UNESP **Universidade Estadual Paulista**

"Júlio de Mesquita Filho"

Campus de Guaratinguetá

Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

LUCAS FÉLIX DA COSTA GONÇALVES

ESTUDO DA ÁLCALI-ATIVAÇÃO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS MODULARES ECOLÓGICOS

Guaratinguetá-SP

2022

LUCAS FÉLIX DA COSTA GONÇALVES

ESTUDO DA ÁLCALI-ATIVAÇÃO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS MODULARES ECOLÓGICOS

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre à Universidade Paulista "Julio de Mesquita Filho" – Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de concentração Ciência dos Materiais, sob a orientação do Prof. Dr. Miguel Ángel Ramírez Gil

Guaratinguetá-SP

2022

Gonçalves, Lucas Félix da Costa
Estudo da álcali-ativação da produção de tijolos modulares ecológicos / Lucas Félix da Costa Gonçalves. – Guaratinguetá, 2022
98 p.

Orientador: Miguel Ángel Ramírez Gil

Dissertação (Mestrado)– Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá

1. Construção civil. 2. Materiais de construção. 3. Tijolos. I. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

Faculdade de Ciências

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LUCAS FÉLIX DA COSTA GONÇALVES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 18 dias do mês de fevereiro do ano de 2022, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LUCAS FÉLIX DA COSTA GONÇALVES, intitulada **"Estudo da álcali-ativação na produção de tijolos modulares ecológicos"**. A Comissão Examinadora foi constituida pelos seguintes membros: Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Materiais e Tecnologia / Faculdade de Engenharia de Guaratingueta UNESP, Prof. Dr. CARLOS EDUARDO TINO BALESTRA (Participação Virtual) do(a) Engenharia Civil / Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo, Profa. Dra. ELIDIANE CIPRIANO RANGEL (Participação Virtual) do(a) Curso de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP/Sorocaba. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final:_ Aprovado _ _ _ _ _. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido em meio a pandemia da COVID-19 e só foi possível sua realização graças a força e incentivo de pessoas que quero deixar registrado aqui.

Aos meus pais Neide e Edvaldo, por todo o incentivo, carinho e suporte de sempre.

À minha companheira Isabel, por toda paciência e apoio.

À meu orientador profº Miguel por toda paciência, ensinamentos e reflexões ao longo do mestrado.

Às empresas Verde Equipamentos e Carmo Laboratório pelo suporte no desenvolvimento dos experimentos.

"É melhor ser alegre que ser triste; alegria é a melhor coisa que existe; é assim como a luz no coração [...]"

(Vinicius de Moraes & Baden Powell)

GONÇALVES, L. F. da C., **Estudo da álcali-ativação na produção de tijolos modulares ecológicos.** Dissertação de mestrado (Ciência e Tecnologia dos Materiais) – UNESP, Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá, 2022.

RESUMO

Com a crescente demanda da construção civil por novos materiais que preferencialmente minimizem os impactos ambientais e atendam as solicitações técnicas, o tijolo solo-cimento, conhecido comercialmente como tijolo ecológico, surge como alternativa ao tijolo de argila queimada, que gera impacto pelo seu processo de queima e consumo de energia. Ao analisar o tijolo solo-cimento, encontram-se benefícios econômicos, sociais e ambientais em sua produção, porém, ele ainda conta com um componente que possui contribuição para impacto ambiental, que é o cimento. Estudos mostram que há possibilidades de substituição do cimento nesta produção e a técnica com resultados promissores é a álcali-ativação. Visto as possibilidades, o presente trabalho propôs a produção do tijolo modular de solo comprimido e estabilizado a partir da técnica de álcali-ativação, em escala real. Foram estudados 4 variações de matérias-primas e metodologias de produção, envolvendo uma matriz fixa de solo e areia, metacaulim ou escória de alto forno como precursores, ativador simples com solução de NaOH ou composto com adição de cal hidratada, com ou sem cura térmica. A partir das caracterizações mecânicas e físicas dos tijolos foi possível concluir que a produção envolvendo metacaulim como precursor, ativador composto, com cura térmica e a produção com escória de alto forno como precursor, ativador simples, com cura térmica, atenderam todos os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 8491:2012 usada de referência. Os tijolos com a escória de alto forno alcançaram os maiores valores de resistência à compressão com média de 3,60 MPa e as caracterizações por DRX, MEV e EDS confirmaram o desenvolvimento de estruturas resultantes das reações de álcali-ativação. Concluiu-se também que a cura térmica inibiu a ocorrência de eflorescência nos tijolos. Dessa forma, o estudo mostrou que os tijolos modulares álcali-ativados podem atender os requisitos para serem utilizados na construção civil, especialmente com o uso da escória de alto forno, reaproveitando um resíduo industrial, contribuindo para um desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Tijolo ecológico, geopolimero, álcali-ativação, metacaulim, escória de alto forno.

ABSTRACT

With the growing demand from civil construction for new materials that preferentially minimize environmental impacts and also meet technical requirements, the soil-cement brick, commercially known as ecological brick, appears as an alternative to the burnt clay brick, which generates impact through its process of burning and energy consumption. When analyzing the soil-cement brick there are economic, social and environmental benefits in its production, however, it still has the cement, which is a component that contributes to the environmental impact. Studies demonstrates that there are possibilities for cement replacement in its production and the technique with promising results is the alkali-activation. Considering the possibilities, the present work proposed the production of a modular brick with compressed and stabilized soil using the alkali-activation technique in real scale. Then, 4 variations of raw materials and production methodologies were studied, involving a fixed matrix of soil and sand, metakaolin or blast furnace slag as precursors, simple activator with NaOH solution or compound with the addition of hydrated lime, with or without thermal curing. From the mechanical and physical characterizations of the bricks it was possible to conclude that the production involving metakaolin as a precursor, composite activator, with thermal cure and the production with blast furnace slag as a precursor, simple activator, with thermal cure, achieve with all the requirements established by standard ABNT NBR 8491:2012 used as a reference. The bricks with blast furnace slag reached the highest compressive strength values with an average of 3.60 MPa and the characterizations by DRX, MEV and EDS confirmed the development of structures resulting from the alkali-activation reactions. It was also concluded that thermal curing inhibited the occurrence of efflorescence on the bricks. Thus, the study demonstrated that alkali-activated modular bricks can achieve the requirements for use in civil construction, especially with the use of blast furnace slag, reusing industrial waste, contributing to sustainable development.

Keywords: Ecological brick, geopolymer, metakaolin, alkali-activation, blast furnace slag.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificado do ciclo produtivo do tijolo solo-cimento 18
Figura 2 - Exemplos de modelos de tijolo solo-cimento e revestimentos utilizados na construção modular 18
Figura 3 – Exemplo de tijolo modular de 2 furos com encaixe macho/fêmea 19
Figura 4 - Exemplo esquemático do sistema construtivo modular 20
Figura 5 - Efeito da quantidade e do tamanho das particulas na eficiência de empacotamento 22
Figura 6 - Geração de CO_2 nas diferentes etapas de produção do cimento 23
Figura 7 - Representação estrutural da caulinita 26
Figura 8 - Modelo de álcali-ativação para escória de alto forno 29
Figura 9 - Representação esquemática do processo de álcali-ativação baixo cálcio 30
Figura 10 - Projeção plana da estrutura tridimensional de um gel de N-A-S-H 31
Figura 11 - Número de publicações registradas no portal da Capes no período de 2011 a 2021, utilizando na pesquisa, o termo "Álkali-activation brick" 33
Figura 12 - Projeto de habitação utilizando blocos produzidos pela técnica de álcali-ativação 35
Figura 13 - Etapas da construção da habitação utilizando os blocos produzidos a partir da técnica de álcali-ativação 35
Figura 14 - Prensa manual para produção de tijolos 43
Figura 15 – Fluxograma da produção de tijolos. 44
Figura 16 – Amostras de tijolos imersas em água. 45
Figura 17 - Amostra de tijolo capeado no momento do ensaio de resistência à compressão 46
Figura 18 – Resumo do planejamento experimental 48
Figura 19 - Difratograma de raios X para a amostra de solo 53
Figura 20 - Difratograma de raios X para a amostra de metacaulim 54
Figura 21 - Difratograma de raios X para a amostra de cal hidratada 55
Figura 22 – Difratograma de raios X para a amostra de escória de alto forno 55
Figura 23 - Eflorescência na superfície dos tijolos sem cura térmica 60
Figura 24 - Difratograma de raios X para a amostra de tijolo 4M.AS.CT, com metacaulim, ativador simples e com cura térmica 67

Figura 25 - Difratograma de raios X para a amostra de tijolo 4M.AS.ST, com metacaulim, ativador simples e sem cura térmica.....67
Figura 26 - Difratograma de raios X para a amostra de tijolo 9M.AC.CT, com metacaulim, ativador composto e com cura térmica.....68
Figura 27 – Difratograma de raios X para a amostra de tijolo 7E.AS.CT, com escória de alto forno, ativador simples e com cura térmica.....68
Figura 28 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras de tijolos com metacaulim, ativador simples e cura térmica (4M.AS.CT), com metacaulim, ativador simples, sem cura térmica (5M.AS.ST), com metacaulim, ativador composto e cura térmica (9M.AC.CT) e escória de alto forno, ativador simples e cura térmica (7E.AS.CT), com ampliações de 500x e 1000x.....70
Figura 29 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras de tijolos com metacaulim, ativador simples e cura térmica (4M.AS.CT), com metacaulim, ativador simples, sem cura térmica (5M.AS.ST), com metacaulim, ativador composto e cura térmica (9M.AC.CT) e escória de alto forno, ativador simples e cura térmica (7E.AS.CT), com ampliações de 3000x.....71
Figura 30 – Resultados das análises por MEV e EDS para amostra 4M.AS.CT, de tijolo com metacaulim, ativador simples e cura térmica.....72
Figura 31 – Resultados das análises por MEV e EDS para amostra 5M.AS.ST, de tijolo com metacaulim, ativador simples e sem cura térmica.....73
Figura 32 – Resultados das análises por MEV e EDS para amostra 9M.AC.CT, de tijolo com metacaulim, ativador composto e cura térmica.....74
Figura 33 – Resultados das análises por MEV e EDS para amostra 7E.AS.CT, de tijolo com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica.....75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros estabelecidos para o tijolo solo-cimento.. 20
Tabela 2 - Classificação granulométrica do solo..... 21
Tabela 3 - Características do solo para produção do tijolo solo-cimento..... 22
Tabela 4 - Formulação das matérias-primas utilizadas na produção dos tijolos..... 42
Tabela 5 - Quantidade de água utilizada para produção dos tijolos 43
Tabela 6 - Caracterização química do solo, valores expressos em percentual em massa de compostos, normalizados a 100% 49
Tabela 7 - Caracterização química do metacaulim, valores expressos em percentual em massa de compostos, normalizados a 100% 50
Tabela 8 - Caracterização química da escória de alto forno, valores expressos em percentual em massa de compostos, normalizados a 100%. 51
Tabela 9 - Caracterização química da cal hidratada, valores expressos em percentual em massa de compostos, normalizados a 100%. 52
Tabela 10 - Granulometria do solo 56
Tabela 11 - Granulometria da areia 57
Tabela 12 - Verificação de correção granulométrica, utilizando peneiramento a úmido em peneira com abertura de malha de 0,075 mm 57
Tabela 13 - Limites de Atterberg do solo 58
Tabela 14 - Densidade das matérias-primas utilizadas no estudo. 58
Tabela 15 - Análise dimensional dos tijolos de diferentes composições e tratamentos de cura 60
Tabela 16 - Absorção de água dos tijolos 63
Tabela 17 - Resistência à compressão dos tijolos 65
Tabela 18 - Resultados da análise por EDS para amostra 4M.AS.CT, de tijolo com metacaulim, ativador simples e cura térmica. 72
Tabela 19 - Resultados da análise por EDS para amostra 5M.AS.ST, de tijolo contendo metacaulim, ativador simples e sem cura térmica 73
Tabela 20 - Resultados da análise por EDS para amostra 9M.AC.CT, de tijolos contendo metacaulim, ativador composto e cura térmica 74

Tabela 21 - Resultados da análise por EDS para amostra 7E.AS.CT, de tijolos contendo metacaulim, ativador composto e cura térmica. 75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
2 OBJETIVOS 16
2.1 OBJETIVO GERAL 16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
3.1 CONCEITOS BÁSICOS 17
3.1.1 Tijolo solo-cimento 17
3.1.2 Solo 21
3.1.3 Impactos ambientais do cimento 23
3.1.4 Álcali-ativação 23
3.1.5 Metacaulim e escória de alto forno como materiais precursores 25
3.1.6 Ativadores alcalinos 28
3.1.7 Mecanismos de reação 28
3.2 ÁLCALI-ATIVAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS 32
4 MATERIAIS E MÉTODOS 36
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS 36
4.1.1 Solo 36
4.1.2 Areia 36
4.1.3 Metacaulim 37
4.1.4 Escória de alto forno 37
4.1.5 Hidróxido de sódio (NaOH) 37
4.1.6 Cal Hidratada 37
4.2 MÉTODOS 38
4.2.1 Caracterização das materias-primas 38
4.2.1.1 Fluorescência de raios X 38
4.2.1.2 Difratometria de raios X 38
4.2.1.3 Granulometria 38
4.2.1.4 Limites de Atterberg 39
4.2.1.5 Picnometria líquida 40
4.2.2 Produção dos tijolos em escala real 40
4.2.2.1 Dosagem 40

4.2.2.2 Preparação dos materiais, produção e cura dos tijolos 42
4.2.3 Caracterização dos tijolos 44
4.2.3.1 Análise dimensional, absorção de água e resistência a compressão simples 44
4.2.3.2 Difratometria de raios X 47
4.2.3.3 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva 47
4.2.4 Análise estatística 47
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 49
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS 49
5.1.1 Fluorecência de raios X 49
5.1.2 Difratometria de raios X 52
5.1.3 Análise granulométrica 56
5.1.4 Limites de Atterberg 58
5.1.5 Picnometria líquida 58
5.2 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS TIJOLOS 59
5.2.1 Observações gerais de produção 59
5.2.2 Análise dimensional 60
5.2.3 Absorção de água 63
5.2.4 Resistência à compressão simples 64
5.2.5 Difratometria de raios X 66
5.2.5 Análise de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva 69
6 CONCLUSÕES 76
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 77
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 78
APÊNDICA A 97

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma área que possui grande importância no contexto socioeconomico de um país. Além disso, deve-se ressaltar também nessa área uma atividade de grande utilização de recursos naturais, consumo de energia e geração de resíduos, onde com um mercado disputado, faz-se necessário estudos sobre a utilização de novos materiais e inovações técnico-científicas com a finalidade de diminuir esses impactos, obtendo eficiência de maneira sustentável (ROQUE; PIERRI, 2019).

Entre os diversos materiais utilizados na construção civil, destacam-se os tijolos, disponibilizados em uma variedade de modelos, utilizando diferentes matérias-primas e metodologias de processamento. Comumente sua produção se dá utilizando a matéria-prima argila submetida a um processo de conformação e levada para sinterização em altas temperaturas, necessárias para que o tijolo adquira propriedades que viabilizem sua utilização. A sinterização acarreta em alto consumo de energia, geração de poluentes e prejuízos ambientais (HWANG, 2015). Uma alternativa para essa metodologia de produção de tijolos é a do tijolo solo-cimento, conhecido comercialmente por tijolo ecológico, constituído por solo, cimento e água, dosados de acordo com suas características, sendo homogeneizados, passando pelas etapas de prensagem e cura úmida, onde nesta última ocorre o processo fisico-quimico de estabilização (MIELI, 2009). Entre as vantagens dos tijolos solo-cimento em comparação aos produzidos com argila sinterizada, destaca-se a excelente relação custo/benefício do sistema construtivo modular dos tijolos solo-cimento, com economia de cerca de 31% em relação ao modelo construtivo tradicional (MENEZES et al., 2017). Outro benefício dos tijolos solo-cimento é a eliminação do processo de sinterização para aumento de resistência mecânica, sendo curados em temperatura ambiente e umidade controlada, alcançando a resistência durante esse processo, a partir de 7 dias (HWANG, 2015).

Embora a produção dos tijolos solo-cimento apresente vantagens em relação aos tijolos sinterizados, é preciso considerar o uso do cimento na estabilização do solo. Isso porque, a produção do cimento possui etapas onde há liberação de altas quantidades de CO_2, um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa (GHANSEL, 2015). Portanto, existe demanda por desenvolvimento de produtos que reduzam o consumo do cimento, fazendo-se necessário o estudo de alternativas que permitam a substituição parcial ou total do cimento como agente estabilizador do solo e contribua para a diminuição dos impactos ambientais. Entre as técnicas

de estabilização do solo que possuem resultados promissores, encontra-se o desenvolvimento da álcali-ativação.

A síntese de materiais álcali-ativados, que são divididos em sistema alto cálcio e baixo cálcio, onde este último pode receber a nomenclatura de geopolímero, pode ser realizada a baixa temperatura (abaixo de 100°C) em presença de solução alcalina e material de aluminossilicato, como exemplo: cinzas volantes, escória de alto forno, argila crua e argila calcinada (XU, 2013; FERONE et. al, 2015). Esses materiais possuem desempenho comparável ao do cimento Portland em muitas aplicações, com excelente aderência a agregados, imobilização de materiais tóxicos e perigosos e redução significativa de emissões de gases do efeito estufa (LI Z et al., 2004; DUXSON, 2007; SHI et al., 2006).

A produção de tijolos por meio de álcali-ativação apresenta resultados promissores, no âmbito de propriedades mecânicas e do ponto de vista ecológico (SHUBBAR et al., 2019). Uma revisão sobre o futuro dos materiais de construção a base de solo foi feita por Shubbar et al. (2019), onde concluiram que a produção de materiais para construção à base da técnica de álcali-ativação, possui menor impacto ambiental, custos relativamente similares ou menores em relação a outras técnicas de produção e com desempenho mecânico e de durabilidade satisfatórios.

De modo a contribuir para a literatura com uma nova metodologia de produção de um material da construção civil, este trabalho propôs o desenvolvimento de tijolos modulares em escala real, modelo este pouco explorado na literatura, utilizando a técnica da álcali-ativação, avaliando diferentes matérias-primas e resíduo industrial na metodologia de produção, propondo uma alternativa que contribua para diminuição de impactos ambientais e reaproveitamento de resíduos.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Produzir em escala real tijolos modulares de solo comprimido e estabilizado a partir da técnica de álcali-ativação, avaliando o método de produção, matérias-primas e suas propriedades.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as matérias-primas envolvidas no processo de produção de tijolos modulares em escala real, obtendo as informações necessárias para estabelecer as dosagens de produção;
- Avaliar e executar o procedimento de preparação dos materiais, conformação por prensagem e metodologia de cura dos tijolos modulares;
- Caracterizar os tijolos modulares produzidos, por meio da análise dimensional, ensaio de absorção de água, ensaio de resistência à compressão simples, adotando como referência de parâmetros as normas técnicas brasileiras para o tijolo solo-cimento, realizando também análise da microestutrutura e interações dos componentes por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), difratometria de raios X (DRX) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS);
- Correlacionar os resultados obtidos nas análises, avaliando a metodologia de produção, suas principais características obtidas e a viabilidade de sua aplicação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão apresenta os conceitos básicos sobre tijolos solo-cimento, matérias-primas utilizadas na produção e sua metodologia de processamento, além de apresentar o que são os materiais álcali-ativados e como são aplicados para a produção de tijolos em geral. Foi realizado também uma consulta em base de dados de artigos científicos publicados em revistas de alto impacto sobre o tema.

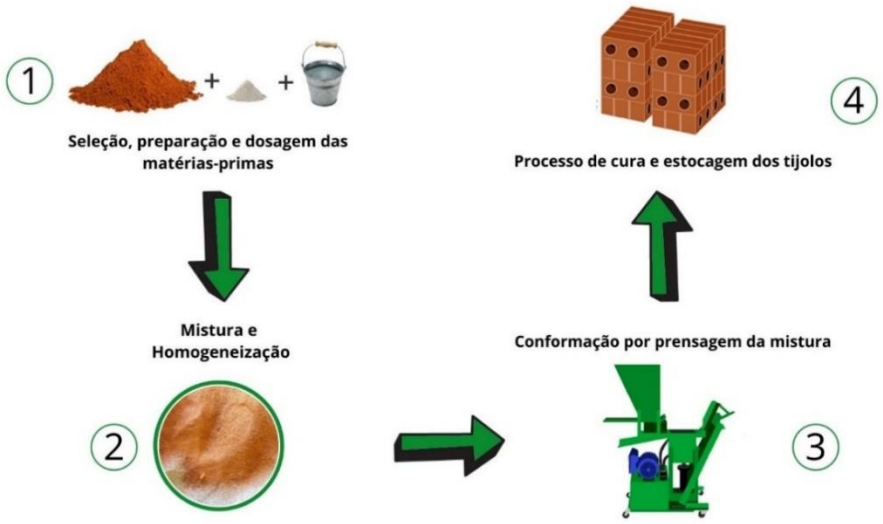
3.1. CONCEITOS BÁSICOS

3.1.1. Tijolo solo-cimento

O tijolo solo-cimento é definido pela norma ABNT NBR 8491:2012 como um componente de alvenaria constituído de uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos em proporções que permitam atender aos requisitos solicitados em norma, sendo sua altura menor que a largura, podendo ser maciço ou vazado (ABNT, 2012). Na metodologia de preparo o solo pode ser destorroado e peneirado,

acrescido de cimento e água, dosados de acordo com as características das matérias-primas empregadas, sendo misturados e homogeneizados e posteriormente prensados, adquirindo assim o formato específico, de acordo com o molde utilizado, seguindo para acondicionamento, onde passará pelo processo de cura em umidade controlada, adquirindo as propriedades necessárias, e por fim são armazenados para posterior utilização (MAZZEO, 2003). O esquema simplificado do ciclo produtivo dos tijolos solo-cimento é apresentado na figura 1.

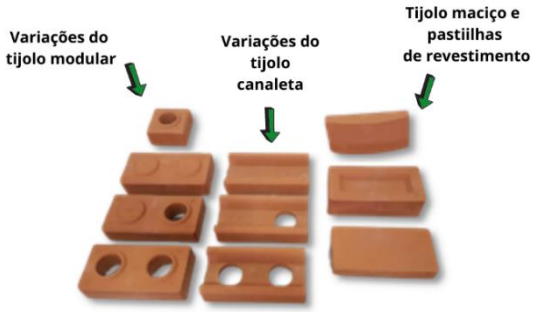
Figura 1 - Esquema simplificado do ciclo produtivo do tijolo solo-cimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta metodologia é possível a produção de diferentes modelos de tijolos, como o tijolo modular de dois furos, meio tijolo, tijolo canaleta, entre outras formas utilizadas no sistema construtivo modular (Figura 2).

Figura 2 – Exemplos de modelos de tijolos solo-cimento e revestimentos utilizados na construção modular.

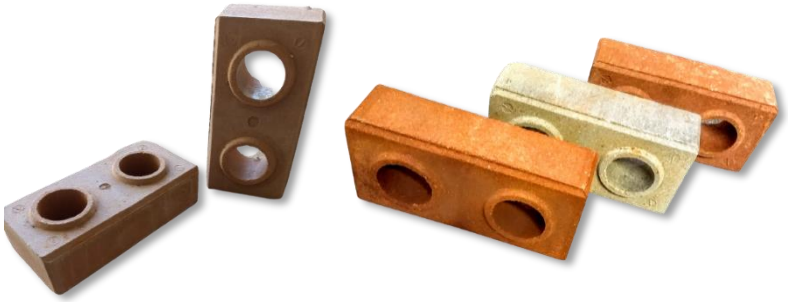


Fonte: Verde Equipamentos (2018). Adaptada pelo autor.

As normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que definem os parâmetros e metodologias do tijolo e bloco de solo-cimento sem função estrutural no Brasil, são a NBR 10833:2012, NBR 10834:2012, NBR 10836:2012, NBR 8491:2012 e NBR 8492:2012, além de outras normas de referência, citadas neste conjunto de normas.

De acordo com a norma NBR 8491:2012, o tijolo solo-cimento vazado apresenta furos verticais com volume inferior a 85% do volume total aparente, espessura mínima das paredes em seu entorno deve ser de 25 mm e a distância mínima entre dois furos de 50 mm (ABNT, 2012). A figura 3 apresenta o modelo de tijolo vazado produzido no Brasil, o tijolo modular de 2 furos com encaixes macho/fêmea.

Figura 3 – Exemplos do Tijolo modular de 2 furos com encaixe macho/fêmea.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Durante o processo de estabilização do solo com o cimento, ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une as partículas adjacentes do solo, proporcionando a resistência inicial. Paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado (ABIKO, 1980).

A tabela 1 apresenta os ensaios e parâmetros previstos pela norma ABNT NBR 8491:2012 para o tijolo solo-cimento, em valores inviduais e valores médios da amostragem que o tijolo deve apresentar a partir do sétimo dia de cura. De acordo com os resultados obtidos nos ensaios, a norma prevê critérios de aceitação e rejeição.

Tabela 1 - Parâmetros estabelecidos para o tijolo solo-cimento.

Ensaio	**Parâmetros**
Análise dimensional	Tolerância de ± 1 mm para dimensões nominais
Absorção de água	Média dos valores ≤ 20% Valor individual ≤ 22%
Resistência a compressão	Média dos valores ≥ 2 MPa Valor individual ≥ 1,7 MPa

Fonte: Norma ABNT NBR 8491:2012.

Os tijolos de solo estabilizados com cimento também podem ser conhecidos como tijolo de solo comprimido (TSC) ou bloco de terra comprimido (BTC) e são utilizados em diversos países, com exemplos de sucesso na construção civil. Na sua utilização, destaca-se o menor custo na construção, metodologia construtiva com economia de tempo, menor geração de resíduos e melhor qualidade do ambiente interno da edificação, quando comparado com o uso de materiais tradicionais (SAID et al. 2018; ZHANG et al. 2017; KARIYAWASAM et al. 2016; GOUNY et al. 2013). A figura 4 apresenta um exemplo esquemático do sistema construtivo, que permite projetar o sistema hidráulico e elétrico, reduzindo a geração de residuos durante a obra, podendo também otimizar o tempo de execução.

Figura 4 - Exemplo esquemático do sistema construtivo modular.

Fonte: Verde Equipamentos (2018). Adaptada pelo autor.

3.1.2. Solo

Solo é o produto do intemperismo de rochas e da transformação das substâncias orgânicas e minerais da superfície da terra sob a influência dos fatores ambientais que operam por um período de tempo muito longo, apresentando organização e morfologia definidas. O solo apresenta quatro componentes (mineral, orgânico, água e ar) arranjados no espaço para formar o corpo do solo, cuja diferenciação ocorre em horizontes, formados a partir da pedogênese, que resulta em um grande número de classes de solos (SCHROEDER, 2017).

A parte sólida do solo, insolúvel em água, é constituída de minerais e material orgânico, sendo que os minerais podem ser inertes, como é o caso da fração grosseira e quimicamente ativos, como os argilominerais, responsáveis pelas propriedades de plasticidade e coesão do solo (MIELI, 2009). O solo pode ser classificado de acordo com a sua granulometria (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação granulométrica do solo.

Nomenclatura	**Diâmetro das partículas (mm)**
Bloco de rocha	Ø > 1000
Matacão	200 < Ø < 1000
Seixo	60 < Ø < 200
Grânulo	2 < Ø < 60
Areia grossa	0,6 < Ø < 2
Areia média	0,2 < Ø < 0,6
Areia fina	0,06 < Ø < 0,2
Silte	0,002 < Ø < 0,06
Argila	Ø < 0,002

Fonte: NBR 6502/1995 (ABNT, 1995).

O solo é a matéria-prima empregada em maior quantidade na produção de tijolos solo-cimento. De acordo com a norma NBR 10833:2012, o solo utilizado para a produção destes tijolos precisa atender as características apresentadas na tabela 3, bem como, não conter matéria orgânica em quantidade que prejudique a hidratação do cimento (ABNT, 2012). Para o Instituto

Americano do concreto (ACI) (2009), o solo não pode conter teor de matéria orgânica superior a 2% e o pH deve ser maior ou igual a 5,5 para não interferir na hidratação do cimento.

Tabela 3 - Características do solo para produção do tijolo solo-cimento.

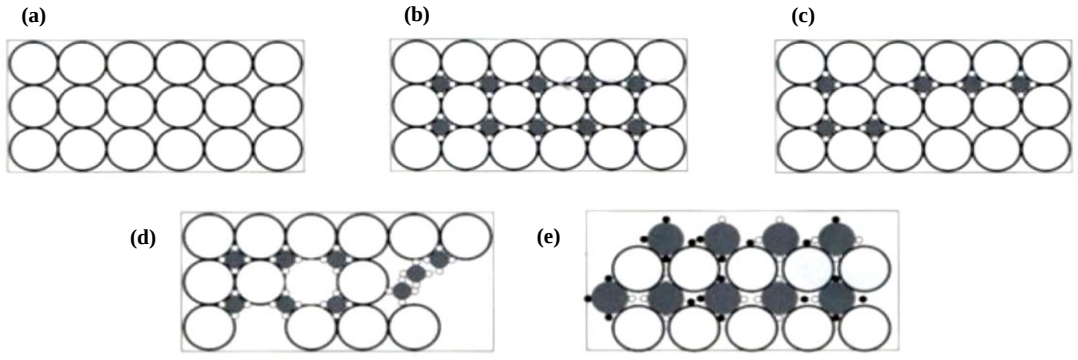
Características	**Requisitos (%)**
% passando na peneira ABNT 4,8 mm (n.º 4)	100
% passando na peneira ABNT 0,075 mm (n.º 200)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Limite de plasticidade	≤ 18

Fonte: NBR 10833 (ABNT, 2012).

A caracterização granulométrica do solo utilizado para a produção do tijolo solo-cimento é fundamental para se obter a correta dosagem de matérias-primas, e quando necessário, estabelecer correções granulométricas visando obter a máxima densidade de empacotamento. O estudo do empacotamento é necessário para a correta proporção das matérias-primas particuladas, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (MCGEARY, 1961).

A figura 5 apresenta modelos de distribuição de partículas e de comportamento em função de tamanhos, quantidade e relação com a eficiência de empacotamento das partículas.

Figura 5 - Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento.



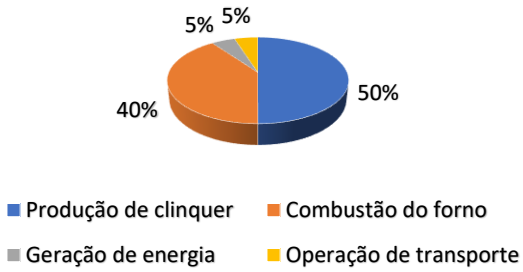
(a) Sistema monodisperso; (b) Máxima densidade de empacotamento teórica; (c) Deficiência de partículas pequenas; (d) Deficiência de partículas grandes; (e) Distribuição inadequada de tamanhos de partículas.

Fonte: Oliveira et al. (2000).

3.1.3. Impactos ambientais do cimento

A produção do cimento é responsável pela geração de poluentes atmosféricos, tornando imprescindíveis estudos que possam resultar em alternativas que reduzam seus impactos ambientais. O modelo tradicional de produção, bem como as matérias-primas utilizadas no processo levam a um consumo de cerca de 9% da demanda global de energia, além de ser responsável por aproximadamente 5% das emissões antrópicas de dióxido de carbono (RICHARDS; AGRANOVSKI, 2017). A figura 6 apresenta a contribuição na emissão de CO_2 das principais etapas de produção do cimento.

Figura 6 - Geração de CO_2 nas diferentes etapas de produção do cimento.



Fonte: Summerbell et al. (2016); Maddalena et al. (2018). Adaptada pelo autor.

O Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) relatou que entre janeiro e setembro de 2020, o valor acumulado da comercialização de cimento foi de 44,6 milhões de toneladas e que só no mês de setembro de 2020, foram comercializadas 5,8 milhões de toneladas de cimento no Brasil (SNIC, 2020). Para Assi et al. (2016), encontrar alternativas ao cimento Portland é de extrema importância devido aos altos níveis de emissão de dióxido de carbono associados ao seu processo de fabricação.

Neste contexto, este estudo propõe a substituição integral do cimento Portland pela técnica de álcali-ativação para a estabilização do solo na produção de tijolos.

3.1.4. Álcali-ativação

A álcali-ativação é um processo químico de transformação de estruturas vítreas em um material com ação cimentante (PALOMO et al., 1999). Sua produção pode ser feita a partir de

materiais precursores como metacaulim, cinzas volantes e/ou escória de alto forno, e ativador alcalino como solução de NaOH ou KOH, por exemplo.

Com base nas características das matérias-primas utilizadas no processo, a ativação alcalina pode ser dividida em duas categorias: Sistema alto cálcio e sistema baixo cálcio (PACHECO-TORGAL et al., 2014).

No sistema alto cálcio, materiais ricos em cálcio, com proporção de $SiO_2 + CaO > 70\%$, como por exemplo a escória de alto forno, são ativados alcalinamente tendo como produto da reação principal o gel C-A-S-H, o silico-aluminato de cálcio hidratado. Já no sistema baixo cálcio, os materiais contém uma predominância de SiO_2 e Al_2O_3 e baixo teor de CaO, como o metacaulim e as cinzas volantes e o produto principal da reação é um polímero inorgânico, um gel N-A-S-H, o hidrato de aluminossilicato alcalino, semelhante a zeólita. Este sistema também é conhecido como geopolímero (DAVIDOVITS, 1994b; PINTO, 2004; PROVIS, 2014). Há também a ocorrência de um terceiro tipo de ativação alcalina, sendo uma combinação dos dois sistemas mencionados, um modelo híbrido com formação de estruturas complexas com géis de C-A-S-H e (N,C)-A-S-H (PACHECO-TORGAL, 2014). No atual estudo, foi considerado o termo álcali-ativação de maneira geral, para se referir às reações desenvolvidas no programa experimental pois foram propostos sistemas baixo e alto cálcio no desenvolvimento dos tijolos, estando o termo de acordo com os autores Provis (2014) e Pacheco-Torgal (2014). O termo geopolímero é utilizado para referências que tratam especificamente o sistema baixo cálcio.

A variedade de precursores aluminossilicatos disponíveis para utilização na síntese de materiais álcali-ativados se difere quanto à viabilidade, à reatividade e ao custo. Essa variação apresenta esses materiais como versáteis e adaptáveis, sendo considerados como um dos componentes-chave entre uma listagem de materiais cimentícios usados ao redor do mundo para o desenvolvimento do futuro da indústria de materiais sustentáveis aplicados à construção civil (PROVIS, 2018).

A microestrutura, bem como, as propriedades mecânicas dos materiais álcali-ativados estão relacionadas a parâmetros como composição química e reatividade da matéria-prima utilizada, natureza e concentração da solução ativadora, além do procedimento de cura (YUAN et al., 2016).

Segundo Pinto (2004), a semelhança com a estrutura porosa das zeólitas permite aos geopolímeros que confinem, por exemplo, metais pesados, resíduos radioativos, materiais tóxicos e rejeitos de tratamento de efluentes, além de apresentarem elevada resistência a compressão, resistência ao fogo e baixa retração. Através dessas propriedades, os materiais

álcali-ativados aparecem como opção ao cimento Portland convencional (SINGH; MIDDENDORF, 2020).

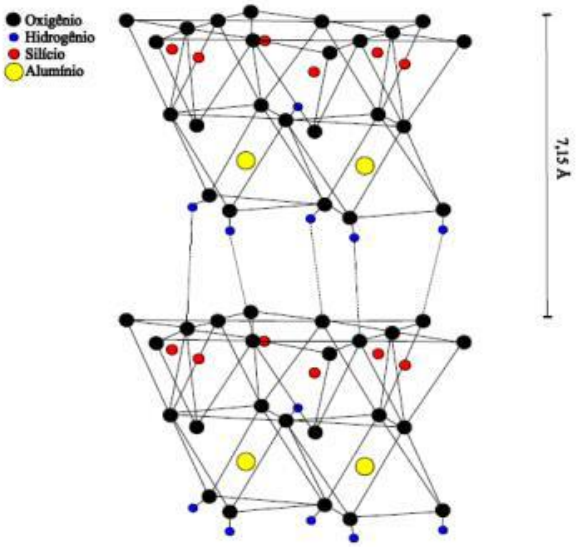
Davidovits (2011) pontua que a produção de uma tonelada de cimento geopolimérico, utilizando a caulinita como precursor, gera 0,18 toneladas de CO_2, relativo à queima de combustível necessária para a calcinação do material, comparado com 1 tonelada de CO_2 liberado na produção de cimento Portland, resultando em redução da emissão de, aproximadamente, seis vezes para a produção do geopolímero. Essa potencial redução de emissão de CO_2 vem gerando aumento do reconhecimento e do interesse por esses materiais (PROVIS, 2014).

3.1.5. Metacaulim e escória de alto forno como materiais precursores

O metacaulim é um aluminossilicato obtido por meio da calcinação de caulinita, que consiste em um processo de ativação térmica, em temperaturas entre 650°C a 800°C, variando de acordo com a pureza e cristalinidade dessas argilas (LI et al., 2004).

O Caulim é uma rocha composta de silicatos hidratados de alumínio, como a caulinita e a haloisita, além de substâncias sob a forma de impurezas como areia, quartzo, mica, partículas de feldspato, óxidos de ferro e titânio, entre outras. Embora o mineral caulinita seja o principal constituinte do caulim, outros elementos além do alumínio, silício, hidrogênio e oxigênio acham-se geralmente presentes. Entre os silicatos hidratados de alumínio, a caulinita ($Al_2O_32SiO_22H_2O$) é a mais empregada no processo de calcinação, possuindo estrutura lamelar constituída pelo empilhamento regular de uma camada de tetraedros de silício com outra de octaedros de alumínio, na relação 1:1 (Si:Al), com espaçamento basal de aproximadamente 7,0 Å (SCORZELLI et al., 2008). A figura 7 apresenta a estrutura da caulinita, porém na composição da rocha caulim, outros aluminossilicatos hidratados podem estar presentes, como por exemplo, haloisita, metahaloisita, nacrita e diquita (CHENG et al., 2012).

Figura 7 - Representação estrutural da caulinita.



Fonte: Cheng et al. (2012).

A calcinação é um tratamento térmico da argila caulinítica a temperaturas de, aproximadamente, 750ºC, que induz formação de fases amorfas ($Al_2O_3.2SiO_2$), que apresentam maior dissolução em meios alcalinos em comparação com argilas brutas, devido à reação mais intensiva das fases amorfas. Quando as argilas cauliníticas são submetidas ao tratamento térmico, ocorre a desidroxilação, levando à quebra ou uma ruptura parcial da estrutura cristalina, com a formação do metacaulim (SABIR et al., 2001). Esse processo de obtenção do metacaulim por meio da calcinação da argila caulinítica, pode ser representado pela equação (1):

$$Al_2O_3 \bullet 2SiO_2 \bullet 2H_2O \rightarrow Al_2O_3 \bullet 2SiO_2 + H_2O\uparrow \qquad (1)$$

Peyne et al. (2017), investigou o uso potencial de um solo de característica argilosa, como fonte precurssora de aluminossilicato para a síntese de materiais geopoliméricos. Os resultados da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier no modo de reflexão total atenuada (ATR), utilizada para monitorar os grupos funcionais das misturas sintetizadas, mostraram que a etapa de calcinação melhora a reatividade da argila utilizada (PEYNE et al., 2017). Como a argila caulinítica não contém carbonatos, não é liberado CO_2 durante o aquecimento, levando à redução de CO_2 incorporado nos materiais finais, na substituição de cimento ou cal (RAMEZANIANPOUR et al., 2012; WANG, 2005).

Já a escória de alto-forno trata-se de um subproduto da produção do ferro gusa e sua formação ocorre por meio da interação química entre o minério de ferro, carvão vegetal ou coque e fundentes como calcário e dolomita, onde no alto forno ocorre combustão e redução do minério, sendo o metal liquído gotejado e coletado no fundo e a escória se estabelece na superfície, sendo retirada regularmente (GALUPPO, 2020). Estima-se que para se obter uma tonelada de ferro gusa, são gerados entre 200 kg e 300 kg de escória de alto forno que necessitará de correta destinação (LANGARO et al., 2016).

Os principais constituintes da escória provenientes do minério de ferro podem ser: sílica, alumina, óxido de titânio, óxido de manganês, dissulfeto de cálcio, óxido de ferro, óxido de zinco, óxido de chumbo, cal, óxido de magnésio, pentoxido de fósforo, óxido de potássio, óxido de sódio e sulfeto de cálcio, entre outros. A composição da escória de alto-forno sofrerá alteração dependendo dos minérios, do tipo de combustível e das impurezas no coque quando este é utilizado (COSTA et al., 2019).

As escórias produzidas por alto forno alimentadas com carvão vegetal normalmente são classificadas como ácidas e quando a alimentação se dá pelo coque, as escórias são básicas. Esta classificação é feita através da razão $CaO:SiO_2$ das escórias, onde o valor sendo maior que 1, classifica-se como ácida e menor que 1, básica (JOHN; AGOPYAN, 2000).

A organização atômica é determinante nas propriedades aglomerantes da escória, porque se cristalizada, ela não apresenta propriedade aglomerante relevante, enquanto que no estado vítreo (não cristalino) possui capacidade aglomerante (DE SOUZA JUNIOR, 2007). A escória possui uma estrutura porosa, é geralmente amorfa, com densidade aparente na faixa de 2,70 g/cm³ a 3,30 g/cm³, alta resistência mecânica, alto ponto de fusão, com propriedades que a tornam um material com potencial tecnológico para aplicações na engenharia (DHOBLE; AHMED, 2018).

De maneira geral, outro fator que também deve ser levado em conta em relação a fonte de material precursor é a granulometria média das partículas, considerando que, quanto mais finas e maior área superficial, maior será a dissolução dos aluminossilicatos, contribuindo para a eficiência do processo de àlcali-ativação, gerando assim estruturas resistentes e de maior densidade (KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007).

3.1.6. Ativadores alcalinos

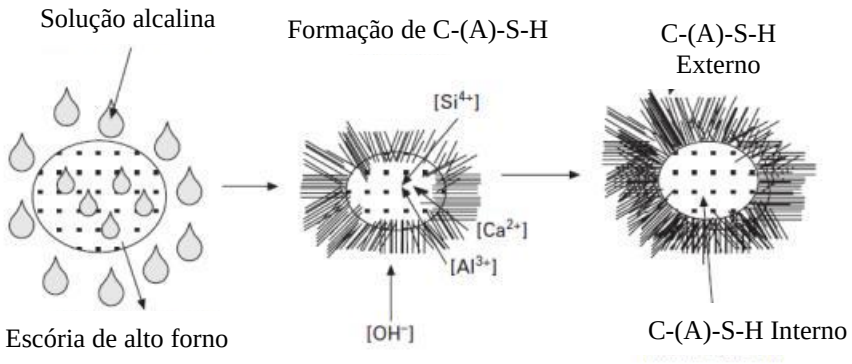
A seleção dos ativadores alcalinos deve considerar as características do precursor a ser utilizado na ativação (COSTA et al., 2013). Soluções de hidróxidos e/ou silicatos são os mais mencionados na literatura para se utilizar neste processo, onde a álcali-ativação deverá ocorrer em ambiente de alta alcalinidade para ser possível dissolver certa quantidade de sílica e alumina, bem como hidrolisar a superfície das partículas das matérias-primas (VAN JAARSVELD et al., 1997). Quando se usa apenas um ativador, tem-se a denominação de ativador simples e quando se utiliza uma mistura de compostos alcalinos, tem-se um ativador composto (SANTA, 2012).

Para Pinto (2004), o que rege o tipo, a dosagem e a concentração do ativador também é o material precursor, onde sua composição química e o grau de finura condicionam a reação de ativação. Segundo este autor, deve-se realizar a preparação do ativador com antecedência suficiente para evitar que ocorram processos exotérmicos em elevadas temperaturas. Singh e Middendorf (2020) também relatam que é necessário a preparação da solução alcalina ativadora, com concentração molar entre 8 e 16 mols L^{-1}, com antecedência de 24 horas, antes de ser acrescentado o precursor.

3.1.7. Mecanismos de reação

Para o sistema alto cálcio, tendo a escória de alto forno como material precursor fonte de SiO_2 e CaO por exemplo, o mecanismo de reação se dá a partir do contato do material com a solução alcalina, ocorrendo o aumento do pH no meio que provocará ataque às partículas de escória, que reagem e formam os produtos de hidratação, que são insolúveis e se depositam na superfície das partículas. (GARCIA-LODEIRO et al., 2013). A hidratação das partículas continua acontecendo e, a longo prazo se completa, redistribuindo a porosidade e densificando a matriz. O cátion alcalino age como catalisador das reações iniciais de hidratação, através da troca catiônica com os íons Ca^{2+} e os cátions alcalinos são consumidos pelas estruturas formadas, na medida que acontecem as reações de álcali-ativação (GARCIA-LODEIRO et al., 2014). A Figura 8 apresenta um modelo que descreve o mecanismo de reação.

Figura 8 - Modelo de álcali-ativação para escória de alto forno.



Fonte: Garcia-Lodeiro, et al. (2013). Adaptada pelo autor.

Os principais produtos de hidratação são géis do tipo C-(A)-S-H, amorfos e possuem relação Ca:Si mais baixa do que o produto de hidratação do cimento Portland (C-S-H). Os produtos secundários, assim como a composição e a estrutura do C-(A)-S-H, dependem da composição e estrutura da escória, do tipo e concentração do ativador utilizado, e da condição de cura à que o material é submetido (GARCIA-LODEIRO et al., 2013). O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) é comumente encontrado com relação atômica de Ca:Si inferior a 3, com variados graus de cristalinidade (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2007)

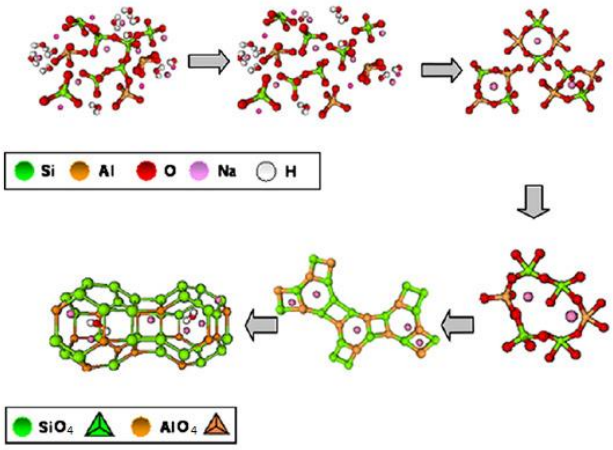
Para o sistema baixo cálcio, com o metacaulim como material precursor fonte de aluminossilicato por exemplo, a partir de sua álcali-ativação em contato com solução concentrada de hidróxido alcalino ou de silicatos que ao se estabilizar, origina o geopolímero com estruturas poliméricas amorfas com ligações Si – O – Al – O – Si interligadas (MAJIDI 2009; VAN DEVENTER et al., 2006).

