadram na norma de alvenaria de vedação, sendo eles o 3B e o 11B. Além disso, outros dois traços estão conformes com a norma de alvenaria estrutural, atingindo resultados médios superiores a 4 MPa, sendo eles o traço 4B e 8B.

O traço 4B, que obteve melhor resultado possuía razão molar de hidróxido de sódio e cal hidratada de 15 mol/l e nenhum acréscimo de gesso. O segundo traço com melhores resultados possuía as mesmas características de cal e hidróxido do primeiro traço, contudo este possui 10% de gesso em sua composição.

Por fim na Tabela 11 são apresentados os resultados do ensaio de compressão da frente C.

Tabela 11: Resultados de Compressão Frente C

Mistura dos sólidos				MPa			Média dos resultados
TRAÇOS	Razão Molar (Ca(OH) ₂)	Razão Molar NaOH	Si/Al	1	2	3	
1	15	15	4,5	2,85	3,58	3,5	3,31
2	15	0	4,5	0,51	0,75	0,61	0,62
3	0	15	4,5	2,09	1,4	1,47	1,65
4	0	0	4,5	0,53	0,46	0,56	0,52

5	15	15	3,95	1,32	1,58	1,39	1,43
6	15	0	3,95	0,37	0,24	0,31	0,31
7	0	15	3,95	1,2	1,2	1,2	1,2
8	0	0	3,95	1,05	0,8	0,72	0,85
9	7,5	7,5	4,22	1,08	1,12	1,17	1,12
10	7,5	7,5	4,22	1,67	2,21	1,63	1,84
11	7,5	7,5	4,22	2,33	2,12	0,96	1,8

Como comentado anteriormente, esta frente apresenta metodologia de execução distinta das demais e se destacou pela facilidade de confecção dos blocos, devido ao pouco empelotamento da mistura. Entretanto para os resultados do ensaio de compressão simples seus resultados não foram muito satisfatórios.

O traço que obteve melhor resultado foi o traço 1C, no qual sua média ultrapassou 2 MPa, se enquadrando em alvenaria de vedação. Contudo, os demais traços não obtiveram valores adequados para alvenaria de vedação.

5.2.1. COMPARATIVO ENTRE AS FRENTES

Nesta etapa faremos um comparativo dos resultados obtidos pelo ensaio de compressão de cada frente. Separando os traços que obtiveram melhores resultados de cada frente, também se optou por trazer mais um resultado da frente C para servir de comparativo entre as frentes, pois a frente C variou a razão de Si/Al. Dessa forma pode-se fazer a Tabela 12.

Tabela 12: Comparativo dos Resultados de Compressão entre as Frentes

TRAÇOS	(Ca(OH) ₂)	NaOH	gesso	Si/Al	Mpa			Média dos resultados
					1	2	3	
4B	15	15	0%	4,5	4,53	5,99	5,13	5,22
1C	15	15	0%	4,5	2,85	3,58	3,5	3,31
4A	15	15	0%	3,94	2,71	2,37	2,05	2,38
5C	15	15	0%	3,95	1,32	1,58	1,39	1,43

Foi observado que todos os traços que obtiveram maiores resultados das três Frentes de pesquisa possuíam a mesma razão molar de Hidróxido de Sódio e Cal Hidratada; acredita-se que a cal proporcionou acréscimo de resistência a estes traços comparando-os com os traços que possuíam a mesma razão molar de Hidróxido de Sódio porém sem a cal.

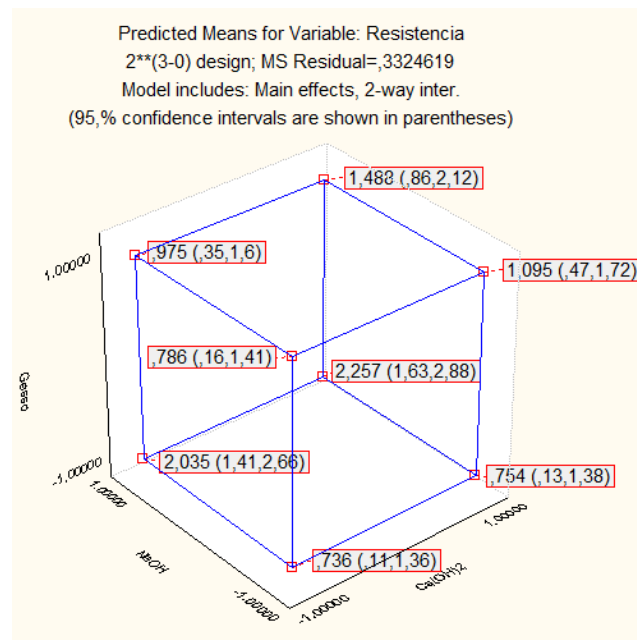
Comparando o traço 4A com o 4B percebe-se que o traço da frente B apresentou valores significativamente maiores que o da frente A; isso se dá devido ao acréscimo de resistência que a sílica presente no silicato proporciona à reação ativadora (REFERENCIA).

Comparando os resultados de compressão da Frente A e B com a Frente C, podemos observar que a metodologia de execução na qual consistia em fazer a solução ativadora um dia antes da realização do traço (frentes A e B) proporcionou melhores resultados em comparação com a Frente C no qual a terra, o ativador e precursor da reação eram misturados em betoneira e posteriormente era acrescida a água. Muito provavelmente a metodologia de execução com solução ativadora realizada um dia antes permite a melhor homogeneização da reação e posteriormente a melhor homogeneização da mistura em betoneira.

Sob a ótica da razão de Sílica/Alumina, foi percebido que os traços que possuíam o acréscimo de sílica ao sistema geraram resultados melhores de resistência à compressão. Segundo Silva et al. (2007), para os geopolímeros, a sílica é responsável por dar a resistência ao geopolímero e a alumina uma possível reguladora da pega na ativação.

