

**RENAN MORENO PEDRO**

**Alternativas para a substituição do cimento na construção civil**

Guaratinguetá  
2023

**Renan Moreno Pedro**

**Alternativas para a substituição do cimento na construção civil**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em (nome do curso) da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em (nome do curso).

Orientador (a): Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Isabel Cristina de Barros Trannin

Guaratinguetá  
2023

P372a	<p>Pedro, Renan Moreno</p> <p>Alternativas para a substituição do cimento na construção civil / Renan Moreno Pedro – Guaratinguetá, 2023.</p> <p>32 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 30-32</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023.</p> <p>Orientadora: Profª Drª Isabel Cristina de Barros Trannin</p> <p>1. Sustentabilidade. 2. Construção sustentável. 3.Cimento Portland. 4. Construção civil. I. Título.</p>
-------	--

CDU 69

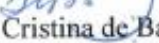


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

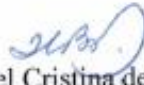
RENAN MORENO PEDRO

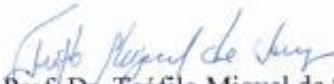
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

  
Profª Drª Isabel Cristina de Barros Trannin  
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:

  
Profª Drª Isabel Cristina de Barros Trannin  
Orientadora/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza  
UNESP-FEG

  
Profª Drª Mariana Ferreira Benessiuti Motta  
UNESP-FEG

Janeiro de 2023

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer à minha noiva, Fernanda Akemi Suzuki, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e graças a ela tive forças para concluir este trabalho e a minha graduação.

Agradeço também ao meu pai, Raul Pedro Neto, que me apoiou durante todo o trajeto até o fim do curso.

Muito Obrigado!

## RESUMO

A produção do cimento é responsável por uma significativa parcela da emissão global de dióxido de carbono, sendo importante a realização de estudos de alternativas viáveis para a substituição, mesmo que parcial, deste material no setor de construção civil. Neste trabalho foram compiladas as informações da literatura relacionadas aos avanços das pesquisas na obtenção de materiais alternativos que apresentam viabilidade técnica e econômica na substituição do cimento e que podem contribuir para a sustentabilidade da indústria da construção civil. Algumas das principais alternativas foram abordadas no trabalho, considerando a teoria, o modo de preparo do material, os possíveis componentes, suas vantagens e desvantagens. Existem alternativas mais simples como o tijolo solo-cimento, que utiliza apenas o solo e uma quantidade reduzida de cimento para sua confecção, outra alternativa pensada para o território brasileiro é a argila calcinada para a produção de cimento Portland pozolânico, a adição de pozolanas ao cimento pode trazer benefícios nas características do produto, por fim, os compostos geopoliméricos, podem se mostrar superiores ao cimento em diversos quesitos, sejam eles econômicos, físicos ou ecológicos. Com a substituição, em proporção adequada, de parte do cimento utilizado na composição do concreto, por estes materiais alternativos, é possível reduzir significativamente a taxa de emissão de dióxido de carbono na atmosfera terrestre.

**PALAVRAS-CHAVE:** materiais sustentáveis; emissão de dióxido de carbono; sustentabilidade; tijolos solo-cimento; argilas calcinadas; geopolímeros.

## ABSTRACT

Cement production is responsible for a significant portion of the global emission of carbon dioxide, and it is important to carry out studies of viable alternatives for replacing, even partially, this material in the civil construction sector. In this work, information from the literature related to research advances in obtaining alternative materials that are technically and economically viable in replacing cement and that can contribute to the sustainability of the civil construction industry were compiled. Some of the main alternatives were addressed in the work, considering the theory, the way of preparing the material, the possible components, their advantages and disadvantages. There are simpler alternatives such as the soil-cement brick, which uses only soil and a reduced amount of cement for its manufacture, another alternative designed for the Brazilian territory is calcined clay for the production of pozzolanic Portland cement, the addition of pozzolans to the cement can bring benefits in the characteristics of the product, finally, the geopolymeric compounds, can prove to be superior to cement in several aspects, whether economic, physical or ecological. With the replacement, in an appropriate proportion, of part of the cement used in the composition of concrete, by these alternative materials, it is possible to significantly reduce the emission rate of carbon dioxide in the Earth's atmosphere.

**KEYWORDS:** sustainable materials; carbon dioxide emission; sustainability; soil-cement bricks; calcined clays; geopolymers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tijolo de solo-cimento .....	16
Figura 2 – Bloco geopolimérico utilizando resíduos de poeira cerâmica .....	18
Figura 3 - Concretos com geopolímeros: Cinza Volante, Metacaulim, Escória de Alto Forno; e Concreto tradicional .....	19
Figura 4 - Tijolo alcalino-ativado feito com escória de alto forno .....	20

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do cimento Portland .....	14
Quadro 2 – Vantagens e desvantagens dos tijolos solo-cimento.....	24

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Principais produtos que utilizam cimento Portland na Construção Civil.....	13
Tabela 2 – Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> do concreto geopolimérico e de cimento Portland .....	27
Tabela 3 – Propriedades mecânicas das argamassas geopolimérica e de cimento Portland.	27

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1	OBJETIVO GERAL .....	11
1.1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	12
2.1	CIMENTO PORTLAND .....	12
2.2	TIJOLOS DE SOLO CIMENTO .....	14
2.3	ARGILAS CALCINADAS – CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO.....	16
2.4	GEOPOLÍMEROS .....	17
<b>2.4.1</b>	<b>Blocos geopoliméricos - resíduo de poeira cerâmica</b> .....	18
<b>2.4.2</b>	<b>Concreto geopolimérico – cinzas volantes</b> .....	19
<b>2.4.3</b>	<b>Tijolo alcalino ativado – resíduos industriais</b> .....	19
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	21
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	23
4.1	TIJOLOS DE SOLO CIMENTO .....	23
4.2	ARGILAS CALCINADAS – CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO.....	24
4.3	GEOPOLÍMEROS .....	25
<b>4.3.1</b>	<b>Blocos geopoliméricos - resíduo de poeira cerâmica</b> .....	27
<b>4.3.2</b>	<b>Concreto geopolimérico – cinzas volantes</b> .....	27
<b>4.3.3</b>	<b>Tijolo alcalino ativado – resíduos industriais</b> .....	28
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	29
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	30

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos temas mais importantes a serem tratados pela população mundial é a poluição causada antropologicamente nos diversos setores produtivos. É importante lembrar que o planeta não é uma fonte inesgotável de recursos naturais e que o impacto do consumismo indiscriminado e em larga escala, como ocorre atualmente, se tornará insustentável nas próximas décadas. Por isso é importante que todos os setores produtivos da economia mundial busquem alternativas que minimizem a escassez e a poluição causada direta ou indiretamente pelo consumo dos recursos naturais.