De acordo com Liew (2016), as matérias-primas devem conter mais de 70% de compostos de SiO_2 e Al_2O_3 para a produção, o que pode ser encontrado em diferentes tipos de solos e outras matérias-primas como resíduos industriais.

Os autores Duxson et al. (2007), Palomo et al. (2005) e Shi et al. (2011), sugerem um modelo de mecanismo para a ativação alcalina no sistema baixo cálcio, em que, inicialmente as partículas se dissolvem em contato com a solução alcalina e os silicatos e aluminatos são liberados, provavelmente, na forma de monômeros. Posteriormente, as moléculas menores se aglutinam, formando grandes moléculas e precipitam na forma de gel, sendo possível observar um pequeno grau de ordem estrutural. As condições existentes neste estágio favorecem a formação de um composto rico em Al metaestável. Os tetraedros de SiO_4 e AlO_4 se unem para formar anéis com quatro unidades tetraédricas secundárias. Os cátions que neutralizam a carga

elétrica resultante da substituição de um silício por um alumínio ficam posicionados nas aberturas da estrutura. A alta taxa de alumínio nessa reação intermediária (denominada Gel 1, com razão Si:Al de aproximadamente 1) pode ser explicada pela alta concentração de íons nas primeiras horas da reação. Este fato se dá pois as ligações Al-O são mais fracas do que as ligações Si-O (PROVIS et al., 2005; PALOMO et al., 2005). Com o desenvolvimento da reação, as ligações Si-O do precursor se dissolvem, favorecendo a evolução do Gel 1 (rico em Al) para um novo Gel 2, onde a razão Si:Al é de aproximadamente 2. Existe ordem tridimensional apenas em uma escala atômica à nanométrica. Na escala microestrutural, o principal produto da reação é um gel aluminossilicato alcalino amorfo, N-A-S-H, onde a composição irá variar, de acordo com o precursor, ativador alcalino e/ou com as condições de síntese (SHI et al., 2011 apud VALADARES, 2019).A Figura 9 apresenta o modelo do processo de ativação alcalina proposto por Shi et al. (2011).

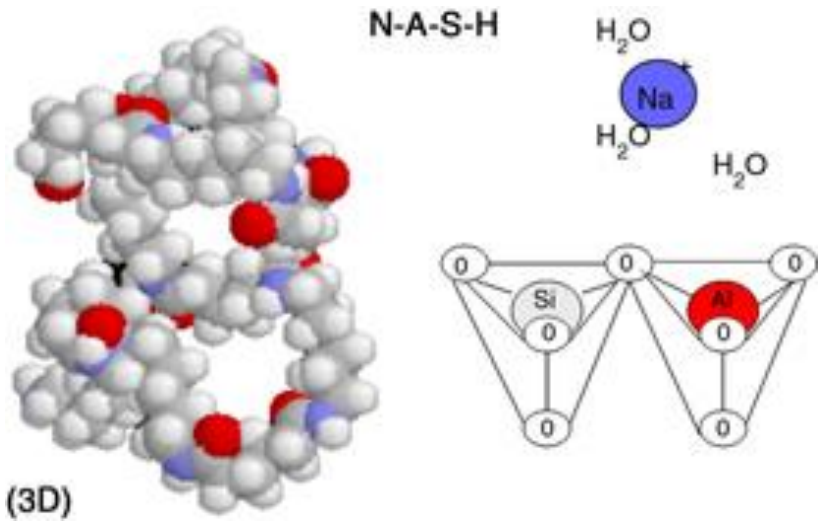
Figura 9 – Representação esquemática do processo de álcali-ativação baixo cálcio.



Fonte: Shi et al. (2011).

Esses géis (N-A-S-H) são caracterizados por uma estrutura tridimensional em que o Si é encontrado em uma variedade de ambientes, com predominância de Q4 e nAl (n = 0, 1, 2, 3 ou 4) unidades (PALOMO, 2015). Na figura 10, pode ser observada a projeção do gel N-A-S-H.

Figura 10 - Projeção plana da estrutura tridimensional de um gel N-A-S-H.



Fonte: Palomo (2015).

Deve-se ressaltar que a razão de Si:Al é um fator que afeta diretamente a dissolução, hidrólise e condensação dos geopolímeros, sendo um dos parâmetros de grande importância para sua síntese (LIMA, 2018). A função do aluminio é de atuar na regulação do tempo de pega da reação e a do silício na resistência mecânica do material (VASSALO, 2013). Dessa forma, aumentando as relações de Si:Al, ocorrerá um incremento de resistência mecânica (LIMA, 2018). Porém, deve-se ter cuidado com valores elevados que possam diminuir a estabilidade química e favorecer a ocorrência de eflorescência (HE et al., 2016). Para Lemougna et al. (2016), a razão sílica:alumina deve estar entre 3,3 e 4,5 para aplicações em obras de engenharia.

A temperatura durante a etapa de cura também é uma variável que pode ocasionar alterações nas propriedades dos geopolímeros, pois mesmo podendo ser realizado a temperatura ambiente, ocorrem melhorias nas propriedades do produto final com o aumento adequado de temperatura nesta etapa. Sindhunata et al. (2006), verificaram que a temperatura acelera a cinética da reação de polimerização (dissolução dos aluminossilicatos na presença de solução alcalina e condensação dos géis) e esse fato pode melhorar significativamente o desempenho mecânico do material. Porém, uma temperatura muito alta pode enfraquecer a estrutura e diminuir o desempenho mecânico do geopolímero. Segundo Severo et al. (2013), temperaturas por volta de 60 ºC mostram-se favoráveis, sendo que o tempo de exposição precisa ser controlado.

Vassalo (2013), realizou um estudo para obter um geopolímero, utilizando como material precursor o metacaulim com solução alcalina de hidróxido de sódio, realizando a cura

em temperatura ambiente e em estufa a 85 ± 3°C. O geopolímero foi moldado com a variação das molaridades do ativador alcalino de 12 mol L^{-1}, 15 mol L^{-1} e 18 mol L^{-1} de NaOH em água, sendo parte das amostras curadas à temperatura ambiente e a outra metade em estufa. As amostras foram submetidas a ensaio de compressão na idade de 7 dias e 28 dias, e as amostras de 12 mol L^{-1} de solução alcalina curada em estufa e curada em temperatura ambiente atingiram maior resistência à compressão, com leve superioridade do geopolímero curado em estufa.

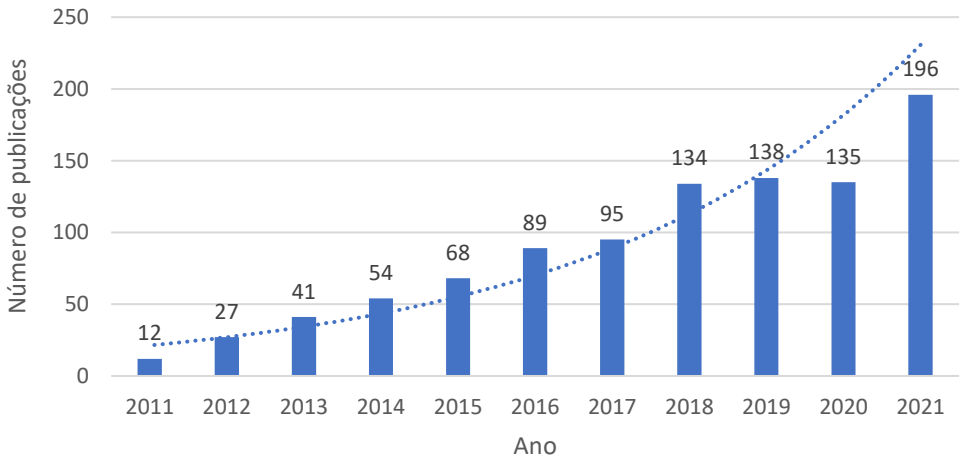
3.2. ÁLCALI-ATIVAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS

Diversos trabalhos relatam a possibilidade de aplicação da técnica de álcali-ativação para a produção de tijolos, considerando aspectos sustentáveis, econômicos, produtivos e de resistência, quando comparados com modelos produtivos já estabelecidos no mercado, como o tijolo sinterizado. Cabe ressaltar que a maioria dos trabalhos realizaram os estudos com base em corpos de prova cilíndricos, prismáticos com dimensões reduzidas, prismáticos maciços ou cúbicos maciços, além de variações na metodologia de processamento, com variações nas dosagens dos materiais precursores, variações no uso de soluções ativadoras compostas ou simples, variações na temperatura de cura, além das variações do método de conformação da mistura. Através do levantamento realizado no portal de periódicos da Capes, buscando por artigos com o termo "Álkali-activation brick" entre os anos de 2020 e 2022, não foi encontrado trabalhos que realizaram estudos utilizando o modelo de tijolo modular vazado de 2 furos em escala real, como o proposto neste trabalho.

Coraspe (2021) realizou um estudo bibliométrico e patentométrico sobre os materiais álcali-ativados e concluiu que há um crescente interesse tanto da comunidade científica quanto da industria neste assunto, tornando-se uma alternativa possível tanto para a elaboração de materiais mais ecológicos quanto para a reavaliação dos resíduos industriais. Apesar do grande volume de patentes encontradas, a tecnologia ainda está em fase de crescimento e desenvolvimento, o que representa uma oportunidade para pesquisa e inovação na área (CORASPE, 2021).

Um levantamento realizado no portal de periódicos da Capes, buscando por artigos com o termo "Álkali-activation brick" publicados entre os anos de 2011 a 2021, registrou 615 resultados no total. A figura 11 apresenta o gráfico com a relação das publicações ao longo dos anos, com a tendência de aumento no número de publicações sobre o tema.

Figura 11 - Número de publicações registradas no portal da Capes no período de 2011 a 2021, utilizando na pesquisa, o termo "Álkali-activation brick".



Fonte: Elaborada pelo autor.

Zhang (2018) realizou uma revisão de estudos sobre a produção de tijolos visando a diminuição de impactos ambientais e concluiu que a geopolimerização é uma alternativa preferível a ser empregada na produção de tijolos para reduzir impactos ambientais, mas destaca que análises de custos e benefícios precisam ser conduzidas para avaliação da viabilidade do processo. Também é preciso orientar a indústria de tijolos em direção a inovações em produção, sendo este um desafio para futuras pesquisas (ZHANG, 2018).

Uma revisão sobre o futuro dos materiais de construção a base de solo, elaborado por Shubbar (2019), concluiu que a produção de materiais para construção à base de precursor geopolimérico possuem menor impacto ambiental, custos relativamente similares ou menores em relação a outras técnicas de produção, apresentando desempenho mecânico e de durabilidade satisfatórios. No entanto, os ativadores alcalinos utilizados na produção precisam ser melhor avaliados para sua escolha e utilização, com relação à concentração molar e seus impactos.

Em relação às variações de parâmetros de produção, Ahmari et al. (2012), avaliaram o uso de rejeitos de minas de cobre para produzir tijolos maciços geopoliméricos, considerando o efeito de quatro fatores principais: a concentração de NaOH (entre 10 e 15 M), o teor inicial de água (de 8% a 18%), a pressão de conformação (de 0 a 35 MPa) e a temperatura de cura (entre 60°C e 120°C), nas propriedades físicas, mecânicas, composição e microestrutura dos corpos de prova cilíndricos de geopolímeros. Com base nos resultados experimentais, estes

autores concluíram que a produção é viável. Obteve-se melhores resultados com ativador de concentração 15 M, maiores teores de água inicial e pressão de conformação o suficente para não eliminar o teor de água inicial, com temperatura de cura a 90°C, atendendo os requisitos da norma ASTM usada como parâmetro (AHMARI et al., 2012).

Gavali et al. (2019), avaliaram o desenvolvimento de tijolos maciços por álcali-ativação usando resíduos industriais como escória de alto forno, cinza de caldeira, cinza volante, cinza de casca de arroz e bagaço de cana-de-açucar, rejeito de mineração, e concluíram que esse tipo de produção pode ser vantajoso pela produção com alto conteúdo de resíduos e baixo gasto energético. Comparado aos tijolos tradicionais, os tijolos álcali-ativados podem apresentar maior resistência, durabilidade e sustentabilidade, porém ainda possuem limitações quanto à legislação no uso de materiais, falta de padrões e normas disponíveis, ocasionando dificuldades no projeto (GAVALI et al., 2019).

Amin et al. (2017) avaliaram a fabricação de tijolos macicços geopoliméricos usando resíduos de particulas cerâmicas, e obtiveram a resistência de 9 MPa em teste de compressão com corpos de prova cúbicos, e o estudo de viabilidade econômica revelou-se que para a produção de mil tijolos de geopolímero, usando as matérias-primas investigadas no trabalho (10% $Ca(OH)_2$, 1% NaOH, 38% H_2O e 89% metacaulim) houve uma redução de custo de 30% em relação aos tijolos convencionais de argila sinterizada (AMIN et al., 2017).

Entre os precursores, a utilização do metacaulim e da escória de alto forno tem sido relatada como promissora. Sore et al. (2018) analisaram a estabilização de blocos maciços de solo comprimidos, utilizando ligante geopolimérico e concluíram que para um teor de geopolímero de 15%, esses materiais apresentaram propriedades comparáveis aos blocos estabilizados com cimento Portland, em particular no que diz respeito à sua estabilidade na água, com um período de cura a baixas temperaturas. A resistência mecânica foi maior, com o aumento da porcentagem de geopolímero utilizado. Sore et al. (2018) destacam que para pesquisas futuras, deve-se avaliar o impacto ambiental dessa produção, por meio do ciclo de vida, bem como, aspectos econômicos. Hodhod et al. (2020) concluíram que a adição de metacaulim às amostras em diferentes relações aumentaram a resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos de geopolímero com valores de até 250,26 kg cm^{-2} em 28 dias de cura.

Sithole et al. (2020) investigaram a ativação alcalina da escória de alto forno com solução de NaOH e KOH, concluindo-se que a solução de NaOH favore as reações da álcali-

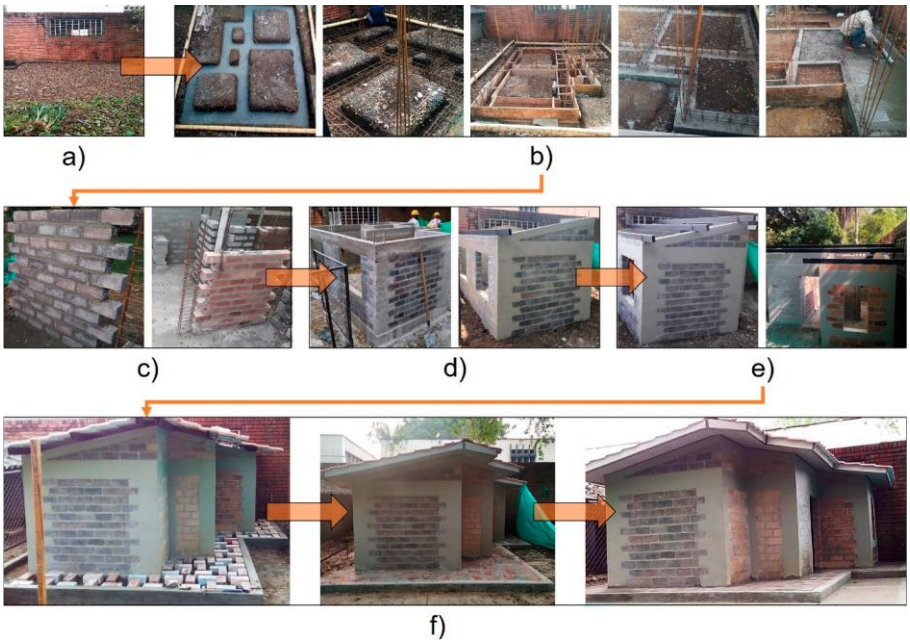
ativação e que os corpos de prova cúbicos produzidos atenderem os requisitos da norma ASTM C126-99 e ASTM C216-07.

Robayo-Salazar et al. (2021) analisaram o projeto e a construção de um protótipo de casa utilizando blocos maciços produzidos pela técnica de ativação alcalina ou geopolimerização (Figuras 12 e 13), demonstrando o potencial deste material, atendendo todas as especificações físico-mecânicas estabelecidas pelas normas e regulamentos de construção garantindo o desempenho estrutural e de resistência a terremotos.

Figura 12 - Projeto de habitação utilizando blocos produzidos pela técnica de álcali-ativação.

Fonte: Robayo-Salazar et al. (2021). Adaptada pelo autor.

Figura 13 - Etapas da construção da habitação utilizando os blocos produzidos a partir da técnica de álcali-ativação.



a) Adaptação do terreno, b) Moldes para fundação de concreto e chão, c) Construção de muro, d) Preenchimento de colunas e vigas, e) Instalação de telhado e, f) construção de calçada e acabamento final.

Fonte: Robayo-Salazar et al. (2021). Adaptada pelo autor.

A estimativa de impacto ambiental calculada pela análise do ciclo de vida de blocos maciços produzidos pela álcali-ativação com diferentes precursores como escória de alto forno, resíduos da construção e resíduos de cerâmica vermelha apresentaram um redução de impacto na faixa de 25,4% a 54,7% em relação a blocos de concreto (ROBAYO-SALAZAR et al., 2021). Esses resultados demonstram o potencial destes materiais para aplicação na construção de casas ecológicas (ROBAYO-SALAZAR et al., 2021).

Dessa forma, este trabalho busca contribuir com informações para a literatura apresentando um estudo sobre a produção de tijolos modulares de solo comprimido e estabilizado a partir da técnica de álcali-ativação, utilizando como materiais precursores metacaulim ou escória de alto forno, ativador simples com solução de NaOH ou ativador composto com solução de NaOH e cal hidratada, com ou sem cura térmica. Esse modelo de produção em escala real ainda é pouco explorado na literatura, bem como o modelo de tijolo, justificando-se como um estudo científico sobre o comportamento dos materiais, promovendo alternativas que possam contribuir com a diminuição de impactos ambientais e para o reaproveitamento de residuos industriais.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1. Solo

Foi utilizado um solo da cidade de Pindamonhangaba-SP, fornecido pela empresa “Verde Equipamentos”, adquirido dentro das permissões legais. Este solo foi avaliado como matriz na produção dos tijolos, caracterizado como um solo que contém maior proporção de argila na composição, necessitando assim de correção granulométrica com areia para se adequar ao modelo de produção proposto.

4.1.2. Areia

A areia foi adquirida comercialmente, classificada como areia média e utilizada para realizar correção granulométrica do solo, com o objetivo de melhorar o empacotamento das

particulas e a desmoldagem do tijolo durante o processo de conformação por prensagem. O método para a correção granulométrica está descrito no item 4.2.1.3.

4.1.3. Metacaulim

O metacaulim foi adquirido comercialmente, produzido pela empresa Jreminas de São Paulo-SP, em uma quantidade de 25 kg e utilizado como material precursor, por se tratar de uma fonte de aluminossilicato, componente essencial na reação entre as matérias-primas, sendo citado na literatura como material adequado para esta aplicação.

4.1.4. Escória de alto forno

A escória de alto forno foi doada pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) ao Laboratório de Materiais Cerâmicos da Universidade Estadual Paulista (UNESP) e foi submetida a moagem em moinho vibratório, com a finalidade de fragmentar e homogeneizar as particulas da escória.

4.1.5. Hidróxido de Sódio (NaOH)

O Hidróxido de Sódio da marca Dinâmica – Química Contemporânea LTDA, foi adquirido comercialmente, em micropérolas, com 98% de pureza mínima. A solução ativadora foi preparada com a utilização de água destilada, trabalhando com uma molaridade fixa de 12M, que está dentro da faixa de 5 a 15 M, proposta na literatura.

4.1.6. Cal Hidratada

A cal hidratada utilizada neste trabalho foi a CH III Itaú, adquirida comercialmente em uma quantidade de 20 kg. A cal hidratada foi aplicada diretamente na mistura (matriz de solo e areia, tendo metacaulim como material precursor) e homogeneizada manualmente, sendo utilizada com a finalidade de formar ativador composto, onde posteriormente foi adicionado a solução de NaOH.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Caracterização das matérias-primas

4.2.1.1. Fluorescência de raios X

A análise do solo e escória de alto forno por fluorescência de raios X foi realizada em equipamento Axios MAX, marca Panalytical, no Laboratório de Caracterização Química da Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de Lorena (EEL). A análise para o metacaulim e a cal hidratada por Fluorescência de raios X foi realizada no Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), em equipamento Shimadzu, XRF 1800. Foram feitas análises semiquantitativas sem padrões, com determinação de elementos químicos de flúor e urânio.

4.2.1.2. Difratometria de raios X

A análise do solo, metacaulim, cal hidratada e escória de alto forno por difratormetria de raios X foi realizada em equipamento da marca Panalytical, modelo Empyrean, com paramâmetros de 40 kV e 40 mA de tensão, de 8° a 90° graus, passo de 0,02, 20 segundos por passo, no Laboratório de Caracterização Química da Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de Lorena (EEL).

4.2.1.3. Granulometria

O solo foi caracterizado, considerando as propriedades solicitadas pela norma ABNT NBR 10833:2012. A análise granulométrica foi realizada no Instituto Agronômico de Campinas (IAC), no Laboratório de Física do Solo. O método da pipeta proposto por Camargo et al. (2009) e Teixeira et al. (2017) foi utilizado, determinando-se as proporções de argila, silte e areia total. Essas proporções foram utilizadas para determinar a correção granulométrica, sendo utilizado a equação (2) (NEVES et al., 2011), para estimar a quantidade de areia a ser adicionada no solo para correção, em volume.

$$P = \frac{s_0 - P_i}{P_i - A_c} \qquad (2)$$

Onde:

P = Proporção de areia a ser adicionada para correção;

S_0 = Porcentagem de areia total no solo a ser corrigido;

P_i = Porcentagem de areia a ser atingido após correção;

A_c = Porcentagem de areia em material utilizado para correção.

A correção do teor de areia baseou-se na metodologia utilizada para produção de tijolo solo-cimento, que utiliza solos com uma faixa de 50% a 90% de partículas de tamanho superior a 0,075 mm segundo a norma NBR 10833:2012. Barbosa et al. (2002) especificam teores de areia total no solo utilizado neste tipo de produção onde se é possível obter bons resultados de desmoldagem, empacotamento e propriedades físicas e mecânicas, em uma faixa de 50% a 70%. Dessa forma é possível obter proporção capaz de estabelecer coesão, ajustando a distribuição granulométrica, contribuindo para a conformação durante a prensagem, proporcionando também melhor desmoldagem do tijolo da máquina. Após a correção, o resultado foi verificado através de peneiramento a úmido utilizando peneira com abertura de malha 0,075 mm, avaliando a quantidade de material retido e passante, com o objetivo de alcançar aproximadamente 70% de material retido, enquadrando-se dentro da referência da norma técnica.

A areia utilizada para a correção foi caracterizada através de peneiramento a seco para determinação das proporções de grânulo, areia grossa, média e fina, utilizando a série de peneiras normais, bem como a determinação da proporção de material pulverulento através de peneiramento a úmido em peneira de abertura de malha 0,075 mm.

