



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

JOÃO GABRIEL OLIVEIRA GOMES

ARGAMASSAS DE TERRA NO ESTADO ENDURECIDO:
INFLUÊNCIA DOS TEORES DE CIMENTO E ARGILA

JOÃO PESSOA
2022

JOÃO GABRIEL OLIVEIRA GOMES

ARGAMASSAS DE TERRA NO ESTADO ENDURECIDO:
INFLUÊNCIA DOS TEORES DE CIMENTO E ARGILA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do
Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal da Paraíba
como requisito complementar para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil, sob orientação
do professor Dr. Givanildo Alves
de Azeredo.

JOÃO PESSOA
2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G633a Gomes, Joao Gabriel Oliveira.

Argamassas de terra no estado endurecido: influência dos teores de cimento e argila / Joao Gabriel Oliveira Gomes. - João Pessoa, 2022.

52 f. : il.

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

1. Construções de Terra. 2. Teor de Cimento. 3. Teor de Argila. I. Azeredo, Givanildo Alves de. II. Título.

UFPB/CT

CDU 624(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

JOÃO GABRIEL OLIVEIRA GOMES

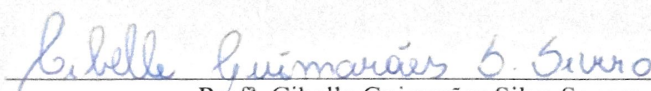
ARGAMASSAS DE TERRA NO ESTADO ENDURECIDO: INFLUÊNCIA DOS TEORES DE CIMENTO E ARGILA

Trabalho de Conclusão de Curso em 9/12/2022 perante a seguinte Comissão Julgadora:



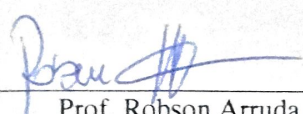
Prof. Givanildo Alves de Azeredo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Profª. Cibelle Guimarães Silva Severo
UFPB

APROVADO



Prof. Robson Arruda dos Santos
IFPB

APROVADO

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os que estiveram ao meu lado e que, de alguma forma, contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional no período em que estive na graduação, em especial, ao professor orientador Givanildo pela parceria e disponibilidade, tanto no projeto de pesquisa quanto na publicação de trabalhos acadêmicos, aos meus amigos de dentro e de fora do ambiente acadêmico, que compartilharam experiências e tornaram a trajetória mais rica e agradável, bem como aos meus familiares, que constituem a base para a minha formação e desenvolvimento pessoal, tendo contribuição imprescindível na formação de hábitos e valores que me permitiram vencer as dificuldades intrínsecas às experiências engrandecedoras.

“Estamos quase lá e, também, nem um pouco
perto. Tudo o que importa é que estamos
indo.”

RESUMO

Nos dias vigentes, a humanidade passa por diversos problemas de ordem social e ambiental relacionados ao desequilíbrio ecológico. Nesse sentido, existe uma tendência de valorização dos meios de desenvolvimento sustentável, englobando a indústria da construção civil, que é responsável por grande parte dos impactos causados pelas atividades antrópicas. Diante disso, a terra surge como uma alternativa, sendo bastante versátil e possibilitando a execução de empreendimentos a um custo reduzido e com elevada eficiência energética, além de oferecer diversas vantagens tecnológicas relacionadas ao conforto interno dos ambientes. Assim, este trabalho visa ao estudo da técnica de estabilização da terra que consiste na adição de cimento Portland à mistura, que possibilita a melhoria no desempenho do produto final em diversos aspectos por meio das alterações físicas e químicas que ocorrem com essa interação. Para tanto, foi feita uma revisão bibliográfica com a exposição de diversos resultados, sobretudo no que diz respeito à variação nos teores de cimento e de argila, através dos quais foram feitas análises e discussões, verificando a compatibilidade, possíveis incoerências e lacunas nos estudos apresentados. Com isso, foi verificado que essa técnica de estabilização constitui um importante mecanismo para superar as dificuldades inerentes às construções de terra, favorecendo a execução de empreendimentos mais duráveis, sustentáveis e menos onerosos. Como principais resultados, observou-se que essa técnica proporciona melhoria na resistência e durabilidade do produto, além de contribuir para a sua estabilização dimensional.

Palavras-chave: Construções de terra, Teor de Cimento, Teor de argila.

ABSTRACT

Nowadays, humanity goes through several social and environmental problems related to the ecological imbalance. In this sense, there is a tendency to appreciate the ways of sustainable development, including the civil construction industry, which is responsible for most of the impacts generated by anthropic activities. Therefore, land appears as an alternative, being quite versatile and enabling the execution of projects at a reduced cost and with high energy efficiency, in addition to offering several technological advantages related to the internal comfort of environments. Thus, this work aims to study the soil stabilization technique that consists of adding Portland cement to the mixture, which allows an improvement in the performance of the final product in several aspects through the physical and chemical changes that occur with this interaction. For that, a bibliographic review was carried out with the exposition of several results, especially with regard to the variation in cement and clay contents, through which analyzes and discussions were made, verifying compatibility, possible inconsistencies and gaps in the studies presented. With this, it was verified that this stabilization technique constitutes an important mechanism to overcome the difficulties inherent to earth constructions, favoring the execution of more durable, sustainable and less expensive projects. As main results, it was observed that this technique improves the strength and durability of the product, in addition to contributing to the dimensional stabilization.

Keywords: Earth construction, Cement content, Clay content.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Casa de terra com mais de 150 anos no Sudeste da França	16
Figura 2: Estrutura molecular das folhas octaédricas e tetraédricas.....	19
Figura 3: Estrutura dos minerais de argila, respectivamente, caulinita, illita e montmorilonita	20
Figura 4: Casa localizada em São Francisco Xavier - SP	21
Figura 5: Processo de construção de parede monolítica de terra.....	22
Figura 6: Casa com estrutura de adobe na Argentina.....	23
Figura 7: Comparação da emissão de CO ₂ para a produção de blocos.....	24
Figura 8: Casa de terra com estrutura visivelmente danificada em Aveiro - Portugal.....	26
Figura 9: Ocorrência de cupins em casa colonial de terra.....	26
Figura 10: Influência do teor de argila na resistência mecânica de blocos de terra compactados estabilizados.....	32
Figura 11: Resistência à compressão de argamassa de terra não estabilizada em função da quantidade de água	33
Figura 12: Deformação (%) em função da tensão de compressão (MPa) em blocos de terra compactados	33
Figura 13: Resistência à compressão de BTC estabilizado com cimento por diversos autores	34
Figura 14: Influência dos teores de cimento e argila na retração por secagem de blocos de terra compactados	35
Figura 15: Perda de massa após a secagem	36
Figura 16: Resistência à flexão da alvenaria em função da umidade dos blocos na execução.....	38
Figura 17: Resistência à flexão da alvenaria em função do teor de argila da argamassa.....	40
Figura 18: Relação entre rugosidade (R) e penetração da água (Di) no reboco.....	41
Figura 19: Relação entre densidade e resistência à compressão em blocos de terra.....	42
Figura 20: Tentativa mal sucedida de reparo em revestimento de parede	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Influência dos estabilizantes sobre argamassas de terra	28
Tabela 2: Resultados de resistência à compressão de blocos de terra compactados	33
Tabela 3: Resistência à flexão de alvenaria para diferentes blocos e traços de argamassa	39
Tabela 4: Densidade, rugosidade e penetração em função da composição do reboco	41

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Al – Alumina

BTC – Bloco de terra compactado

Ca – Cálcio

Si – Sílica

TO – Tetraédrica-octaédrica

TOT – Tetraédrica-octaédrica-tetraédrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 METODOLOGIA.....	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
4.1 CONSTRUÇÕES DE TERRA.....	14
4.1.1 Contexto histórico	15
4.1.2 Composição mineralógica da terra	18
4.1.3 A terra como material de construção	20
4.1.4 Características das construções de terra	23
4.1.5 Estabilização da terra.....	27
4.2 CIMENTO PORTLAND.....	29
4.2.1 Fabricação do cimento.....	29
4.3 ESTABILIZAÇÃO DA TERRA COM CIMENTO	30
4.3.1 Estabilização de blocos de terra com cimento.....	31
4.3.2 Estabilização argamassa de terra para juntas de alvenaria com cimento	37
4.3.3 Estabilização argamassa de terra para reboco com cimento.....	40
4.3.4 Ressalvas e cuidados na estabilização da terra com cimento	42
4.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	44
5 CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

No atual contexto de desenvolvimento econômico e social, com consequente exploração dos recursos naturais do planeta, fica evidente a preocupação da comunidade científica com relação às consequências dessas intervenções antrópicas para o meio ambiente. Com isso, nas últimas décadas, a busca por meios saudáveis e sustentáveis de crescimento tem ganhado destaque no interesse público. Diante dessa necessidade de adaptação, o desenvolvimento sustentável é cada vez mais valorizado pela sociedade e pelas organizações, de modo que, a partir dos benefícios, inclusive econômicos, que as frequentes inovações podem oferecer, as empresas conseguem se tornar mais competitivas e, paralelamente, mais responsáveis ambientalmente (YAMAL, TEIXEIRA e NAAS, 2011).

Tendo em vista esse cenário, é de se ressaltar a participação da indústria da construção civil na economia mundial. Conforme Berge (2009), há estimativas que apontam esse setor como responsável por cerca de 30-40% das emissões de gases do efeito estufa pelo homem. Além disso, salienta-se o elevado consumo de materiais, que, dentro da composição de custo das empresas, corresponde a 22,9% do total dos gastos (IBGE, 2020), sendo esse um fator determinante nos impactos ambientais provocados por esse tipo de atividade.

Diante disso, evidencia-se a necessidade de utilização de materiais de construção eficientes e que, ao mesmo tempo, apresentem um ciclo de vida sustentável e economicamente viável. Assim, no sentido de adotar materiais de construção mais adequados ecologicamente, Torgal e Jalali (2007) estabelecem, como critério de seleção, a análise global dos impactos causados por cada alternativa ao longo de toda a vida útil, levando em conta fatores como o consumo energético, a durabilidade e o potencial de reciclagem.

Nessa perspectiva, a terra surge como uma boa alternativa por ser encontrada em abundância na natureza e de forma acessível, sendo a sua utilização pouco prejudicial ao ambiente, tendo em vista que, geralmente, a sua exploração pode ser feita nas proximidades dos empreendimentos, minimizando a necessidade de transporte, além de que o excedente pode ser deposto no local da extração sem que haja contaminação ambiental, podendo, ainda, ser reaproveitado com facilidade (TORGAL e JALALI, 2011). Do ponto de vista energético, a terra também leva vantagem sobre diversos materiais mais tradicionais, como os cerâmicos (FRANÇA *et al*, 2019).

Ainda, é de se destacar o desempenho das construções de terra, tendo em vista que os rebocos à base de terra atuam como reguladores naturais da umidade do ar no interior das edificações (LIMA, FARIA e SILVA, 2016), além de reduzir a concentração de ozônio em

ambientes internos (DARLING *et al*, 2012), sendo esse um gás que está relacionado à redução do desempenho pulmonar, sobretudo em alguns indivíduos que apresentam maior sensibilidade, como os asmáticos (MUDWAY e KELLY, 2000).

Do ponto de vista do isolamento térmico e acústico, o desempenho das construções de terra é elevado (RANDAZZO *et al*, 2016). Vale ressaltar que o comportamento das edificações nesse sentido é de fundamental importância, tanto para o conforto dos ocupantes quanto do ponto de vista da eficiência energética diante das soluções atuais para a atenuação da temperatura nos ambientes internos, como o uso de ventiladores e de ares-condicionados.

Nesse sentido, argamassas de terra também apresentam um bom desempenho quanto à resistência ao fogo e, portanto, trata-se de um material que, quando utilizado da maneira correta, apresenta grande eficiência em diversos aspectos, contribuindo para a segurança e o conforto interno das edificações (SANTOS, FARIA e SILVA, 2014).

Apesar de todas essas vantagens, há limitações intrínsecas à utilização da terra como material de construção, sobretudo quando a mesma é utilizada sem qualquer tipo de adição. Entre elas, Ouedraogo *et al* (2020) destacam a vulnerabilidade diante da presença de água, podendo ocasionar erosões e reduzir a resistência de forma drástica. Não obstante, é possível fazer intervenções nas argamassas de terra no sentido de melhorar as características do produto final. Trata-se do processo de estabilização, que consiste na realização de modificações nas propriedades do solo no sentido de melhorar o seu comportamento diante da aplicação visada, alterando a sua estrutura (SANTIAGO, 2001).

Assim, é necessário o constante aprimoramento dessas técnicas, facilitando a execução de estruturas sustentáveis com a terra como principal material de composição, tendo em vista o atual movimento de resgate desse tipo de solução e diante dos impasses, dificuldades e preconceitos relacionados a esse processo. No entanto, vale destacar que os conhecimentos a esse respeito ainda são limitados (GOMES, FARIA e GONÇALVES, 2018).

Nesse contexto, embora seja um setor imprescindível no âmbito do desenvolvimento econômico e social, a construção civil precisa se adequar aos meios sustentáveis de crescimento, que são cada vez mais valorizados. Assim, é importante que haja um processo de adaptação para a adoção de materiais com maior consonância ambiental como a terra e, para tanto, são necessários estudos no sentido do aprimoramento e do resgate dessas técnicas, viabilizando a sua utilização de forma eficiente e segura e, com isso, reduzindo os impactos ambientais do setor e possibilitando a redução nos custos de execução, contribuindo para a democratização do acesso à moradia.