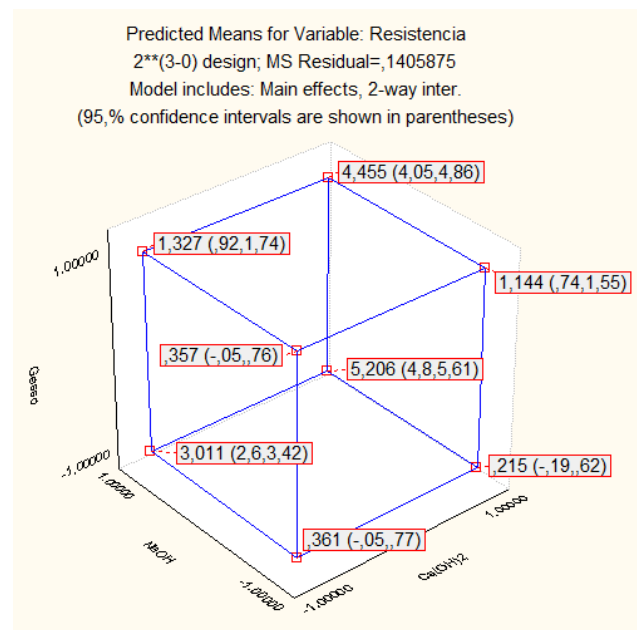
Ainda foram realizadas análises estatísticas por meio do já citado software *Statistica*. Buscando auxiliar na compreensão dos resultados gerados, foram construídos os Gráficos 1, 2 e 3.

Gráfico 1: Valores preditos para combinações de variáveis utilizadas na Frente A



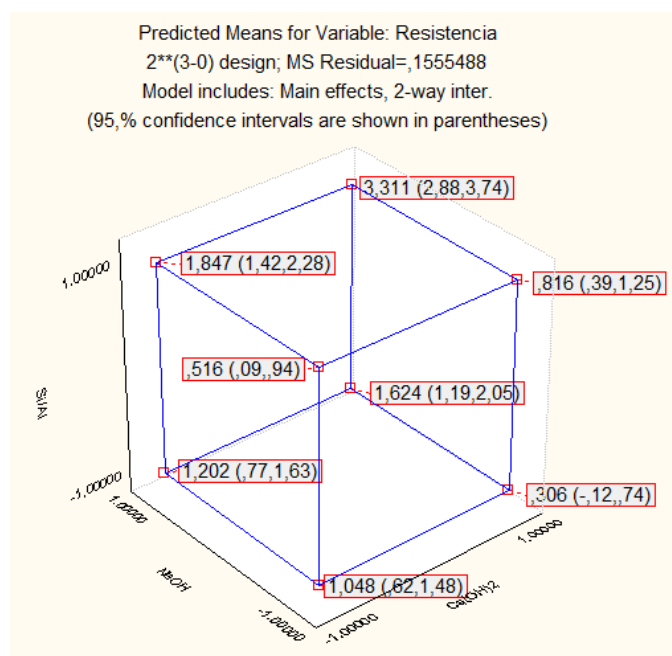
Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Gráfico 2: Valores preditos para combinações de variáveis utilizadas na Frente B



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Gráfico 3: Valores preditos para combinações de variáveis utilizadas na Frente C



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

A partir dos gráficos 1 e 2, observa-se que o comportamento da resistência em função das variáveis estudadas nas frentes A e B são bem semelhantes. Quando é acrescido gesso no sistema os resultados de resistência à compressão diminuem; também podemos concluir que o gesso interfere negativamente na resistência à compressão principalmente quando a solução ativadora contém NaOH. Contudo maiores razões molares de NaOH possivelmente aumentaram os resultados. Singh e Middendorf (2019) apontam que quanto maior a concentração de mol/L do metal alcalino na solução ativadora maior a solubilidade de Si/Al no geopolímero, melhorando a resistencia.

Também é percebido o acréscimo de resistência à compressão significativos quando o Ca(OH)_2 é combinado com NaOH. Segundo Temuujin et al.(2009), o aumento do teor de cálcio em geopolímeros favorece a melhor compactação das microestruturas, apresentando cristais menores, demonstrando que o CaOH age como um elemento precipitador; acredita-se que isso é o responsável pelo acréscimo de resistência à compressão gerado nos blocos contendo cal hidratada e hidróxido de sódio.

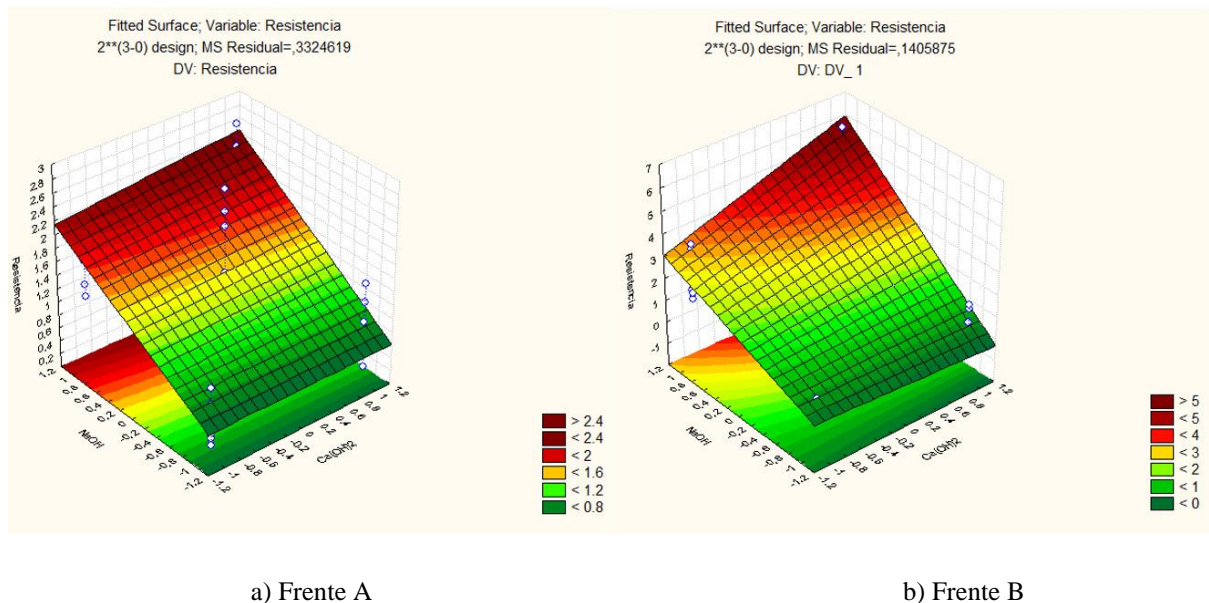
Sob o ponto de vista da frente C, percebe-se que a adição de silicato de sódio na mistura aumenta os resultados de resistência à compressão. Também se nota a influência positiva da cal hidratada quando combinada com ambos os ativadores e com razões maiores de Si/Al.