A escória de alto forno, metacaulim e cal hidratada foram caracterizadas através de peneiramento a úmido na peneira com abertura de malha 0,075 mm, avaliando o material retido e passante.

4.2.1.4. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg ou limites de consistência do solo foram determinados com base nas normas NBR 6459:2016 e NBR 7180:2016, obtendo-se assim o limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade da amostra do solo. Os resultados foram comparados com os limites estabelecidos pela norma NBR10833:2012, usada como referência.

4.2.1.5. Picnometria líquida

Para a determinação da densidade aparente do solo, areia, cal hidratada, metacaulim e escória de alto forno utilizados na produção dos tijolos, foi aplicado o método da picnometria líquida, utilizando um picnômetro de 100 mL e 10 g para cada material. A picnometria líquida é usada para determinar a densidade aparente média, onde o picnômetro calibrado é pesado de forma vazio, com as partículas sólidas, com um líquido de densidade conhecida (no caso a água) e contendo as partículas mais o líquido, sendo possível obter o volume da amostra. Com estes dados, foi possível obter a densidade aparente dos solos, através da equação (3):

$$D_{ap} = \frac{Ma}{Va} \qquad (3)$$

Onde:

D_{ap} = Densidade aparente da amostra (g/cm³);

M_a = Massa da amostra (g);

V_a = Volume da amostra (cm³).

4.2.2. Produção dos tijolos em escala real

4.2.2.1. Dosagem

Para a produção dos tijolos, foram utilizadas referências da literatura na definição das dosagens, com base na caracterização das matérias-primas selecionadas para este trabalho.

Por meio da caracterização granulométrica do solo, foi constatado maior proporção de silte e argila na composição, então optou-se pela correção granulométrica com areia média, de forma a obter-se uma faixa de aproximadamente 70% de areia total na composição final da mistura. Essa correção foi realizada por meio da estimativa fornecida pela equação (2), onde o valor de P encontrado foi de 1,38. Ou seja, para cada uma parte (recipiente de volume conhecido) de solo adicionado, será necessário adicionar 1,38 partes de areia de correção. Para auxiliar nessa dosagem, os valores foram convertidos da relação de volume para relação em massa.

Foi estabelecido como critério a razão molar SiO_2:Al_2O_3 das matérias-primas como base para estabelecer dosagens entre a matriz e os precursores de forma que o valor da razão molar

global seja mantida em 3,5, atendendo a referência da faixa de 3,3 a 4,5 proposta por Davidovits (2008) e por Lemougna et al (2016) para uso em materiais de engenharia.

A quantidade de ativador simples de solução de NaOH foi baseada no trabalho proposto por Preethi (2020), que trabalhou com uma quantidade de 10% em massa de solução em relação à massa seca da mistura de materiais precursores. Dessa forma, optou-se pela utilização de 10% de solução alcalina em relação à massa do solo e precursor. Para o ativador composto, foi utilizado também 10% da solução de NaOH adicionando 10% de cal hidratada em realção a massa do solo e precursor, conforme proposto por Khater (2012). O solo também foi considerado no cálculo, pois possui contribuições de SiO_2 e Al_2O_3, sendo considerado com potencial de interação para as razões molares globais. As proporções foram estimadas com base no material seco.

Este modelo de produção a partir da álcali-ativação, com as matérias-primas propostas neste trabalho, não possui norma técnica que estabeleça parâmetros para controle de qualidade e uso das matérias-primas, dosagens ou modos de produção/execução. Por esse motivo, optou-se pela utilização das normas do tijolo solo-cimento sem função estrutural, NBR 8491:2012, NBR 8492:2012, NBR 10833:2012 e NBR 10834:2012, para comparação dos valores de resultados de análises de matérias-primas, produção e caracterizações do produto final.

Dessa forma, foram preparados quatro formulações de tijolos modulares: M.AS.CT - Solo corrigido com areia, metacaulim, ativador simples, com cura térmica; M.AS.ST - Solo corrigido com areia, metacaulim, ativador simples, sem cura térmica; M.AC.CT - Solo corrigido com areia, metacaulim, ativador composto com cura térmica; e E.AS.CT - Solo corrigido com areia, escória de alto forno, ativador simples, com cura térmica. As siglas são um resumo das matérias-primas envolvidas, onde a primeira parte se refere ao precursor (M de metacaulim ou E de escória de alto forno), a segunta parte é sobre o ativador (AS para simples ou AC para composto) e a última parte é sobre o processo de cura (CT é para com cura térmica e ST é para sem cura térmica). Fixando a razão molar e com os dados de densidade dos materiais, foi estimado os valores para a produção de ao menos 10 amostras de cada dosagem.

A cura térmica foi realizada por 4 horas a 70°C em estufa, estando dentro da faixa proposta por Yuan et al. (2016) e Chen et al. (2016) e posteriormente os tijolos foram armazenados em sala fechada, cumprindo um período de 7 dias em temperatura ambiente. Os tijolos que não passaram pela cura térmica foram acondicionados em sala fechada, em temperatura ambiente. A tabela 4 apresenta um resumo das dosagens das matérias-primas utilizadas na produção dos tijolos.

Tabela 4 - Formulação das matérias-primas utilizadas na produção dos tijolos.

Formulação de Tijolos	Matriz	Precursor	Razão molar global SiO_2:Al_2O_3	Ativador	Cura	Quantidade de tijolos
M.AS.CT	Solo corrigido com areia	Metacaulim	3,5	Simples, Solução NaOH 12M	Térmica	10
M.AS.ST	Solo corrigido com areia	Metacaulim	3,5	Simples, Solução NaOH 12M	Temperatura ambiente	10
M.AC.CT	Solo corrigido com areia	Metacaulim	3,5	Composto, Solução NaOH 12M e Cal hidratada	Térmica	10
E.AS.CT	Solo corrigido com areia	Escória de alto forno	3,5	Simples, Solução NaOH 12M	Térmica	10

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.2.2. Preparação dos materiais, produção e cura dos tijolos

Para a produção dos tijolos, o solo e a areia foram destorroados e peneirados em malha de 4,8 mm, para remoção de partículas e resíduos de tamanho superior. Em seguida, procedeu-se à mistura e homogeneização manual do solo com suas respectivas correções granulométricas com areia, obtendo-se as matrizes para cada lote.

Cada matriz recebeu a adição do respectivo precursor, realizando-se a homogeneização de forma manual. Para a formulação de tijolo com ativador composto, a cal hidratada foi adicionada logo após a homogeneização com o precursor, continuando o processo de homogeneização. Em todos os casos, as misturas permaneceram em repouso por 24 horas.

Após esta etapa, a produção seguiu com a mesma metodologia para todos os lotes, com a adição primeiramente de água, necessária para moldagem. Walker (1995), Consoli et al. (2011), Consoli et al. (2007) e Venkatarama Reddy et al. (2011) apud Preethi (2020) indicaram que a umidade para a moldagem de materiais de solo comprimido pode variar entre 9% a 16% em relação a massa do material seco. De acordo com a referência, adotou-se um teor de umidade de no mínimo 10% como base, sendo realizado ajustas do teor de umidade de acordo com os precursores e ativadores. O ajuste foi controlado com uma inspeção tátil-visual (NEVES; MILANI, 2011), obtendo-se uma consistência em que fosse possível uma porção da mistura

permanecer conformada após ser pressionada com a mão, sem grudar excessivamente, e permitisse a quebra dessa porção manualmente em duas metades iguais e que uma dessas metades, ao se deixar cair de uma altura de 1 metro em uma base plana pudesse se fragmentar, obtendo um espalhamento de suas partículas. Ao longo da homogeneização, foi mantido esse controle, além da mudança de coloração e trabalhabilidade da mistura. A tabela 5 apresenta a quantidade de água utilizada para cada formulação. Após esse processo, verificou-se o pH da solução ativadora obtendo o valor de 14, adicionado-a então e seguindo com a homogeneização manual da mistura.

Tabela 5 - Quantidade de água utilizada para produção dos tijolos.

Formulação de tijolos	**Quantidade de água**
M.AS.CT	10,7%
M.AS.ST	10,7%
M.AC.CT	13,9%
E.AS.CT	10,0%

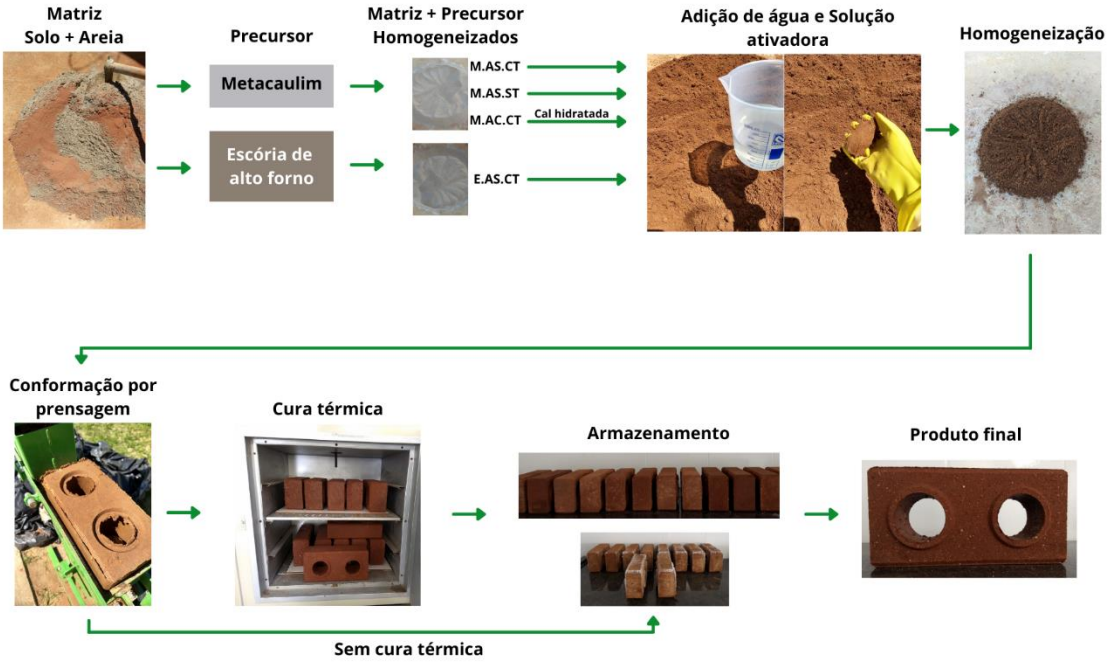
Fonte: Elaborada pelo autor.

Após o preparo, a mistura foi transferida para o silo dosador da prensa manual (figura 14) e procedeu-se com a produção de 10 tijolos modulares para cada formulação, sendo destinados aos seus respectivos processos de cura. A figura 15 apresenta o fluxograma da metodologia de produção empregada.

Figura 14 - Prensa manual para produção dos tijolos.

Fonte: Verde Equipamentos (2018).

Figura 15 - Fluxograma da produção dos tijolos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.3. Caracterização dos tijolos

4.2.3.2. Análise dimensional, absorção de água e resistência à compressão simples

Os ensaios de análise dimensional, absorção de água e resistência à compressão simples foram executados tendo como referência as normas NBR 8491:2012 e NBR 8492:2012. Para o estudo comparativo das propriedades foram utilizadas 10 amostras de cada formulação de tijolo. Das 10 amostras, todas passaram pela análise dimensional, 3 foram destinadas ao ensaio de absorção de água e 7 destinadas ao ensaio de resistência à compressão simples. Para análise dimensional, foi utilizado paquímetro com resolução de 0,05 mm e capacidade de 300 mm, anotando-se 3 medidas para cada região do tijolo, obtendo-se a média dos resultados. O objetivo da análise dimensional foi de avaliar a variação das dimensões nominais de comprimento, largura e altura, entre os tijolos de mesma formulação e entre diferentes formulações, após o processo de cura, já que durante a produção, o material apresentou dificuldades de trabalhabilidade devido ao rápido tempo de pega da mistura, o que pode influenciar na estabilidade dimensional do produto.

O ensaio de absorção de água foi realizado para as amostras de tijolos de cada formulação, após 14 dias de fabricação, de acordo com a norma NBR 10833:2012 que estabelece que o material poderá ser utilizado após este intervalo de tempo de sua fabricação.

O procedimento consistiu na secagem dos tijolos em estufa, a temperaturas entre 105°C e 110 ºC, até atingirem a massa constante, sendo realizado a pesagem de hora em hora, imediatamente após a remoção da estufa, até que 2 pesagens consecutivas diferenciassem, em no máximo 0,25%, anotando-se o valor de massa seca. Esperou-se então as amostras atingirem a temperatura ambiente para que fossem imersas em um tanque de água, em temperatura ambiente, por 24 horas, registrando-se ao fim deste período, a massa saturada (Figura 16).

Figura 16 - Amostras de tijolos imersas em água.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O cálculo da absorção de água (*A*), em porcentagem, foi realizado pela equação (4):

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1}\right) x100\% \qquad (4)$$

Onde:

M_1 = massa seca (g);

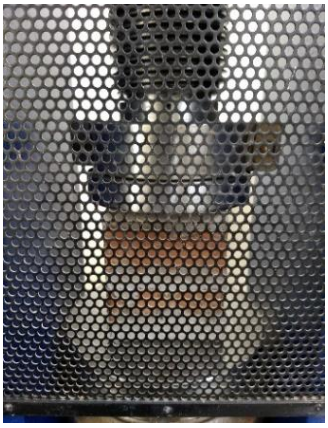
M_2 = massa saturada (g).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado após 14 dias de produção, seguindo a mesma recomendação da norma NBR 10833:2012 de intervalo de tempo após a fabricação. Para a realização do ensaio, inicialmente foi realizado o procedimento de capeamento para as amostras, com a finalidade de regularização das faces de aplicação de força. O procedimento consistiu em cortar o tijolo em duas partes iguais, unindo-as com pasta de cimento com as faces cortadas em lados opostos. Após 24 horas da união das duas metades, deu-se início a regularização da primeira face com a pasta de cimento, sendo realizado todo procedimento em bancada nivelada, tomando os cuidados para que fosse mantido o paralelismo e a planicidade da face corrigida. Após secagem de 24 horas, procedeu-se com a aplicação da pasta de cimento

e correção da mesma forma na outra face, esperando 24 horas novamente para a completa secagem da pasta. Então, foi realizada a medição das faces de aplicação de força, obtendo-se a área em milimetros quadrados, para o cálculo de resistência.

As amostras permaneceram imersas em tanque com água em temperatura ambiente durante 6 horas, sendo retiradas e secas superficialmente para a execução do ensaio. Para o ensaio de resistência à compressão utilizou-se uma prensa hidráulica elétrica, da marca Contenco, da empresa “Carmo Laboratório”, com capacidade de 100 toneladas e aplicação de carga uniforme e à razão de 500 N/s, com resolução de 10 Kgf (Figura 17).

Figura 17 - Amostra de tijolo capeado no momento do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O cálculo de resistência à compressão foi realizado pela equação (5):

$$ft = \frac{F}{s} \qquad (5)$$

Onde:

Ft = resistência à compressão simples (MPa);

F = carga de ruptura do corpo de prova (N);

S = área da aplicação da carga (mm²).

4.2.3.3.Difratometria de raios X

A análise dos tijolos por difratormetria de raios X foi realizada em equipamento da marca Panalytical, modelo Empyrean, com paramâmetros de 40 kV e 40 mA de tensão, de 8° a 90° graus, passo de 0,02, 20 segundos por passo, no Laboratório de Caracterização Química da Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de Lorena (EEL). Foram utilizadas uma amostra de cada formulação de tijolo, optando pela escolha das amostras com maior resultado no ensaio de resistência à compressão.

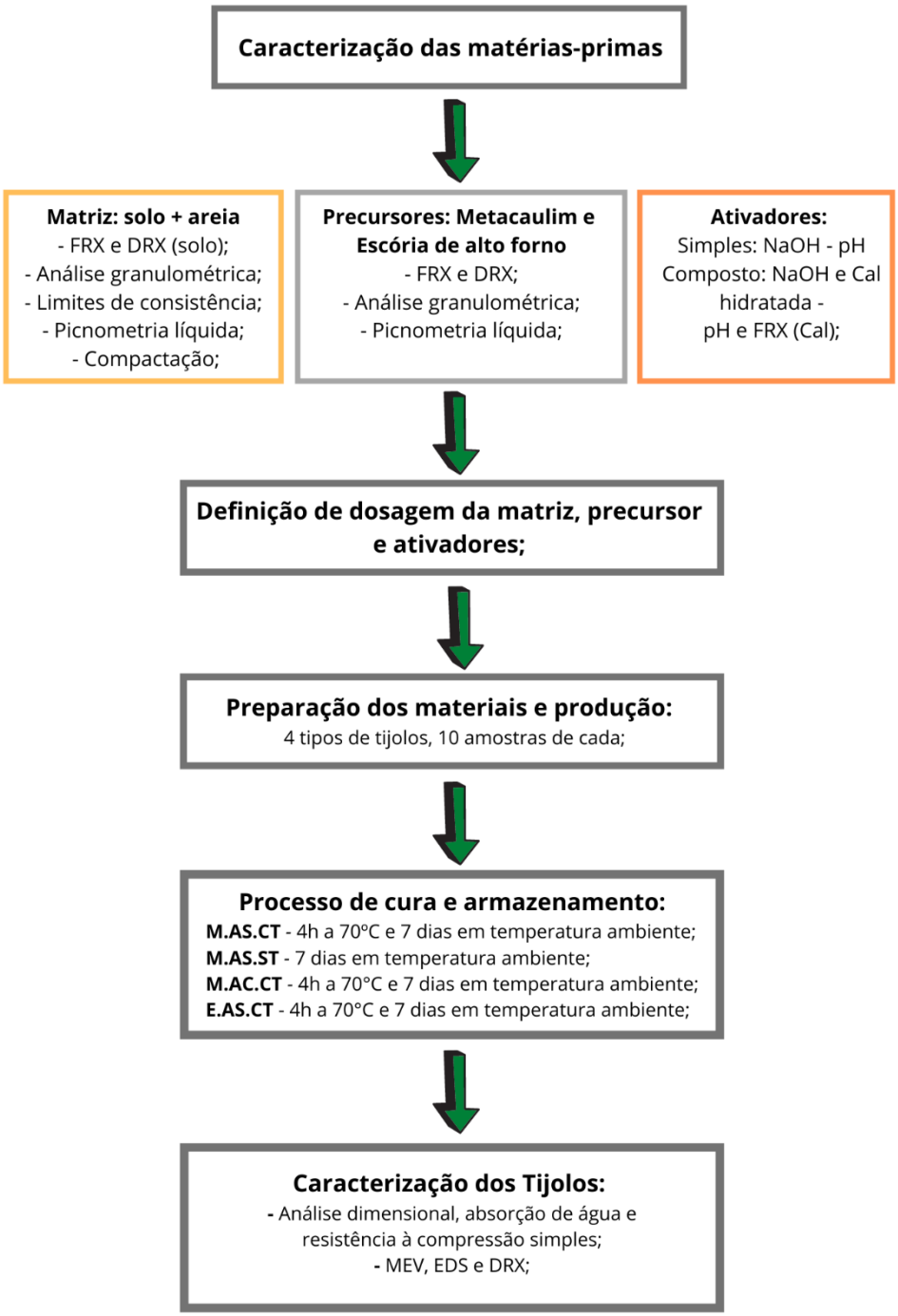
4.2.3.4. Análise de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva

Para a análise de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva, foram utilizadas uma amostra de cada formulação de tijolo, optando-se pela escolha das amostras com maior resultado no ensaio de resistência à compressão, onde as mesmas foram preparadas e cominuídas em pó e metalizadas com prata para a realização do procedimento. A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização da Escola de Engenharia de Lorena (EEL), da Universidade de São Paulo (USP), utilizando um microscópio eletrônico de varredura da marca LEO 1.450VP e espectrômetro de energia dispersiva de Oxford (EDS).

4.2.4. Análise estatística dos resultados

Os resultados obtidos da análise dimensional para cada dimensão de comprimento, largura e altura consistiram na média dos resultados de 3 medições em pontos diferentes do mesmo tijolo, sendo esses valores submetidos ao cálculo do desvio padrão com a finalidade de comparação de estabilidade dimensional para cada produção. Os resultados de absorção de água e resistência à compressão foram submetidos ao cálculo da média e do desvio padrão. A figura 18 apresenta um resumo do planejamento experimental.

Figura 18 - Resumo do planejamento experimental.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

5.1.1. Fluorescência de raios X

Os resultados obtidos para a análise por Fluorescência de raios X, para o solo são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização química do solo, valores expressos em percentual em massa de compostos, normalizados a 100%.

Composto	**Concentração (%)**
SiO_2	45,1
Al_2O_3	26,7
Fe_2O_3	9,42
TiO_2	1,27
K_2O	0,43
MgO	0,15
P_2O_5	0,09
ZrO_2	0,05
Na_2O	0,05
CaO	0,05
SO_3	0,02
Cr_2O_3	0,02
MnO	0,02
PbO	0,01
SrO	0,01
Perda ao fogo	16,63

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com estes resultados, verificou-se que o solo possui teores de SiO_2 e Al_2O_3 superiores a 70% quando somados, podendo ser considerado como fonte de aluminossilicatos, de acordo com Liew (2016). A razão molar SiO_2:Al_2O_3 é igual a 2,87.

Os resultados fornecidos para o metacaulim comercial encontram-se na tabela 7.

Tabela 7 - Caracterização química do metacaulim, valores expressos em percentual em massa de compostos.

Composto	**Concentração (%)**
SiO_2	75,21
Al_2O_3	17,96
Fe_2O_3	0,01
MgO	0,01
CaO	5,01
$BaSO_4$	0,01
Na_2O_3	0,01
K_2O	0,01
Perda ao Fogo	1,76

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados expressos na tabela 7 indicam que o metacaulim possui teor somado de SiO_2 e Al_2O_3 de 93,17%, razão molar SiO_2:Al_2O_3 de 7,11 e razão Si:Al de 3,55. De acordo com Vassalo (2013), como a somatória dos teores de SiO_2 + Al_2O_3+ Fe_2O_3 é superior a 90%, é possível pré-classificar como material de alta reatividade. O metacaulim comercial possui quantidades de SiO_2 e Al_2O_3 favoráveis para sua utilização como fonte de aluminossilicato, onde utilizando a norma NBR 12653:2012, que considera a soma dos óxidos SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 superior a 70%, é possivel classificá-lo como pozolânico.

A razão molar global SiO_2:Al_2O_3 da mistura do solo de com metacaulim foi de 3,5 com razão Si:Al de 1,7. Para Davidovits (2002), a relação atômica Si:Al ideal deve assumir valores próximos a 2. A relação atômica influencia na resistência do material (PAPA et al., 2018), e é necessário que apresente valor superior a 1 para que o precursor seja apropriado (BUCHWALD, 2005).

Os autores Silva et al. (2007) trabalharam com amostras de metacaulim com relações SiO_2:Al_2O_3 variando de 5,01; 3,8; 3,0 e 2,5. Analisando-as por imagens de MEV, conclui-se

que as amostras com maior concentração de Si, apresentam maior homogeneidade e amostras com baixo teor de Si, há presença de partículas, materiais possivelmente não reagentes e predominância cristalina (SILVA et al., 2007).