Portanto, tendo em vista as limitações que a terra possui isoladamente, como a resistência mecânica, a retração por secagem e a sensibilidade à água, faz-se necessário que sejam analisadas as formas de estabilização, possibilitando o melhoramento dessas características e a sua eficiência como um todo. Para tanto, uma dessas intervenções se dá através da adição de cimento Portland e, diante disso, este trabalho se justifica por fazer uma análise da influência da variação nos teores de cimento e de argila nas propriedades das argamassas de terra no estado endurecido quando essa metodologia é aplicada.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral o avanço nos estudos das argamassas de terra estabilizadas com cimento, contribuindo para o desenvolvimento e padronização dessa metodologia, fornecendo parâmetros para uma maior incorporação da mesma dentro da indústria da construção civil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a abordagem do objetivo geral descrito, este trabalho adotou os seguintes objetivos específicos:

- Descrever um breve histórico sobre as construções de terra;
- Apontar as principais características das construções de terra, destacando os seus benefícios e suas limitações;
- Estudar a influência da variação nos teores de cimento e de argila na composição dos traços de argamassa feitos com terra, evidenciando as implicações nas suas características após o endurecimento;
- Avaliar a influência dessa variação no desempenho do sistema construtivo como um todo, a depender do tipo de aplicação, analisando a interação entre os diferentes componentes.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado através de um processo de pesquisa de caráter bibliográfico, por meio do qual foi feito um levantamento de trabalhos científicos sobre o tema abordado, sendo essas publicações nas suas diversas formas, visando a uma fundamentação teórica para a realização de análises e discussões acerca de resultados obtidos

previamente, compilando e interligando as informações mais relevantes que foram encontradas.

Esse processo se deu, inicialmente, através da definição da temática a ser desenvolvida, a partir da identificação de um problema contemporâneo relacionado à indústria da construção civil, que consiste na grande proporção dos impactos ambientais das suas atividades e tendo, em contrapartida, uma dificuldade na adaptação a meios mais sustentáveis de operação, bem como a dificuldade quanto ao acesso a uma condição tão básica de sobrevivência, que consiste na moradia, por parte de uma grande parcela marginalizada da sociedade.

Para tanto, a partir de diferentes bases de dados, como ScienceDirect e ResearchGate, foram aplicados diversos filtros para encontrar as publicações mais interligadas com o tema abordado, de acordo com a linha de raciocínio seguida, de modo a complementar as conclusões de cada publicação com os resultados relacionados obtidos por outros autores. Esse processo de pesquisa se deu ao longo do desenvolvimento de todo o trabalho, entre julho e novembro de 2022.

Foram diversas as palavras-chave aplicadas como filtro nas bases de dados, como “construções de terra”, “argamassas de terra”, “estabilização da terra”, “estabilização da terra com cimento”, “teor de cimento em argamassas de terra”, “teor de argila”, “resistência de argamassas de terra”, “durabilidade de argamassas de terra”, “blocos de terra estabilizados com cimento”, “rebocos de terra”, entre outros. Vale destacar que a aplicação dos filtros na língua inglesa facilita a pesquisa por publicações nas referidas bases de dados.

Assim, foi feita uma sintetização dos materiais encontrados, selecionando as publicações úteis ao trabalho a partir da realização de uma breve leitura e análise sobre a relevância em relação ao tema, sobretudo nos conteúdos apresentados nos resumos e conclusões, descartando os que não se adequaram aos critérios de seleção e aprofundando os estudos nos demais.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CONSTRUÇÕES DE TERRA

Inicialmente, é preciso definir o que caracteriza uma construção de terra. São empreendimentos que utilizam esse material de forma predominante na sua constituição, seja como elemento estrutural, de vedação, de revestimento ou de acabamento, por exemplo. Esse conceito se distingue de outros tipos de soluções construtivas que podem ser confundidos entre si, que são a construção em terra, no sentido de terra escavada ou cortada no formato

desejado, e construção com terra, em que ela é utilizada para enchimento, no caso do preenchimento de elementos ocos ou para o recobrimento de telhados, melhorando os isolamentos térmico e acústico desses elementos (SANTIAGO, 2001). Todos esses tipos de solução são benéficos do ponto de vista ambiental, visto que apresentam uma boa eficiência energética.

Porém, é necessário atentar para alguns parâmetros determinantes no comportamento final dos produtos formados, tendo em vista que as argamassas de terra, que possuem diversas aplicações possíveis, precisam apresentar resistência suficiente para absorver os esforços, bem como apresentar desempenho adequado diante das variações de temperatura e umidade, evitando a ocorrência de diversos tipos de patologia. Essas propriedades são bastante influenciadas por fatores como a composição dos materiais constituintes, a metodologia de produção e de cura, além das condições ambientes.

4.1.1 Contexto histórico

A utilização da terra para construção constitui um importante mecanismo de sobrevivência e desenvolvimento do homem. Conforme Çamurcuoğlu (2015), esse material foi um dos primeiros a ser utilizado pelo ser humano para essa finalidade, havendo registros do seu uso desde a pré-história, evidenciando a sua importância na trajetória do homem até os tempos mais atuais e constituindo um importante patrimônio histórico e cultural. Nesse sentido, de acordo com Fernandes (2020), a sua aplicação pré-histórica ocorria no estado natural para a execução de moradias. Além dessa finalidade, a necessidade de estocagem da colheita a partir do surgimento da agricultura também motivou a disseminação dessa técnica há cerca de 10 mil anos.

Atualmente, o bloco de terra mais antigo de que se tem conhecimento foi feito por volta de 7500 anos a.c. no Rio Tigre. No Egito, há vestígios de blocos com cerca de 5000 anos de idade, enquanto que no Paquistão, já foram descobertos com mais de 3000 anos. Ainda, há exemplos de cidades que preservaram a herança histórica e permanecem com a predominância desse material, como Jericó e Timbuctu, além da existência de obras grandiosas, como templos, igrejas, palácios e até mesmo a Muralha da China (BERGE, 2009). Vale destacar que essa última grande obra foi feita há 2000 aproximadamente, permanecendo até os dias atuais (BUI *et al*, 2009). Portanto, apesar dos preconceitos associados à limitação da durabilidade desse material, diversos são os exemplos pelo mundo que provam o contrário, como é o caso da casa da Figura 1, com mais de 150 anos de idade.

Figura 1: Casa de terra com mais de 150 anos no Sudeste da França



Fonte: Bui *et al* (2009)

Segundo Torgal e Jalali (2012), esse material é utilizado em larga escala, principalmente em países menos desenvolvidos, onde grande parte da população não dispõe de recursos suficientes para recorrer a alternativas mais tradicionais e modernos que surgiram no decorrer do tempo e que necessitam de um processamento mais complexo para serem empregados na construção civil. Com isso, o fato de ser uma matéria-prima acessível, abundante e que possibilita a execução de obras de forma simples e menos onerosas contribui para a popularização desse material dentro dessas circunstâncias.

No entanto, apesar de serem associadas à simplicidade pelo senso comum, Minke (2006) afirma que as construções de terra não possuem aparência particular, sendo possível, diante da versatilidade do material, a execução de diversos tipos de acabamento, desde os mais simples aos mais sofisticados e modernos e, portanto, a execução de empreendimentos de alto padrão também é viável com esse material, de modo que a sua utilização também acontece mesmo em países desenvolvidos.

Nos períodos pós-guerra, a terra passou a exercer importante papel na reabilitação de diversos países afetados pelos conflitos. Na Europa, salienta-se o caso da Alemanha, que passou a incorporar esse material como forma de reerguer o país após a Segunda Guerra Mundial. Dessa forma, houve grande contribuição no sentido da resolução da falta de habitação (PONTE, 2012).

De modo similar, a França também passou por esse processo de reconstrução fazendo uso desse material diante da escassez de alternativas e, com isso, essas regiões passaram a desenvolver padrões nessas construções. Vale destacar que diversas regiões da Europa não

possuem fácil acesso a jazidas de areia e brita devido às limitações locais e aos grandes impactos ambientais que a extração nessas regiões poderia causar (BERGE, 2009). Portanto, a utilização de materiais mais acessíveis como a terra é fundamental para permitir o acesso à moradia por parte da população, sobretudo os mais necessitados.

Nesse contexto, Corrêa (2009) resalta o aspecto ético e social envolvido na sustentabilidade das construções, destacando a dificuldade de acesso a moradias por parte da população mesmo em grandes metrópoles, de modo que o intenso processo de urbanização vivenciado nas últimas décadas potencializou a quantidade de ocupações irregulares, muitas vezes em áreas de risco e de preservação, afetando o ambiente e a segurança desses locais. Com isso, diversos moradores recorrem à terra como solução construtiva para sanar a necessidade básica de habitação.

No Brasil, Zanoni *et al* (2010) afirmam que a utilização desse material foi bastante disseminada, inicialmente, pelos negros e povos nativos no período colonial, principalmente pela execução de construções em taipa, tendo em vista que esses grupos já possuíam o conhecimento dessa técnica e costumavam fazer uso da mesma, sobretudo pela acessibilidade do material e facilidade de execução. Assim, com a mistura de culturas que houve a partir desse movimento de imigração, os costumes relacionados às técnicas de construção também passaram a ser compartilhados. Mais tarde, esses também foram os motivos pelos quais os tropeiros faziam uso dessa tipologia arquitetônica, tendo em vista que, chegando ao local de destino, precisavam de um abrigo rápido e fácil de ser executado.

Nesse sentido, a terra constituiu um importante insumo para as construções por um longo período, sendo amplamente utilizada em diversas aplicações. No entanto, em determinado momento, com o surgimento de alternativas mais modernas, a sua utilização foi sendo substituída até ser praticamente cessada por algumas décadas, de modo que o conhecimento empírico relacionado à sua aplicação foi se perdendo (SANTOS, FARIA e SILVA, 2014).

Esse processo de abandono se deu muito em função da associação que esse material passou a ter com a limitação de resistência, sobretudo na presença de água, além de mudanças nas ambições arquitetônicas ao longo do tempo. Essa transição passou a ocorrer de forma acentuada com a Revolução Industrial, com a incorporação do aço nas construções, bem como a maior utilização do cimento Portland, que permitiram a verticalização das estruturas (JAQUIN e AUGARDE, 2012). No entanto, é válido destacar que o preconceito em relação a esse material existe desde o período colonial, tendo em vista que os construtores da época não

queriam ser associados a essas técnicas manufaturais provenientes da mestiçagem (SILVA, 2000).

Dessa forma, conforme as construções foram evoluindo e aumentando de porte, as alternativas mais modernas e industrializadas foram ganhando espaço na indústria. Apesar disso, observa-se a existência de construções de terra muito antigas que permanecem íntegras, evidenciando a possibilidade de execução de empreendimentos bastante duráveis tendo a terra como principal componente (PONTE, 2012).

No momento atual, diante da visibilidade e relevância que os meios de produção sustentáveis estão ganhando e tendo em vista o elevado gasto energético e a grande parcela de gases do efeito estufa que são emitidos durante a produção de materiais tradicionais como o cimento Portland, os produtos formados a partir da terra crua estão passando por um processo de resgate, de modo que diversas pesquisas estão sendo realizadas no sentido de superar as dificuldades atreladas a esse material, melhorando o desempenho mecânico e a durabilidade (THOMPSON, AUGARDE e OSORIO, 2022).

Nesse sentido, Braga *et al* (2005) afirmam que os meios de desenvolvimento sustentável devem atender às demandas de produção sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas necessidades. Logo, o racionamento de recursos e o uso de materiais ecológicos agregam valor à imagem da empresa, podendo se configurar como uma vantagem competitiva aos olhos dos consumidores e reduzindo os custos de operação e, com isso, movimentos nesse sentido vêm se evidenciando nos últimos anos.

4.1.2 Composição mineralógica da terra

Segundo Bergaya e Legaly (2013), a terra que é utilizada na construção é a argilosa, caracterizada pela presença de minerais argilosos, que são partículas de dimensões diminutas concebidas a partir de reações químicas, além de outros minerais formados por meio da decomposição de rochas. Entre esses constituintes, a argila é o que mais influencia as propriedades do material, tendo em vista que proporciona a plasticidade e a capacidade de aglutinação do produto após a secagem.

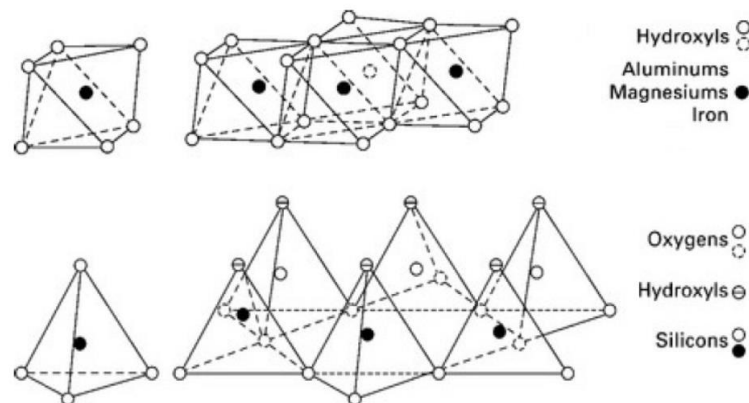
Nesse sentido, a formação dos minerais argilosos se dá a partir da meteorização química das formações rochosas, em que ocorrem reações de oxidação, hidratação, carbonatação e lixiviação devido à presença de água e ácidos no ambiente. Com isso, acontece a sedimentação do produto, formando soluções de grãos provenientes da degradação dessas rochas. Por fim, as condições de temperatura e pressão durante a cristalização e a constituição

da rocha de origem definem a formação molecular dos novos minerais, que são estruturas compostas por silicatos de alumínio, magnésio e ferro hidratados, dispostos em folhas e, assim, apresentando uma área superficial específica elevada (REDDI, JAIN e KYUN, 2012).