Na construção civil, os principais impactos ambientais são causados pelo elevado consumo de recursos naturais e energia, bem como, pela geração de resíduos, emissões atmosféricas, poluição sonora, além de alterações dos corpos hídricos decorrentes de obras hidráulicas e desmatamento.

Desde a sua concepção em 1824, o cimento Portland é um dos materiais mais utilizados na construção civil e sua produção está entre as principais fontes de poluição atmosférica gerada pela construção civil. Segundo o instituto de pesquisa britânico Chatam House (2018), a produção do cimento é responsável por cerca de 8% da emissão global de dióxido de carbono, devido à etapa de clínquerização, onde é utilizada uma grande quantidade de energia resultando na liberação de aproximadamente 0,87kg de dióxido de carbono para a atmosfera, para cada quilo de cimento produzido (DAVIDOVITS, 1994) (DAMTOFT, 2008). Para efeito comparativo, o agronegócio, que é um dos setores produtivos mais poluentes, é responsável por cerca de 12% da emissão global de dióxido de carbono. Considerando que, segundo Chatam House (2018), a média de produção global de cimento Portland é da ordem de 4 bilhões de toneladas por ano, são liberados anualmente, cerca de 3,5 bilhões de toneladas de dióxido de carbono na atmosfera na produção de cimento.

Diante deste cenário, tornou-se imprescindível o desenvolvimento de pesquisas buscando materiais alternativos e viáveis técnica e economicamente na substituição do cimento Portland na indústria da construção civil. Entre os materiais alternativos que podem substituir o cimento Portland, destacam-se os tijolos solo-cimento, as argilas calcinadas para produção de cimento Portland pozolânico e os geopolímeros. Neste trabalho foi realizada uma análise da viabilidade técnica destas alternativas como forma de reduzir o consumo de cimento Portland na indústria da construção civil.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Compilar as informações disponíveis na literatura nacional e internacional sobre os materiais alternativos e que apresentam viabilidade técnica na substituição do cimento Portland na construção civil.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Realizar pesquisa bibliográfica para a fundamentação técnica e científica sobre materiais que apresentam potencial para substituir o cimento Portland no setor de construção civil, visando a diminuição dos impactos ambientais causados na produção deste insumo;
- Analisar os resultados apresentados na literatura com a finalidade de evidenciar as vantagens, limitações e necessidades de materiais que apresentam potencial para substituir o cimento Portland.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland utilizado atualmente surgiu, efetivamente, no ano de 1756, quando John Smeaton foi capaz de obter um produto de alta resistência, por meio da calcinação de materiais calcáreos moles e argilosos, mas somente no ano de 1818 foi realizado um aprimoramento do primeiro produto, pelas mãos do francês Vicat, que obteve um produto semelhante ao misturar componentes argilosos e calcáreos.

Em 1824, Joseph Aspdin, conseguiu, por meio da queima conjunta de cal e argila, criar um pó fino, que viria a ser patenteado com o nome de cimento Portland, devido à semelhança com as rochas da ilha britânica de Portland. Assim foi desenvolvido, um dos produtos mais utilizados na Construção Civil, mas que hoje é um dos maiores responsáveis pela crescente emissão de dióxido de carbono na atmosfera terrestre.

O cimento Portland é composto basicamente por Cal (60 a 67%) e Sílica (17 a 25%), suas principais matérias-primas, podendo conter também Alumina e Óxido de Ferro. O processo de obtenção destas matérias-primas inclui as etapas de extração; britagem; pré homogeneização; moagem e homogeneização, que resultam em um material fino com composição química pré estabelecida, assim como sua finura e homogeneidade.

As matérias-primas são fundidas a uma temperatura de até 1450°C, este processo é conhecido como clínquerização, principal responsável pela emissão de dióxido de carbono na atmosfera terrestre (Quadro 1), realizado em fornos rotativos onde a mistura permanece entre uma e três horas.

O principal método de calcinação do clínquer utilizado hoje é o de via seca, onde se faz necessário um forno composto por um conjunto de ciclones (pré aquecedores); um maçarico secundário (pré calcinador), responsável pela descarbonatação do calcáreo; um forno rotativo com maçarico principal e um resfriador industrial, ao fim do processo de clínquerização (COUTINHO, 2006).

Após o processo de clínquerização e o resfriamento do clínquer, podem ser colocados aditivos e gesso na mistura, em seguida ocorre o processo de moagem e homogeneização do cimento e, por fim, os processos de ensacagem e expedição.

A tabela 1 apresenta os principais tipos de cimento Portland e seus principais usos na construção civil.