Entretanto, apesar de a cal hidratada, para todas as frentes, apresentar valores positivos quando combinada com razões de hidróxido de sódio, e silicato de sódio, ela sozinha não proporciona acréscimo considerável de resistência.

Os comportamentos aqui citados podem ser mais bem observados por meio de superfícies de resposta geradas também pelo programa Statistica, conforme mostrados nos gráficos 4, 5 e 6, de maneira que serão separados os gráficos da frente A e B em relação à frente C para facilitar o entendimento e realizar comparações.

O Gráfico 4 abaixo é uma comparação das resistências das Frentes A e B quando não é acrescido o gesso em seus sistemas, variando apenas as razões molares de NaOH e Ca(OH)_2 .

Gráfico 4: Comparação dos resistências das Frentes A e B com relação a variação de NaOH e Ca(OH)_2



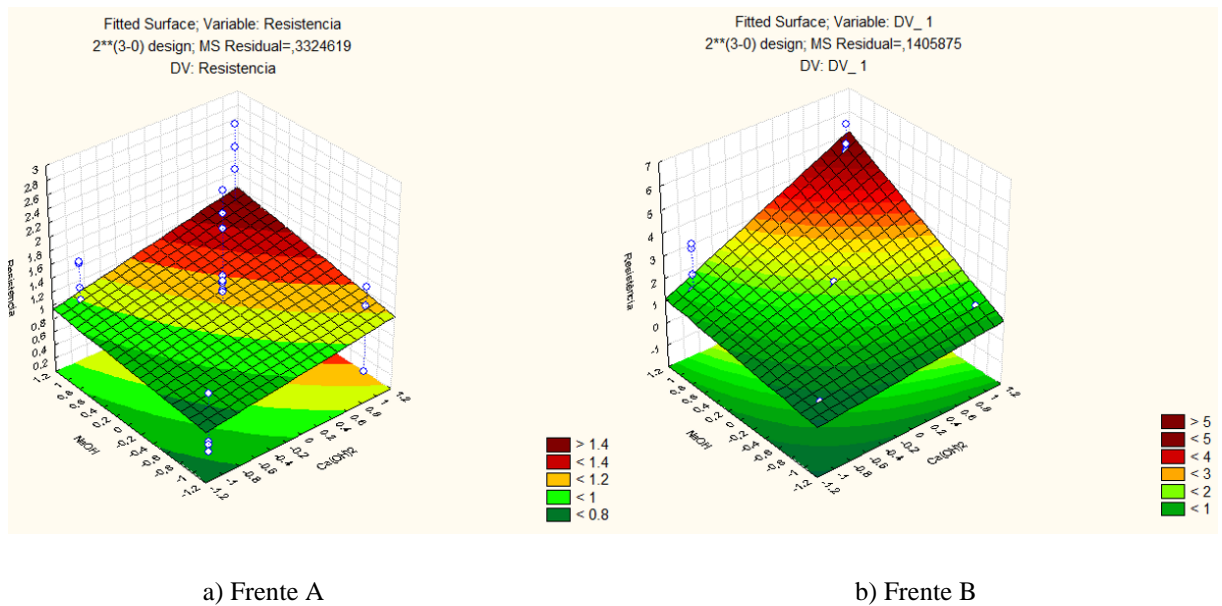
Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Como já exposto, percebe-se que apenas o acréscimo de Ca(OH)_2 não gera mudanças expressivas na resistência diferentemente de quando ocorre variações de NaOH pura e simplesmente, onde é perceptível o acréscimo de resistência à compressão, tendo em vista que o NaOH é comprovadamente um ativador muito utilizado em ativações alcalinas. Contudo, quando as duas variáveis são acrescentadas, na frente A podemos observar um leve aumento da resistência à compressão, porém na frente B ocorre um aumento significativo, bem como é o

caso do acréscimo de silicato de sódio em todos os traços da frente B, resultando em um melhor desempenho dos blocos.

Já o Gráfico 5 é uma comparação das resistências à compressão das Frentes A e B quando há acréscimo de 10% de gesso em seus sistemas, com variação das razões molares de NaOH e Ca(OH)₂.