A NBR 6502 (ABNT, 1995) denomina esse processo de decomposição como argilização, que dá origem aos minerais argilosos por meio da ação de soluções hidrotermais. Além disso, a norma afirma que eles são formados a partir de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares.

As folhas que constituem as argilas podem ser formadas por unidades tetraédricas, em que o átomo de silício é envolvido por quatro de oxigênio, ou octaédricas, com um átomo de alumínio, ferro ou magnésio sendo envolvido por outros de oxigênio ou hidroxilas. Assim, as folhas que se formam a partir desse processo se sobrepõem em camadas (BRIGATTI, GALÁN e THENG, 2013). Essas formas de organização molecular são evidenciadas na Figura 2.

Figura 2: Estrutura molecular das folhas octaédricas e tetraédricas



Fonte: Reddi *et al* (2012)

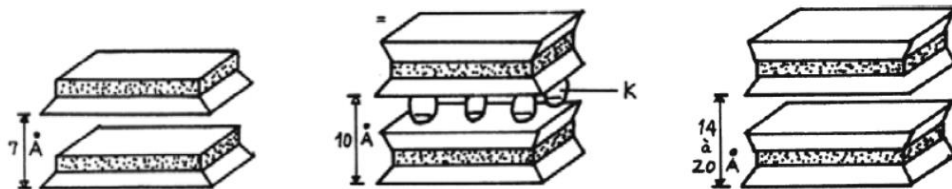
Nessa estrutura característica das argilas, as camadas sobrepostas de sílica e de alumina são interligadas por meio de interações de Van der Waals, que são forças de atração entre moléculas, átomos e íons, e por ligações de hidrogênio. Com isso, essas estruturas podem apresentar um inchamento considerável na presença de água, além de possuir propriedades ligantes (GOMES, GONÇALVES e FARIA, 2016).

Ainda, a organização molecular das folhas de sílica e alumina é determinante no comportamento das argilas. Segundo Schoonheydt, Johnston e Bergaya (2018), as camadas podem dar origem a uma estrutura de carga neutra, no caso da ligação entre as camadas tetraédrica-octaédrica (TO), formando interações do tipo TO-TO por ponte de hidrogênio, que constitui uma ligação mais intensa em relação à de Van der Waals. Exemplo dessa ocorrência

é a caulinita, que, de acordo com Martínez (2015), apresenta pouca variação dimensional devido à dificuldade de incorporação da água entre as folhas. Assim, há uma menor retração por secagem e maior resistência à penetração da água, apesar desse mineral ser um ligante fraco em comparação com outras argilas.

Além desse tipo, Martínez (2015) também afirma que, quando as camadas são formadas por folhas tetraédrica-octaédrica-tetraédrica (TOT), formando ligações TOT-TOT, a carga resultante é negativa, podendo ser compensada pela absorção de cátions presentes na água, como o sódio e o potássio. Com isso, as interações entre as camadas são mais fracas e essas argilas acabam sendo bastante reativas. Esses fatores acabam proporcionando uma maior capacidade ligante, bem como de regulação da umidade do ar, como é o caso das montmorilonitas e das ilitas. Essa última, em comparação com outros tipos existentes, apresenta propriedades balanceadas com relação à retração, resistência mecânica, abrasão e absorção de água, sendo ideal para diversas aplicações na construção civil (LIMA, FARIA e SILVA, 2020). Além disso, conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995), esse grupo de minerais possui o comportamento de admitir moléculas de água intralamelares, proporcionando uma alta expansibilidade. A Figura 3 ilustra a estrutura molecular dos tipos de argila citados.

Figura 3: Estrutura dos minerais de argila, respectivamente, caulinita, ilita e montmorilonita



Fonte: Minke, 2000

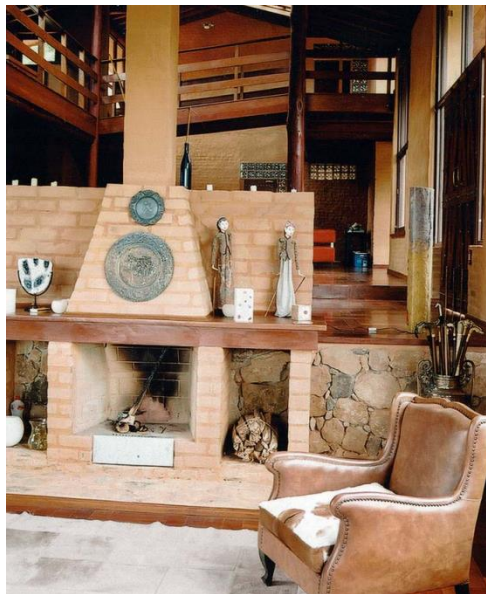
Ainda, vale destacar que, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), as argilas são caracterizadas pelo tamanho das partículas, que são menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade. Sobre essa última propriedade, a referida norma a define como sendo a capacidade de sofrer grandes deformações permanentes sem que haja a ocorrência de rupturas, fissuras ou variações volumétricas consideráveis. Assim, essas características proporcionam uma grande possibilidade de aplicação na construção civil.

4.1.3 A terra como material de construção

A terra possui diversas aplicações possíveis na construção civil. Quando tratada corretamente, pode ser usada na produção de argamassas, revestimentos, pisos e materiais cerâmicos (BERGE, 2009). Além disso, Santiago (2001) cita outras formas de utilização

desse material, como a terra escavada, de cobertura, de enchimento, cortada, compactada (blocos compactados, taipa de pilão, piso em terra batida, etc), modelada, empilhada, derramada, blocos de adobe, entre outras. Essa versatilidade possibilita a execução de empreendimentos de diversos tipos, dos mais simples aos mais modernos e elegantes. A Figura 4 mostra uma casa erguida com materiais locais, inclusive a terra.

Figura 4: Casa localizada em São Francisco Xavier - SP



Fonte: Minke (2006)

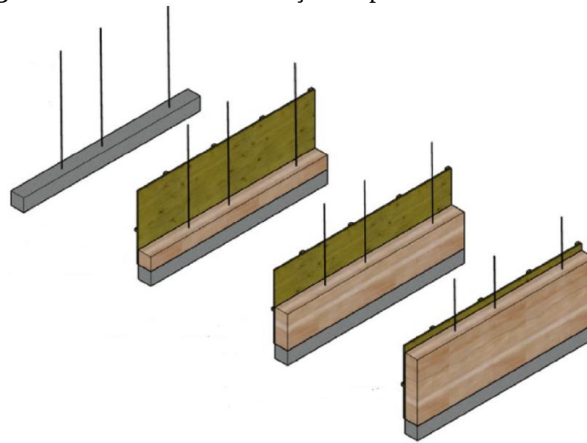
Os blocos de terra podem ser compactados (BTC) ou feitos artesanalmente, que são os de adobe. No primeiro caso, a moldagem é feita através da prensagem da terra que, em geral, é feita junto a um material aglomerante, de modo a melhorar as características do produto final. Dessa forma, os blocos são estabilizados quimicamente, através da atuação do aglomerante (geralmente, utiliza-se o cimento Portland), e fisicamente, por meio do adensamento que ocorre na prensagem e, também, pela presença da parcela de finos na composição, que atua no preenchimento de vazios (FRANÇA *et al*, 2019).

A esse respeito, a compactação pode ocorrer de forma manual ou mecânica e visa à redução no volume de vazios, aumentando a densidade e, com isso, melhorando a resistência mecânica e à água. Além do BTC, outras soluções utilizam esse princípio, como o piso de terra batida, em que o material é apiloado no chão por alguns dias até que pare de fissurar, a taipa de pilão, em que camadas de terra são apiloadas em fôrmas, e as paredes inteiriças em solo-cimento, que ocorrem a partir de um processo semelhante, porém com a adição de determinado teor de cimento

(SANTIAGO, 2001). Nessa perspectiva, Silva *et al* (2014) destacam que a terra precisa estar minimamente úmida para a compactação nas fôrmas, que são retiradas posteriormente.

No Brasil, a NBR 13553 (1996) regulamenta os materiais utilizados para essa finalidade, definindo essas paredes como sendo uma sequência de painéis monolíticos de solo-cimento que são articulados verticalmente entre si ou entre componentes verticais de materiais semelhantes. Essa técnica, ilustrada na Figura 5, vem passando por um processo de resgate, assim como outras de caráter mais sustentável, tendo em vista os recentes estudos desenvolvidos no sentido da padronização do método (THOMPSON, AUGARDE e OSORIO, 2022).

Figura 5: Processo de construção de parede monolítica de terra



Fonte: Thompson, Augarde e Osorio (2015)

Os blocos de adobe, por sua vez, são feitos com solo natural e produzidos manualmente e de forma artesanal, podendo conter fibras, sem o processo de prensagem que ocorre nos blocos compactados. É uma técnica bastante difundida em países em desenvolvimento, como China, Índia, Iran e Turquia (WU *et al*, 2013). A Figura 6 mostra uma casa com paredes de adobe localizada na região norte da Argentina.

Figura 6: Casa com estrutura de adobe na Argentina



Fonte: Martínez (2015)

Além dessas, existem diversas outras formas de utilização desse material na construção, como a terra modelada, na qual ela é trabalhada manualmente no estado plástico, a terra empilhada, em que bolotas são projetadas energicamente sobre as outras com o uso de desgordurantes que melhoram a coesão e a resistência à tração, a terra derramada, que é lançada sobre um molde em consistência líquida e com um traço bastante arenoso, entre outras aplicações (SANTIAGO, 2001). Diante disso, percebe-se a grande versatilidade desse material, que pode ser tratado de diversas maneiras para que se adeque às necessidades diante das circunstâncias.

4.1.4 Características das construções de terra

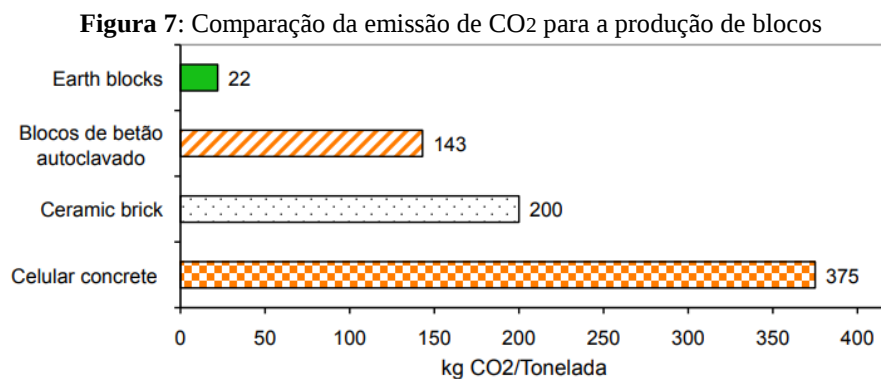
Como mencionado, as argamassas de terra constituem uma boa alternativa para diversas aplicações na construção civil, sobretudo quando há compatibilização com esse material. Nesse sentido, elas se diferenciam em relação às tradicionais à base de cimento e areia devido à parcela de argila presente, que constitui um agregado bastante fino e tendo propriedades ligantes.

De modo geral, entre as principais vantagens das construções de terra, destacam-se o baixo consumo energético, o bom isolamento térmico e acústico, a inércia e resistência ao fogo, a simplicidade dos métodos de execução, a redução de custos, a acessibilidade da matéria-prima, com pouca ou nenhuma degradação do ambiente no ato da exploração, além de ser facilmente reciclável (ALMEIDA, 2015).

Do ponto de vista energético, ao comparar o gasto de energia para a fabricação de blocos de terra em relação a outros tipos já consolidados no mercado, como os cerâmicos,

percebe-se que esses necessitam de um gasto de energia consideravelmente maior nesse processo. Isso se dá, principalmente, devido às altas temperaturas que precisam atingir, enquanto os blocos de terra dispensam a queima (FRANÇA *et al*, 2019).

Nesse sentido, tendo em vista a eficiência energética e o aspecto ecológico favorável a esse tipo de solução, a Figura 7 apresenta uma comparação da emissão estimada de CO₂ para a produção de blocos constituídos de diferentes materiais, evidenciando o bom desempenho daqueles de terra crua, ou seja, que não precisam passar pelo processo de queima.



Fonte: Torgal e Jalali, 2011

Quando utilizada em revestimentos, além das vantagens em termos da eficiência energética e facilidade de execução, essa solução é importante para manter as características higroscópicas das paredes, que contribuem para o controle da umidade do ar (MAUFFRÉ *et al*, 2021). Essa intensa capacidade de regulação nos ambientes internos pela ação dos revestimentos de terra se dá pelos processos de adsorção e dessorção que acontecem nesse tipo de material, que ocorrem naturalmente (CARREIRA, CARDOSO e FARIA, 2021). Ainda, ressalta-se que o desempenho das argamassas de terra nesse sentido se mostra superior a alternativas mais tradicionais, como aquelas à base de cimento e de gesso (SANTOS *et al*, 2020).