Tabela 1 – Principais produtos que utilizam cimento Portland na Construção Civil

Principais tipos de cimento	Sigla	Principais utilidades na Construção Civil
Cimento Portland Comum	CP I	Feito apenas sob encomenda, pouquíssimo utilizado.
Cimento Portland Composto	CP II	Argamassa de revestimento e assentamento de tijolos e blocos; Argamassa de assentamento de azulejos e ladrilhos; Concreto simples; Concreto magro; Concreto protendido; Concreto armado; Elementos pré-moldados; Pavimento de concreto simples ou armado; Pisos industriais de concreto; Solo-cimento e Concreto com agregados reativos.
Cimento Portland de Alto-forno	CP III	Argamassa de revestimento e assentamento de tijolos e blocos; Concreto simples; Concreto magro; Concreto armado; Concreto protendido com protensão das barras após o endurecimento do concreto; Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento curados por aspersão de água; Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento para desforma rápida, curados a vapor ou com outro tipo de cura térmica; Pavimento de concreto simples ou armado; Pisos industriais de concreto; Solo-cimento; Argamassas e concretos para meios agressivos; Concreto-massa e Concreto com agregados reativos.
Cimento Portland Pozolânico	CP IV	Argamassa de revestimento e assentamento de tijolos e blocos; Argamassa de assentamento de azulejos e ladrilhos; Concreto simples; Concreto magro; Concreto armado; Concreto protendido com protensão das barras após o endurecimento do concreto; Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento curados por aspersão de água; Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento para desforma rápida, curados a vapor ou com outro tipo de cura térmica; Pavimento de concreto simples ou armado; Pisos industriais de concreto; Solo-cimento; Argamassas e concretos para meios agressivos; Concreto-massa e Concreto com agregados reativos.
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V	Concreto armado com função estrutural; Concreto protendido; Concreto armado para desforma rápida, curado a vapor ou com outro tipo de cura térmica; Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento curados por aspersão de água; Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento para desforma rápida, curados por aspersão de água e Pisos industriais de concreto.

Fonte: Pugliesi, 2015.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens do cimento Portland

<b>Cimento Portland</b>	
Vantagens	Abundante no mercado; Técnica mais tradicional no país; Não requer mão de obra muito especializada; Existem mais estudos que abrangem todo tipo de utilização; A grande maioria de suas características já foram comprovadas e estão normalizadas.
Desvantagens	Seu processo de formação gera grande emissão de dióxido de carbono; Existem alternativas que podem ser mais baratas. Materiais geopoliméricos podem alcançar características superiores.

Fonte: Autor.

## 2.2 TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Um dos métodos mais antigos de construção é o uso de solo na construção de residências. Os tijolos de solo-cimento prensados têm sido utilizados desde a década de 1950. Para alcançar as propriedades físicas desejadas, é necessário que o cimento Portland seja misturado ao solo em proporções que podem variar de 4 a 15% (BARBOSA, 2002). O processo mais comum de produção destes tijolos é com uma prensa manual, que é capaz de aplicar uma pressão de cerca de 2 MPa para a compactação do material, com capacidade de produção de três peças por vez em cada prensa (BARBOSA, 2002). Alguns dos principais fatores responsáveis pela qualidade do produto são o tipo de solo utilizado, o teor de umidade da mistura, o tipo de prensa (hidráulica ou manual), o tipo e percentual de estabilizante e o tempo de cura.

Quanto ao tipo de solo utilizado, para tijolos prensados é importante que o solo tenha determinados de 10 a 20% argila, 10 a 20% silte e 50 a 70% areia. Além disso, é importante que o solo possua limite de liquidez menor que 40-45%, considerando a umidade de moldagem ótima, pelo ensaio de compactação estática (BARBOSA, 2002).

Para a obtenção de bons resultados nas propriedades mecânicas dos tijolos, é importante que a compactação seja a melhor possível, normalmente aplicando dupla compressão. Uma prensa manual indicada é a GEO-50, mas também existem prensas hidráulicas capazes de ultrapassar a barreira dos 2MPa, resultando em tijolos muito mais resistentes, porém estes equipamentos são de custo mais elevado (BARBOSA, 2002).

É importante considerar o tipo e o percentual de estabilizante utilizado para acentuar as qualidades do produto, sendo o cimento Portland o principal estabilizante utilizado, com um percentual de 4 a 6%, que resulta em tijolos prensados de alta qualidade (BARBOSA, 2002). O percentual de cimento na mistura solo: cimento varia de acordo com a textura do solo. Por exemplo, solos com mais argila levam mais cimento em sua mistura (cerca de 6%), enquanto solos arenosos podem precisar de menor quantidade de cimento, de 2 a 4%, dependendo da granulometria (BARBOSA, 2002).

O processo de cura dos tijolos evita a liberação rápida de água, pois leva tempo para que a água reaja com todos os componentes da mistura, caso ela evapore muito rápido resultará em blocos quebradiços e de baixa qualidade. O método mais eficaz é cobrir os tijolos novos com lona plástica, assim que finalizada sua produção (BARBOSA, 2002).

O objetivo da produção deste material é substituir parte da produção de tijolos queimados ou de concreto, quando possível sua utilização, já que sua produção não necessita de energia térmica para ser realizada, lembrando que a utilização de energia térmica, tem como resultado a emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, porém a produção de tijolos sem queima necessita da adição de cimento para que atinja propriedades mecânicas viáveis.

É importante destacar que a própria produção de cimento é responsável por usar altos índices de energia térmica, existindo um limite de porcentagem de cimento que pode ser utilizado, sem que ultrapasse os valores de energia térmica consumida na sinterização do tijolo comum. Ferreira (2015) verificou que a porcentagem máxima de cimento que pode ser adicionado à mistura e que ainda apresente vantagens quanto à sustentabilidade dos tijolos, é de 40% de cimento, porém para a conformação de um tijolo de solo-cimento sem queima é suficiente um total de 4 a 15% de cimento (OBONYO, 2010). Assim, um tijolo de solo-cimento (Figura 1) sem queima utilizará menos energia térmica que o tijolo comum e muito menos cimento do que um tijolo de concreto, reduzindo a emissão de dióxido de carbono para a atmosfera.

Figura 1 – Tijolo de solo-cimento



Fonte: Ilhe Engenharia (2019).

Este tipo de tijolo é aplicado prioritariamente em estruturas como armazéns e galpões, ou casas populares, sendo um tipo de construção mais econômica, dado que o solo, principal material, está presente no mercado com alta oferta. Vale ressaltar a economia relacionada a não necessidade de queima do material, dessa forma são evitados gastos com energia.

No Brasil, as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 10833, NBR 8491 e NBR 8492 (ABNT, 2012) são específicas para a produção de tijolos solo-cimento, considerando as proporções de solo e cimento necessárias para atendimento aos padrões de qualidade exigidos pelo mercado da construção civil.