Gráfico 5: Comparativo dos resultados de resistência das Frentes A e B com relação a variação de NaOH e Ca(OH)₂, com 10% de Gesso

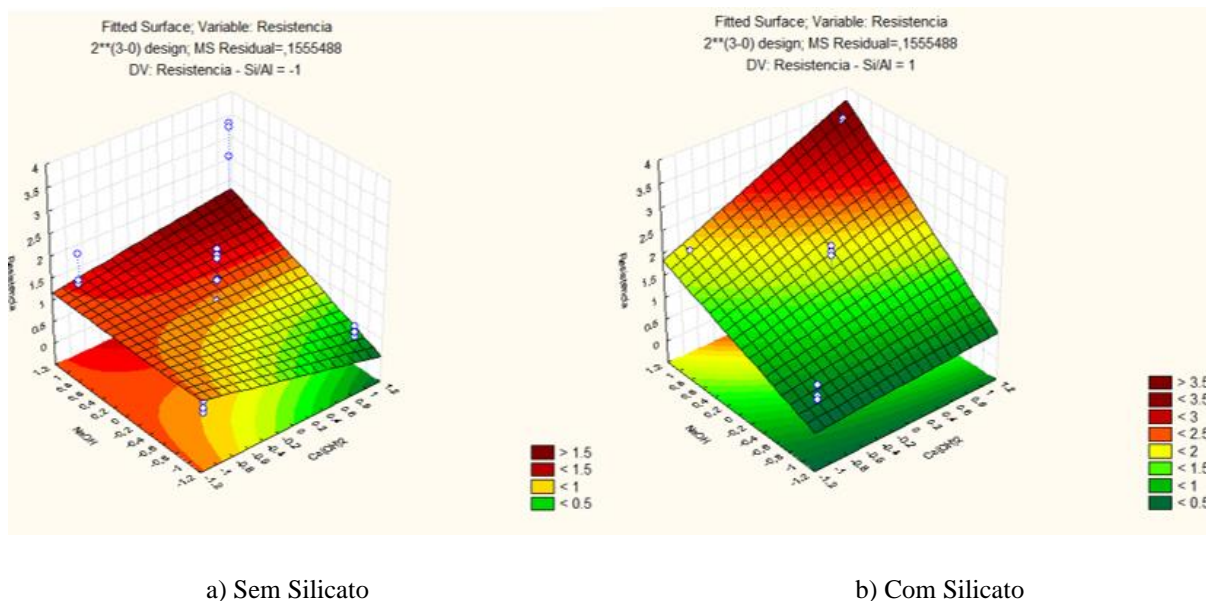


Fonte: Acervo Pessoal (2019)

A partir do Gráfico 5, pode-se perceber novamente como o acréscimo de gesso influencia negativamente na resistência à compressão dos blocos. O acréscimo de resistência à compressão gerado pelo hidróxido de sódio também se mostrou menos efetivo comparado ao Gráfico 4. Ainda assim como no Gráfico 4, no Gráfico 5 é percebido que a frente B com adição de silicato de sódio possui valores mais expressivos.

Partindo para os gráficos de superfície gerados para a frente C, os Gráficos 6 apresenta os resultados de resistência da frente C com e sem sílica, variando as razões molares de NaOH e Ca(OH)₂.

Gráfico 6: Comparativo dos resultados de resistência à compressão da Frente C com variação de NaOH e Ca(OH)₂, com e sem silicato.



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Quando o silicato é adicionado pode ser observado uma semelhança com o Gráfico 4 da frente B, onde os valores de resistência à compressão aumentam significativamente, principalmente quando ocorre a combinação das maiores razões molares de NaOH e Ca(OH)₂. No entanto, para o gráfico 6.a sem silicato, esses valores são menores e percebe-se uma alteração do padrão dos resultados onde o menor valor de resistência à compressão é registrado quando ocorre o máximo de Ca(OH)₂ sem a presença de hidróxido de sódio; já nos Gráficos 4 e 5, o menor resultado gerado sempre foi quando não ocorria nenhuma composição de hidróxido de sódio ou de cal. E ainda sobre os valores sem silicato de sódio, pode-se perceber que à medida que vai se acrescentando cal em conjunto com hidróxido de sódio, os valores aumentam semelhantemente aos Gráficos 4 e 5.

5.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Sobre os ensaios de capilaridade vale-se recapitular que foram realizados ensaios com três amostras de cada traço. Partindo disso, foi observado que alguns traços tiveram perdas de um ou mais blocos, outros blocos tiveram perda de massa e seus resultados de absorção também foram comprometidos como pode ser visto na Figura 12. Dessa forma, utilizadas a média dos resultados apenas nos blocos restantes, os traços que tiveram perda de todas as amostras foram desconsiderados.

Figura 12: exemplo de perda de massa dos blocos



Fonte: Acervo Pessoal (2019)

Os valores de absorção por capilaridade das três frentes A, B e C, respectivamente, estão representados nas Tabelas 13,14 e15:

Tabela 13: Resultados de Absorção por capilaridade Frente A

TRAÇOS	(Ca(OH) ₂)	NaOH	gesso	1	2	3	Média dos resultados
1	0	0	0%	6,33	6,47	6,93	6,58
2	15	0	0%	16,26	15,77	15,61	15,88
3	0	15	0%	9,50	10,17	7,12	8,93
4	15	15	0%	4,95	3,84	5,53	4,77
5	0	0	10%	X	25,09	X	25,09
6	15	0	10%	14,20	14,78	14,06	14,35
7	0	15	10%	X	X	X	O bloco se desfez em água
8	15	15	10%	82,87	6,21	X	44,54
9	7,5	7,5	5%	7,33	8,04	X	7,69
10	7,5	7,5	5%	3,32	1,27	0,83	1,80
11	7,5	7,5	5%	4,27	5,62	4,77	4,89

Tabela 14: Resultados de Absorção por capilaridade Frente B

TRAÇOS	(Ca(OH) ₂)	NaOH	Gesso	1	2	3	Média dos resultados
1	0	0	0%	6,37	7,70	9,11	7,73
2	15	0	0%	X	X	X	O bloco se desfez em água
3	0	15	0%	1,02	2,31	1,41	1,58
4	15	15	0%	6,76	5,24	4,99	5,66
5	0	0	10%	-3,77	-3,77	-3,77	-3,77
6	15	0	10%	6,00	7,36	7,89	7,08
7	0	15	10%	3,26	1,11	4,07	2,81
8	15	15	10%	2,37	2,38	88,06	30,94
9	7,5	7,5	5%	6,01	6,89	8,36	7,09
10	7,5	7,5	5%	2,47	2,93	3,37	2,92
11	7,5	7,5	5%	4,74	3,42	3,05	3,74