Além disso, os revestimentos de terra são reconhecidos por reduzir a concentração de ozônio nos ambientes internos. Trata-se de uma característica bastante interessante, tendo em vista que existem fortes evidências de efeitos em curto prazo da exposição ao ozônio associados a maiores taxas de mortalidade por efeitos cardiovasculares (BELL *et al*, 2005). A presença desse poluente pode ser controlada através da instalação de filtros de carbono ativado, no entanto, o gasto energético e os custos associados a essa solução têm prejudicado a aceitação dessa técnica (LAMBLE, CORSI e MORRISON, 2011). Sendo assim, os revestimentos de terra se tornam uma alternativa eficiente e acessível para a redução da sua

concentração, contribuindo para a purificação do ar e, conseqüentemente, melhorando a qualidade de vida dos indivíduos.

Com relação ao isolamento térmico e acústico, pode-se afirmar que as argamassas de terra possuem desempenho comparável a alternativas tradicionais que se destacam nesse aspecto, como aquelas à base de cal e de gesso, além dos blocos cerâmicos. Não obstante, as propriedades isolantes são influenciadas pelo volume e pela distribuição dos poros, sobretudo os macroporos, que são aqueles maiores que 0,05 μm , sendo um fator de fundamental importância para o conforto dos ocupantes (RANDAZZO *et al*, 2016).

Essa característica também pode ser realçada, por exemplo, pela adição de palha na confecção de tijolos (PRÉNERON, 2018) ou, ainda, de resíduos da indústria de papel nos blocos de adobe, que também promove melhorias no desempenho mecânico desses elementos na ordem de 190% (MUÑOZ *et al*, 2020). Ademais, há estudos que mostram um aumento de 30-48% no isolamento térmico de blocos de adobe através da adição de fibras (6% em massa), a depender do tipo que foi adicionado (MELLAIKHAFI *et al*, 2021).

Ademais, apesar de serem frequentemente associadas a uma baixa durabilidade pelo senso comum, as construções de terra apresentam uma vida útil considerável quando as técnicas são aplicadas seguindo os procedimentos recomendados. Nessa perspectiva, ao realizarem análises sobre as erosões provocadas em casas de terra crua com 20 anos de idade, Bui *et al* (2009) estimaram uma durabilidade de 60 anos aproximadamente, sendo esse número potencialmente maior nas análises feitas em casas de terra estabilizada.

Apesar de tantas vantagens, é de se ressaltar as restrições inerentes às construções de terra pura. Nesse sentido, Almeida (2015) aponta, como principais desvantagens, a baixa resistência mecânica quando comparado a outros materiais, além da fragilidade diante da exposição à água, seja por infiltrações ou por ascensão capilar. Nesse último caso, destaca-se a necessidade de realização de uma impermeabilização criteriosa da base das alvenarias térreas, tendo em vista a facilidade de ascensão da água nesse tipo de material (MARTÍNEZ, 2015).

Esses fatores são evidenciados a partir da limitação existente tanto para o número de pavimentos quanto para a abertura de vãos em construções de adobe, bem como através do aparecimento de patologias ao longo da vida útil dessas edificações, que, em geral, estão relacionadas à umidade e às cargas solicitantes, como é o caso evidenciado na Figura 8. Ademais, apesar de não ser uma realidade no Brasil, há de se ressaltar a vulnerabilidade do material diante de abalos sísmicos, tendo em vista que as paredes de terra são bastante sensíveis a esses eventos, sobretudo na existência de muitos vãos no empreendimento (LIU e

CREWE, 2020). No entanto, esse problema engloba os materiais frágeis de modo geral, podendo ser mitigado pela adição de fibras na terra.

Figura 8: Casa de terra com estrutura visivelmente danificada em Aveiro - Portugal



Fonte: Almeida (2015)

Outro ponto de atenção relacionado às construções de terra quando a mesma é utilizada com alguma estrutura de madeira é o ataque de insetos que se aproveitam desse material, como os cupins. A Figura 9 mostra a presença desses seres no interior das paredes de uma casa colonial de terra na cidade de Miranda – MS. O aparecimento desse problema é favorecido pelo excesso de umidade, além da realização de reparos com materiais de características distintas daquele de origem, dificultando a evaporação da água e prejudicando a aderência, sobretudo na interface dos materiais, facilitando o destacamento e a presença dos agentes patogênicos.

Figura 9: Ocorrência de cupins em casa colonial de terra



Fonte: Zanoni (2009)

Além dos cupins, Silva (2000) faz um alerta quanto à relação íntima entre as construções de taipa e a ocorrência de “barbeiros”, que são vetores da doença de Chagas. Isso ocorre devido ao fato de que essas moradias, quando construídas de forma improvisada por leigos, não apresentam acabamento de boa qualidade. Assim, tendo em vista que esses insetos

podem viver dentro das paredes em frestas e buracos, essas casas se tornam atrativas nesse sentido, favorecendo a transmissão da doença.

Portanto, ressalta-se a importância da difusão de metodologias adequadas nesse tipo de solução, sobretudo em relação ao acabamento dos revestimentos, à devida proteção contra a água, com a impermeabilização das fundações e alongamento dos beirais, evitando erosões o apodrecimento da madeira por umidade ascendente, bem como a execução de reparos com materiais de características semelhantes aos de origem.

4.1.5 Estabilização da terra

A NBR 6502 (ABNT, 1995) define a estabilização como um tratamento físico-químico ou mecânico exercido sobre o solo que tem como objetivo manter ou melhorar as suas características geotécnicas. Portanto, trata-se de um importante instrumento para a aplicação da terra na construção civil, potencializando o seu comportamento de acordo com as necessidades.

Barbalho (2020) afirma que, para contornar suas limitações e melhorar as características do produto final, a terra pode ser submetida a algum tipo de estabilização, que pode ser de forma mecânica, física, química ou mista. A adição de fibras ao traço, por exemplo, pode ser caracterizada como uma estabilização física, enquanto a adição de cimento é considerada como química devido ao seu princípio de funcionamento reativo e aglomerante, assim como a cal.

Além disso, Berge (2009) destaca outros materiais que podem ser usados para essa finalidade, como o betume, a palha e a argila expandida, seja para melhorar o desempenho mecânico ou o isolamento térmico e acústico do sistema. Ainda, o autor destaca a possibilidade de ter como resultado um material bastante resistente quando utilizado nas proporções adequadas, evidenciando o caso da Alemanha, onde há edifícios de terra de até seis andares.

Nessa perspectiva, diante das limitações existentes com relação ao desempenho das argamassas de terra, sobretudo no que diz respeito à resistência mecânica e à água, diversas alternativas de estabilizantes vêm sendo analisadas no sentido de superar essas dificuldades, minimizando esses problemas e, assim, melhorando o desempenho final do produto. Com isso, ao realizar uma revisão de estudos realizados até então relacionados à influência desses agentes sobre argamassas de terra, Carreira, Cardoso e Faria (2021) observaram diversas

mudanças nas características do material formado. Nesse sentido, a Tabela 1 apresenta o resumo do que foi constatado pelos autores.

Tabela 1: Influência dos estabilizantes sobre argamassas de terra

ESTABILIZANTE	DESIDADE E CONDUTIVIDADE	COMPORTAMENTO MECÂNICO	HIGROSCOPIA	RESISTÊNCIA À ÁGUA
Cimento	Ligeiro aumento	Ligeiro aumento	Decréscimo considerável	Aumento
Cais hidráulicas	Ligeiro aumento	Pouco significativo	Decréscimo considerável	Aumento
Cais aéreas	Ligeiro aumento	Decréscimo	Decréscimo	Aumento
Sulfatos de cálcio	Pouco significativo	Aumento	Ligeiro decréscimo	Ligeiro aumento
Óleos naturais	Pouco significativo	Pouco significativo	Decréscimo	Aumento
Fibras vegetais	Decréscimo	Ligeiro decréscimo	Pouco significativo	Pouco significativo

Fonte: Adaptado de Carreira, Cardoso e Faria (2021)

A partir desses resultados, observa-se que os diferentes tipos de estabilizantes analisados proporcionam mudanças distintas sobre as propriedades da argamassa. Não obstante, vale destacar que, em todos os casos, houve melhora em alguns aspectos, porém isso se deu com a deterioração de outros. Logo, faz-se necessária a análise da finalidade da aplicação da argamassa para que sejam feitas as alterações necessárias no traço, com a seleção do melhor tipo de estabilizante diante das circunstâncias.

Outra técnica que vem sendo estudada é a ativação alcalina, que pode ser aplicada na terra para melhorar as suas características. Trata-se de uma metodologia relativamente nova que tem o potencial de aumentar a resistência mecânica, ao fogo e a ataques ácidos, reduzir a retração e a condutividade térmica (SEVERO *et al*, 2013), além de possuir uma cura bastante acelerada, atingindo resistências consideráveis com apenas três dias (SINGH e MIDDENDORF, 2020).

A ativação alcalina é caracterizada pela reação de um material rico em sílica e alumina com um composto alcalino (VASSALO, 2013). No entanto, por ser relativamente recente, ainda existem diversas dificuldades que precisam ser melhoradas para viabilizar a aplicação dessa técnica em substituição ao cimento. Entre elas, Teixeira (2017) destaca o tempo de pega reduzido, apesar de já existirem estudos sobre possíveis formas de retardá-la, como a aditivação com tetraborato de sódio (PINTO, 2007). Ainda, vale destacar o caráter exotérmico das reações e o elevado PH da solução ativadora, que constituem grandes fatores de risco. Com isso, outras formas de estabilização acabam sendo mais populares, como a adição de cimento Portland.

4.2 CIMENTO PORTLAND

Segundo Botelho (2015), o cimento é um material inorgânico, de granulometria bastante reduzida e que, quando misturado com água, apresenta consistência pastosa. Com isso, passa a sofrer reações de hidratação, as quais são responsáveis pelo endurecimento e promover as suas propriedades mecânicas e térmicas com o tempo. Nessa perspectiva, Mehta e Monteiro (2008) destacam que esse produto é classificado como um aglomerante hidráulico devido ao mecanismo de endurecimento, que se dá a partir da hidratação dos componentes cimentícios na presença de água.

Ainda, é de se destacar a diferença entre o cimento natural e o cimento Portland. De forma similar, ambos são ligantes formados a partir do clínquer, que é formado por silicatos e aluminatos de cálcio obtidos pela queima de matérias-primas constituídas por carbonato de cálcio e sílica, além de outros óxidos. No entanto, o que os diferencia é que a obtenção do cimento Portland envolve a queima em temperaturas bastante elevadas em relação ao natural, além da adição de outros agentes, como gesso e pozolana (VARAS, BUERGO e FORT, 2005).

Apesar de ter ganhado popularidade apenas nos últimos séculos, a produção de cimento é bastante antiga, havendo relatos da sua utilização no Antigo Egito. Na ocasião, a sua composição básica era de gesso impuro e cal. No entanto, o produto empregado atualmente surgiu a partir da patente de um aglomerante de nódulos calcinados de calcário argilado, que ficou conhecido como Cimento Portland, em 1824 (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

4.2.1 Fabricação do cimento

Inicialmente, para a sua fabricação, é preciso que haja a extração do calcário das jazidas existentes. Após isso, ele passa por um processo de britagem antes de ser misturado com argila. Em seguida, essa mistura é levada a um moinho de bolas até atingir uma granulometria bastante reduzida para ser transportado e armazenado em silos. Ainda, o produto é balanceado nas proporções ideais por meio de peneiras (TAYLOR, 1998).

Na sequência, o pó passa por um processo de queima em um forno rotativo, que chega a atingir cerca de 1400° C de modo que, ao longo do aquecimento, acontecem diversas reações químicas que dão origem ao clínquer. Assim, após ser resfriado até a temperatura ambiente, esse composto é moído junto ao gesso, que age sobre o controle de pega do produto final. Com isso, obtém-se o tão tradicional cimento Portland (NEVILLE, 1997).

Diante do exposto, pode-se afirmar que, assim como os materiais cerâmicos, aqueles que possuem uma elevada concentração de cimento Portland na composição apresentam grande quantidade de energia incorporada. Essa característica se apresenta a partir do processo produtivo descrito, que também envolve altas temperaturas e tendo em vista que, até chegar às prateleiras das distribuidoras, esse produto gera impactos em diversas etapas, desde a extração da matéria prima, com degradação e alterações no ambiente natural de exploração, as operações de transporte, com queima de combustíveis fósseis e, sobretudo, o processo de fabricação, que envolve a emissão de material particulado, causador de impactos diretos sobre a saúde humana em áreas próximas, e a elevada emissão de gases de efeito estufa, principalmente o gás carbônico, devido ao processo de clínquerização (MAURY e BLUMENSCHNEIN, 2012).

Diante disso, Palomo *et al* (2014) afirmam que a elevada demanda por cimento Portland é um fator de contribuição relevante para o efeito estufa devido ao elevado gasto energético, pois está associada à liberação de uma quantidade considerável CO₂ na atmosfera para suprir essa necessidade, evidenciando os impactos ambientais gerados por essa indústria.

Com isso, a comunidade científica vem alertando sobre a interferência da indústria da construção civil no equilíbrio dos ecossistemas terrestres. Logo, é imprescindível que haja um processo de adaptação no sentido da redução no consumo de materiais com esse perfil, ou seja, com um alto valor energético agregado e, para tanto, a estabilização da terra com cimento surge como uma alternativa, de modo a potencializar o desempenho do produto em alguns aspectos e podendo atingir um nível de desempenho adequado mesmo com baixos teores de adição.