### 2.3 ARGILAS CALCINADAS NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO

Pozolanas é a denominação para o conjunto de todos os silicatos e aluminosilicatos reativos naturais ou artificiais, predominantemente na forma vítrea, que se solubilizam em meio alcalino e reagem em solução com íons  $\text{Ca}^{2+}$ , levando à precipitação de silicatos de cálcio hidratados. As pozolanas isoladamente não possuem capacidade aglomerante e necessitam de uma fonte de cálcio. Elas podem ser naturais como as cinzas vulcânicas e as terras diatomáceas, ou originadas de algum processamento industrial, como a cinza volante “fly ash” originada da queima do carvão mineral em termelétricas, a sílica ativa captada nos eletrofiltros na fabricação de ligas de silício, a cinza da casca de arroz e as argilas calcinadas (DAL MOLIN, 2002).

Desde a antiguidade sociedades como a romana, a egípcia e a hindu utilizam pozolanas produzidas com argila calcinada. Porém, o primeiro cimento pozolânico produzido data de meados de 1915, criado pela empresa Lafarge na Inglaterra e denominado “Potter’s Red Cement”, com o intuito de ser um cimento não passível de decomposição e utilizado primordialmente para obras expostas à ação marinha ou de rios (ZAMPIERI, 1993).

Devido à grande quantidade de dióxido de carbono liberado na etapa de clínquerização, se faz necessário encontrar alternativas que diminuam a proporção de clínquer na conformação do cimento. Uma alternativa que tem se mostrado viável é a adição de uma determinada proporção de cinzas volantes à mistura, porém a quantidade disponível deste resíduo para esse uso depende da atividade de termoelétricas, e no Brasil, a principal fonte de energia são as hidroelétricas, o que limita muito a disponibilidade desse material.

Para isso foram pesquisadas alternativas, como as pozolanas artificiais, obtidas via calcinação de argilas. Este método é relevante pois utiliza cerca de 55% a 79% da energia necessária para fabricação do clínquer, além de reduzir a emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, pois não possuem carbonatos como um de seus principais componentes. A utilização de argilas calcinadas tem seu valor econômico, sendo um material de custo mais baixo do que o clínquer, além de resultar em aumento da produtividade (CHRISTÓFOLLI, 2010).

## 2.4 GEOPOLÍMEROS

Na década de 1950, Glukhovsky, encontrou materiais semelhantes aos que chamamos hoje de geopolímeros e os denominava de “solo-cimento”, porém os geopolímeros que conhecemos hoje, foram descobertos apenas na década de 1970 por Davidovits, que originalmente estava conduzindo investigações com base na reação entre metacaulims em meio alcalino, visando a produção de polímeros compostos por alumino-silicatos. O termo “geo” faz referência à relação dos componentes da mistura com materiais geológicos (DAVIDOVITS, 2005).

Os geopolímeros são classificados como um tipo de material inorgânico com propriedades semelhantes às de um material cerâmico, que podem ser produzidos em temperatura ambiente, ou um pouco mais alta (WANG, 2005). Alguns dos materiais mais comuns utilizados para a conformação dos geopolímeros são de origem pozolânica, crus, sendo eles, o metacaulim; bagaço; cinzas volantes provenientes da combustão do carvão; material granular, resultado da queima de material sólido; escória de alto forno vindas de

indústrias metalúrgicas e os resíduos de vidro (AMIN, 2017). É importante ressaltar que a natureza destes materiais crus, bem como a condição de preparo do sistema geopolimérico tem impacto direto nas propriedades físicas do produto (AMIN, 2017).

Outras soluções ainda mais sustentáveis podem ser encontradas, como por exemplo, a substituição do metacaulim da mistura, tendo em vista que o metacaulim ainda precisa ser produzido a uma temperatura de 800°C. Uma possível solução neste molde seria substituir o metacaulim por resíduos cerâmicos finos, pois além de encontrar um uso para este material, que normalmente é descartado, é uma alternativa que diminui o custo de produção de blocos geopoliméricos.

#### **2.4.1 Blocos geopoliméricos utilizando resíduos de poeira cerâmica**

As matérias primas utilizadas para a produção dos blocos geopoliméricos consistem em um ativador alcalino, que pode ser o hidróxido de cálcio ou o hidróxido de sódio, e na poeira residual do processo de pulverização, que ocorre durante a produção do azulejo na indústria de revestimentos cerâmicos. A poeira cerâmica é composta por argila caulínica, quartzo, calcáreo, feldspato potássico e bentonita.

O processo de produção dos blocos geopoliméricos (Figura 2) se inicia com a queima da poeira cerâmica a 800°C por duas horas, com o intuito de produzir metacaulim (PTÁČEK, 2010). Em seguida é preparada uma solução de cal hidratada (10%), soda cáustica (1%) e água (38%), para que então, o resultado do processo de queima seja misturado com a solução até que fique completamente homogênea, são formados moldes cúbicos de (50x50x50mm), que são deixados por 24h nos moldes e depois 28 dias, fora dos moldes, em temperatura ambiente (25°C) (AMIN, 2017).

Figura 2 – Bloco geopolimérico utilizando resíduos de poeira cerâmica



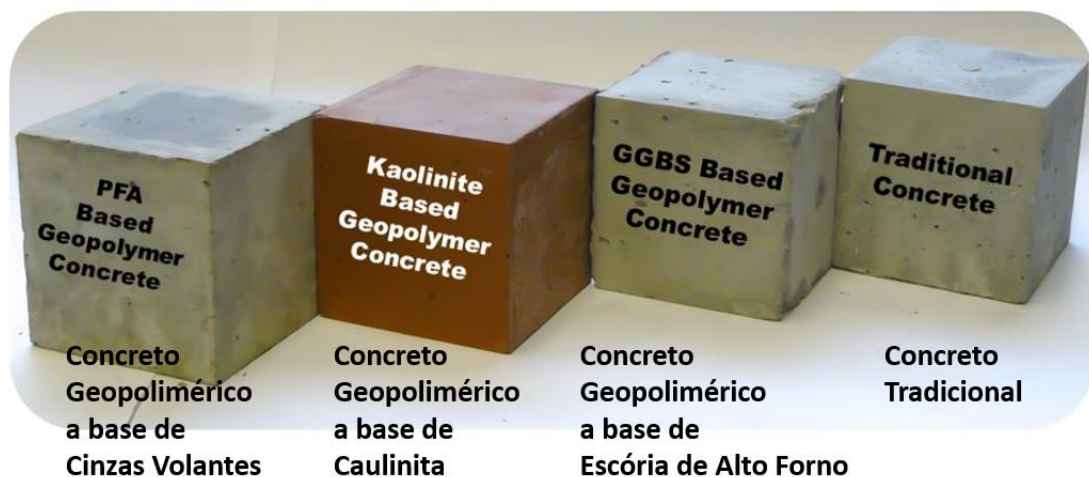
Fonte: Amin, 2017.