Tabela 15: Resultados de Absorção por capilaridade Frente C

TRAÇOS	(Ca(OH) ₂)	NaOH	Si/Al	1	2	3	Média dos resultados
1	15	15	4,5	16,98	13,80	15,40	15,39
2	15	0	4,5	4,77	4,78	3,37	4,31
3	0	15	4,5	11,46	11,82	11,67	11,65
4	0	0	4,5	11,68	13,98	12,97	12,88
5	15	15	3,95	5,38	7,54	7,65	6,86
6	15	0	3,95	28,52	31,63	23,06	27,74
7	0	15	3,95	3,32	8,86	8,36	6,85
8	0	0	3,95	6,33	6,47	6,93	6,58
9	7,5	7,5	4,22	4,10	5,98	4,52	4,87
10	7,5	7,5	4,22	2,62	3,43	4,64	3,56
11	7,5	7,5	4,22	6,81	7,50	5,13	6,48

A partir dos resultados mostrados na Tabela 13, pode-se observar que novamente na frente A o traço 10 foi o que mais se destacou; entretanto, ocorreram problemas na confecção deste traço (como já descrito). Dessa forma, outro traço da frente A que obteve bons resultados de absorção por capilaridade foi o traço 4, sendo o traço (depois do 10A) com melhores resultados de resistência à compressão.

Partindo para a frente B (Tabela 14), destaca-se o traço 3B que semelhantemente ao traço 4A, foi um dos traços com melhor resultado de resistência à compressão e com o melhor resultado de capilaridade. Além destes, outros dois traços são destacados, entretanto para resultados não satisfatórios: o primeiro é o traço de número 2 onde os blocos se desfizeram total ou parcialmente durante o ensaio e o outro é o de número 5 cujos resultados foram negativos. Isso se deve à perda de massa ocorrida pela lixiviação de partículas da terra; isso provavelmente ocorre pelo fato de nestes traços não ocorrerem de maneira adequada a formação do geopolímero, pois possui apenas porcentagem de Cal ou de gesso. Ainda vale-se ressaltar que o traço 1, que foi realizado apenas com a compactação da terra úmida, obteve melhores resultados que o traço 5; assim conclui-se que o gesso contribui negativamente para o ensaio de absorção por capilaridade.

A frente C foi a única frente que todos os blocos puderam ser avaliados após o ensaio, pois não tiveram seus blocos desfeitos pela água (Tabela 15). O melhor resultado desta frente foi o traço 10, sendo este um dos pontos centrais, estes também obtiveram bons resultados para o ensaio. Outro traço em destaque é o de número 2 que possuía porcentagem de cal e acréscimo de silicato de sódio, sem a presença de hidróxido de sódio, entretanto este traço não registrou resultados de resistência à compressão satisfatórios. O traço desta frente com melhor resultado de resistência à compressão não forneceu bons resultados de absorção por capilaridade. Acredita-se que o pouco empelotamento dos traços desta frente favoreceu os resultados de absorção, pois permitiu que os blocos fossem melhor compactados.

De forma geral pode-se observar que o gesso contribuiu negativamente para os resultados de absorção por capilaridade, à exemplo disso é a comparação dos traços 1 A com 5 A ou 1 B com 5 B, em que os traços de numeração 1 possuíam apenas a terra umedecida e obtiveram melhores resultados que os que continha gesso em sua composição (traços de numeração 5). Assim também comparando traços de composição com apenas hidróxido (3A, 3B) obtiveram resultados de capilaridade melhores que traços com composições de hidróxido e gesso (7A, 7B).

Também foi observado que a Cal sozinha não forneceu resultados positivos de absorção por capilaridade. Como é o caso dos traços 2 A e 2 B que possuíam cal em sua composição e tiveram piores resultados em comparação com os traços 1 A e 1 B que não possuíam cal.

Ressalta-se aqui que, além da ocorrência da reação de ativação alcalina, a boa compactação do bloco em sua confecção é imprescindível para bons resultados de absorção por

capilaridade. Acredita-se que o empelotamento da mistura possa influenciar negativamente em sua compactação deixando espaços vazios nos blocos e por consequência interferindo negativamente os resultados do ensaio de capilaridade. No âmbito da perda de massa acredita-se que os blocos que tiveram perda de massa não possuíam a formação geopolimérica adequada, ou seja, a quantidade de ligante era insuficiente para aglutinar os agregados causando assim a lixiviação das partículas da terra.

5.4. ENSAIO DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO

Para os resultados de imersão muitos traços tiveram seus blocos desfeitos por completo na água e outros tiveram perda de massa, mascarando os resultados dos ensaios. Dessa forma os resultados de imersão são pouco conclusivos. As Tabelas 16, 17 e 18, demonstram os resultados de imersão das respectivas Frentes A, B e C.

Tabela 16: Resultados de Imersão Frente A

TRAÇOS	(Ca(OH) ₂)	NaOH	Gesso	1	2	3	Média dos resultados
1	0	0	0%	X	X	X	O bloco se desfez em água
2	15	0	0%	X	X	X	O bloco se desfez em água
3	0	15	0%	10,51	12,44	9,74	10,90
4	15	15	0%	3,46	3,54	4,10	3,70
5	0	0	10%	X	X	X	O bloco se desfez em água
6	15	0	10%	11,82	11,01	10,94	11,26
7	0	15	10%	X	X	X	O bloco se desfez em água
8	15	15	10%	0,09	0,28	X	0,18
9	7,5	7,5	5%	X	X	X	O bloco se desfez em água
10	7,5	7,5	5%				Sem Amostras suficientes
11	7,5	7,5	5%	6,39	7,16	7,14	6,90

Para a frente A, o traço 8 teve um resultado expressivo, entretanto após o fim do ensaio uma de suas amostras se desfez, assim o resultado de absorção por imersão pode ter sido alterado por perda de massa. Desta forma o traço com melhor resultado foi o traço 4, sendo o traço com melhor resultado de resistência à compressão e de absorção por capilaridade. No

traço 10, ocorreram problemas no momento de sua execução, não conseguindo fabricar o número de blocos necessários.