4.3 ESTABILIZAÇÃO DA TERRA COM CIMENTO

As argamassas de terra, apesar de todas as suas vantagens ambientais e tecnológicas, apresentam algumas limitações relacionadas ao desempenho mecânico, coesão, porosidade e variações volumétricas, como a retração por secagem (SANTOS, FARIA e SILVA, 2014). Apesar disso, existem opções de estabilização para melhorar essas características e, assim, contornar esses problemas, por exemplo, através de alguma adição, como a utilização de cimento.

Com isso, conforme visto na Tabela 1, esse ligante, quando adicionado às argamassas de terra, é reconhecido por melhorar o comportamento do material em alguns aspectos, como a resistência mecânica e à água, que constituem fatores bastante significativos no desempenho nas construções. Tais informações são coerentes com Santiago (2001), que elenca os

principais efeitos da estabilização da terra com cimento: redução da massa unitária em solos consideravelmente compactáveis e aumento da mesma em solos pouco compactáveis, menor variação volumétrica, aumento da resistência à compressão e à erosão.

Segundo Santiago (2001), esse tipo de estabilização é mais eficiente se o solo utilizado for arenoso ou com pedregulhos. Esse apontamento está de acordo com os resultados de Walker (1999), que testou a resistência de argamassas de terra com diferentes traços, sendo constituídas por solos distintos e constatou que o melhor desempenho nesse quesito foi aquele com menor concentração de argila e maior parcela de areia.

Ainda, caso haja compactação, recomenda-se que ela seja feita com o material no estado úmido, sendo importante observar a presença de alguns agentes nocivos na mistura tendo em vista a deterioração do produto, como a matéria orgânica, sobretudo em concentrações acima de 2%, bem como sulfatos e sais. Portanto, além do solo, é imprescindível avaliar as características da água que está sendo utilizada na mistura (SANTIAGO, 2001).

Outro aspecto salientado por Zak *et al* (2016) é a grande variabilidade entre os constituintes dos solos, que podem mudar a forma de interação dos seus componentes com o cimento. Isso seria uma possível explicação para a incoerência entre os seus resultados em relação aos demais, tendo em vista que foi constatado uma redução na resistência com a adição de cimento, indicando um efeito destoante com outros autores em relação a esse tipo de estabilização. Nesse sentido, Champoorat *et al* (2022) sugerem que as argilas com maior concentração de cálcio (Ca) e uma relação $Ca/(Si + AL)$ mais elevada tendem a ter um ganho de resistência maior, bem como de rigidez, tendo em vista que essas condições são favoráveis à formação do gel CSH, ou seja, dos silicatos de cálcio hidratados.

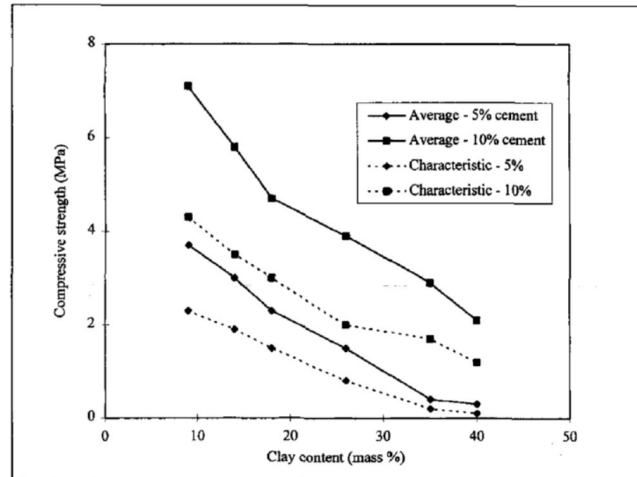
Ademais, as condições de cura dos produtos também são determinantes nos resultados finais, sobretudo no caso da utilização de ligantes hidráulicos, como é o caso do cimento, tendo em vista que é recomendada a cura de 28 dias em certas condições de umidade e temperatura para favorecer as reações de hidratação. Portanto, caso esses requisitos não sejam respeitados, o ganho de resistência proveniente do cimento pode ser prejudicado (OUEDRAOGO, 2020).

4.3.1 Estabilização de blocos de terra com cimento

Walker e Stace (1997), a partir da fabricação de blocos compactados feitos com diferentes teores de cimento e argila, verificaram que a resistência à compressão (compressive strength) foi melhor para maiores quantidades de cimento e foi reduzida com o aumento no

teor de argila, conforme a Figura 10. Assim, esses resultados estão consoantes com a recomendação de Santiago (2001) ao afirmar que é preferível a utilização de solos arenosos para esse tipo de estabilização, ou seja, com baixo teor de argila.

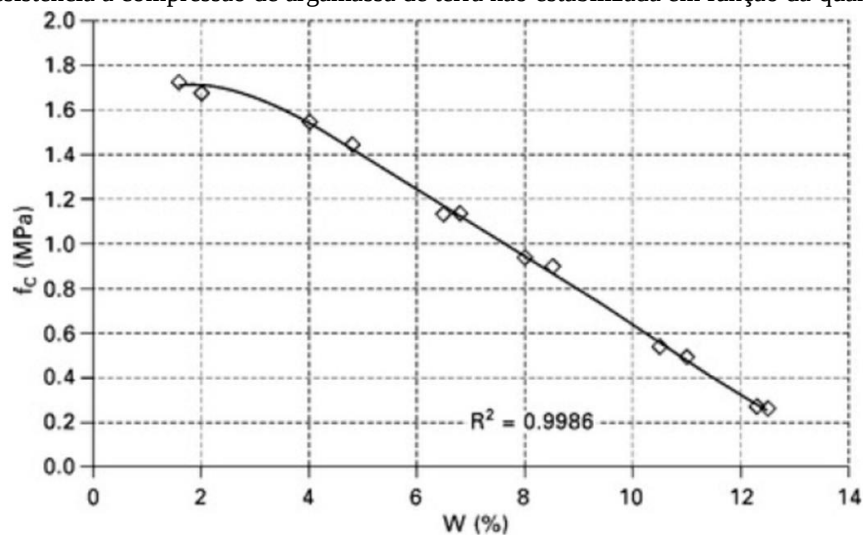
Figura 10: Influência do teor de argila na resistência mecânica de blocos de terra compactados estabilizados



Fonte: Walker e Stace (1997)

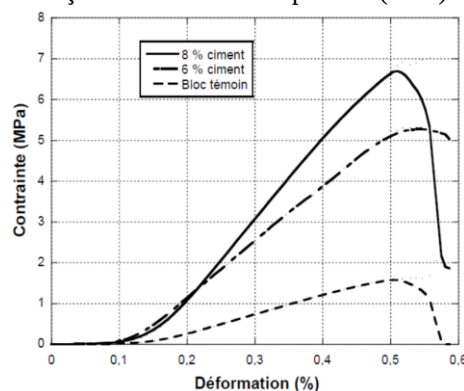
O comportamento evidenciado pode ter sido influenciado pela quantidade de água, visto que essa variou de acordo com o ponto adequado de trabalhabilidade da mistura, sendo que essa demanda é crescente quanto maior for a quantidade de argila (PKLA *et al*, 2003). Dessa forma, há um aumento proporcional da relação água/cimento do sistema, provocando a queda do desempenho mecânico, que, conforme Zak *et al* (2016), ocorre devido à evaporação da água em excesso, ou seja, que não participou das reações de hidratação do cimento, provocando a formação de poros e, consequentemente, reduzindo a resistência do produto após a secagem.

Nesse sentido, analisando a influência da quantidade de água em argamassas não estabilizadas, Morel, Bui e Hamard (2012) também constataram um grande decréscimo na resistência mecânica com o aumento na umidade da mistura para uma quantidade fixada de argila de 9% (Figura 11). Isso se dá devido à retração da argila após a secagem, enquanto as partículas maiores mantêm a posição e, com isso, há uma redução na coesão entre as partes. Portanto, essa quantidade é determinante tanto para argamassas de terra pura como para aquelas estabilizadas com cimento.

Figura 11: Resistência à compressão de argamassa de terra não estabilizada em função da quantidade de água

Fonte: Morel, Bui e Hamard (2012)

Mahdad e Brara (2021) também avaliaram o comportamento mecânico de blocos de terra compactados estabilizados com cimento e, de forma similar, constataram um aumento na resistência à compressão dos mesmos com o acréscimo nessa adição. Os autores ainda testaram a resistência de elementos de alvenaria, compostos por três blocos ligados por uma argamassa de terra com 10% de cimento, e observaram que o desempenho foi proporcional à resistência das unidades que compunham o elemento. A Figura 12 evidencia a deformação (déformation) dos blocos em função da tensão de compressão (contrainte), enquanto a Tabela 2 mostra os resultados de resistência à compressão aos 90 dias das amostras.

Figura 12: Deformação (%) em função da tensão de compressão (MPa) em blocos de terra compactados

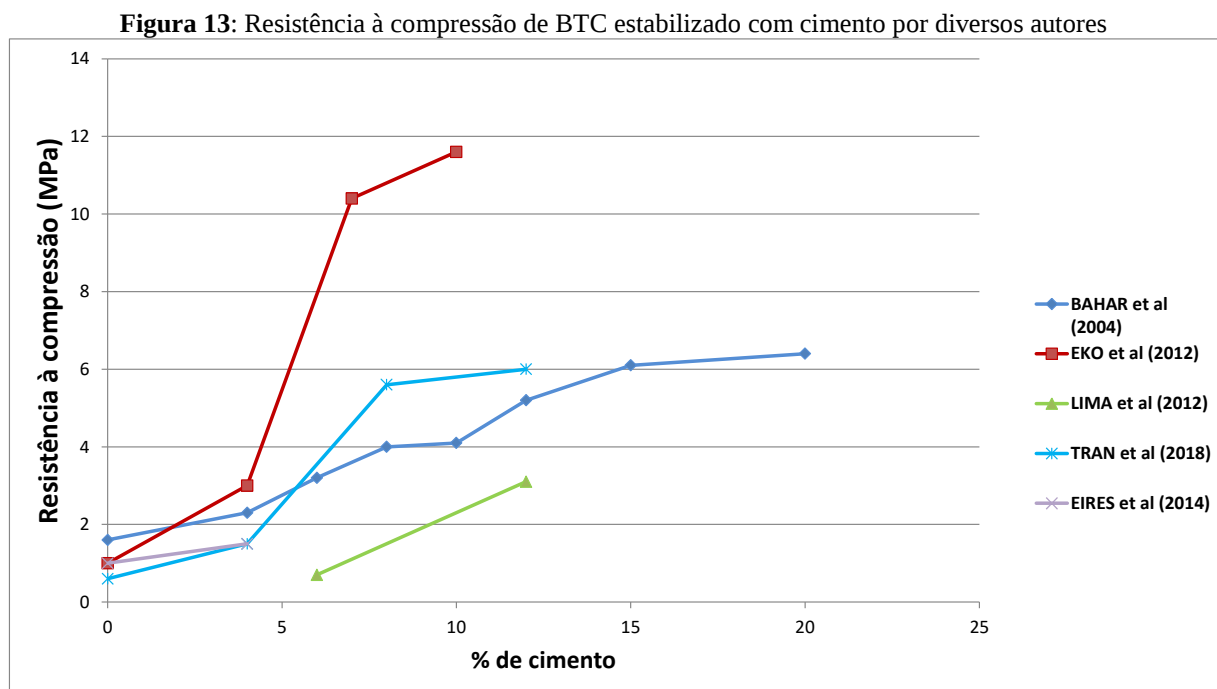
Fonte: Mahdad e Brara, 2021

Tabela 2: Resultados de resistência à compressão de blocos de terra compactados

% DE CIMENTO	0%	2%	4%	6%	8%
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	1,90	2,11	4,44	7,38	8,13

Fonte: Adaptado de Mahdad e Brara(2021)

Diante disso, fica evidente a grande diferença entre os blocos testemunhas (bloc témoin) não estabilizados e os demais, inclusive quanto à deformação, tendo em vista que o acréscimo no agente estabilizador proporcionou aumento na resistência à compressão, bem como um incremento considerável no módulo de elasticidade. Esses resultados estão coerentes com diversos outros autores que também estudaram a resistência à compressão de blocos de terra compactados variando a quantidade de cimento e, de forma semelhante, constataram melhora nesse quesito (**Figura 13**).



Fonte: Adaptado de Ouedraogo *et al* (2020)

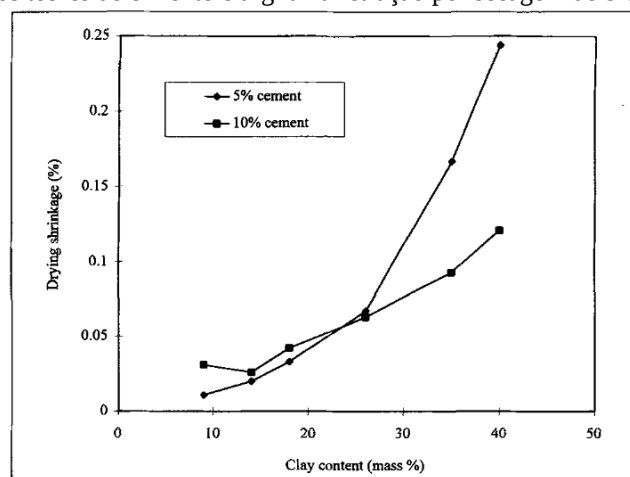
Apesar disso, há autores que observaram o processo contrário ao acrescentarem cimento à argamassa de terra. É o caso de Gomes, Faria e Gonçalves (2018), que a partir da testagem de diversos aspectos físicos e mecânicos de argamassas de terra com diferentes quantidades de cimento Portland (5-15%), constataram que o aumento no teor de cimento provocou mudanças indesejadas, como o aumento da absorção de água e redução na velocidade de secagem. Além disso, ao contrário do esperado, não foi observado ganho de resistência à compressão nem à flexão e, portanto, esses resultados se mostram incoerentes com os de outros autores já apresentados.