### 2.4.2 Concreto geopolimérico baseado em cinzas volantes

O concreto geopolimérico baseado em cinzas volantes (Figura 3) ou fly ash-based geopolymer concrete (FGC) é constituído a partir da reação de materiais compostos por aluminossilicatos com uma solução alcalina, além dos tradicionais agregados miúdos e graúdos (ASSI, 2016).

As cinzas volantes são uma fonte de aluminossilicatos necessários para a mistura, sendo dessa forma aproveitadas, deixando de ser um resíduo poluente gerado pelas termoelétricas movidas a carvão. Porém seu uso é limitado no Brasil, considerando que a principal fonte de energia do país são as hidroelétricas. Mesmo assim, esse material é interessante, pois pode se adaptar como escória granulada de alto forno, resíduo mais abundante no Brasil.

Figura 3 – Concretos com geopolímeros: Cinza Volante, Metacaulim, Escória de Alto Forno; e Concreto tradicional



Fonte: Silva (2016)

### 2.4.3 Tijolo alcalino-ativado usando resíduos industriais

A matéria prima deste tijolo (Figura 4) é composta por materiais contendo sílica, alumínio e filler (obtido na moagem de materiais carbonáticos) ou agregados finos, que são ativados por reagentes alcalinos como o hidróxido de sódio, o hidróxido de potássio e o hidróxido de lítio (GAVALI, 2019).

Alguns dos resíduos industriais que possuem composição de aluminossilicatos são as cinzas volantes, as cinzas da casca do arroz, as cinzas do bagaço da cana de açúcar e escória granulada de alto forno e, com exceção do primeiro, todos são resíduos abundantes em nosso

país. Portanto, essa solução além de minimizar o uso do cimento, ainda é capaz de trazer utilidade para diversos resíduos que, quando descartados, se tornam poluentes.

O processo de produção destes tijolos é caracterizado pela ativação do aluminossilicato escolhido, por um hidróxido (com ou sem água), seguido por vibração, compactação e cura.

Figura 4 – Tijolo alcalino-ativado feito com escória de alto forno



Fonte: Robayo-Salazar (2021).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Para demonstrar a importância da substituição/redução do uso do cimento na construção civil, esse trabalho trouxe inicialmente uma conceituação do principal tipo de cimento utilizado atualmente, o cimento Portland, passando pela história, sua composição, modo de preparo e seus benefícios e malefícios principalmente o dano ambiental causado pela emissão de dióxido de carbono em grande quantidade.

A fim de encontrar soluções para a substituição parcial do cimento, foram consultadas diversas literaturas com o objetivo de encontrar os mais diversos tipos de alternativas, desde as mais simples e restritas, até outras mais complexas e que podem ser utilizadas de maneira mais ampla, com resultados reconhecidos no mundo todo.

Para soluções pontuais foi encontrado o tijolo de solo-cimento, que possibilita a redução das emissões de carbono pois não leva queima em seu processo e tem baixa necessidade de cimento em sua fabricação.

Uma solução intermediária encontrada seriam as argilas calcinadas, que podem produzir cimento Portland pozolânico, material mais versátil e que reduz a quantidade de cimento necessária na mistura, além de necessitar de menos energia em sua produção.

Como solução mais complexa foram apresentados os geopolímeros, material a base de aluminossilicatos e um hidróxido, que pode ser utilizada das mais diversas formas e possuem grandes construções para comprovar sua eficácia.

Os materiais indicados na literatura como potenciais substituintes do cimento na construção civil, também foram apresentados quanto a sua história, composição, modo de preparo, vantagens e desvantagens quando comparados com o Cimento Portland.

Os materiais apresentados possuem características diversas, com o principal objetivo de reduzir a ameaça ambiental causada pela grande emissão de dióxido de carbono inerente ao processo de clínquerização, utilizando materiais que já estão sendo utilizados para este fim, em diversos países do mundo.

Das diversas literaturas consultadas, algumas são citadas no texto, outras serviram apenas como inspiração e estudo.

Após a etapa de conceituação foram apresentados resultados encontrados na literatura que comprovam a possibilidade de utilização dos materiais em substituição aos tradicionais encontrados no mercado.

Para verificar a viabilidade mecânica dos materiais, foram analisadas normas técnicas (ABNT) que comprovem a viabilidade do material descrito.

Com base nessas informações foram apresentadas considerações finais para avaliar as características das alternativas selecionadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os resultados da análise comparativa entre os possíveis substituintes do cimento Portland: (tijolos solo-cimento; cimento Portland pozolânico e geopoliméricos e o cimento Portland, para verificar a viabilidade técnica, econômica e ambiental destas alternativas, que visam a redução do uso do cimento e, conseqüentemente, a emissão de poluentes atmosféricos, principalmente, o dióxido de carbono.

### 4.1 TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

A adição de cimento aos tijolos foi capaz de contribuir com propriedades mecânicas como a resistência, porém outros aditivos foram necessários para aprimorar a eficiência térmica. A adição do cimento pode melhorar as propriedades mecânicas até um certo ponto, sendo ainda necessário pensar em soluções que sejam capazes de contribuir de outras formas, como por exemplo, na junção entre os tijolos, tornando-os mais coesos.