Os resultados obtidos para análise por Fluorecência de raios-X para a escória de alto forno são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Caracterização química da escória de alto forno, valores expressos em percentual em massa de compostos, normalizados a 100%.

Composto	**Concentração (%)**
SiO_2	37,72
CaO	35,64
Al_2O_3	14,55
MgO	7,83
SO_3	2,49
TiO_2	0,73
MnO	0,37
K_2O	0,33
Fe_2O_3	0,19
SrO	0,14
ZrO_2	0,01
P_2O_5	0,01
Perda ao fogo	NH

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados da tabela 8 indicam a existência de SiO_2 e Al_2O_3 na escória, com uma concentração total de 52,27%. Há contribuição de CaO que somado ao teor de SiO_2 totalizam 73,36%, atendendo os requisitos de utilização como precursor no sistema de alto cálcio. A relação ($CaO+MgO+Al_2O_3/SiO_2$) que indica sua composição e propriedades hidráulicas, possui um valor de 1,53, estando de acordo com o critério estabelecido na norma NBR 16697:2018, onde o valor deverá ser superior a 1.

Os resultados obtidos para análise por Fluorecência de raios-X para a cal hidratada são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização química da cal hidratada, valores expressos em percentual em massa de compostos, normalizados a 100%.

Composto	**Concentração (%)**
CaO	74,94
MgO	21,09
SiO_2	2,05
Fe_2O_3	0,68
P_2O_5	0,57
Al_2O_3	0,20
Cr_2O_3	0,15
MnO	0,13
K_2O	0,13
SO_3	0,05
SrO	0,03

Fonte: Elaborada pelo autor.

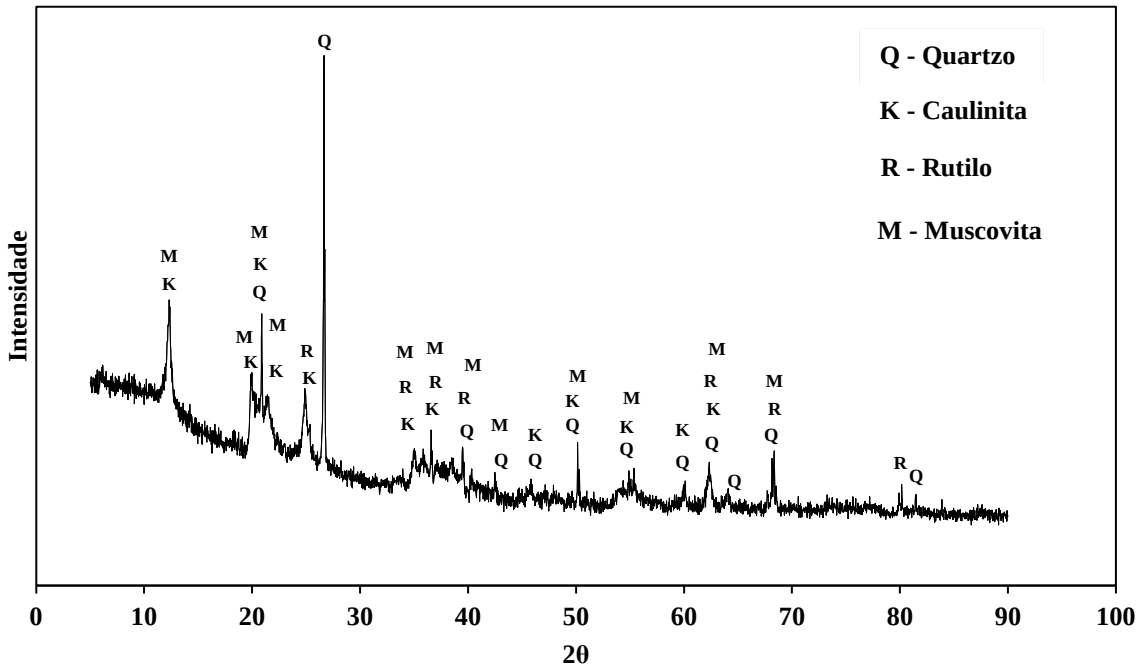
A cal hidratada apresentou maiores porcentagens para os elementos CaO e MgO, tratando-se de uma cal dolomítica, sendo o teor desses elementos somados igual a 96,03%, estando de acordo com a norma NBR 7175:2003 que estebelece um valor mínimo de 88% para a soma desses óxidos, estando de acordo com a classificação CH III.

As matérias-primas possuem propriedades que permitem a sua utilização na metodologia proposta, com valores satisfatórios de SiO_2+Al_2O_3, SiO_2+CaO, razões molares e reatividade.

5.1.2. Difratometria de raios X

O resultado da difratometria de raios X do solo é apresentado nas figura 19.

Figura 19 - Difratograma de raios X para a amostra de solo.

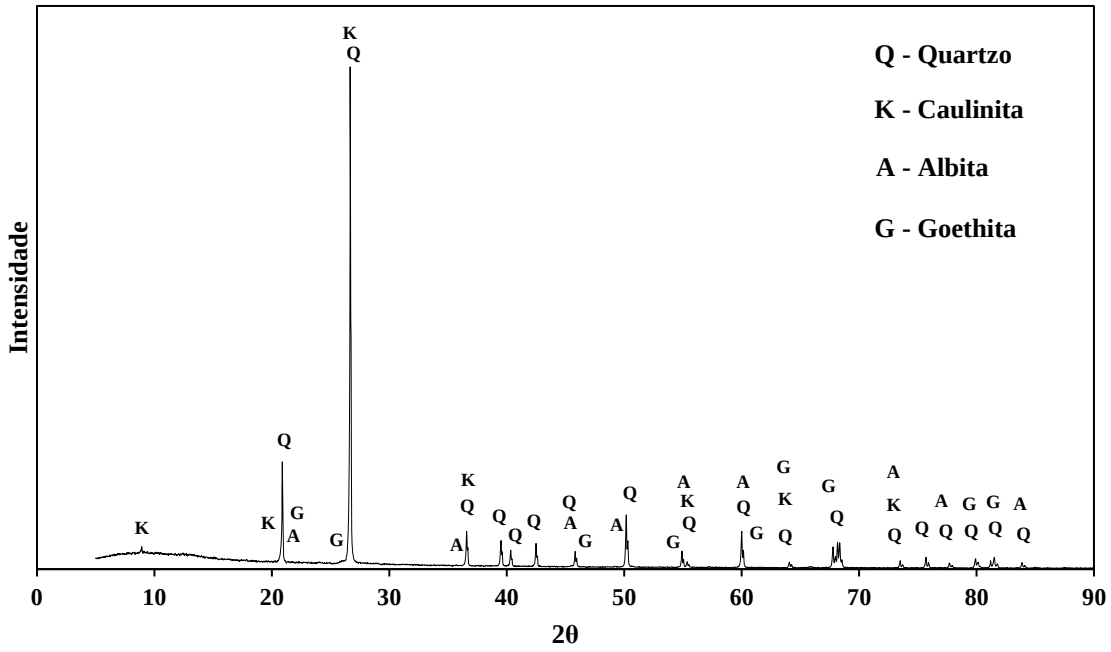


Fonte: Elaborada pelo autor.

No solo, foi encontrado em predominância as fases mineralógicas como o quartzo (SiO_2), a caulinita ($Al_2SiO_5(OH)_4$), o rutilo (TiO_2) e a muscovita ($KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$), estando de acordo com os elementos encontrados pela análise de fluorescência de raios X. As caolinitas são formadas por unidades de silício e alumínio, os quais unem-se alternadamente resultando em uma estrutura rígida e como consequência, são relativamente estáveis em presença da água (CAPUTO, 2015). A identificação da fase caulinita confirma a disponibilidade de SiO_2 e Al_2O_3 no solo, o que é favorável para a sua utilização na álcali-ativação, justificando sua contribuição nos cálculos de razão molar global. Contudo, deve-se salientar que solos cauliníticos de clima tropical apresentam frequentemente baixa cristalinidade, baixo pH e baixa capacidade de troca de cátions (BRINDLEY et al., 1986), o que deve ser considerado na formulação dos ativadores, para que seja possível fornecer o ambiente alcalino necessário para dissolução dos aluminossilicatos.

O resultado da difratometria de raios X do metacaulim é apresentado nas figura 20.

Figura 20 - Difratograma de raios X para a amostra de Metacaulim.

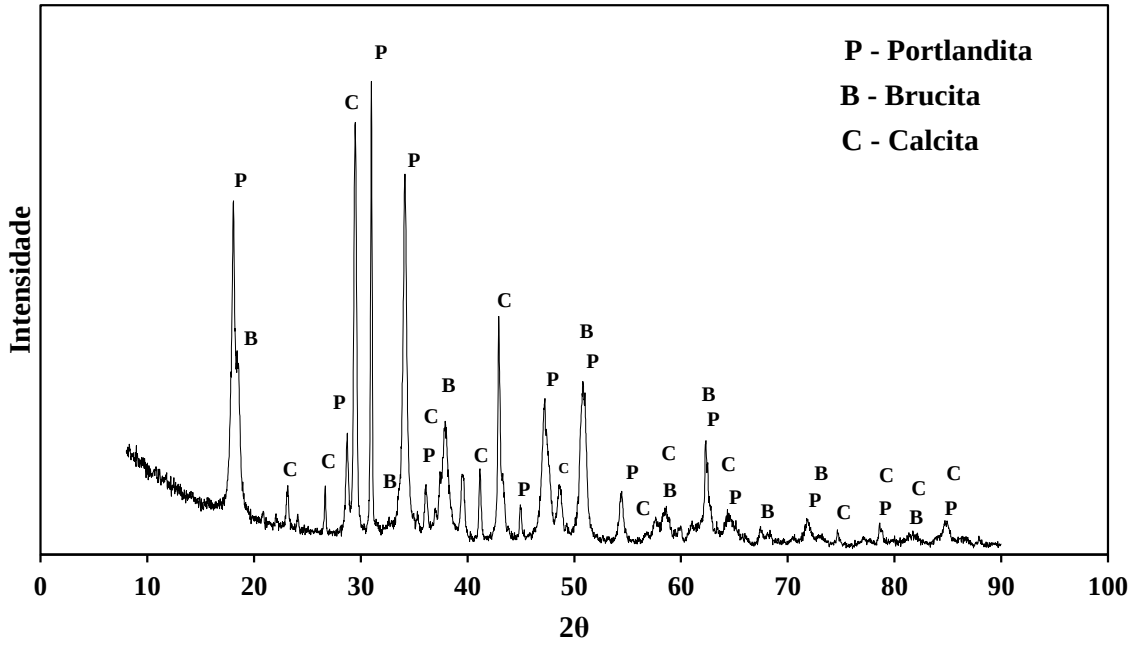


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o metacaulim, foram encontradas as fases mineralógicas como o quartzo (SiO_2), caulinita ($Al_2SiO_5(OH)_4$), albita ($NaAlSi_3O_8$) e goethita ($FeO(OH)_4$). A presença de quartzo, albita e goethita pode ter relação com resíduos do material de origem para a produção do metacaulim (SEVERO, 2013). A presença de caulinita indica que o tratamento térmico não foi o suficiente para converter toda caulinita em metacaulim (CATAURO et al., 2015), e que não foi possível observer o halo difuso centrado em aproximadamente 2θ = 20-25° que caracterizaria o metacaulim como material majoritariamente amorfo, o que poderá influenciar na sua reatividade (LIU et al., 2017).

O resultado da difratometria de raios X da cal hidratada é apresentado na figura 21.

Figura 21 - Difratograma de raios X da amostra de cal hidratada.

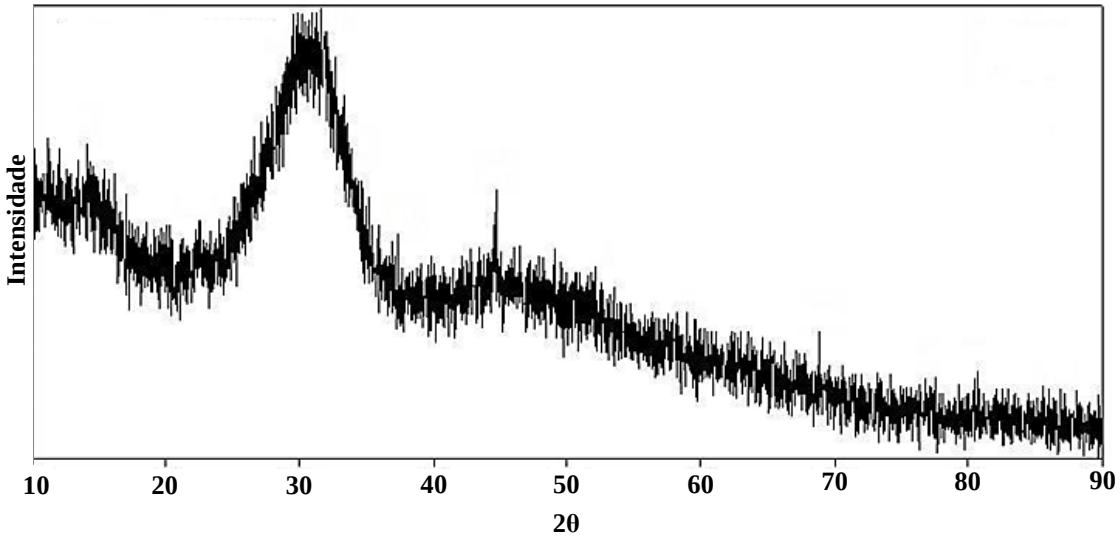


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a cal hidratada, foram encontrados os compostos portlandita ($Ca(OH)_2$), brucita ($Mg(OH)_2$) e calcita ($CaCO_3$), confirmando a origem da cal como dolomítica devido o magnésio presente.

O resultado da difratometria de raios X da escória de alto forno é apresentado nas figura 22.

Figura 22 - Difratograma de raios X para a escória de alto forno.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a escória de alto forno não foi possível a identificação das fases, pois trata-se de um material amorfo, onde na análise de FRX foi identificado a composição química do material. Pacheco-Torgal (2009) concluiram que maiores resistências são obtidas em ligantes à base de materiais que sofreram um tratamento térmico, como as cinzas volantes, escórias e metacaulim. A reatividade dos materiais está ligada à sua estrutura interna, sendo maior quando a sílica e a alumina não apresentam elevado grau de cristalinidade, isto é, com o aumento da fase amorfa (PACHECO-TORGAL, 2009).

5.1.3. Análise granulométrica

A tabela 10 apresenta os resultados da análise granulométrica do solo.

Tabela 10 – Granulometria do solo.

Amostra	**Argila < 0,002 mm**	**Silte 0,06-0,002 mm**	**Areia total 2,00 – 0,06 mm**	**Classificação textural**
Solo	65,0%	3,5%	31,5%	Muito argiloso

Fonte: Elaborada pelo autor.

O solo foi classificado como de textura muito argilosa, com proporção de argila de 65%. O solo contendo maior proporção de argila pode dificultar a desmoldagem do tijolo na prensa e não contribui para a distribuição granulométrica neste modelo de produção, além de apresentar alta retração de secagem. A norma NBR 10833:2012 estabelece que o solo a ser utilizado deverá conter partículas de tamanho superiores a 0,075 mm entre 50% a 90% na composição total do solo. Dessa forma, optou-se por realizar a correção do solo, ajustando o teor de areia para valores próximos a 70%, estimando a proporção pela equação 2, de forma a se enquadrar no padrão granulométrico estabelecido pela norma NBR 10833:2012.

Os dados obtidos pela análise granulométrica da areia estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Granulometria da areia.

Amostra	Grânulo 4,8 – 2 mm	Areia grossa 2,0 – 0,6 mm	Areia média 0,6 - 0,2 mm	Areia fina 0,2 – 0,06 mm	Teor de material pulverulento
Areia	2%	16%	50%	32%	3%

Fonte: Elaborada pelo autor.

A areia utilizada para correção apresentou maior proporção de areia média, estando de acordo com a classificação especificada pelo fornecedor e não apresentou partículas de tamanho superior a 4,8 mm, passando 100% por essa abertura de malha. Ela também apresentou um teor de material pulverulento de 3%, estando dentro do limite de 5% estabelecido pela norma NBR 7211:2009, o que demonstrou ser um material apropriado para utilização.

Após a mistura e homogeneização das quantidades de solo e areia para correção granulométrica, foi coletado uma amostragem dessa matriz, para avaliar a efetividade de correção, realizando o peneiramento a úmido na peneira de abertura de malha de 0,075 mm, onde o resultado é apresentado na tabela 12.

Tabela 12 – Verificação de correção granulométrica, utilizando peneiramento a úmido em peneira com abertura de malha de 0,075 mm.

Amostra	Teor de material retido	Teor de material passante
Matriz	69,80%	30,2%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nestes resultados constatou-se que a correção granulométrica foi satisfatória, elevando a porcentagem de areia na composição, com material retido na peneira de abertura de malha 0,075 mm a valores próximos ao padrão estabelecido de 70%.

Para o metacaulim, cal hidratada e escória de alto forno, ambos não apresentaram material retido na peneira de abertura de malha 0,075 mm, sendo considerado o tamanho de particulas de ambos inferior a 0,075 mm, sendo que para estes materiais quanto mais finas forem suas particulas, maior a área superficial, contribuindo para sua reatividade.

5.1.4. Limites de Atterberg

Os resultados para os limites de Atterberg do solo são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Limites de Atterberg do solo.

Amostra	**Limite de liquidez** **%**	**Limite de plasticidade** **%**	**Índice de plasticidade** **%**
Solo	45,9	35,7	10,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Jenkins (1993) citado por Caputo (2015), o solo é classificado como medianamente plástico, apresentando o índice de plasticidade igual a 10,2%, estando dentro da faixa entre 7% a 15% para esta classificação.

5.1.5. Picnometria líquida

Na tabela 14, estão apresentados os valores de densidade determinados a partir do ensaio de picnometria líquida para os materiais empregados na produção dos tijolos.

Tabela 14 - Densidade das matérias-primas utilizadas no estudo.

Material	**Densidade Média (g cm^{-3})**
Solo	2,19
Areia	1,80
Escória de alto forno	2,66
Metacaulim	1,37
Cal hidratada	2,23

Fonte: Elaborada pelo autor.

A densidade do solo possui um valor de 2,19 g cm^{-3}, encontrando-se próximo de valores citados na literatura para solos cauliníticos de 2,43 g cm^{-3} (BARROS, 2016). Cabe ressaltar que há variações nas composições de cada solo, o que implica nas variações de resultados nas

densidades. Para a areia, foi encontrado o valor de densidade de 1,80 g cm^{-3} . A escória de alto forno possui densidade de 2,66 g cm^{-3}, estando este valor próximo dos valores citados na literatura, em torno de 2,7 g cm^{-3} a 3,3 g cm^{-3} (CHIARATTI et al., 1987). O Metacaulim possui densidade de 1,37 g cm^{-3}, o qual está de acordo com o valor especificado pela empresa fornecedora e a cal hidratada hidratada apresentou densidade de 2,23 g cm^{-3} estando dentro da faixa especificada pela empresa fornecedora, entre 2,08 g cm^{-3} a 2,34 g cm^{-3}.

5.2. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS TIJOLOS

5.2.1. Observações gerais de produção

Os tijolos produzidos não apresentaram dificuldade de retirada da forma após a prensagem. Para todas as formulações de tijolos, as misturas apresentaram uma difícil trabalhabilidade na homogeneização e rápida alteração de consistência após adição da solução ativadora, especialmente para os tijolos com metacaulim e ativador simples. Essa alteração no comportamento reológico dos materiais pode estar associado a fatores como relação líquido-sólido, a razão SiO_2:Na_2O e a natureza do ativador alcalino (PALACIO et al., 2008; CRIADO et al., 2009). Em relação a natureza do ativador alcalino, ela poderá afetar o comportamento reológico devido a liberação de íons que promovem formação dos produtos de polimerização ou devido à viscosidade do próprio ativador que por sua vez poderá afetar a viscosidade plástica da mistura geopolimérica. A concentração dos ativadores também excerce influencia no comportamento reológico, aumentando a tensão de escoamento das misturas (SAMPAIO, 2017).

Após o período de cura dos tijolos sem cura térmica, observou-se a formação de cristais na superfície do tijolo como apresentado na figura 23, podendo estar associado a eflorescência, processo de deposição de sais na superfície do material.

Figura 23 - Eflorescência na superfície dos tijolos sem cura térmica.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Preethi et al. (2020) verificaram a formação de eflorescência durante o período inicial de cura das amostras de geopolímeros, descrevendo que nas primeiras 24 horas em temperatura ambiente, ocorreu evaporação da água das amostras, sendo que devido a este movimento de evaporação da água houve deposição de sais na superfície dos corpos-de-prova. Essa ocorrência pode estar associada à solução ativadora, rica em sódio, e que o sódio não reagido ou excedente evapora, deixando sais depositados nas superfícies das amostras. Este problema pode ser minimizado mantendo os tijolos em um dessecador com a umidade relativa de 95%. Nenhuma eflorescência foi observada quando as amostras foram mantidas em câmara úmida (dessecador) ou curadas em estufa (PREETHI et al., 2020). Dessa forma, ressalta-se que o processo de cura térmica neste estudo inibiu a formação de eflorescência, tanto para as formulações com metacaulim e ativador simples ou composto, quanto para formulação com escória de alto forno e ativador simples.

5.2.2. Análise dimensional

Os resultados da análise dimensional dos tijolos encontram-se na tabela 15.

Tabela 15 - Análise dimensional dos tijolos modulares de diferentes composições e tratamentos de cura.

Tijolos com metacaulim, ativador simples e cura térmica	**Dimensões nominais**			
	Altura (mm) Média	**Compr. (mm) Média**	**Largura (mm) Média**	**Massa (g)**
1 M.AS.CT	66,7	246,7	123,9	3378
2 M.AS.CT	67,2	247,6	123,8	3511

3 M.AS.CT	68,6	243,7	125,1	3618
4 M.AS.CT	67,0	247,8	124,5	3288
5 M.AS.CT	67,9	247,0	123,5	3467
6 M.AS.CT	67,6	247,1	124,3	3454
7 M.AS.CT	71,4	247,8	123,8	3612
8 M.AS.CT	67,0	248,0	123,5	3420
9 M.AS.CT	67,8	246,7	124,2	3439
10 M.AS.CT	67,4	247,6	124,2	3418
Desvio Padrão	1,35	1,30	0,50	--
Tijolos com metacaulim, ativador simples e sem cura térmica	**Dimensões nominais**			
	Altura (mm) Média	**Compr. (mm) Média**	**Largura (mm) Média**	**Massa (g)**
1 M.AS.ST	68,3	248,2	124,2	3414
2 M.AS.ST	67,9	247,5	124,1	3422
3 M.AS.ST	65,7	246,0	123,1	3345
4 M.AS.ST	66,2	246,9	123,4	3271
5 M.AS.ST	66,4	247,7	123,2	3215
6 M.AS.ST	70,7	247,3	124,0	3537
7 M.AS.ST	67,8	246,8	124,0	3446
8 M.AS.ST	67,3	248,2	124,0	3334
9 M.AS.ST	68,3	248,5	124,1	3414
10 M.AS.ST	68,3	247,3	123,9	3432
Desvio Padrão	1,4	0,8	0,4	--
Tijolos com metacaulim, ativador composto e cura térmica	**Dimensões nominais**			
	Altura (mm) Média	**Compr. (mm) Média**	**Largura (mm) Média**	**Massa (g)**
1M.AC.CT	69,2	249,6	125,4	3282
2 M.AC.CT	69,1	249,7	125,4	3391
3 M.AC.CT	69,2	249,7	125,4	3553
4 M.AC.CT	69,5	249,6	125,3	3508

5 M.AC.CT	69,6	249,6	125,4	3501
6 M.AC.CT	69,5	249,6	125,4	3441
7 M.AC.CT	69,7	249,7	125,3	3614
8 M.AC.CT	69,2	249,7	125,3	3511
9 M.AC.CT	69,2	249,7	125,4	3320
10 M.AC.CT	69,0	249,7	125,5	3498
Desvio Padrão	0,2	0,10	0,0	--
Tijolos com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica	**Dimensões nominais**			
	Altura (mm) Média	**Compr. (mm) Média**	**Largura (mm) Média**	**Massa (g)**
1E.AS.CT	69,5	249,7	125,0	3483
2 E.AS.CT	69,5	249,5	125,0	3546
3 E.AS.CT	69,7	249,7	125,1	3423
4 E.AS.CT	69,4	249,5	124,9	3517
5 E.AS.CT	69,8	249,7	125,3	3396
6 E.AS.CT	69,8	249,6	125,1	3544
7 E.AS.CT	69,0	249,5	125,2	3579
8 E.AS.CT	69,7	249,6	125,2	3461
9 E.AS.CT	69,4	249,5	125,1	3547
10 E.AS.CT	69,2	249,4	125,1	3414
Desvio Padrão	0,3	0,1	0,1	--

Fonte: Elaborada pelo autor.