Além deles, Zak *et al* (2016) também verificaram uma redução no desempenho mecânico dos blocos de terra ao adicionar cimento. No entanto, vale destacar que, possivelmente, esse comportamento se deu em função do aumento na quantidade de água necessária para proporcionar adequada trabalhabilidade, tendo em vista que essa forma de

estabilização aumenta a parcela de finos da mistura, que já era alta considerando a parcela de silte e argila, aumentando a demanda de água e, com isso, a resistência final é reduzida, conforme mencionado anteriormente.

Com relação à retração por secagem, Walker e Stace (1997) verificaram que o cimento exerceu influência considerável no sentido da estabilização dimensional do produto, tendo em vista que houve uma redução desse efeito com o aumento na quantidade de cimento para maiores teores de argila, que são as situações mais críticas com relação à retração, apesar desse comportamento ter sido um pouco mais notável para baixos teores de argila no traço com 10% de cimento quando comparado ao de 5%, como mostra a Figura 14, a qual apresenta a retração por secagem (drying shrinkage) em função do teor de argila (clay content) para essas concentrações de adição.

Figura 14: Influência dos teores de cimento e argila na retração por secagem de blocos de terra compactados



Fonte: Walker e Stace (1997)

Tendo isso em vista, conforme Santiago (2001), a quantidade necessária de cimento para a estabilização do solo é maior para aqueles com bastante silte e argila. Esse apontamento está de acordo com a visão de Walker (1999), que recomenda a estabilização de argamassas de terra com 5% de cimento para até 20% de argila na composição do solo utilizado, sendo recomendado o aumento na quantidade de adição para maiores teores de argila, evitando a retração excessiva. Ainda, ressalta-se a importância da minimização desse efeito, pois ele pode provocar a aparição de fissuras, prejudicando a homogeneidade e estanqueidade da alvenaria e, assim, facilitando a penetração de água e desfavorecendo a durabilidade do sistema (PKLA, 2003).

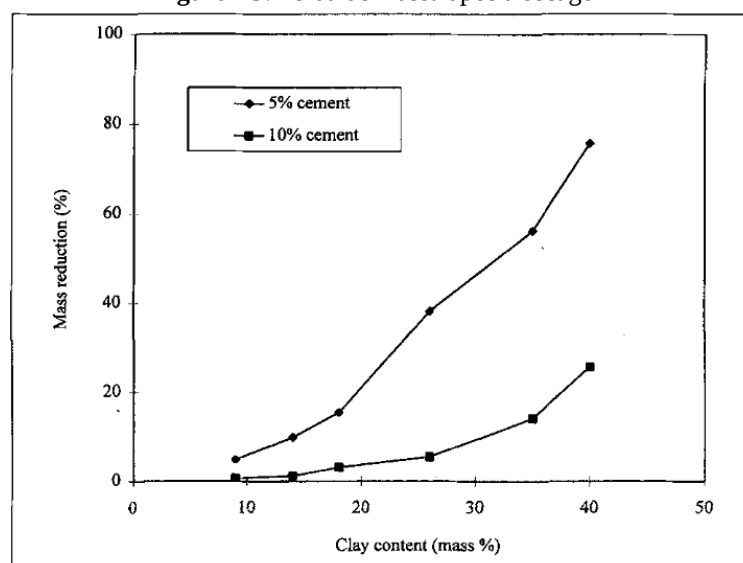
Sobre esse comportamento, Zak *et al* (2016) explicam a redução desse efeito a partir da adição de cimento atribuindo isso à formação da estrutura cristalina do ligante que se forma

nas primeiras 24 horas. Com isso, tendo em vista que o processo de secagem e a consequente retração dos materiais argilosos podem durar até semanas, a rigidez dos cristais formados a partir da hidratação do cimento evita a interconexão direta entre os minerais de argila e, assim, a variação volumétrica é menor. Portanto, esse tipo de adição contribui para a estabilização dimensional da argamassa, prevenindo deformações excessivas durante a secagem.

Além disso, foi constatado que as amostras com terras mais argilosas possuem uma maior perda de água após secagem, enquanto que o cimento reduz esse comportamento. Cabe ressaltar que esse é um parâmetro para a durabilidade do material, de modo que quanto menor for essa perda, melhores são as perspectivas nesse sentido (WALKER e STACE, 1997).

Isso pode ser observado na Figura 15, que apresenta os resultados de testes de molhagem e secagem em blocos com diferentes teores de cimento e argila, evidenciando a perda de água após secagem (mass reduction). Assim, observa-se que a adição do cimento contribui para a durabilidade, minimizando a absorção demasiada de água e, com isso, evitando possíveis problemas que possam decorrer desse processo. Porém, tendo em vista os resultados dos experimentos de Champoorat *et al* (2022), vale destacar que os ciclos de molhagem e secagem prejudicam a resistência do produto mesmo quando estabilizado com cimento. Portanto, ressalta-se a importância de adotar soluções construtivas para evitar a exposição desses elementos à água.

Figura 15: Perda de massa após a secagem



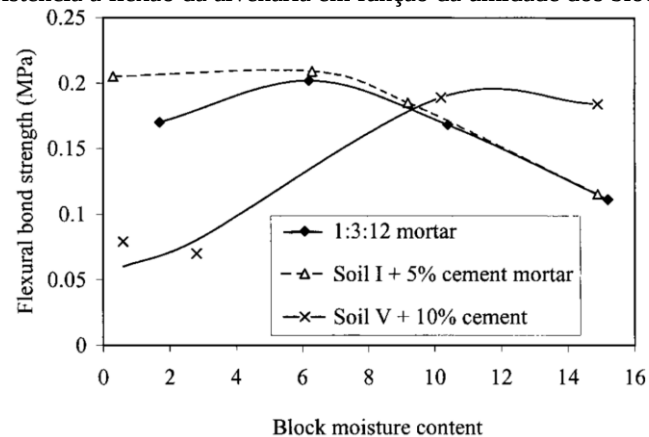
Fonte: Walker e Stace (1997)

Ainda, conforme Berge (2009), a capacidade de retenção de umidade da terra está intimamente relacionada à retração por secagem, visto que quanto maior for o teor de argila, mais umidade ela retém e, assim, maior será a tendência de retração do produto durante a secagem, prejudicando, além da estética, o desempenho mecânico final, como foi visto na Figura 14.

4.3.2 Estabilização argamassa de terra para juntas de alvenaria com cimento

Quando a argamassa estabilizada é utilizada em juntas de alvenaria, um aspecto determinante na resistência final do sistema é a umidade dos blocos no momento da execução. Isso se dá devido à existência de uma umidade ótima que proporciona a hidratação adequada do cimento da argamassa e, ao mesmo tempo, a devida aderência da mesma sobre os blocos. Assim, é importante evitar a execução com os blocos muito secos, de modo que eles tendem a puxar rapidamente a umidade da argamassa, prejudicando a hidratação do cimento. A umidade excessiva, no entanto, também é imprópria, pois dificulta a aderência entre os elementos. Portanto, a umidade ótima varia de acordo com o tipo de argamassa e do bloco, sendo essa por volta da metade da capacidade de absorção do mesmo e se aproximando do ponto de saturação quanto maior for o teor de argila (WALKER, 1999).

De acordo com os resultados apresentados por Walker (1999), esse efeito é notório, podendo ser observado na Figura 16, que mostra a resistência à flexão (flexural bond strength) das juntas de alvenarias em função da umidade do bloco (block moisture content) no momento da execução. Para tanto, foi utilizado um mesmo tipo de bloco na constituição das paredes, que foram submetidas a testes de resistência à flexão, variando níveis de umidade no momento do assentamento e para diferentes tipos de argamassa, sendo duas delas de terra. A primeira, no entanto, apresentava um teor de argila de 11% (solo I), enquanto a segunda se encontrava com 40% (solo V). Vale ressaltar que, conforme Rao, Reddy e Jagadish (1996), submeter a alvenaria à flexão é um parâmetro para medir a resistência das juntas de argamassa. Dessa forma, observando o modo de ruptura do sistema (se é na argamassa, nos blocos, na interface dos elementos ou uma combinação dessas formas) é possível ter um indicativo de quem está limitando o desempenho da alvenaria nesse sentido.

Figura 16: Resistência à flexão da alvenaria em função da umidade dos blocos na execução

Fonte: Walker (1999)

Diante disso, pode-se afirmar que essa diferença no teor de argila teve influência direta sobre a umidade ótima e, assim, observa-se que a primeira argamassa de terra apresentou comportamento semelhante ao traço tradicional de 1:3:12. Por sua vez, a segunda teve uma demanda maior de água na hora da execução. Além disso, Walker (1999) também constatou que, no caso da argamassa do solo I, as três primeiras amostras (na sequência crescente de umidade) falharam na argamassa, enquanto que na última, com mais umidade, o rompimento aconteceu na interface dos blocos com a argamassa. Já para o solo V, foi a interface que limitou a resistência do sistema nas duas primeiras amostras, sendo um indício de uma maior dificuldade de adesão entre esses elementos. No entanto, nas duas últimas, que apresentaram melhor desempenho, a falha ocorreu na argamassa, evidenciando que a aderência foi satisfatória.

Ainda, há de se ressaltar a variação ocorrida no teor de cimento, que contribuiu para a resistência da argamassa de forma isolada (1,1 MPa para o solo I + 5% de cimento e 3 MPa para o solo V + 10% de cimento), porém, isso não se refletiu na resistência final da alvenaria, dados os resultados de resistência à flexão apresentados. Possivelmente, o autor usou esses teores de cimento devido ao efeito da retração por secagem, de modo que, conforme evidenciou a Figura 14, para quantidades de argila acima de 20%, esse efeito é mais notório, sendo necessário mais cimento para a estabilização em níveis adequados. Esses resultados indicam uma piora na resistência das juntas com o aumento na quantidade de argila. Com isso, ressalta-se a possibilidade de haver desempenho superior nas juntas de argamassa para uma quantidade reduzida de cimento quando o solo utilizado apresenta um menor teor de argila, como foi o caso.

Nessa perspectiva, Rao, Reddy e Jagadish (1996), através dos resultados expostos na Tabela 3, chegaram à conclusão de que as argamassas de cimento, quando apresentam um

aumento na resistência da argamassa de forma isolada, proporcionam melhora na resistência à flexão da alvenaria, independentemente do tipo de bloco utilizado. Apesar disso, eles também constataram que uma argamassa de cimento, terra e areia (traço 1:1:6), sendo o solo utilizado com 15% de argila, apresentou melhor desempenho que o traço feito nas mesmas proporções, mas sem terra. O mesmo aconteceu para o traço 1:1:10.

Essa diferença se fez mais evidente nos blocos de terra em relação aos cerâmicos, sendo um indicativo de que essa compatibilização na composição dos materiais pode ser benéfica ao sistema. Ademais, os blocos de terra se mostraram superiores nesse sentido em relação ao cerâmico, independentemente do tipo de argamassa utilizada nas juntas. Ainda, é de se destacar o melhor desempenho do traço 1:1:6 em relação ao 1:4 nos blocos cerâmicos, tornando evidente a possibilidade de redução no consumo de cimento para um resultado similar ou até superior através da adição de terra. Assim, observa-se que, quando em pequenas quantidades, a presença da argila é benéfica à resistência das juntas de argamassa.

Tabela 3: Resistência à flexão de alvenaria para diferentes blocos e traços de argamassa

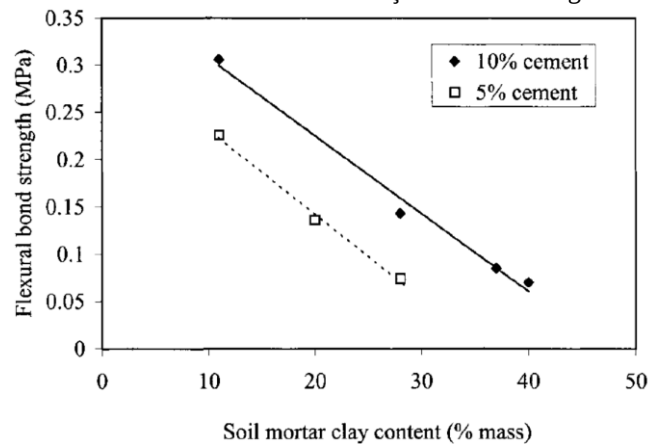
TIPO DE BLOCO	TRAÇO	RESISTÊNCIA Á FLEXÃO (MPa)	DESVIO PADRÃO
BLOCO DE TERRA COMPACTADO	1:4	0,23	0,08
	1:6	0,10	0,02
	1:10	0,02	0,01
	1:1:6	0,17	0,06
	1:1:10	0,12	0,06
BLOCO CERÂMICO	1:4	0,10	0,04
	1:6	0,08	0,02
	1:10	0,05	0,02
	1:1:6	0,11	0,06
	1:1:10	0,08	0,02

Fonte: Adaptado de Rao, Reddy e Jagadish (1996)

Esses resultados demonstram a viabilidade da utilização de blocos de terra em substituição aos cerâmicos, bem como a importância da utilização da terra como forma de redução do consumo de cimento nas construções, visto que, dessa forma, é possível atingir uma determinada resistência com uma menor concentração do aglomerante em relação às argamassas que utilizam apenas areia como agregado. Possivelmente, isso ocorre devido às propriedades ligantes que a parcela de argila presente na terra proporciona para esse material, que se soma ao cimento nesse sentido, formando uma combinação que agrega resistência ao sistema quando em proporções adequadas. Dessa forma, há uma contribuição para a desoneração do processo, além de reduzir os impactos causados pela utilização do cimento, que passa a ser minimizada.