Com o objetivo de aprimorar as propriedades físicas dos tijolos solo-cimento foi criada uma fôrma para a produção de tijolos com padrões macho e fêmea (MATTONE, 2002). Barbosa (2002) constatou experimentalmente que o uso de uma argamassa composta por solo peneirado em malha de 2 mm e cimento na proporção de 8 a 10% resultou em uma parede com grande rigidez. É importante destacar que este tipo de tijolo não pode ser utilizado em qualquer tipo de construção, sendo limitado a obras de no máximo três pavimentos quando os tijolos tiverem função estrutural. Além disso, como os tijolos não passam pelo processo de sinterização, quando foram testados com o uso de um jato d'água mostraram deficiência quanto a resistência à erosão.

Os tijolos solo-cimento apresentam algumas diferenças em relação ao processo construtivo comum, sendo necessária atenção em relação à fundação e à cobertura. Uma grande possibilidade de aplicação desta técnica construtiva é na construção de casas populares, pois é um material de menor custo que os tijolos tradicionais e se utiliza de técnicas construtivas mais simples. O Quadro 2 apresenta as vantagens e desvantagens deste tijolo na construção civil, uma das principais vantagens é a possibilidade de embutir as instalações elétricas e hidráulicas no próprio tijolo, evitando 80% de toda a geração de resíduos da obra e conseqüentemente gera um ganho econômico significativo (VERONEZI, 2021).

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens dos tijolos solo-cimento

<b>Tijolos Solo-Cimento</b>	
Vantagens	<p>O design permite a passagem de tubulações hidráulicas e elétricas durante o processo construtivo, evitando o retrabalho;</p> <p>Seu formato é de fácil encaixe, evitando assim o desperdício de materiais ligantes;</p> <p>Sua durabilidade pode alcançar seis vezes a de um tijolo comum, quando bem aplicados;</p> <p>Isolamento térmico elevado;</p> <p>Sua utilização gera economia de materiais como cimento e madeira.</p>
Desvantagens	<p>Grande absorção de umidade, necessitando de impermeabilização após a conclusão do processo construtivo;</p> <p>Exige planejamento construtivo especial, pois são tijolos com espessura maior do que o habitual;</p> <p>Exige mão de obra qualificada, por ter um tipo de assentamento especial;</p> <p>Aumento de ambientes e reparos podem ser difíceis de serem realizados;</p> <p>Esquinas ou cantos possuem baixos índices de resistência a impacto, podendo comprometer a estrutura da obra quando danificados.</p>

Fonte: Autor.

É importante ressaltar que o uso de tijolos solo-cimento pode ser considerada uma técnica construtiva muito mais sustentável do que as costumeiramente utilizadas no Brasil, tendo em vista que não necessita de massa de correção em seu assentamento, o que gera uma economia de até 90% do cimento utilizado pelo método mais comum, além disso, sua produção não consome energia térmica (VERONEZI, 2021).

#### 4.2 ARGILAS CALCINADAS NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO

Inicialmente é preciso destacar os principais benefícios da adição de pozolanas ao cimento Portland, como a melhoria no comportamento reológico no estado fresco; maior resistência mecânica, maior durabilidade, maior resistência aos ataques químicos e redução da fissuração pelo efeito térmico no estado endurecido. Estes benefícios se devem, principalmente, aos efeitos cimentícios e pozolânicos, bem como a redução da porosidade causados pela adição de materiais como as cinzas volantes (CHRISTÓFOLLI, 2010).

Mehta (2008) descreve alguns efeitos benéficos da adição de pozolanas ao cimento Portland, entre eles:

- o efeito plastificante redutor de água, onde adições como as cinzas volantes, substituindo o cimento, podem agir como redutores de água no concreto em determinada consistência;

- a redução do calor de hidratação, onde a adição de pozolanas é responsável por reduzir a geração de calor, durante a fase de hidratação do concreto;

- o aumento da resistência à ataques químicos, onde as pozolanas são responsáveis por reduzir a heterogeneidade da microestrutura do concreto e, conseqüentemente reduzem a porosidade capilar e promovem uma maior cristalização dos produtos da hidratação, minimizando os efeitos da percolação de fluídos;

- a proteção da armadura, passivação do aço, onde a remoção dos íons de hidróxido de cálcio causada pela ação da pozolana, isenta os polos capilares desse íon, diminuindo a condutividade elétrica dos concretos pozolânicos.

Dal Molin (2002), descreve outros efeitos benéficos, como os efeitos reológicos do concreto, onde as adições de metacaulim, sílica ativa e a cinza da casca do arroz, fazem com que o concreto apresente redução nas taxas de exsudação e aumente a resistência à compressão. Este autor destaca que, quando adicionado, o metacaulim pode interferir nas propriedades mecânicas do concreto, dependendo do seu grau de finura, quanto mais fino, maiores serão as resistências iniciais, pois facilitará as reações pozolânicas.

Segundo Malacarne (2019), um cimento com redução de 30% do clínquer Portland normalmente utilizado, substituído por argila calcinada levando 40% de caulinita, é capaz de equiparar a resistência mecânica do produto original, ou até mesmo superá-la. Portanto, o produto é capaz de substituir o cimento Portland original em diversas aplicações, como por exemplo, na argamassa de revestimento e assentamento de tijolos, blocos, azulejos e ladrilhos; no concreto simples; no concreto magro; em pavimentos de concreto simples ou armado, ou em pisos industriais de concreto. No âmbito ambiental, essa redução de 30% no uso do cimento, corresponde a 0,26kg a menos de dióxido de carbono sendo liberado na atmosfera para cada kg de cimento produzido, o que em um ano resulta em, aproximadamente, um bilhão de toneladas de dióxido de carbono, dada a produção anual de cimento no mundo.

#### 4.3 GEOPOLIMÉRICOS

É importante ressaltar a questão econômica que envolve a comparação entre os materiais geopoliméricos e os compostos tradicionais de cimento Portland. Quando se trata de materiais geopoliméricos, o custo de sua produção é ditado pelo custo de seus ativadores

e dos sólidos presentes na mistura, por exemplo, cinzas volantes e escória de alto forno, enquanto nos materiais tradicionais, o custo de produção está atrelado, principalmente, ao custo do cimento. O custo máximo de produção de materiais geopoliméricos é apenas um pouco superior ao dos materiais tradicionais, por outro lado, seu custo mínimo é relativamente inferior ao dos materiais cimentícios (BUCHWALD, 2005).