Estes resultados permitiram verificar uma variação do desvio padrão para cada dimensão, que foi maior especialmente para o parâmetro altura do tijolo. As maiores variações foram encontradas para os tijolos com metacaulim, ativador simples, com e sem cura térmica, que podem estar associadas com a difícil trabalhabilidade da mistura, pela rápida alteração de seu comportamento reológico após a adição do ativador simples. As menores variações dimensionais foram para os tijolos com metacaulim, ativador composto e cura térmica e tijolos com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica, indicando que foi possível obter uma produção padronizada e estável em relação as dimensões dos tijolos, atendendo os requisitos da norma de ±1 mm de tolerância para as dimensões nominais de comprimento, largura e altura. Dessa forma, o ativador composto com metacaulim como precursor, contribuiu para melhorar

a trabalhabilidade da mistura, quando comparado com o ativador simples e que no caso da escória de alto forno, o uso do ativador simples apresentou menor interferência na trabalhabilidade da mistura do que em relação ao metacaulim, e foi suficiente para manter a estabilidade dimensional.

5.2.3. Absorção de água

Os resultados dos ensaios de absorção de água são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 - Absorção de água dos tijolos.

Tijolos com metacaulim, ativador simples e cura térmica	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção de água (%)	Média
1 M.AS.CT	3074	3454	12,4	12,1%
2 M.AS.CT	3222	3605	11,9	
3 M.AS.CT	3298	3694	12,0	
		Desvio Padrão	0,3	
Tijolos com metacaulim, ativador simples e sem cura térmica	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção de água (%)	Média
1 M.AS.ST	3169	3589	13,3	13,2%
2 M.AS.ST	3042	3435	12,9	
3 M.AS.ST	2991	3390	13,3	
		Desvio Padrão	0,2	
Tijolos com metacaulim, ativador composto e cura térmica	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção de água (%)	Média
1 M.AC.CT	3034	3492	15,1	14,8%
2 M.AC.CT	3064	3520	14,9	
3 M.AC.CT	3110	3555	14,3	
		Desvio padrão	0,4	

Tijolos com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção de água (%)	Média
1 E.AS.CT	3151	3571	13,3	13,4%
2 E.AS.CT	3146	3566	13,4	
3 E.AS.CT	3152	3576	13,5	
		Desvio Padrão	0,1	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tanto os valores individuais quanto as médias de todos os resultados apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 8491:2012, onde os valores individuais não podem ultrapassar 22% e a média não pode ultrapassar 20%, estando em conformidade para todos os tijolos. A absorção de água é um parâmetro que permite inferir sobre a durabilidade, condutividade térmica e qualidade de um tijolo. Quando as partículas da microestrutura estão empacotadas, não permitem a infiltração da água e a densidade é maior (IFTIKHAR et al., 2020), o que pode estar correlacionado com os resultados obtidos no atual estudo, mostrando uma eficiência no estudo do empacatomento das partículas e da etapa de conformação.

Iftikhar (2020), verificou que para tijolos maciços geopoliméricos, contendo argila e teores de cinza volante entre 10% e 20% , solução de NaOH e Na_2SiO_3 e cura térmica, a absorção de água foi de 12,67% e 11,09% respectivamente. Robayo-Salazar et al. (2021) encontraram valores de absorção para blocos maciços com materiais álcali-ativados na faixa de 7,5% a 14,4%. Dessa forma, resultados de absorção de água deste estudo estão em conssonância com os valores encontrados na literatura.

5.2.4. Resistência à compressão simples

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, são apresentados na tabela 17.

Tabela 17 - Resistência à compressão dos tijolos.

Tijolos com metacaulim, ativador simples e cura térmica	**Resistência à compressão (MPa)**	**Média**	**Tijolos com metacaulim, ativador simples e sem cura térmica**	**Resistência à compressão (MPa)**	**Média**
4 M.AS.CT	0,88		4 M.AS.ST	0,66	
5 M.AS.CT	0,60		5 M.AS.ST	1,06	
6 M.AS.CT	0,73		6 M.AS.ST	0,59	
7 M.AS.CT	0,73	0,70 MPa	7 M.AS.ST	0,69	0,74 MPa
8 M.AS.CT	0,62		8 M.AS.ST	0,69	
9 M.AS.CT	0,82		9 M.AS.ST	0,76	
10 M.AS.CT	0,55		10 M.AS.ST	0,70	
Desvio padrão	0,12		Desvio Padrão	0,15	
Tijolos com metacaulim, ativador composto e cura térmica	**Resistência à compressão (MPa)**	**Média**	**Tijolos com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica**	**Resistência à compressão (MPa)**	**Média**
4 M.AC.CT	1,70		4 E.AS.CT	3,47	
5 M.AC.CT	2,14		5 E.AS.CT	2,70	
6 M.AC.CT	2,34		6 E.AS.CT	2,86	
7 M.AC.CT	1,80	2,10 MPa	7 E.AS.CT	4,48	3,60 MPa
8 M.AC.CT	2,31		8 E.AS.CT	4,29	
9 M.AC.CT	2,41		9 E.AS.CT	3,68	
10 M.AC.CT	1,70		10 E.AS.CT	4,00	
Desvio padrão	0,3		Desvio Padrão	0,7	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A resistência à compressão individual e média dos tijolos contendo metacaulim, ativador simples, com ou sem cura térmica, não atenderam aos limites estabelecidos pela norma

NBR 8491:2012. De acordo com Robayo et al. (2016), as concentrações de Na_2O abaixo do ideal, podem não fornecer grupos hidroxila (OH-) o suficiente para dissolver Si e Al. No atual estudo, com metacaulim, utilizando apenas ativador simples, com ou sem cura térmica, pode ter ocorrido essa falta de fornecimento dos grupos hidroxila para a dissolução efetiva de Si e Al, ocasionando resultados de resistencia à compressão menores, não atingindo a resistência individual ≥ 1,7 MPa e média ≥ 2,0 MPa. A resistência reduzida para essas duas formulações também pode estar relacionada com o metacaulim, o qual em seu processo de obtenção não houve a completa conversão da caulinita em metacaulim, constatada através da análise de difratometria de raios X, reduzindo assim sua reatividade.

Já para os tijolos com metacaulim, ativador composto e cura térmica, e os tijolos com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica, todos atingiram os requisitos estabelecidos pela norma NBR 8491:2012, onde os tijolos com a escória alcançaram os maiores valores individuais e a maior média entre todas as formulações, com o valor de 3,60MPa.

Os tijolos com metacaulim e ativador composto ($NaOH + Ca(OH)_2$) tiveram aumento na média de resistência à compressão chegando a 2,10 MPa, em comparação com os valores das formulações com metacaulim e ativador simples, com cura termica (0,70MPa) e sem cura térmica (0,74 MPa). Esses valores estão de acordo com o estudo porposto por Khater (2012), onde os resultados de resistência a compressão dos materiais álcali-ativados aumentaram com a adição de $Ca(OH)_2$, ressaltando que a adição de $Ca(OH)_2$ contribuiu para o aumento da alcalinidade do meio, que permitiu maior dissolução dos aluminossilicatos existentes e portanto uma maior taxa de policondensação.

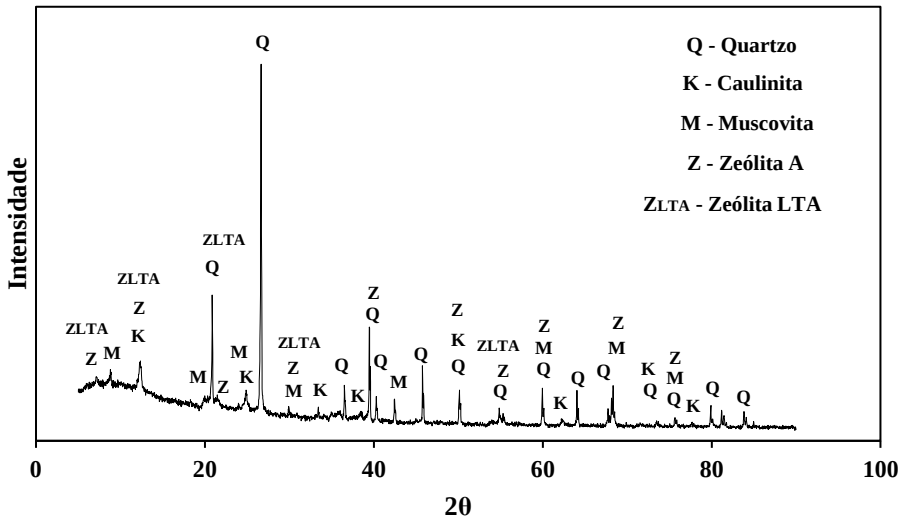
Os valores encontrados para os tijolos com escória estão de acordo com a faixa proposta no estudo de Preethi et al. (2020), o qual trabalhou com a produção corpos de prova cilindricos e de tijolos maciços de solo e álcali-ativação da escória de alto forno, com ativador simples de solução NaOH 12 M, encontrando valores de resistência à compressão na faixa de 3,0 MPa a 5,18 MPa, onde a resistência aumentou com o aumento de dosagem da escória na composição. O teor de cal da escória facilita reações pozolânicas secundárias, contrubuindo para melhores valores de resistência a compressão (PREETHI et al., 2020).

5.2.5. Difratometria de raios X

Os resultados para a difratometria de raios X das amostras de maior resistência à compressão são apresentados nas figuras 24, 25, 26 e 27, para os tijolos com metacaulim,

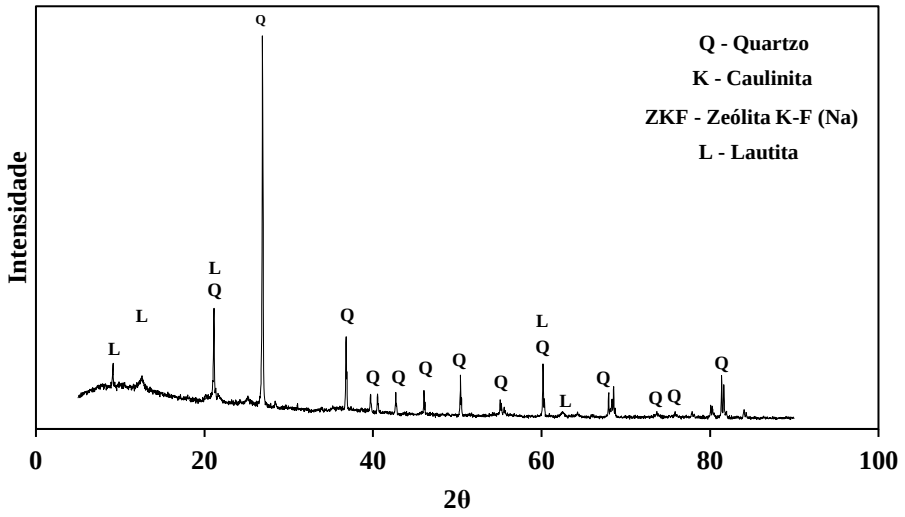
ativadores simples, com cura térmica (4M.AS.CT) e sem cura térmica (5M.AC.ST), com ativador composto e cura térmica (9M.AC.CT) e com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica (7E.AS.CT), respectivamente.

Figura 24 - Difratograma de raios X para a amostra de tijolo 4M.AS.CT, com metacaulim, ativador simples e com cura térmica.



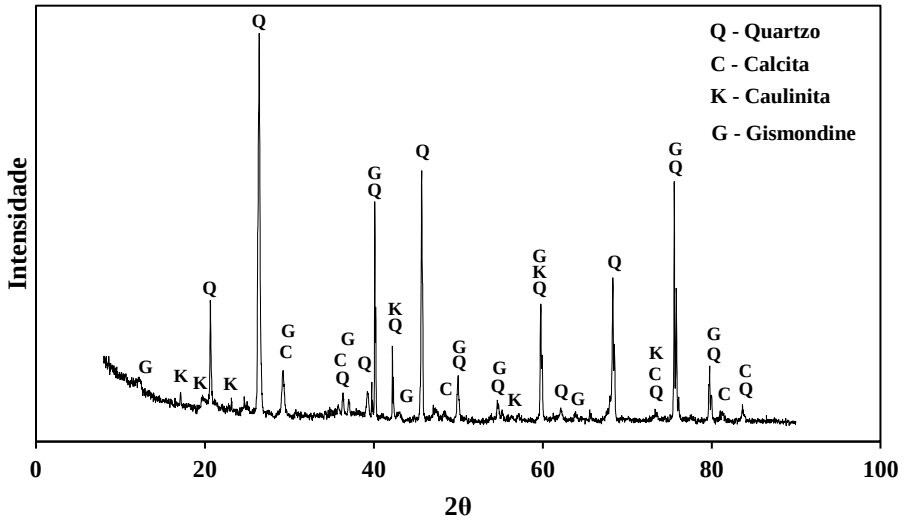
Fonte:Elaborada pelo autor.

Figura 25 - Difratograma de raios X para amostra de tijolo 5M.AS.ST, com metacaulim, ativador simples e sem cura térmica.



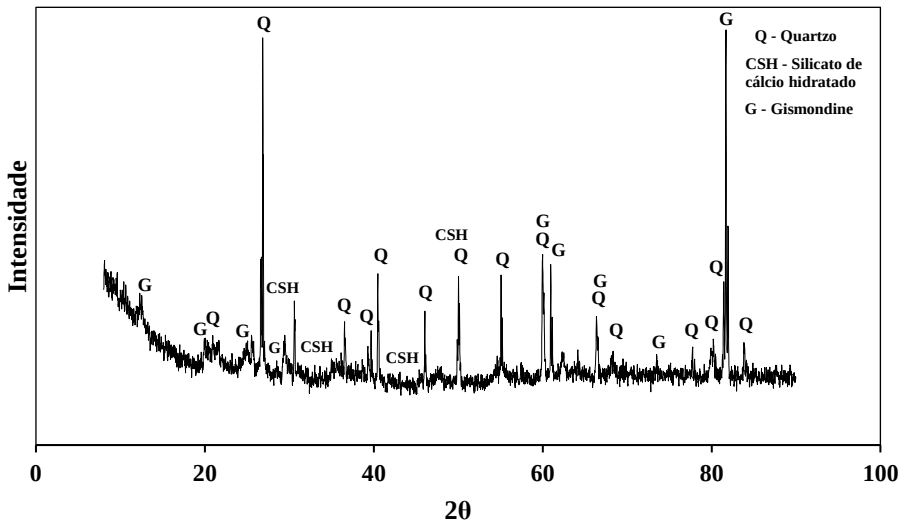
Fonte:Elaborada pelo autor.

Figura 26 - Difratograma de raios X para a amostra de tijolo 9M.AC.CT, com metacaulim, ativador composto e com cura térmica.



Fonte:Elaborada pelo autor.

Figura 27 - Difratograma de raios X para a amostra de tijolo 7E.AS.CT, com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica.



Fonte:Elaborada pelo autor.

Os difratogramas para as amostras de tijolos 4M.AS.CT e 5M.AS.ST apresentaram picos de cristalinidade referentes a compostos encontrados nos materiais solo e precursor, como o quartzo, caulinita e muscovita, sugerindo uma reação parcial. Foram encontradas estruturas zeolíticas, identificadas como Zeólita A ($Na(AlO_2)(SiO_2)$) e LTA ($Na_{12}Al_{12}Si_{12}O_{48}$ (H_2O)$_{27}$)

para a amostra 4M.AS.CT e K-F ($Na_5Al_5Si_5O_{20}.9H_2O$) para a amostra 5M.AS.ST. A formação das estruturas zeolíticas indicaram interação entre os componentes envolvidos na produção, porém em baixa intensidade, o que se relacionou com os baixos valores de resistência à compressão em comparação com as outras formulações de tijolos.

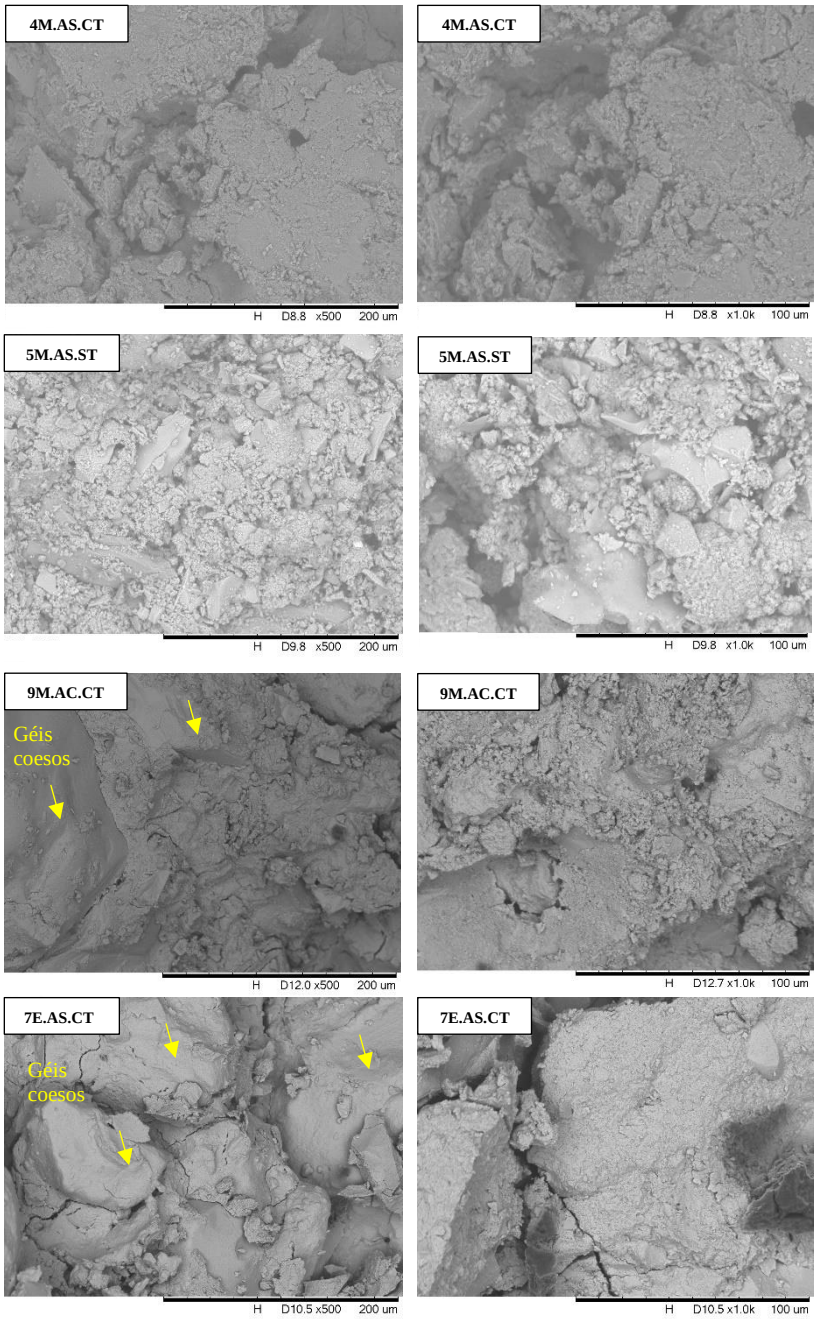
Os difratogramas para as amostras de tijolos 9M.AC.CT e 7E.AS.CT apresentaram picos de cristalinidade mais intensos que as amostras de tijolos 4M.AS.CT e 5M.AS.ST. Para a amostra 9M.AC.CT, foram encontrados compostos como quartzo, caulinita, provenientes dos materiais solo e precursor. Foram encontrados também compostos como a Calcita ($CaCO_3$) e um composto zeolítico identificado como Gismondine ($CaAl_2Si_2O_8.4H_2O$). Yazdi et al., (2018) indicaram que a presença de calcita e de um aluminossilicato hidratado contribuem para o desenvolvimento de maiores valores de resistência a compressão e menor porosidade no material álcali-ativado, o que justifica maiores valores de resistência à compressão da amostra 9M.AC.CT neste estudo, em relação as amostras 4M.AS.CT e 5M.AS.ST.

Através do difratograma da amostra 7E.AS.CT foi possível identificar compostos como quartzo, presença de um halo difuso em aproximadamente $2\theta =$ 26°, 36° e 50°, o qual caracteriza o C-S-H (FILHO et al., 2017) e Gismondine. Na álcali-ativação, é comum a coexistência de fases hidratadas como silicato de cálcio hidratado e aluminossilicato de cálcio hidratado, contribuindo para o desenvolvimento de resistência à compressão do material (PANGDAENG et al., 2014; SOUZA, 2013). Dessa forma, justifica-se o maior valor de resistência à compressão para amostra 7E.AS.CT, sendo efetiva a dosagem proposta. Sithole et al (2020) concluiu que a escória de alto forno ativada com solução de NaOH resultou na formação de C-S-H e aluminato de cálcio hidratado, produtos estes encontrados no presente estudo.