Nessa linha de raciocínio, comparando argamassas de terra com diferentes teores de argila e de cimento na composição das juntas de alvenaria, Walker (1999) observou que a melhora no desempenho mecânico quanto à flexão é visível com o aumento dessa adição. Ademais, pode-se afirmar que o aumento na quantidade de argila deteriora a capacidade de resistência do sistema. Esse efeito pode ser observado na Figura 17, que mostra os resultados de resistência das juntas em função do teor de argila do solo utilizado (soil clay content) para 5% e 10% de cimento adicionados.

Figura 17: Resistência à flexão da alvenaria em função do teor de argila da argamassa

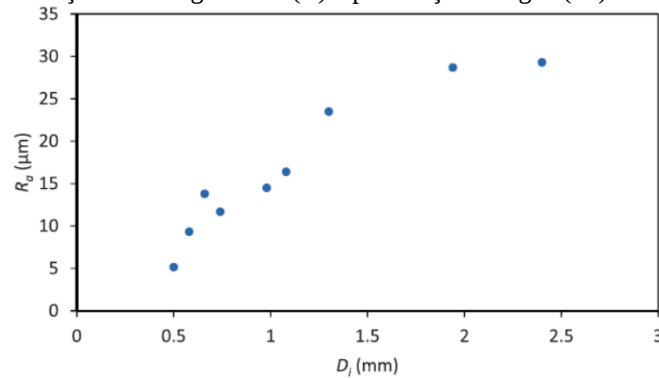


Fonte: Walker (1999)

4.3.3 Estabilização argamassa de terra para reboco com cimento

As argamassas de terra também podem ser utilizadas como reboco. Dessa forma, as alvenarias, possivelmente de material semelhante, são protegidas de erosões, além de manterem as vantagens relacionadas ao conforto interno proporcionado por vedações desse tipo, como o isolamento térmico e sonoro e a regulação da umidade do ar nesses ambientes.

Nesse sentido, Mauffré *et al* (2021) analisaram a topografia superficial de argamassas de terra para reboco feitas com diferentes quantidades de argila e com composições granulométricas diferentes para a areia, relacionando isso com a penetração de gotas de água projetadas sobre o reboco, além de outras características, como a densidade. A Figura 18 ilustra a relação entre a rugosidade superficial (R_a) e a penetração da água (D_i), enquanto a Tabela 4 apresenta alguns dos resultados obtidos para amostras de terra provenientes de uma mesma região.

Figura 18: Relação entre rugosidade (R) e penetração da água (Di) no reboco

Fonte: Mauffré *et al* (2021)

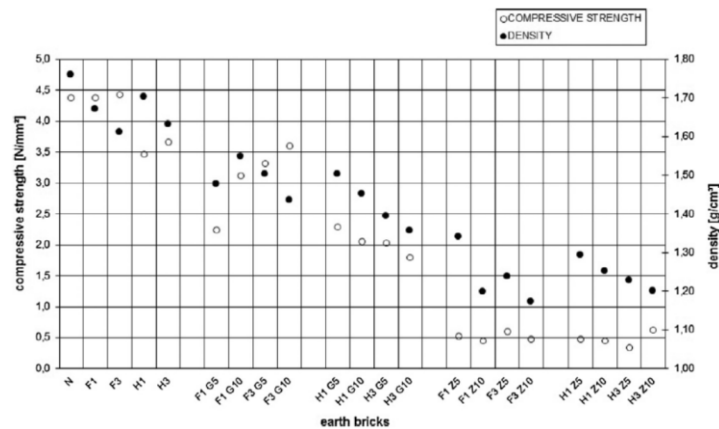
Tabela 4: Densidade, rugosidade e penetração em função da composição do reboco

AMOSTRA	GRANULOMETRIA DA AREIA (μ m)	% DE AREIA	% DE TERRA	% DE ARGILA	DENSIDADE (kg/m^3)	RUGOSIDADE (μ m)	PENETRAÇÃO FINAL (mm)
1	0-315	83	17	4,42	1660	16,4	3,75
2	315-630	83	17	4,42	1600	28,7	3,75
3	630-1000	83	17	4,42	1650	29,3	4,30
4	0-2000	83	17	4,42	1770	23,5	3,55
5	0-630	70	30	7,80	1820	11,7	2,90
6	0-630	70	30	7,80	1790	13,8	2,75
7	0-630	50	50	13,00	1830	5,2	2,25

Fonte: Adaptado de Mauffré *et al* (2021)

Assim, Mauffré *et al* (2021) observaram que maiores quantidades de argila proporcionaram menor rugosidade superficial, que se refletiu em uma menor penetração da água nessas amostras. Ademais, ficou evidente que maiores teores de argila também proporcionaram um melhor empacotamento dos grãos, visto que apresentaram maiores densidades, dificultando a penetração.

Ainda, vale destacar a relação de proporcionalidade observada por Zak *et al* (2016) entre densidade (density) e resistência à compressão (compressive strength), a partir da testagem de amostras com diferentes tipos de estabilizantes e em proporções variáveis. Os seus resultados constam na Figura 19.

Figura 19: Relação entre densidade e resistência à compressão em blocos de terra

Fonte: ZAK *et al* (2016)

Nesse contexto, cabe ressaltar a maior densidade da amostra 4 da Tabela 4 em relação às demais com mesmo teor de argila, que também se refletiu em uma menor penetração, mesmo tendo grãos de maior dimensão, porém com uma distribuição granulométrica mais ampla. Diante disso, os autores explicam que esse efeito se dá devido à menor fricção que há entre a água e as partículas quando os poros são de maior dimensão, facilitando a penetração. No entanto, poros de menor dimensão e a densidade mais elevada não necessariamente estão relacionados a uma menor penetração, tendo em vista que esse efeito depende, também, da disposição dos poros e se há interligação entre os mesmos.

Não obstante, de acordo com Martínez (2015), a densidade do produto depende de diversos fatores, como o grau de compactação, a capacidade ligante dos minerais de argila, a proporção de argila e agregados e a quantidade de água utilizada na mistura. Diante disso, as amostras com areia de melhor distribuição granulométrica e com maior teor de argila se mostraram mais eficientes quanto à penetração da água.

4.3.4 Ressalvas e cuidados na estabilização da terra com cimento

De acordo com Rodrigues (2007), o impacto direto da chuva ou dos respingos nas paredes externas das construções de terra provoca desgastes e erosões na superfície. Esses danos podem ser potencializados pela ação dos ventos e, portanto, é recomendável que haja algum tipo de proteção adicional, como a execução de beirais mais extensos, evitando o impacto direto sobre a superfície do reboco.

Porém, apesar do desgaste que as paredes de terra possam vir a sofrer no decorrer do tempo, Gomes, Faria e Gonçalves (2018) evidenciaram a possibilidade da utilização de argamassas de terra no reparo desses danos, não só de empreendimentos modernos, mas de

construções históricas e arqueológicas constituídas desse material, sendo uma forma barata e acessível de manutenção desse tipo de patrimônio. Não obstante, é importante ressaltar que é recomendável que o reparo dessas construções seja feito com um material semelhante, apresentando propriedades físicas, mecânicas e químicas parecidas. Dessa forma, há uma melhor compatibilidade e essas intervenções tendem a ser mais eficientes, evitando degradações que necessitem reparos mais profundos e complexos (GOMES, FARIA e GONÇALVES, 2016).

Ainda, caso o material de origem seja constituído de terra não estabilizada, a adição de ligantes como o cimento na argamassa de reparo, mesmo que em pequenas concentrações, é menos eficiente em relação à utilização do mesmo tipo de material sem qualquer estabilizante para esse fim (GOMES, FARIA e GONÇALVES, 2019).

Nesse sentido, um dos possíveis problemas da utilização de um material incompatível nesse tipo de intervenção é gerado quando o reparo externo é feito com a criação de uma barreira mais impermeável que o material de origem, dificultando a evaporação da água que, de alguma forma, tenha contato com a parede. Assim, a umidade e os sais presentes se concentram na interface entre os diferentes materiais, provocando sucessivos ciclos de dissolução e cristalização dos sais e, com isso, são geradas tensões que prejudicam a coesão da camada mais superficial de terra (GROOT, HEES e WIJFFELS, 2009). A Figura 20 evidencia um caso de intervenção mal sucedida com material incompatível com a terra, com o destacamento do novo revestimento.

Figura 20: Tentativa mal sucedida de reparo em revestimento de parede



Fonte: Almeida (2015)

Além da influência da exposição à água, outro problema relacionado às argamassas de terra quando estabilizadas com cimento é a suscetibilidade a ataques de agentes externos, como o sulfato. A esse respeito, Bezerra e Azeredo (2019) estudaram a influência da absorção por capilaridade de íons de sulfato em blocos de terra compactados, variando o tempo de

exposição e a concentração, e observaram danos causados por esse processo devido ao aparecimento de tensões internas no material, inclusive com aparecimento de etringita. Os autores explicam que o cimento, quando exposto a esse tipo de agente, forma produtos expansivos e, com isso, o material tende a sofrer perda de coesão, podendo haver aumento na porosidade e até fissuração, reduzindo o desempenho. Portanto, outro aspecto a se observar antes de selecionar o estabilizante para a terra é o meio em que ela será aplicada, verificando a presença de agentes químicos e o comportamento do mesmo ao entrar em contato com o produto.

4.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, foram observados alguns aspectos que ainda carecem de estudos mais aprofundados e que são de relevância para o tema abordado. Com isso, esses temas podem ser abordados em futuras pesquisas da área, de modo a contribuir para o aprimoramento no que diz respeito à metodologia da estabilização da terra com cimento.

Nesse sentido, destaca-se que são necessários mais estudos no sentido de compreender outros aspectos relacionados à durabilidade das argamassas estabilizadas com cimento além da presença de água, a exemplo da ocorrência de sais no produto, bem como o comportamento, em longo prazo, da superfície do reboco de terra com diferentes composições quando submetido à projeção de chuvas, tendo em vista que a topografia se mostrou determinante a esse respeito, avaliando a influência da presença ou não de cimento nos traços das amostras.

Outro aspecto que poderia ser mais bem estudado é a influência do tipo de cimento utilizado na estabilização da terra, analisando o custo-benefício das alternativas existentes atualmente e verificando os efeitos de cada uma delas quando utilizadas para essa finalidade, tendo em vista a variação que ocorre na composição de cada um deles, podendo ter implicações sobre os resultados obtidos.

5 CONCLUSÕES

Nos dias vigentes, diante das consequências da exploração demasiada dos recursos naturais e a poluição do planeta devido às atividades humanas, é evidente a crescente preocupação da população e da comunidade científica em relação às perspectivas futuras, sobretudo para as próximas gerações. Com isso, é necessária uma adaptação da indústria da

construção civil visando a técnicas e materiais mais viáveis do ponto de vista social e ambiental.

Assim, a terra surge como uma alternativa, sendo bastante versátil, com diversas técnicas de aplicação e sendo facilmente reciclável. Além disso, tendo em vista a sua eficiência energética, o baixo custo associado e a acessibilidade, minimizando a necessidade de transporte, há a possibilidade de execução de empreendimentos menos onerosos, facilitando a execução de moradias. Portanto, trata-se de um elemento que cumpre importante função social, econômica e ambiental, abrigando uma grande parcela da população mundial desde as primeiras civilizações humanas e compondo um acervo histórico e cultural bastante amplo.

Além desses aspectos, trata-se de uma ótima opção visando ao conforto interno dos ambientes, tendo em vista características como a capacidade de regulação da concentração de ozônio e da umidade relativa do ar a partir das suas propriedades higroscópicas, a inércia e resistência ao fogo, além do isolamento térmico e acústico, tornando os ambientes mais salubres e agradáveis aos ocupantes.

No entanto, existem limitações e preconceitos associados às construções de terra que, somados ao surgimento de materiais mais modernos a partir da Revolução Industrial, reduziram bastante a utilização dessa tipologia arquitetônica, que passa por um processo de resgate e desenvolvimento.

Nessa perspectiva, as diferentes técnicas de estabilização do solo constituem um importante mecanismo para superar as restrições inerentes a esse material, sobretudo no que diz respeito à resistência mecânica e à suscetibilidade à água. Para tanto, a adição de cimento Portland constitui uma alternativa viável, sendo reconhecida por melhorar o desempenho desses produtos quanto a esses fatores limitantes.

Não obstante, diversas variáveis podem influenciar o desempenho final das argamassas provenientes dessa mistura, como a quantidade de água utilizada na execução, as condições de cura do produto, a constituição mineralógica e granulométrica do solo, as concentrações e os tipos de argila, além do teor de cimento adicionado no processo de estabilização.