Segundo Borges (2014), o consumo energético atrelado a produção do cimento pode ser reduzido em 45,8%, conseqüentemente uma redução drástica no custo com energia térmica/elétrica.

Durante a produção dos materiais geopoliméricos, alguns processos podem afetar o resultado do produto, alguns exemplos são, a natureza da fonte de aluminossilicato; concentração da solução ativadora; razão de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ; razão de  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ; razão de  $\text{Na}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ; razão sólido/líquido (água e ativador); quantidade de água; quantidade de cálcio inserido no processo; temperatura, pressão e tempo de cura e a utilização de superplastificantes (CABALLERO, 2017).

Algumas propriedades em que os geopolímeros se destacam estão relacionadas aos compostos de Cimento Portland, à resistência mecânica elevada; à resistência a altas temperaturas; à resistência a ataques químicos, uma vez que os materiais geopoliméricos não estão sujeitos à reação álcali agregado; à elevada adesão a elementos metálicos e não metálicos; baixo custo; baixas emissões de  $\text{CO}_2$  (CABALLERO, 2017).

É importante destacar algumas aplicações bem sucedidas dos materiais geopoliméricos, como por exemplo, na Índia desde 2011 tem sido desenvolvido e comercializado blocos constituídos por escória de alto forno, utilizando processo geopolimérico. Outro exemplo foi a construção do Global Change Institute, em Queensland, na Austrália, sendo utilizados nesta obra, 11 metros de painéis geopoliméricos, pré fabricados. Também a construção do Brisbane West Wellcamp Airport, concluído em novembro de 2014, onde foram utilizados, aproximadamente, 40.000m<sup>3</sup> de material geopolimérico, composto por cinzas volantes e escória granulada de alto forno, reconhecida como a maior obra de concreto geopolimérico em todo o mundo (LEMOUGNA, 2016).

As tabelas 2 e 3 apresentam comparativos entre o Concreto geopolimérico e o Concreto de cimento Portland.

Tabela 2 – Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> do concreto geopolimérico e de cimento Portland

Tipo de concreto	Consumo de energia (MJ m <sup>-3</sup> )	Emissão de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup> de concreto)
Concreto Geopolimérico	971*	75,1
Concreto de Cimento Portland – CII	1794**	271,9

\* 616 MJ referentes a produção do silicato de sódio; \*\* 1550 MJ referentes a produção do Cimento Portland.

Fonte: Borges, 2014.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas das argamassas geopolimérica e de cimento Portland

Tipo de Argamassa	Índice de Consistência (Norma: 255 a 265mm)	Resistência à Compressão (Norma: 2,4 MPa aos 28 dias)	Tempo de Pega (início – fim)
Argamassa Geopolimérica*	286,7	4,60	13:00 – 15:20
Argamassa de cimento Portland**	266,7	3,38	13:10 – 22:30

\*Traço: 95g de Cimento Portland; 279g de água; 198g de cal; 1310,5g de areia; 34g de metacaulim; 32,5g de escória granulada de alto forno; 28,5g de cinza volante; 30,5g de hidróxido de potássio e 45,5g de silicato de sódio alcalino.

\*\*Traço: 190g de Cimento Portland; 355g de água; 198g de cal e 1460,5g de areia.

Fonte: Borges, 2014.

#### 4.3.1 Blocos geopoliméricos utilizando resíduos de poeira cerâmica

Amin (2017) demonstrou que um bloco geopolimérico composto por 10% Ca(OH)<sub>2</sub>, 1% NaOH e 38% de água, após 28 dias de cura, consegue atingir 9 MPa de resistência à compressão, ultrapassando a exigência da NBR 6136 de 6 MPa para blocos com função estrutural (acima ou abaixo do solo), portanto este bloco geopolimérico pode ser utilizado na construção substituindo os blocos tradicionais de concreto.

#### 4.3.2 Concreto geopolimérico baseado em cinzas volantes

Bazzani (2022) encontrou resultados satisfatórios na substituição parcial do cimento Portland por geopolímeros com base em cinzas volantes, ou escória de alto forno. Características como consistência, resistência à compressão e módulo de elasticidade, atenderam as normas e, em alguns casos, superou a amostra de referência feita apenas com cimento Portland. Portanto, é possível dizer que o concreto geopolimérico confeccionado com cimento com base em cinzas volantes, ou escória de alto forno, para substituir,

parcialmente, o clínquer Portland, pode ser utilizado como alternativa ao tradicional concreto de cimento Portland.

#### **4.3.3 Tijolo alcalino-ativado usando resíduos industriais**

Ren (2020) obteve resultados satisfatórios na produção de tijolos alcalino-ativados produzidos com escória de alto forno. A resistência à compressão encontrada varia entre 15 e 60 MPa, dependendo do percentual de cimento na mistura, no intervalo de 0 a 100%. Este resultado demonstra que o tijolo geopolimérico composto parcialmente por escória de alto forno atende ao requisito da NBR 6136 e pode ser utilizado com função estrutural em obras de construção civil.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existem materiais que podem ser utilizados na substituição ou redução do cimento Portland em diversos tipos de situações e em diversos tipos de obras, desde materiais mais simples e conseqüentemente limitados, como os tijolos de solo-cimento, até materiais mais complexos e com propriedades que podem ser até melhores que as dos compostos cimentícios, como é o caso dos geopolímeros.

Os materiais geopoliméricos podem ter custo de produção menor do que os tradicionais compostos de cimento Portland e, mais importante, são materiais mais ecológicos, podendo reduzir a taxa de emissão de CO<sub>2</sub> em até 80%, quando utilizada uma fórmula bem otimizada para aplicações na construção civil. Além disso, sua produção é constituída de materiais que, originalmente, são resíduos de outros processos produtivos, permitindo que não sejam descartados no ambiente e sejam reaproveitados no ciclo produtivo.