5.2.6. Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

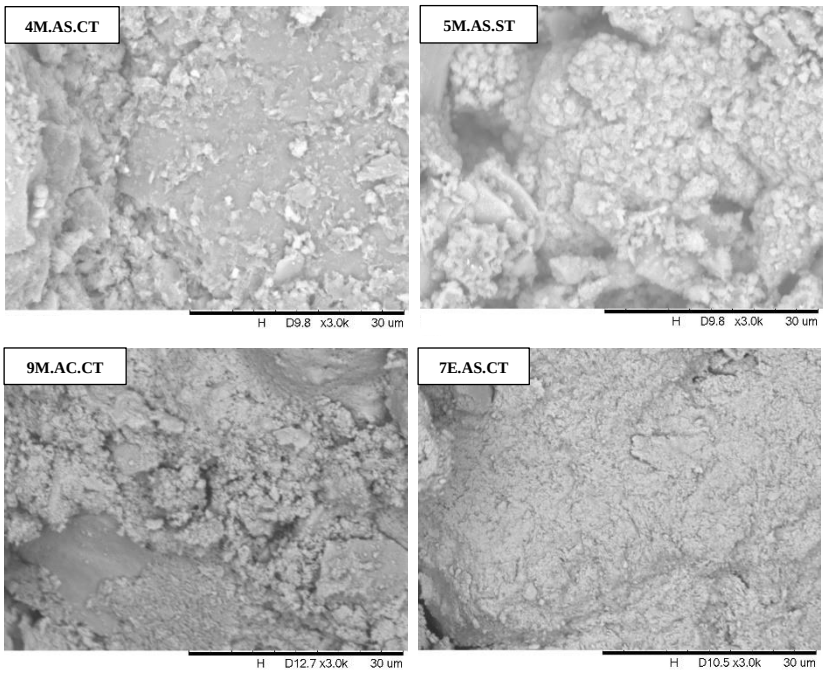
As micrografias obtidas para as amostras de maior resistência à compressão com metacaulim, ativadores simples com cura térmica (4M.AS.CT) e sem cura térmica (5M.AS.ST), com ativador composto e cura térmica (9M.AC.CT) e com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica (7E.AS.CT) são apresentadas na figura 28, com ampliações de 500x e 1000x, e figura 29 com ampliação de 3000x.

Figura 28 - Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras de tijolos com metacaulim, ativador simples e cura térmica (4M.AS.CT), com metacaulim, ativador simples, sem cura térmica (5M.AS.ST), com metacaulim, ativador composto e cura térmica (9M.AC.CT) e escória de alto forno, ativador simples e cura térmica (7E.AS.CT), com ampliações de 500x e 1000x.



Fonte:Elaborada pelo autor.

Figura 29 - Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras de tijolos com metacaulim, ativador simples e cura térmica (4M.AS.CT), com metacaulim, ativador simples, sem cura térmica (5M.AS.ST), com metacaulim, ativador composto e cura térmica (9M.AC.CT) e escória de alto forno, ativador simples e cura térmica (7E.AS.CT), com ampliações de 3000x.



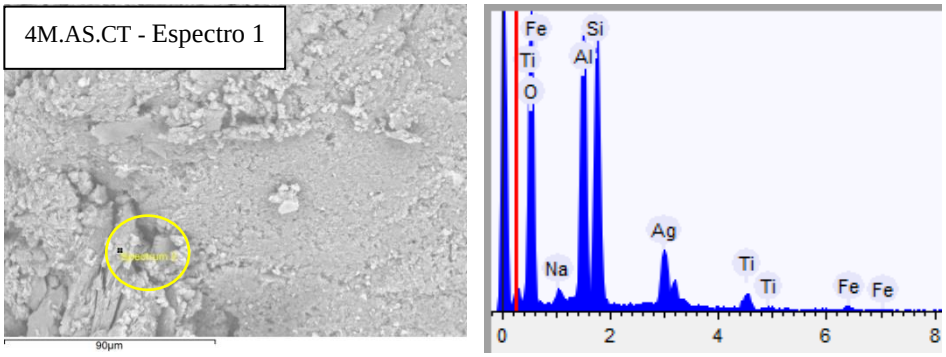
Fonte:Elaborada pelo autor.

As micrografias com aumentos de 500x e 1000x apresentaram diferentes morfologias de acordo com as matérias-primas utilizadas, com tendência de formação de géis coesos para as amostras com metacaulim, ativador composto e cura térmica (9M.AC.CT) e para as amostras com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica (7E.AS.CT), as quais apresentaram maiores valores de resistência à compressão. As amostras 4M.AS.CT e 5M.AS.ST apresentaram estruturas de geometrias irregulares envoltas por estruturas granulares, que podem sugerir material precursor e matriz não reagidos. Nas micrografias com aumento de 3000x, foi possível identificar maior coesão e compactação para a amostra 7E.AS.CT, a qual apresentou maior valor de resistência à compressão.

Foi possível observar também uma formação de pequenas estruturas com geometria definida e coloração mais esbranquiçada nas micrografias das amostras 4M.AS.CT e 5M.AS.ST, sugerindo uma geopolimerização incompleta, ou seja, não ocorrendo a completa dissolução dos aluminossilicatos presentes, possivelmente pelo uso apenas de um ativador simples destas formulações (SITHOLE et al., 2020), onde essas amostras apresentaram valores inferiores de resistência a compressão em relação aos outras formulações de tijolos.

Os resultados da análise por EDS, no Espectro 1, para a amostra de tijolo com metacaulim, ativador simples e cura térmica (4M.AS.CT) é apresentado na figura 30 e tabela 18, respectivamente. Para essa amostra o espectro 1 apresentou maiores porcentagens em peso silício, alumínio e ferro e menores porcentagens de sódio e titânio.

Figura 30 - Resultados das análises por MEV e EDS para amostra 4M.AS.CT, de tijolo com metacaulim, ativador simples e cura térmica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 18 - Resultados da análise por EDS para amostra 4M.AS.CT, de tijolo com metacaulim, ativador simples e cura térmica.

Elemento	% Peso	% Peso σ	% Atômica
Sódio	1,229	0,200	1,050
Alumínio	16,118	0,357	11,729
Silício	19,202	0,415	13,424
Titânio	3,047	0,246	1,249
Ferro	10,166	1,117	5,306

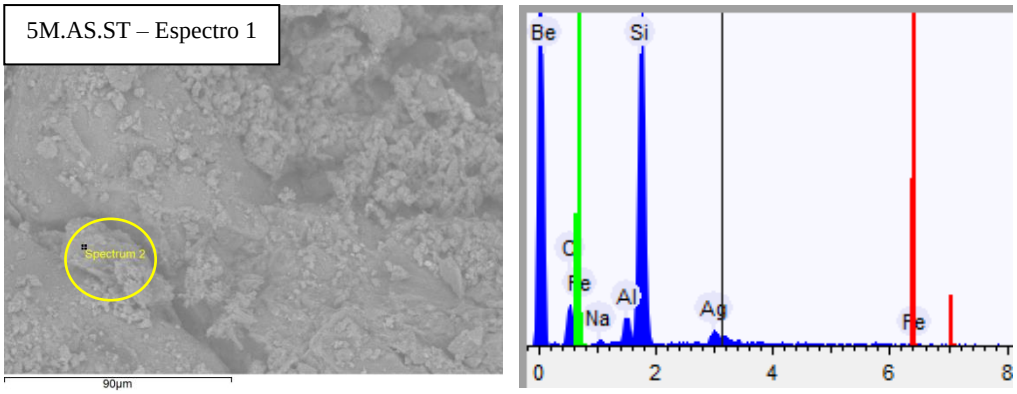
Fonte: Elaborada pelo autor.

A presença de ferro pode indicar uma reação incompleta entre o precursor e o ativador (MAHMOODI, 2020), o que pode estar associado ao uso de um ativador simples, o qual possivelmente não forneceu as condições ideais para que as reações de geopolimerização acontecessem completamente, justificando os baixos valores de resistência à compressão em comparação com as outras formulações de tijolos.

Os resultados da análise por EDS, no espectro 1 da amostra de tijolo com metacaulim, ativador simples e sem cura térmica (5M.AS.ST) é apresentado na figura 31 e na tabela 19,

respectivamente. A análise por EDS para a amostra 5M.AS.ST, permitiu verificar que no espectro 1, ocorreram maiores porcentagens em peso dos elementos silício, alumínio e ferro, e menores porcentagens de sódio.

Figura 31 - Resultados das análises por MEV e EDS da amostra 5M.AS.ST, de tijolo contendo metacaulim, ativador simples e sem cura térmica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 19 - Resultados da análise por EDS para amostra 5M.AS.ST, de tijolo contendo metacaulim, ativador simples e sem cura térmica.

Elemento	% Peso	% Peso σ	% Atômica
Sódio	3,787	0,664	3,595
Alumínio	12,378	0,820	10,013
Silício	20,106	1,096	15,624
Ferro	16,614	1,793	6,493

Fonte: Elaborada pelo autor.

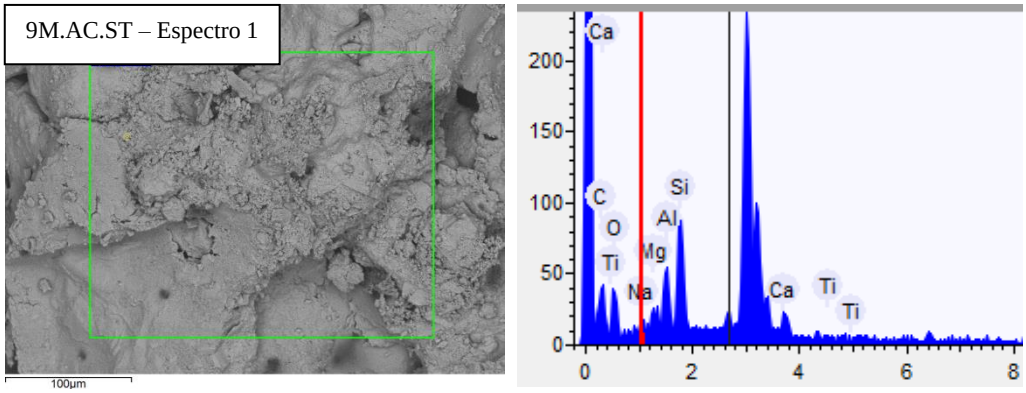
Há também para essa amostra a presença de ferro que pode indicar uma reação incompleta entre o precursor e o ativador (MAHMOODI, 2020), o que pode estar associado ao uso de um ativador simples, o qual possivelmente não forneceu as condições ideais para que as reações de geopolimerização acontecessem completamente, justificando os baixos valores de resistência à compressão também para essa amostra em comparação com as outras formulações de tijolos.

Mahmoodi (2020) avaliou a otimização de aglutinantes de geopolímero à base de resíduos de tijolos à temperatura ambiente e parâmetros químicos pré-direcionados e,

analisando os corpos-de-prova por MEV e EDS, encontrou teores de ferro e potássio, que são indicativos da não reação do precursor na mistura proposta.

Os resultados da análise por EDS, no espectro 1 da amostra de tijolo com metacaulim, ativador composto e cura térmica (9M.AC.CT) é apresentado na figura 32 e tabela 20, respectivamente. A análise por EDS permitiu verificar que no espectro 1, ocorreu maior porcentagem em peso do elemento silicio e menores porcentagens para titânio, sódio, magnésio, cálcio e alumínio.

Figura 32 - Resultados das análises por MEV e EDS da amostra 9M.AC.CT, de tijolos contendo metacaulim, ativador composto e cura térmica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 20 - Resultados da análise por EDS para amostra 9M.AC.CT, de tijolos contendo metacaulim, ativador composto e cura térmica.

Elemento	% Peso	% Peso σ	% Atômica
Sódio	1,319	0,780	0,924
Magnésio	2,291	0,722	1,518
Alumínio	5,587	0,945	3,336
Silício	13,409	1,696	7,690
Cálcio	4,687	1,017	1,884
Titânio	0,871	0,890	0,293

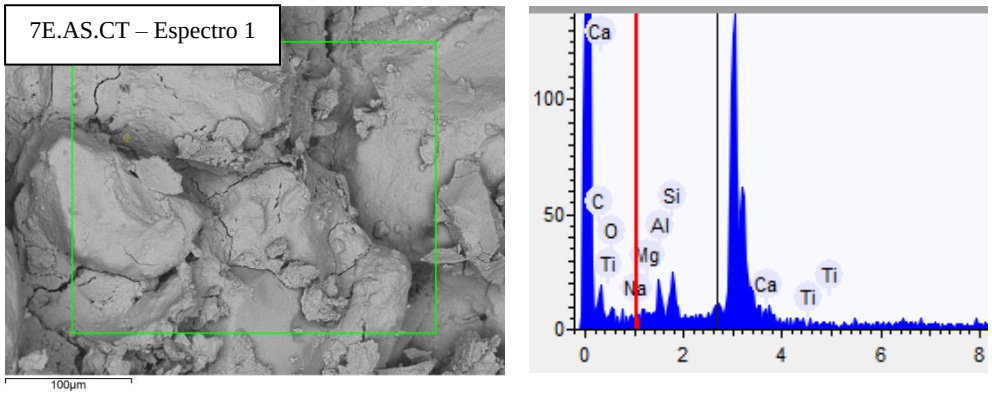
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os elementos encontrados foram condizentes com a composição do precursor, matriz e ativador composto, sendo os principais elementos para uma matriz álcali-ativada. A razão Ca:Si

resultou em um valor de 0,35, estando dentro da faixa de 0,29 a 0,53 encontrado em estudo feito por Kamath et al. (2021).

Os resultados da análise por EDS, no espectro 1 da amostra de tijolo com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica (7E.AS.CT) é apresentado na figura 33 e na tabela 21, respectivamente. A análise por EDS permitiu verificar que no espectro 1, ocorreram maiores porcentagens em peso dos elementos silício e aluminio e menores porcentagens para cálcio e sódio.

Figura 33 - Resultados das análises por MEV e EDS da amostra 7E.AS.CT, de tijolos contendo escória de alto forno, ativador simples e cura térmica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 21 - Resultados da análise por EDS para amostra 7E.AS.CT, de tijolos contendo metacaulim, ativador composto e cura térmica.

Elemento	% Peso	% Peso σ	% Atômica
Sódio	3,261	1,560	2,166
Alumínio	6,690	1,953	3,741
Silício	8,010	2,351	4,303
Cálcio	3,537	2,298	1,332

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os elementos encontrados foram de acordo com a composição da matriz, precursor e ativador simples, sendo também os principais elementos para uma matriz álcali-ativada. A razão Ca:Si resultou em um valor de 0,44, estando dentro da faixa de 0,29 a 0,53 encontrado em estudo feito por Kamath et al. (2021).

Os materiais que contém cálcio, como a escória, exercem efeito favorável com o tempo, para o desenvolvimento da resistência. Os íons cálcio entram na estrutura tetraédrica do material álcali-ativado e compensam a carga nos átomos de alumínio, função esta que é atribuida ao Na+, sendo provável que os íons Ca^{2+} interconectem as cadeias individuais Si-O-Al-O dando origem a uma estrutura caracterizada por altos valores de densidade e resistência (PHOO-NGERNKHAM, 2015).

6. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas pode-se concluir que para a produção dos tijolos com matriz, metacaulim como precursor e ativador simples, com ou sem cura térmica, há a necessidade de considerar o uso de um ativador composto, já que não foi possível atingir os valores de resistência à compressão estabelecidos pela norma de referência. Já para o ensaio de absorção de água dessas formulações, as amostras demonstraram-se estáveis, atendendo os requisitos da norma de referência, onde os tijolos com cura térmica apresentaram uma média de absorção de 12,1% e os tijolos sem cura térmica, uma média de 13,2%. A caracterização por DRX, MEV e EDS sugeriu uma reação de geopolimerização incompleta, com parcelas de materiais da matriz e precursor não reagidos e com uma baixa formação de estruturas provenientes do mecanismo de reações proposto, devido possivelmente a não dissolução completa de SiO_2 e Al_2O_3 pelo uso de ativador simples. Observou-se através da análise de DRX que o metacaulim não apresentou uma calcinação satisfatória para a completa conversão de caulinita em metacaulinita, o que também pode ter diminuido a reatividade do material. Também foi possível concluir que a cura térmica desses tijolos foi efetiva para inibir o surgimento de eflorescência, o que é determinante no aspecto visual e qualidade do material.

Os tijolos produzidos a partir da matriz, metacaulim como precursor e ativador composto com cura térmica, atenderam todos os requisitos estabelecidos pela norma técnica de referência, obtendo uma média de resistência à compressão de 2,10 MPa e uma média de absorção de água de 14,8%, sendo uma produção viável em relação as propriedades mecânicas e físicas do material. A caracterização por DRX, MEV e EDS permitiu verificar a formação de estruturas esperadas, como a Calcita e a estrutura zeolítica Gismondine, pelo mecanismo de reação da álcali-ativação. Dessa forma, conclui-se que a cal hidratada utilizada para formar um ativador composto com a solução de NaOH foi efetiva, obtendo-se ganhos de resistência a

compressão para esta formulação em comparação com as formulações com metacaulim e ativador simples, com ou sem cura térmica.

Os tijolos produzidos a partir da matriz, escória de alto forno como precursor, ativador simples com cura térmica atenderam todos os requisitos estabelecidos pela norma técnica de referência, apresentando os maiores valores de resistência à compressão individuais e na média, com valor de 3,60 MPa e absorção de água com média de 13,4%, sendo uma produção viável em relação as propriedades mecânicas e físicas do material. A caracterização por DRX, MEV e EDS permitiu verificar a formação de estruturas provenientes do mecanismo de reação da álcali-ativação, como o silicato de cálcio hidratado e a estrutura zeolítica Gismondine, confirmando o bom desempenho obtido nos ensaios. Conclui-se que a escória de alto forno pode ser utilizada na produção de tijolos álcali-ativados como material precursor, sendo possível obter excelentes propriedades físicas e mecânicas, reaproveitando dessa forma um subproduto da indústria siderurgica.

De acordo com os resultados obtidos para as caracterizações físicas e mecânicas dos tijolos com metacaulim, ativador composto e cura térmica e para os tijolos com escória de alto forno, ativador simples e cura térmica, ressalta-se que além de atenderem a norma técnica brasileira NBR 8491:2012, atenderam também a norma Colombiana NTC 5324 e francesa XP P 13-901, onde os valores para o ensaio de resistência à compressão a seco variam entre 2 MPa e 6 MPa e a úmido, entre 1 MPa a 3 MPa. Ambas as formulações também atenderam a norma espanhola UNE 41410, a qual determina valores de resistência entre 1,3 MPa e 5 MPa. Os tijolos com escória ainda antenderam a norma alemã DIN 18945, que determina valor de resistência entre 2,5 MPa a 7,5 MPa e valores individuais superiores a 2 MPa.

Nas metodologias de produção propostas, verificou-se a importância da caracterização dos materiais precursores e matriz a ser estabilizada, para o fornecimento adequado do ambiente alcalino através dos ativadores, com dosagens adequadas às caracteristicas desses materiais, permitindo concluir que a produção dos tijolos em escala real utilizando a álcali-ativação é viável e promissora, podendo atingir satisfatóriamente os requisitos da norma técnica utilizada de referência para sua aplicação, reaproveitando resíduo industrial, com potencial para um desenvolvimento sustentável.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Realização de análise do ciclo de vida dos tijolos produzidos neste trabalho, para quantificar as diminuições de impactos ambientais na produção em relação à produções utilizando o cimento Portland, bem como a comparação de custo entre os modelos de produção;

- Formulação de tijolos avaliando outros resíduos industriais como matrizes e precursores;

- Formulação de tijolos avaliando outros ativadores simples e compostos, com a finalidade de avaliar as propriedades mecânicas e relações de custo-benefício de produção;

- Realizar um estudo específico do comportamento reológico das formulações, com a finalidade de aprimorar as etapas de mistura e homogeneização das matérias-primas;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIKO, A. K. **Tecnologias apropriadas: tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento.** 1980. 115 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

AHMARI, S., ZHANG, L. **Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization.** Construction and building materials, v. 29, p. 323-331, 2012.

ALVARENGA, Cristiane Bom Conselho Sales. **Síntese e caracterização de geopolímeros à base metacaulim e micropartículas de vidro soda-cal.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ALVAREZ, A. A.; RIPOLL-MEYER, V. **Matriz de referencia para la optimización del ciclo de vida de los materiales constructivos de la vivienda social en zonas árido-sísmicas**. Revista hábitat sustentable, v. 8, n. 2, p. 52-63, 2018.

ALONSO, S. PALOMO, A. **Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio**, Mater. Lett. 47, 55–62. 2001.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) **Report on Soil Cement.** Report ACI 230.1R-09, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2009.

AMIN, Sh K. et al. **Fabrication of geopolymer bricks using ceramic dust waste.** Construction and Building Materials, v. 157,p. 610-620, 2017.

ASSI, L.; DEAVER, E; ELBATANOUNY, M.; ZIEHL, P. **Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete.** Construction and Building Materials, v. 112, p.807-815, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação de tijolos-solo cimento com a utilização de prensas manuais.** Publicações ABCP. São Paulo. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8492 – **Tijolos maciços de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502 – **Terminologia – Rochas e solos.** Rio de Janeiro. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459 – **Solo: Determinação do limite de liquidez. Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508 – **Grãos de Solo que passam na peneira 4,8mm: determinação da massa específica. Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7175: **Cal hidratada para argamassas; requisitos**. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180 – **Solo: determinação do limite de plasticidade. Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181 – **Solo: análise granulométrica. Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto-especificação**. ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8491 – **Tijolo maciço de solo-cimento: especificação**. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217 – **Agregado: determinação da composição granulométrica. Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 1987..

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10832 – **Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual: procedimento**. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10833 – **Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com a utilização de prensa hidráulica: procedimento**. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). NBR 12023 – **Solo-cimento: ensaio de compactação. Método de ensaio**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Materiais Pozolânicos-Requisitos**. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: **Cimento Portland-Requisitos**. 2018.

AZIZI, Seyed Naser; ALAVI DAGHIGH, Akram; ABRISHAMKAR, Maryam. **Phase transformation of zeolite P to Y and analcime zeolites due to changing the time and temperature.** Journal of Spectroscopy, v. 2013, 2013.

BARBOSA, N.; MATTONE, R.; MESBAH, A. (2002) **Blocos de Concreto de Terra: uma opção interessante para a Sustentabilidade da Construção**. 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte – Minas Gerais, 2002.

BARROS, Felipe da Silva. **Efeito da substituição do cimento Portland por cinza de casca de arroz e cal nas propriedades de tijolos ecológicos**. 2016.

BRINDLEY, G.W.; KAO, C.; HARRISON, J.L.; LIPSICAS, M. & RAYTHATHA, R. **The relation between structural disorder and other characteristics of kaolinite and dickite**. Clays Clay Miner., 34:239-249, 1986.

BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K.; WEIL, M. **Development of Geopolymer Concrete Supported by System Analytical Tools.** Proceeding sof the 2nd Int. Symposiun of Non-tradition Cementand Concrete. ed. By Bilekand Kersner, 25-35, 2005.

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

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas, IAC, 2009. 94 p. (Boletim técnico, 106). 2009.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 7ª ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, v.1. 2015

CATAURO, M.; PAPALE, F.; LAMANNA, G.; BOLLINNO, F. Geopolymer/PEG Hybrid Materials Synthesis and Investigation of the Polymer Influence on Microstructure and Mechanical Behavior. **Materials Research**, v.18, n.4, p. 698-705, 2015.

CHEN, Liang et al. **Preparation and properties of alkali activated metakaolin-based geopolymer.** Materials, v. 9, n. 9, p. 767, 2016.

CHENG, H.; LIU, Q.; CUI, X.; ZHANG, Q.; ZHANG, Z.; FROST, R. L. **Mechanism of dehydroxylation temperature decrease and high temperature phase transition of coal-bearing strata kaolinite intercalated by potassium acetate**. Journal of Colloid and Interface Science. V. 376, p. 47-56, 2012.

CHIARATTI, L; GOMES, C.; BRAGA, R; VASCONCELOS, H. O. B. de; PRADO, J. L.V. T.; **Escória de alto forno - COSIPA**, Seminário sobre resíduos siderúrgicos, Rio de Janeiro-RJ, 1987.

CHRISTÓFOLLI, Jorge Luiz. **Estudo de argilas calcinadas para produção de cimento Portland pozolânico na região de Curitiba, Paraná** – Brasil. Curitiba. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, 2010.