Tabela 17: Resultados de Imersão Frente B

TRAÇOS	(Ca(OH) ₂)	NaOH	Gesso	1	2	3	Média dos resultados
1	0	0	0%	9,91	10,46	12,75	11,04
2	15	0	0%	X	X	X	O bloco se desfez em água
3	0	15	0%	2,52	3,72	5,03	3,76
4	15	15	0%	5,58	5,32	5,16	5,35
5	0	0	10%	X	X	X	O bloco se desfez em água
6	15	0	10%	7,56	6,17	6,73	6,82
7	0	15	10%	1,77	1,83	1,80	1,80
8	15	15	10%	X	X	X	O bloco se desfez em água
9	7,5	7,5	5%	2,62	2,30	4,21	3,04
10	7,5	7,5	5%	6,03	6,02	6,97	6,34
11	7,5	7,5	5%	6,42	5,24	6,33	6,00

Para a frente B destaca-se o resultado do traço 7, contudo ao analisá-lo após o fim do ensaio, percebeu-se que uma parte se desfez, caracterizando perda de massa. Observando que neste traço em sua composição continha NaOH e gesso, acredita-se que o gesso tenha atrapalhado na formação do geopolímero, influenciando negativamente no resultado pois como dito anteriormente a formação adequada do geopolímero é responsável por ligar os materiais particulados da terra impedindo sua lixiviação.

Outro traço com bom desempenho foi o traço central de número 9, contudo comparando com os outros dois pontos centrais obteve-se um grande desvio. O traço 4 também apresenta resultados positivos do ensaio de absorção por imersão, além de ser o traço com melhor resultado de resistência à compressão.

Do ponto de vista dos traços que tiveram seus blocos desfeitos nas duas frentes A e B, percebe-se que todos continha cal ou gesso em sua composição, com exceção do traço 1 A que sua compactação foi realizada apenas com terra úmida. Assim pode-se concluir que o gesso e a cal influenciam negativamente a este ensaio de absorção por imersão. Além disso ressalta-se que nos ensaios de capilaridade também foram feitas estas observações.

Ainda sob a análise dos resultados das duas frentes pode-se observar que em geral os traços com bons resultados de compressão são os que obtiveram resultados positivos de imersão com exceção do 8 B que se dissolveu. Dessa forma apesar dos numerosos traços que se desfizeram ambas as frentes apresentam resultados positivos de imersão dos traços com bom desempenho a compressão. Concluindo-se que a formação geopolimérica adequada favoreceu o bom desempenho de imersão destas frentes.

Tabela 18: Resultados de Imersão Frente C

TRAÇOS	(Ca(OH) ₂)	NaOH	Si/Al	1	2	3	Média dos resultados
1	15	15	4,5	5,62	6,31	7,02	6,31
2	15	0	4,5	13,62	14,38	16,22	14,74
3	0	15	4,5	9,89	8,62	7,59	8,70
4	0	0	4,5	X	12,20	X	12,20
5	15	15	3,95	10,80	11,94	11,58	11,44
6	15	0	3,95	26,59	24,15	23,65	24,80
7	0	15	3,95	12,78	9,57	8,64	10,33
8	0	0	3,95	X	X	X	O bloco se desfez em água
9	7,5	7,5	4,22	6,54	7,34	45,68	19,85
10	7,5	7,5	4,22	10,12	8,64	10,77	9,84
11	7,5	7,5	4,22	10,38	9,87	12,13	10,79

A frente C teve grande destaque nos resultados de imersão, visto que a maioria dos seus blocos não se desfizeram durante o ensaio. Apenas o traço 8 teve perda das amostras e não possuía Cal hidratada nem Hidróxido de sódio em sua composição. Outro traço que obteve resultados negativos foi o de número 6, não estando de acordo com as exigências estabelecidas de porcentagem máxima de 20%, os demais estão de acordo com a norma. Por fim, nesta frente, o traço que obteve melhor resultado foi o de número 1, destacando-se também nos resultados de compressão, apontando, assim como nas outras frentes, que uma boa formação geopolimérica interfere positivamente no ensaio de absorção de imersão.

6. CONCLUSÃO

A partir dos pontos discutidos anteriormente, baseado nas metodologias aplicadas para a execução dos blocos e nos resultados obtidos, conclui-se que é necessário não apenas bons resultados em ensaios e testes, mas também boa produtividade e trabalhabilidade para a confecção dos blocos estabilizados alcalinamente. Ainda se ressalta que a trabalhabilidade interfere nos resultados de resistência à compressão e principalmente nos resultados de absorção por capilaridade, devido a uma interferência negativa das pelotas, impedindo a homogeneidade do BTC.

Dessa forma, a metodologia de execução mais produtiva e de melhor trabalhabilidade (Frente C) obteve, em geral, bons resultados de absorção por capilaridade. Contudo, os resultados de resistência à compressão não foram os melhores, tendo destaque para a frente B; dessa forma seria ideal o desenvolvimento da frente C, buscando aprimorar a formação do ligante álcali ativado para que seja agregado melhores valores de resistência à produtividade dos blocos.

Os resultados de absorção por capilaridade e imersão das três frentes não foram muito conclusivos. Porém pode-se observar que é de suma importância a sua compactação para os resultados positivos das amostras, vinculado à metodologia de execução dos blocos, à melhor trabalhabilidade e a tempos mais longos de pega para que não ocorra empelotamento excessivo. Cita-se também a observada perda de massa ocorrida em alguns traços, sendo necessário a boa formação do ligante para garantir a pouca lixiviação das amostras.