Nessa perspectiva, são encontradas diversas recomendações na literatura existente sobre essa metodologia. Com relação à umidade da mistura, sabe-se que a resistência final é prejudicada caso haja uma parcela considerável de água em excesso que, quando não participa das reações de hidratação do cimento, deixa vazios ao evaporar, aumentando a porosidade. Esse problema pode ser intensificado em condições de cura inadequadas que favoreçam a evaporação, sobretudo nas primeiras horas, provocando a saída de moléculas que,

potencialmente, participariam dessas reações e, assim, contribuiriam para o ganho de resistência.

Quanto à composição do solo estabilizado, existem características que potencializam os resultados, como uma distribuição granulométrica relativamente uniforme, favorecendo o empacotamento dos grãos e, com isso, reduzindo o volume de vazios. Esse fator é determinante para a resistência mecânica e à água, diminuindo a penetração da mesma quando projetada sobre a superfície de rebocos desse tipo e, assim, melhorando a durabilidade do produto.

Além disso, a presença de uma maior parcela arenosa e reduzido teor de argila também são recomendados, tendo em vista que a quantidade de cimento necessária para a estabilização é maior para concentrações elevadas de minerais argilosos. Esses, por sua vez, estão presentes na natureza de diversas formas, havendo diferentes classes que se comportam de forma distinta. Portanto, para essa finalidade, é recomendada a utilização daquelas que apresentam características mais balanceadas e que favoreçam as propriedades de interesse, sobretudo no que diz respeito à capacidade de ligação e estabilidade dimensional, como é o caso das ilitas.

De modo geral, aumento no teor de cimento provoca alterações consideráveis no comportamento das argamassas de terra, entre elas o aumento da resistência mecânica e à água, a estabilização dimensional, com reduzida retração por secagem, bem como a diminuição do efeito da perda de água após a secagem, que é positivo para a durabilidade.

Não obstante, existem fatores que devem ser considerados na decisão por esse tipo de estabilização. Nesse sentido, tendo em vista o desgaste que os revestimentos de terra sofrem ao longo do tempo, sobretudo quando expostos à água, existe a possibilidade de utilização de argamassas de terra para a realização de reparos, porém, é recomendável que essas intervenções sejam feitas com material de propriedades semelhantes e, portanto, talvez a estabilização para esse fim seja prejudicial caso o material de origem não tenha passado por esse processo. Outro aspecto que deve ser estudado é a presença de agentes nocivos ao cimento, como é o caso dos sulfatos, que podem provocar o aparecimento de tensões internas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, V. M. C. **Arquitetura de terra na Região de Aveiro: reabilitação de construções em adobe**. 2015. 157 f. Dissertação (Mestrado) – Arquitetura, Universidade Lusíada, Porto, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13353**: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.
- BAHAR, R.; BENAZZOUG, M.;KENAI, S. Performance of compacted cement-stabilised soil, **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 811-820, 2004.
- BARBALHO, V. M. R. O. L. **Influência de parâmetros metodológicos e experimentais nos blocos de terra compactados estabilizados pela ativação alcalina do metacaulim**. 2020. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.
- BELL, M. L.; DOMINICI, F.; SAMET, J. M. A Meta-Analysis of Time-Series Studies of Ozone and Mortality With Comparison to the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. **Epidemiology**. v. 16, p. 436-445, 2005.
- BERGAYA, F.; LAGALY, G. **General Introduction: Clays, Clay Minerals and Clay Science**, v. 5, p. 1-19, 2013.
- BERGE, B. **The Ecology of Building Materials**. 2. ed. Architectural Press, Elsevier Science, 2009. 448 p.
- BEZERRA, W. V. D. C.; AZEREDO, G. A. External sulfate attack on compressed stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 255-264, 2019.
- BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O. **Concreto armado eu te amo**. Volume 1, 8. ed. Editora Blucher, 2015.
- BRAGA, B. *et al.* **Introdução à Engenharia Ambiental – O desafio do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005.
- BRIGATTI, M. F.; GALÁN, E.; THENG, B. K. G. Chapter 2 - Structure and Mineralogy of Clay Minerals. **Developments in Clay Science**, v. 5, p. 21-81, 2013.
- BUI, Q. B. *et al.* Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. **Building and Environment**, v. 44, p. 912-919, 2009.
- ÇAMURCUOĞLU, D. S. **The Wall Paintings of Çatalhöyük (Turkey): Materials, Technologies and Artists**. 2015. Tese (Doutorado) - Curso de Filosofia, University College London, Londres, 2015.

CARREIRA, I.; CARDOSO, I. P.; FARIA, P. Estabilização de argamassas de terra: uma revisão. **Conservar Patrimônio**, v. 37, 2021.

CHAMPOORAT, T. *et al.* Improving mechanical properties and shrinkage cracking characteristics of soft clay in deep soil mixing. **Construction and Building Materials**, v. 316, 2022.

CORRÊA, L. R. **Sustentabilidade na construção civil**. Monografia - Curso de Especialização em Construção Civil, Escola de Engenharia UFMG, Belo Horizonte, 2009.

DARLING, E. K. *et al.* Impacts of a clay plaster on indoor air quality assessed using chemical and sensory measurements. **Building and Environment**, v. 57, p. 370-376, 2012.

EIRES, R.; CAMÕES, A.; JALALI, S. Ancient materials and techniques to improve the earthen building durability, **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 357-366, 2014.

EKO, R. M. *et al.* Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 340-346, 2012.

FERNANDES, J. V. A. Ativação alcalina em blocos de terra comprimidos utilizando como precursor o metacaulim. 2020. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

FRANÇA, S. *et al.* Procnow-C: da Seleção de um Portfólio de Artigos à Análise Sistemática Sobre Blocos de Terra Comprimida. **Pensar acadêmico**, Manhauçu, v.17, n.3, p.291-308, 2019.

GOMES, M. I.; FARIA, P.; GONÇALVES, T. D. Characterization of Earth-Based Mortars for Rammed Earth Repair. **Earth Constructions & Tradition**, v. 1, p. 259-276, 2016.

GOMES, M. I.; FARIA, P.; GONÇALVES, T. D. Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilization with mineral binders and fibers. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2401-2414, 2018.

GOMES, M. I.; FARIA, P.; GONÇALVES, T. D. Rammed earth walls repair by earth-based mortars: The adequacy to assess effectiveness. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 213-231, 2019.

GOMES, M. I.; GONÇALVES, T. D.; FARIA, P. Hydric Behavior of Earth Materials and the Effects of Their Stabilization with Cement or Lime: Study on Repair Mortars for Historical Rammed Earth Structures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, 2016.

GROOT, C.; HEES, R. V.; WIJFFELS, T. Selection of plasters and renders for salt laden masonry substrates. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1743-1750, 2009.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção**. IBGE, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9018-pesquisa-anual-da-industria-da-construcao.html?=&t=destaques>. Acesso em: 10 set. 2022.

JAQUIN, P.; AUGARDE, C. Earth Building - History, science and conservation. Watford: IHS BRE Press, 2012.

JAQUIN, P. Influence of Arabic and Chinese Rammed Earth Techniques in the Himalayan Region. **Sustainability**, v. 4, p. 2650-2660, 2012.

LAMBLE, S. P.; CORSI, R. L.; MORRISON, G. C. Ozone deposition velocities, reaction probabilities and product yields for green building materials. **Atmospheric Environment**, v. 45, p. 6965-6972, 2011.

LIMA, J.; FARIA, P.; SILVA, A. S. Earthen Plasters Based on Illitic Soils from Barrocal Region of Algarve: Contributions for Building Performance and Sustainability. **Key Engineering Materials**, v. 678, p. 64-77, 2016.

LIMA, J.; FARIA, P.; SILVA, A. S. Earth Plasters: The Influence of Clay Mineralogy in the Plasters' Properties. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 14, p. 948-963, 2020.

LIMA, S. A. *et al.* Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash, **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 829-837, 2012.

LIU, Z.; CREWE, A. Effects of size and position of openings on in-plane capacity of unreinforced masonry walls. **Bulletin of Earthquake Engineering**, v. 18, p. 4783-4812, 2020.

MAHDAD, M.; BRARA, A. Caractérisation hydromécanique des blocs de terre stabilisée au ciment et à la chaux. In: **Colloque International - Défis et Perspectives de l'Habitat en Algérie: Comprendre Pour Mieux Agir**, 14., Université Mouloud Mammeri, Algérie, 2014.

MARTÍNEZ, O. D. **Preservation and repair of rammed earth constructions**. 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Análise Estrutural de Monumentos e Construções Históricas, Universidade do Moinho, Portugal, 2015.

MAUFFRÉ, T. *et al.* Analysis of water droplet penetration in earth plasters using X-ray microtomography. **Construction and Building Materials**, v. 283, 2021.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHEN, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde humana e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 3, p. 75-96, 2012.

MELLAIKHAFI, A. *et al.* Characterization and thermal performance assessment of earthen adobes and walls additive with different date palm fibers. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, IBRACON, 2008.

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

MOREL, J. C.; BUI, Q. B.; HAMARD, E. Weathering and durability of earthen material and structures. **Modern Earth Buildings**, p. 282-303, 2012.

MUDWAY, I. S.; KELLY, F. J. Ozone and the lung: a sensitive issue. **Molecular Aspects of Medicine**, v. 21, p. 1-48, 2000.

MUÑOZ, P. *et al.* Adobe bricks reinforced with paper & pulp wastes improving thermal and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 254, 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª ed. Editora PINI Ltda. São Paulo, 1997.

OUEDRAOGO, K. A. J. *et al.* Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? **Construction and Building Materials**, v. 236, 2020.

PALOMO, A. *et al.* A review on alkaline activation: new analytical perspectives. **Materiales de construcción**, v.64, n.315, 2014.

PINTO, E. N. M. G. **Aditivação de pastas geopoliméricas com tetraborato de sódio e látex não iônico para cimentação de poços de petróleo**. 2007. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

PKLA, A. *et al.* Comparaison de méthodes d'essais de mesures des caractéristiques mécaniques des mortiers de terre. **Materials and Structures**, v. 36, p. 108-117, 2003.

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

PRÉNERON, A. L.; MAGNIONT, C.; AUBERT, J. E. Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. **Energy and Buildings**, v. 178, p. 265-278, 2018.

RANDAZZO, L. *et al.* Moisture absorption, thermal conductivity and noise mitigation of clay based plasters: The influence of mineralogical and textural characteristics. **Applied Clay Science**, v. 132-133, p. 498-507, 2016.

RAO, K. V. M.; REDDY, B. V. V.; JAGADISH, K. S. Flexural bond strength of masonry using various blocks and mortars. **Materials and Structures**, v. 29, p. 119-124, 1996.

REDDI, L. N.; JAIN, A.; KYUN, H. B. Soil materials for earth construction; properties, classification and suitability testing. **Modern Earth Buildings: Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications**, p. 155-171, 2012.

RODRIGUES, P. F. Construções em terra crua: Tecnologias, potencialidades e patologias. **Revista MUSA**, v. 2, p. 149-155, 2007. Disponível em: <http://run.unl.pt/handle/10362/9949>.

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

SANTOS, T. *et al.* Comparison of mineralogical, mechanical and hygroscopic characteristic of earthen, gypsum and cement-based plasters. **Construction and Building Materials**, v. 254, 2020.

SANTOS, T.; FARIA, P.; SILVA, V. Caracterização de argamassa pré-dosada de terra. **Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento**, Coimbra, 2014.

SCHOONHEYDT, R. A.; JOHNSTON, C. T.; BERGAYA, F. Clay minerals and their surfaces. **Developments in Clay Science**, v. 9, p. 1-21, 2018.

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

SILVA, C. G. T. **Conceitos e Preconceitos relativos às Construções em Terra Crua**. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saúde Pública, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2000.

SILVA, R. A. *et al.* Conservation and New Construction Solutions in Rammed Earth. **Structural Rehabilitation of Old Buildings**, v. 2, p. 77-108, 2014.

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

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. London: Academic Press, 1998.

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

THOMPSON, D.; AUGARDE, C.; O, J. P. A review of current construction guidelines to inform the design of rammed earth houses in seismically active zones. **Journal of Building Engineering**, v. 54, 2022.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Construção Sustentável: O Caso Dos Materiais De Construção. In: **Congresso Construção**, 3., 2007, Coimbra: Researchgate, 2007.

TORGAL, P. F.; JALALI, S. Construção sustentável: Vantagens ambientais da construção com terra. **Encontro para o Desenvolvimento do Sector Eléctrico e Electrónico**, 17., 2011, Porto: Ufi. p. 32-34, 2011.

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

TRAN, K. Q.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 204–210, 2018.

VARAS, M. J.; BUERGO, M. A.; FORT, R. Natural cement as the precursor of Portland cement: Methodology for its identification. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 2055-2065, 2005.

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

WALKER, P.; STACE, T. Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars. **Materials and Structures**, v. 30, p. 545-551, 1997.

WALKER, P. Bond Characteristics of Earth Block Masonry. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 11, p. 249-256, 1999.

WU, F. *et al.* Strength and stress-strain characteristics of traditional adobe block and masonry. **Materials and Structures**, v. 46, p. 1449-1457, 2013.

YEMAL, J. A.; TEIXEIRA, N. O. V.; NAAS, I. A. Sustentabilidade na construção civil. **3º International Workshop Advances in Clear Production**. São Paulo, 2011.

ZAK, P. *et al.* The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 179-188, 2016.

ZANONI, R. *et al.* Levantamento e caracterização técnica de construções em terra crua no estado de Mato Grosso do Sul. In: **Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil**, 3., Campo Grande, 2010.