CONSOLI, N.C.; A. DALLA ROSA, M.B. Corte, L. da S. Lopes, B.S. Consoli, **Porositycement ratio controlling strength of artificially cemented clays**, J. Mater. Civ. Eng.. 23 1249–1254, https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000283, 2011.

CONSOLI, N. C.; D. Foppa, L. Festugato, S.H. Karla, **Key parameters for strength control of artificially cemented soils,** J. Mater. Civ. Eng. 133 197–205, https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197). 2007.

CORASPE, Luis Alberto Vásquez et al. Situación actual de la síntesis y utilización de geopolímeros. **Gaceta Técnica**, v. 22, n. 2, 2021.

COSTA D. S., MOREIRA A. C. M., **Estudo do aproveitamento da escória de alto Forno das siderúrgicas de Marabá – PA para fabricação de material**, 2013.

COSTA, WFS; CHOQUE FERNANDEZ, O. J.; SOUSA, MSC. **Caracterização de escórias de aciaria e de alto-forno produzidas em usinas ao longo da estrada de ferro Carajás para aplicação industrial**. Belo Horizonte: XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2019.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; BANFILL, P.F.G. **Alkali activated fly ash: effect of admixtures on paste rheology. Rheological Ac**ta, v. 48, i. 4, p. 447-455, 2009.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements**. In: First international conference on alkaline cements and concretes. Kiev State Technical University, Ukraine: Scientific Research Institute on Binders and Materials, 1994.

DAVIDOVITS J. A., **Geopolymer Chemistry and Applications,** 2nd ed., Institut G_[opolym__re, Saint-Quentin, 2008.

DAVIDOVITS, J. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs .** Geopolymer 2002 Conference, p. 1 – 16, 2002.

DAVIDOVITS, J. **Application of Ca-based geopolymer with blast furnace slag, a review**. In: 2nd International Slag Valorisation Symposium. 2011.

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

DE SOUZA JUNIOR, Dilermando Salvador et al. **Estudo do comportamento de escórias de alto-forno a carvão vegetal produzidas a partir de ativação a quente**. 2007.

DHOBLE, Yogesh Nathuji; AHMED, Sirajuddin. **Review on the innovative uses of steel slag for waste minimization.** Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 20, n. 3, p. 1373-1382, 2018.

DIN 18945: 2013 - **Earth blocks – Terms and definitions, requirements, test methods (em alemão).** NABau: Berlin.

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

DUXSON, P. et al. **Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007a.

DUXSON, P., MALLICOAT, S.W., LUKEY, G.C., KRIVEN, W.M., VAN DEVENTER, J.S.J. **The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin based geopolymers. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 292, n. 1, p. 8–20, 2007b.

DUXSON P., MALLICOAT S. W., LUKEY G. C., KRIVEN W. M., VAN DEVENTER J. S. J. **The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers.** Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects; 292(1):8–20, 2007.

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

FALAYI T.; F.N. OKONTA, F. NTULI, **Desilication of fly ash and development of lightweight construction blocks from alkaline activated desilicated fly ash,** Int. J. Environ. Waste Manage. 20 (3), 233–253. 2017.

FENG, DINGWU; PROVIS, JOHN L. AND VAN DEVENTER, JANNIE S. J. **Thermal Activation of Albite for the Synthesis of One-Part Mix Geopolymers.** Journal Am. Ceram. Soc., vol.95 [2], 565–572, 2012.

FERNÁNDEZ-JIMENEZ, A. et al. **Quantitative determination of phases in the álcali activation of fly ash. Part I. Potential ash reactivity.** Fuel, v. 85, n. 5, p. 625-634, 2006.

FERONE C., LIGUORI B., CAPASSO C., COLANGELO F., CIOFFI R., CAPPELLETTO E., DI R., MAGGIO, **Thermally treated clay sediments as geopolymer source material**, Appl. Clay Sci. 107, 195–204. 2015.

FERREIRA, D. W. **Comparação energética de tijolos comum e sem queima pela análise do ciclo de vida**. 2015.

FILHO, J., GOBBI, A., PEREIRA, E., TANAKA, R., MEDEIROS, M. **Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG)**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3. 2017.

GALUPPO, Mariana Vilela. **Estudo do emprego da escória granulada de alto-forno na massa cerâmica de revestimento.** 2020.

GARCIA-LODEIRO, I., PALOMO, A., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., MACPHEE, D.E., 2011. **Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na2O-CaOAl2O3- SiO 2-H2O**. Cem. Concr. Res. 41, 923–931. 2011.

GARCIA-LODEIRO, I.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. **Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash–portland cement blends.** Cement and concrete research, v. 52, p. 112-122, 2013.

GARCIA-LODEIRO, I. et al. **Alkaline activation of synthetic aluminosilicate glass**. Ceramics International, v. 40, n. 4, p. 5547-5558, 2014.

GAVALI, H. R. et al. **Development of sustainable alkali-activated bricks using industrial wastes.** Construction and Building Materials, v. 215, p. 180-191, 2019.

GHANSEL, O., **Characteristics of fired clay bricks with pumice additive. Energy and Buildings. vol. 102**, p. 217-224. 2015.

GHOSH P, Ghosh K., **Effect of alkali concentration on mechanical properties, microstructure, zeta potential and electrical conductivity of thermally cured fly-ash blast furnace slag based blended geopolymer composite**. Orient J Chem 32(2):704–715, 2017.

GOUNY, **Fabrice et al. Mechanical behavior of an assembly of wood–geopolymer–earth bricks.** Construction and Building Materials, v. 38, p. 110-118, 2013.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com adição de sílica ativa.** São Carlos: EESC-USP, 165p. Dissertação Mestrado. 2003.

GUTIÉRREZ R. M., TORRES J., VIZCAYNO C., CASTELLÓ R. **Influence of the calcination temperature of kaolin on the mechanical properties of mortars and concretes containing metakaolin.** Clay Miner 2008;43(2):177–83.

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

HODHOD, Osama A.; ALHARTHY, Samiha E.; BAKR, Shreen M. **Physical and mechanical properties for metakaolin geopolymer bricks**. Construction and Building Materials, v. 265, p. 120217, 2020.

HWANG, C. L. **Investigation into the use of unground rice husk ash to produce ecofriendly construction bricks**. Construction and Build Materials. v. 93. p. 335-341. 2015.

IFTIKHAR, Sahar et al. **Synthesis and characterization of sustainable geopolymer green clay bricks: An alternative to burnt clay brick.** Construction and Building Materials, v. 259, p. 119659, 2020.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de resíduos da construção**. Seminário Reciclagem de Resíduos Sólidos Domésticos, v. 1, n. 1, p. 01-13, 2000.

KAMATH, Muralidhar V.; PRASHANTH, Shreelaxmi; KUMAR, Mithesh. **Review of Low to High Strength Alkali-Activated and Geopolymer Concrete.** In: Recent Trends in Civil Engineering. Springer, Singapore, 2021.

KARIYAWASAM, K.K.G.K.D.; JAYASINGHE, C. **Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material**. Constr. Build. Mater. 2016.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. **Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review.** Journal of Materials Science, v. 42, n. 3, p. 729–746, 2007.

KHATER, H. M. Effect of calcium on geopolymerization of aluminosilicate wastes. **Journal of materials in civil engineering**, v. 24, n. 1, p. 92-101, 2012.

KOMNITSAS, Kostas; ZAHARAKI, Dimitra. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals engineering**, v. 20, n. 14, p. 1261-1277, 2007.

LANGARO, Eloise Aparecida et al. **Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

LEMOUGNA, Patrick N.; WANG, Kai-Tuo; TANG, Qing; MELO, U. Chinje; CUI, Xue-Min. **Recent developments on inorganic polymers synthesis and applications**. Ceramics International, [S.L.], v. 42, n. 14, p. 15142-15159, nov. 2016.

LI Z, DING Z, ZHANG Y. **Development of sustainable cementitious materials. In: Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology**, Beijing, China; p. 55–76. 2004.

LIEW, Y., M.; HEAH, C.,Y.; LI, L.,Y.; JAYA, N.,A.; ABDULLAH, M., M., A., B.; TAN, S.,J.; HUSSEIN, K.; **Formation of one-part-mixing geopolymers and geopolymer ceramics from geopolymer powder, Construction and Building Materials**. 156, 9–1. 2017.

LIEW, Yun-Ming et al. **Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review.** Progress in Materials Science, v. 83, p. 595-629. 2016.

LIU, Y., LEI, S., LIN M., LI, Y. YE, Z., FAN, Y. **Assessment of pozzolanic activity of calcined coal-series kaolin.** Aplied Clay Science., v. 143, p. 159–167, 2017.

LIMA, J. L.. **Efeito da Relação Molar SiO2/Al2O3 e das Condições de Cura nas Propriedades de Geopolímeros obtidos com Silicato de Cinza da Casca de Arroz**. 2018. 96

f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambienta, Universidade Federal de Pernanbuco, Caruaru, 2018.

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito.** Campina Grande, Paraíba Brasil: Universidade, 2010.

MADDALENA, R.; ROBERTS, J. J.; HAMILTON, A. (2018). **Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements.** Journal of Cleaner Production, 186, 933–942. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.138.

MAHMOODI, O. et al. **Optimization of brick waste-based geopolymer binders at ambient temperature and pre-targeted chemical parameters**. Journal of Cleaner Production, v. 268, p. 122285, 2020.

MAJIDI B. **Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review**. Mater Technol; 24(2):79–87. 2009.

MASKELL, D.; HEATH, A.; WALKER, P. **Use of metakaolin with stabilised extruded earth masonry units.** Construction and Building Materials, v. 78, p. 172-180, 2015.

MAZZEO, Fernando G,. **Fabricação de tijolos modulares de solo cimento por prensagem manual com e sem a adição de sílica ativa.** Dissertação de Mestrado em Arquitetura. EESC – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

MCGEARY, RKp. **Mechanical packing of spherical particles**. Journal of the American ceramic Society, v. 44, n. 10, p. 513-522, 1961.

MENEZES, L. C. M. de A. O.; YAMASHITA, M. **Produção de tijolos ecológicos com cinzas de caldeira e bagaço de malte**. 2017. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

MIELI, P. H. **Avaliação do tijolo modular de solo-cimento com material na construção civil.** 2009. 59f. Dissertação (Conclusão de curso – Engenharia de Materiais). – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. UFRJ, Rio de Janeiro. 2009.

MONTE, M. B. M; PAIVA, P. R. P; TRIGUEIRO, F. E. **Técnicas Alternativa para Modificação do Caulim.** Rio de Janeiro: Cento de Tecnologia Mineral (CETEM), Série Rochas e Minerais Industriais, Vol 8, 50 p., 2003.

NASCIMENTO R. M., **Estudo da aditivação do metacaulim de alta reatividade produzido por meio do método de calcinação flash em cimento Portland**. Universidade Federal do Paraná, 2009.

NASCIMENTO, A. M. et al. **Tijolo modular de solo-cimento como material na construção.** Revista InterScientia, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 187-202, 2018.

NEVES, Célia; FARIA, Obede Borges. **Técnicas de construção com terra**. Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA. Disponível em< http://www. redproterra. org>. Acesso em, v. 14, n. 08, p. 2013, 2011.

NF XP P 13-901: 2001 - **Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. Definitions, spécifications, méthodes d'essai, conditions de reception**. AFNOR: Paris.

NORTH, M.R., SWADDLE, T.W. **Kinetics of Silicate Exchange in Alkaline Aluminosilicate Solutions** 4, 2661–2665. 2000.

NTC 5324: 2004 - **Bloques de suelo cemento para muros y divisones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de Ensayo.** Condiciones de entrega. ICONTEC: Bogotá.

OLAWALE M. D. Syntheses, **Characterization and Binding Strength of Geopolymers: A Review. International Journal of Materials Science and Applications**, v. 2, n. 6, p. 185-193, 2013.

OLIVEIRA I. R. DE, STUDART A. R, PILEGGI R. G., PANDOLFELLI V. C., **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**, Fazendo Arte Editorial, S. Paulo, SP. 2000.

OSÓRIO, P. **Concepção de um Saferoom Anti-Tornado em Betão Geopolimérico**. 2006. 204 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Do Minho. Guimarães, Portugal, 2006.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, Said. **Construção Sustentável: o caso dos materiais de construção**. 2007.

PACHECO-TORGAL, F.; EIRES, R.; JALALI, Said. **Construção em terra**. Universidade do Minho. TecMinho, 2009.

PACHECO-TORGAL, Fernando et al. (Ed.). **Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes**. Elsevier, 2014.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A.; LEONELLI, C.; PALOMO, A.; CHINDAPRASIRT, P. **Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes**. 54. ed. Elsevier, 2015.

PALACIOS, M.; BANFILL, P. F. G ; PUERTAS, F. **Rheology and setting of alkali-activated slag pastes and mortars: effect of organic admixture.** ACI Materials Journal. March-April, 2008.

PALOMO, A., GRUTZECK, M., BLANCO, M. - **Alkali-activated fly ashes: A cement for the future**. Cement and Concrete Research, v. 29, n. 8, p. 1323-1329, 1999.

PALOMO, A., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., KOVALCHUK, G. **Some key factors affecting the alkali activation of fly ash,** in: 2nd International Symposium of Non- Traditional Cement and Concrete. Brno, Czech Republic, 2005.

PALOMO, Ángel et al. **A review on alkaline activation: new analytical perspectives**. 2015.

PAPA, E. et al. **Zeolite-geopolymer composite materials: Production and characterization**. Journal of Cleaner Production, v. 171, p. 76–84, 2018.

PANGDAENG, Saengsuree et al. **Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive.** Materials & Design, v. 53, p. 269-274, 2014.

PARTICIPAÇÃO (%) DO PIB DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO PIB DO BRASIL. **Câmara Brasileira da Industria da Construção**, 2020. Disponível em: < http://www.cbicdados.com.br/media/anexos/1.3.1_Sala_de_Imprensa_23.pdf>. Acesso em: 19/06/2021.

PEYNE, J. et al. **Feasibility of producing geopolymer binder based on a brick clay mixture**. Ceramics International, v. 43, n. 13, p. 9860-9871, 2017.

PHOO-NGERNKHAM, T. el. al. **High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material**. Construction and Building Materials. Tailândia, v. 98, p. 482-488, Ago. 2015.

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

PORTAL DE PERIÓDICOS CAPES. Disponível em <www.periodicos.capes.gov.br>, acesso em 10/01/2022;

PREETHI, R. K.; REDDY, BV Venkatarama. **Experimental investigations on geopolymer stabilised compressed earth products. Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119563, 2020.

PRESA, M. B. **Resistência a compressão e absorção de água em tijolos de solo-cimento**. 2011. Projeto de Conclusão de Curso – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

PROVIS, J. L**. Alkali-activated materials**, Cement and Concrete Research**,** v. 114, p. 40-48, 2018.

PROVIS, J.L, **Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?**, Mater. Struct. 47, 11–25. 2014.

RAMEZANIANPOUR A., JOVEIN H.B., **Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes**. Construction Build Mater; 30:470–9. 2012.

REIG, L., TASHIMA, M.M., BORRACHERO, M. V., MONZÓ, J., CHEESEMAN, C.R., PAYÁ, J., 2013. **Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste.** Constr. Build. Mater. 43, 98–106. 2013.

RICHARDS, G.; AGRANOVSKI, I. E. (2017). Dioxin-like pcb emissions from cement kilns during the use of alternative fuels. **Journal of Hazardous Materials**, 323, 698–709. doi:10.1016/j.jhazmat.2016.10.040. 2017.

RIGASSI, V.; CRATerre-EAG. **Compressed Earth Blocks: Manual of Production**; Deutsches Zentrum für.

ROBAYO, R.A., MULFORD, A., MUNERA, J., MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R., 2016. **Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste**. Constr. Build. Mater. 128, 163–169. 2016.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael A. et al. **Eco-house prototype constructed with alkali-activated blocks: material production, characterization, design, construction, and environmental impact.** Materials, v. 14, n. 5, p. 1275, 2021.

RODRIGUES, M. S. **Avaliação de cinzas de palha de cana de açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias.** Tese de Doutorado (Doutor em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2012.

ROQUE, R. A. L., PIERRI, A. C. **Uso inteligente de recursos naturais e sustentabilidade na construção civil**. Research, Society and Development. 8 (2). 1-18.

SABIR, B.b; WILD, S; BAI, J. **Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review.** Cement And Concrete Composites, [s.l.], v. 23, n. 6, p.441-454, dez. 2001.

SAIDI, M.; CHERIF, A.S.; ZEGHMATI, B.; SEDIKI, E. **Stabilization e_ects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks.** Constr. Build. Mater. 2018, 167, 566–577. 2018.

SAMPAIO, Renato Barbosa. **Comportamento reológico de pastas geopoliméricas com uso de aditivos dispersantes**. 2017.

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

SCHROEDER, D. **Solos: fatos e conceitos**. Traduzido por Alfredo Scheid Lopes. Zug: International Potash Institute, 244 p, 2017.

SCORZELLI, R.B.; BERTOLINO, L.C.; LUZ, A. B.; DUTTINE, M.; SILVA, F.A.N.G. & MUNYACO, P**. Spectroscopy studies of kaolin from different Brazilian regions** . Clay Minerals, 43. pp1 - 7, 2008.

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

SHI C, FERNANDEZ-JIMENEZ A. **Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements**. J Hazard Mater;137(3): 1656–63. 2006.

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

SHUBBAR, A. A. et al. **Future of clay-based construction materials–A review**. Construction and Building Materials, v. 210, p. 172-187. 2019.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Resultados preliminares de Setembro de 2020.** 2020. Disponível em: < http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=53>. Acesso em: 20/06/2020.

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

SINDHUNATA, J.S.J. VAN; G.C. DEVENTER, H. Lukey, XU, **effect of curing temperature and silicate concentration on fly-ash-based geopolymerization**, Ind. Eng. Chem. Res. 45, 3559–3568. 2006.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. **Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview.** Construction and Building Materials, v. 237, p. 117455, 2020.

SITHOLE, Nastassia Thandiwe; MASHIFANA, Tebogo. **Geosynthesis of building and construction materials through alkaline activation of granulated blast furnace slag.** Construction and Building Materials, v. 264, p. 120712, 2020.

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

SOUZA, J. S. C. **Estudo de argamassa à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas.** 228 f. Universidade Federal de Pernambuco (dissertação de mestrado), 2013.

SUMMERBELL, D. L.; BARLOW, C. Y.; CULLEN, J. M. (2016). **Potential reduction of carbon emissions by performance improvement: A cement industry case study.** Journal of Cleaner Production, 135, 1327–1339. doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.155. 2016.

TAALLAH, B.; GUETTALA, A.; GUETTALA, S.; KRIKER, A. **Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers.** Constr. Build. Mater, 59, 161–168. 2014.

TAALLAH, B.; GUETTALA, A. **The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers**. Constr. Build. Mater. 104, 52–62. 2016.

TEIXEIRA, Elisabete R. et al. **Mechanical and thermal performance characterisation of compressed earth blocks**. Energies, v. 13, n. 11, p. 2978, 2020.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo (Ed.).** 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p. 2017.

UNE 41410: 2008 - **Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo**. AENOR: Madrid.

VALADARES, J. et al. **Síntese e caracterização de geopolímeros macroporosos com uso de peróxido de hidrogênio.** 2019.

VAN DEVENTER J. S. J., PROVIS J., DUXSON P., LUKEY G. C. **Technological environmental and commercial drivers for the use of geopolymers in a sustainable material industry.** In: International symposium of advanced processing of metals and materials. p. 241–52. 2006.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LORENZEN, L. **The potencial use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: part I. Theory and applications.** Minerals Engineering. 10: 659-669, 1997.

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

VENKATARAMA REDDY, B. V., P. Prasanna Kumar, **Cement stabilised rammed earth. Part A: Compaction characteristics and physical properties of compacted cement stabilised soils**, Mater. Struct. 44, 681–693, https://doi.org/10.1617/s11527-010-9658-9. 2011.

WALKER, P. J., **Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks**, Cem. Concr. Compos. 17, 301–310, https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00019-9. 1995.

WANG, H. LI, F. YAN, **Synthesis and mechanical properties of meta-kaolinite based geopolymer**, Colloids Surf. A 268, 1–6. 2005.

XU H., **Geopolymerisation of Aluminosilicate Minerals (Ph.D. thesis)**, Department of Chemical Engineering, University of Melbourne, Australia, 2013.

YAZDI, Mohammad Ali; LIEBSCHER, Marco; HEMPEL, Simone; YANG, Jian; MECHTCHERINE, Viktor. **Correlation of microstructural and mechanical properties of geopolymers produced from fly ash and slag at room temperature**. Construction and Building Materials. Vol. 191, p.330-341. 2018.

YOUSSEF, Nicolas; LAFHAJ, Zoubeir; CHAPISEAU, Christophe. **Economic Analysis of Geopolymer Brick Manufacturing: A French Case Study**. Sustainability, v. 12, n. 18, p. 7403, 2020.

YIP CK, VAN DEVENTER JSJ. **Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymer binder.** J Mat Sci 38:3851–3860,2003.

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

ZHANG, L.; GUSTAVSEN, A.; JELLE, B.P.; YANG, L.; GAO, T.;WANG, Y. **Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks.** Constr. Build. Mater. 2017, 151, 504–511. 2017

ZHANG, Zipeng et al. **A review of studies on bricks using alternative materials and approaches.** Construction and Building Materials, v. 188, p. 1101-1118, 2018.

APÊNDICE A

1) Cálculo de razão molar SiO_2:Al_2O_3 do solo:

30 g SiO_2 = 0,499 mols Al_2O_3 = 0,249 mols

45,1% de SiO_2 = 0,225 mols 26,7% de Al_2O_3 = 0,0785 mols

(0,225 mols/0,0785 mols) = 2,87

2) Cálculo de razão molar SiO_2:Al_2O_3 do metacaulim:

30 g SiO_2 = 0,499 mols Al_2O_3 = 0,249 mols

75,21% de SiO_2 = 0,375 mols 17,96% de Al_2O_3 = 0,0528 mols

(0,375 mols/0,052 8mols) = 7,11

3) Cálculo de razão molar SiO_2:Al_2O_3 da escória de alto forno:

30 g SiO_2 = 0,499 mols Al_2O_3 = 0,249 mols

37,72% de SiO_2 = 0,188 mols 14,55% de Al_2O_3 = 0,0362 mols

0,188 mols/0,0362 mols = 5,19

4) Cálculo de razão molar global para dosagem com precursor metacaulim e solo

15 kg de solo SiO_2 = 249,650 mols Al_2O_3 = 147,116 mols

45,1% de SiO_2 = 112,59 mols 26,7% de Al_2O_3 = 39,28 mols

4,20 kg de metacaulim SiO_2 = 69,902 mols Al_2O_3 = 41,193mols

75,21% de SiO_2 = 52,57 mols 17,96% de Al_2O_3 = 7,40 mols

(112,59 + 52,57 / 39,28 + 7,40) = 3,5

5) Cálculo de razão molar global para dosagem com precursor escoria de alto forno e solo

15 kg de solo SiO_2 = 249,650 mols Al_2O_3 = 147,116 mols

45,1% de SiO_2 = 112,59 mols 26,7% de Al_2O_3 = 39,28 mols

17 kg de escória de alto forno SiO_2 = 282,94 mols Al_2O_3 = 166,73 mols

37,72% de SiO_2 = 106,94 mols 14,55% de Al_2O_3 = 24,26 mols

(112,59 + 106,94 / 39,28 + 24,26) = 3,5