Como retardador de pega, o gesso não provocou nenhuma ação durante a execução das amostras, além da sua influência negativa nos resultados de compactação, absorção por capilaridade e absorção por imersão. Chega-se também à conclusão de que o gesso não se mostrou adequado para sua utilização em BTC estabilizados com geopolímero tendo como precursor o metacaulim.

Assim, a dificuldade de moldar os blocos, principalmente nas frentes utilizando solução ativadora (frente A e B), ainda permanece, sendo necessário estudos mais aprofundados para retardar a pega e por consequência melhorar sua trabalhabilidade.

Ainda sobre a pega, a cal hidratada (Ca(OH)_2) foi testada com o intuito de ser um ativador mais fraco e mais lento. Pode-se observar que a cal sozinha não mostrou ser eficaz, porém quando acrescida juntamente com o hidróxido de sódio permitiu ganhos de resistência à compressão consideráveis, porém influenciou negativamente nos resultados de absorção por capilaridade e de imersão. Dessa forma não podemos concluir que a cal não funciona como ativadora, sendo necessário realizar mais testes que verifiquem sua utilização com outras razões molares bem como em outras temperaturas de cura.

Sobre o silicato de sódio, este contribuiu significativamente para o aumento de resistência dos traços que o continham; isso se deve ao fato do acréscimo de sílica no sistema que é responsável pela resistência a compressão do geopolímero. Entretanto, o silicato de sódio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) também atua como ativador, acelerando ainda mais a pega das amostras. Dessa forma, ressalta-se novamente a necessidade de retardar a pega.

Os resultados observados comprovam que a utilização do geopolímero como estabilizante de BTC é possível, tendo algumas ressalvas já expostas. Além disso, pode-se perceber que as metodologias de execução apontaram para dois resultados principais: A metodologia do preparo da solução ativadora (frente A e B) proporcionou resultados melhores de resistência à compressão; entretanto foi relatado dificuldade de execução e trabalhabilidade, além de muitas amostras terem se desfeito nos ensaios de absorção por capilaridade e imersão, com tudo os blocos que resistiram aos ensaios de absorção, em média, apresentaram melhores resultados; já a frente dos sólidos (frente C) obteve resultados de compressão inferiores a outra metodologia, contudo o manuseio e a trabalhabilidade da mistura permitiram a execução rápida e, em geral, a melhor compactação dos blocos. Além disso um maior número de as amostras resistiram aos ensaios de absorção que a outra metodologia.

Por fim percebe-se a necessidade de mais pesquisas relacionadas ao tema. Sabe-se de resultados promissores em outras pesquisas, porém muito pontuais. Espera-se que os resultados obtidos neste trabalho, suas observações e conclusões sejam de grande valia para o desenvolvimento de novos passos para o aprimoramento dos Blocos de Terra Compactados estabilizados Alcalinamente. Também é compreendido que nem todas as áreas do mercado da construção civil irão absorver esta nova técnica, contudo acredita-se que técnicas convencionais devam andar alinhadas com o desenvolvimento sustentável na busca de novos processos construtivos que façam uma melhor utilização e reutilização das matérias primas.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

Buscar métodos seguros de triturar o hidróxido de sódio em escamas para uma melhor dispersão e interação entre os materiais na frente dos sólidos, podendo ser moído em moinho de bolas do estilo periquito. Outra sugestão é variar a ordem e o tempo de interação dos materiais em mistura desta frente.

Sugere-se a busca da melhor trabalhabilidade da metodologia da frente B, analisando o tempo de pega, que neste trabalho não foi avaliado de maneira técnica experimental, apenas foram feitas observações ao longo da produção dos blocos. Sugere-se o acréscimo de alumina amorfa no sistema no qual é avaliada como reguladora da formação geopolimérica.

Outro fator a ser avaliado é o tempo da mistura na betoneira, pois o tempo excessivo resultou em empelotamento de algumas amostras. Deste modo deve-se analisar o tempo em que os materiais são misturados na betoneira para definir um tempo ideal que garanta homogeneidade da mistura sem que esta empelote.

Por fim sugere-se a realização de ensaios para identificar o grau de reatividade tanto dos componentes (terra crua e metacaulim) quanto do produto (blocos estabilizados). Pois poderão ajudar a contornar as dificuldades encontradas neste trabalho, referente ao tempo de pega e a durabilidade dos blocos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10834: Bloco de solocimento sem função estrutural: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 15270 - Componentes cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação — Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. NBR 12653 – Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 8491 – Tijolo maciço de solo-cimento. Especificação. Rio de Janeiro, 2012.

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

BARBOSA, V.F.F., MACKENZIE, K.J.D., THAUMATURGO, C., Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymer. **International Journal of Inorganic Materials**, v. 2, pp. 309-317, 2000.

DAVIDOVITS, F. Les Mortiers des pouzzolanes artificielles chez vitruve, evolution historique architecturale. Thèse de DEA, Les Culturesdes de l' Antiquité Classique, Université Paris. 1993.

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

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

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 4. ed. Saint-Quentin, France: Geopolymer Institute, 2008.

DAVIDOVITS, J. **Mineral polymers and methods of making them**, US Patent 4349386. Depósito: 29 ago. 1980. Concessão: 14 set. 1982.

DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, v. 1, p. 131-149. 1994.

DAVIDOVITS, J.; BOUTTERIN, C. Reticulação Geopolimérica (LTGS) e Materiais de Construção. **Actualité de la construction de terre na França**. Plan Construction. Paris, 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.

FARIA, O. B. . **Utilização de macrófitas aquáticas na produção de adobe: um estudo de caso no Reservatório de Salto Grande (Americana-SP)**. 2002. 200 p. Tese (Doutorado e Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FARIA, O. B. Identificação e seleção de solos. In: NEVES, C.; FARIA, O. B. (Org.). Técnicas de construção com terra. Bauru: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. p. 12-15. Disponível em: <http://www.redproterra.org>. Acesso em: 03 jan. 2016.

FARIA, O. B.; BATTISTELLER, R. A. G.; NEVES, C. Influence of the addition of “synthetic termite saliva” in the compressive strength and water absorption of compacted soilcement. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, ed. 3, p. 127-136, 2016.

FARIA, O. B.; NEVES, C.; PINTO, E. da S. Proposta de método de ensaio para determinação do módulo de deformação de adobes. In: LATIN AMERICAN AND EUROPEAN CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDINGS AND COMMUNITIES, 2015, Guimarães Pt. Proceedings of EURO ELECS 2015. Guimarães: ANTAC, Universidade do Minho, 2015. v. 2, p. 747-756. ISBN 978-989-96543-8-9

FIGUEIRA, A. F. T. **O caráter vernáculo na construção com terra no panorama contemporâneo**. Orientador: Professor Doutor Arquiteto Manuel Jorge Rodrigues Couceiro da Costa. 2016. 279 p. Dissertação (Mestrado em 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.

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

HEATHCOTE, K. A. Durability of earthwall buildings. **Construction and Building Materials**, v. 9, p. 185-189, 1995

HOUBEN, H. *et al.* Builders grains - a new pedagogical tool for earth architecture education. **5th International conference on building with earth - LEHM**, Weimar. Germany, 2008.

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.

JALALI, S., & EIRES, R., **Inovações científicas de construção em terra crua**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Portugal, 2012.

KOMLJENOVIC, M.; BASCAREVIC, Z.; BRADIC, V. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 181, p. 35-42, 2010.

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

LOPES, V., **Estudo da viabilidade da incorporação de resíduos de sisal em BTC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Aveiro, Portugal, 2012.

LOURENÇO, P. *et al.* Novas Tecnologias na Aplicação de Terra Crua na Construção. **Companhia de Arquitetura e Desingn**, Portugal, 2008.

MIDDENDORF, B., SINGH, N. B., Geopolymers as na alternative to Portland cement: Na overview, **Construction and Building Materials**, 2019.

MILANI, A. P. S. *et al.* Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. **Construções rurais e ambiência**, Jaboticabal, v. 26, ed. 1, 2006.

MINKE, G. **Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture**. Basel-Berlim-Boston: Birkhäuser, 2006. 199 p.

MINKE, G. **Earth Construction Hand Book. The Building Material Earth in the Modern Architecture**. 1. ed. Southampton, U.K.: WIT Press, 2000. v. 4.

MOREL, JC., PKLA, A., WALKER, P., Compressive strength testing of compressed earth blocks, **Construction and Building Materials**, 2007. V 21, issue 2.

MORTON, T. Unfired earth bricks building. **Building for the Futere**, p. 24-27, 2005.

NEVES, C. M. M. *et al.* **Técnicas de Construção com Terra**. 1. ed. Bauru, São Paulo: FEB-UNESP/ PROTERRA, 2011. 79 p. ISBN 978-85-64472-00-6

NEVES, Célia Maria Martins; FARIA, Obede Borges; ROTONDARO, Rodolfo; CEVALLOS, Patricio S.; HOFFMANN, Márcio Vieira. (2009). **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo**. Rede Ibero-americana. PROTERRA. Disponível em <http://www.redproterra.org>. Acessado em 10 fev. 2020

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 472 p.

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

OKOYE, F. N.; DURGAPRASAD, J.; SINGH, N. B. Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 685-691, 2015.

PALOMO, A., PALACIOS, M., Alkali-activated cementitious materials: Alternative materices for the immobilisation of hazardous wastes. Part II. Stabilisation of chromiun and Lead, **Cement and Concrete Research**, 2003.

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.

PINTO, A. T. **Sistema de ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulim**. 2004. Tese (Doutorando) - Universidade do Minho, Portugal, 2004.

PINTO, A.T. Introdução ao Estudo dos Geopolímeros. 105p. Editora UTAD. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, 2006.

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

RANJBAR, N.; KASHEFI, A.; MAHMOUD, R. M. Hot-pressed geopolymer: Dual effects of heat and curing time. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, 2017.

RUIZ, G., ZHANG, X., EDRIS, F., CANAS, I., GARIJO, L., A comprehensive study of mechanical properties of compressed earth blocks, **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 566-572, 2018.

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

SCHROEDER, H. *et al.* Education and vocational training in building with earth in Germany. **5th International conference on building with earth - LEHM**, Weimar. Germany, 2008.

SEGANTINI, A. A. S; ALCÂNTARA M. A. M. Solo-cimento e Solo-cal. In: *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2ª. Ed. v.2. p.864 – 891. São Paulo: IBRACON, 2010.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011.

SHI, C.; KRIVENKI, P. V.; ROY, D. **Alkali-Activated Cements and Concretes**. USA - Canada: Taylor & Francis, 2006. 370 p.

SILVA, P. D.; SAGOE-CRENSTILK, K.; SIRIVIVATNANOM, V. Kinetics of Geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. **Cement and Concrete Research**, **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 512-518, 2007

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.

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.

STRUBLE, L.; GODFREY, J. HOW SUSTAINABLE IS CONCRETE?. **Proceeding of the International Workshop: Sustainable Development and Concrete Tecnology**, Beijing, China, p. 201-211, 2004.

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

TEIXEIRA, D. A. A. **Blocos de Terra Comprimidos Estabilizados com Ativação Alcalina do Metacaulim: Aspectos Metodológicos**. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

TEMUJIN, J. V.; VAN RIESSEN, A.; WILLIAMS, R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. **Journal of hazardous materials**, v. 167, p. 82-88, 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.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. 2013. 103 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federaç de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

World Business Council for Sustainable Development, 2018. Disponível em: <http://www.wbcsd.org/>. Acesso em: 2019.

YUAN, J., HE, P., JIA, D., YANG, C., ZHANG, Y., YAN, S., YANG, Z., DUAN, X., WANG, S., SHOU, Y., Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers, **Ceramics International**, 2016.