Materiais como os geopolímeros devem ser cada vez mais utilizados no mundo, visando a diminuição global da emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Este é um processo de adaptação muito complicando, visto que, o cimento Portland há muito tempo vem sendo a base de toda a construção civil. Além disso as indústrias produtoras de cimento Portland no mundo são gigantescas e necessitam de grande capitalização para sua construção e manutenção, o que significa que a maioria de seus proprietários serão conservadores nesse sentido, dificultando ainda mais o processo.

Seria interessante que grandes empresas investissem capital para desenvolvimento de alternativas visando a evolução deste processo, para que futuramente as taxas de consumo do cimento Portland sejam reduzidas e, conseqüentemente ocorra a diminuição da emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, que atualmente é responsável por cerca de 8% de toda a emissão global.

Compostos geopoliméricos não são apenas mais ecológicos, eles podem ter características físicas melhores do que as de compostos cimentícios, podendo, portanto, substituir estes compostos adequadamente nas mais diversas situações, pois podem ter resistência a compressão até maiores, entre outras características físicas.

## REFERÊNCIAS

- AMIN, S. K. *et al.* Fabrication of geopolymer bricks using ceramic dust waste: construction and building materials. **Construction & Building Materials**, Giza, 2017, v. 157, p. 610-620, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817318536>. Acesso em: 23 fev. 2022.
- ASSI, L.; DEEVER, E.; ELBATANOUNY, M. K. Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete: construction and building materials. **Construction & Building Materials**, Columbia, 2016, v. 112, p. 807-815, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181630294X>. Acesso em: 23 fev. 2022.
- BARBOSA, N.; MATTONE, R.; MESBAH, A. Blocos de concreto de terra: uma opção interessante para a sustentabilidade da construção. **Sebrae biblioteca online**, João Pessoa, 2002, p. 1-18, 2002. Disponível em: <https://docplayer.com.br/69253836-Blocos-de-concreto-de-terra-uma-opcao-interessante-para-a-sustentabilidade-da-construcao.html>. Acesso em: 23 fev. 2022.
- BAZZANI, M. Argamassas com cimento geopolimérico à base de metacaulim, cinza volante e escória granulada de alto forno ativado por solução alcalina de silicato. **Cerâmica**, Joinville, 2020. v. 1, p. 26-136, 2020. Disponível em: [https://www.udesc.br/arquivos/cct/id\\_cpmenu/706/2020\\_02\\_17\\_Manuela\\_Bazanni\\_Kretzer\\_15948257946944\\_706.pdf](https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/706/2020_02_17_Manuela_Bazanni_Kretzer_15948257946944_706.pdf). Acesso em: 23 fev. 2022.
- BORGES, P. *et al.* Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos a base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, 2014. v.14, p.153-158, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/xVQkySsxyBRGR8BZZS4zYyq/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 01 fev. 2023.
- BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K.; WEIL, M. Symposium of non-tradition cementand concrete, II, 2005. **Development of geopolymer concrete supported by system analytical tools**. Disponível em: <https://iccc-online.org/fileadmin/gruppen/iccc/proceedings/12/pdf/fin00276.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2022.
- CABALLERO, L. R. **Comportamento físico-mecânico de matrizes geopoliméricas à base de metacaulim reforçadas com fibras de aço**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/9609>. Acesso em: 23 fev. 2022.
- CHRISTÓFOLLI, J. L. **Estudo de argilas calcinadas para produção de cimento Portland pozolânico na região de Curitiba, Paraná**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/24061>. Acesso em: 23 fev. 2022.

COUTINHO, J. S. Materiais de construção 2: ligantes e caldas. **Departamento de engenharia civil FEUP**, Porto, 2006, v. 2, p. 100-157, 2006. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/ligantes2006.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.

DAMTOFT, J. S. *et al.* Sustainable development and climate change initiatives. **Cement and Concrete Research**, Lafarge, 2008, v. 38, p. 115-127, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884607002153>. Acesso em: 23 fev. 2022.

DAVIDOVITS, J. S. Conference of global warming, V, 1994. **Global warming impact on the cement and aggregates industries**. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/wp-content/uploads/5GWPROCE.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2022.

DAVIDOVITS, J. S. International conference geopolymere, II, 1999. **Chemistry of geopolymeric systems, terminology**. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/284514069\\_Geopolymer\\_chemistry\\_and\\_sustainable\\_development](https://www.researchgate.net/publication/284514069_Geopolymer_chemistry_and_sustainable_development). Acesso em: 23 fev. 2022.

FERREIRA, D. W. **Comparação energética de tijolos comum e sem queima pela análise do ciclo de vida**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/139164>. Acesso em: 23 fev. 2022.

GAVALI, H. R. *et al.* Development of sustainable alkali-activated bricks using industrial wastes: construction and building materials. **Construction & Building Materials**, Nagpur, 2019, v. 215, p. 180-191, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181931044X>. Acesso em: 23 fev. 2022.

LEMOUGNA, P. N. *et al.* Recent developments on inorganic polymers synthesis and applications. **Ceramics International**, Nanning, 2016, v. 42, p. 2-18. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884216310793>. Acesso em: 23 fev. 2022.

MALACARNE, C.S. **Desenvolvimento e caracterização de cimentos LC3 – cimentos ternários a base de argila calcinada e calcário – a partir de matérias primas do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/214512/001119076.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 jan. 2023

MEHTA, P. K. **Concreto – microestrutura, propriedades e materiais**. Berkeley: IMCYC, 2008. v. 1, p. 258-315. Disponível em: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/64487273/CONCRETO\\_ESTRUTURA\\_PROPIEDADES\\_Y\\_MATERIALES%20PDF%20PORTLAND.pdf?1600721093=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DConcreto\\_Estructura\\_propiedades\\_y\\_materi.pdf&Expires=1676515295&Signature=fcgUW74cjZmzSahx7S1LHHmeg8gUuPLK9p1Y7G48E2qP2uO4q-mLr54Y3FMDFOK303trKjSTkeLFE4J8~zE198sAQRfhxUeLlkXdChqWnHZqm3kN](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/64487273/CONCRETO_ESTRUTURA_PROPIEDADES_Y_MATERIALES%20PDF%20PORTLAND.pdf?1600721093=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DConcreto_Estructura_propiedades_y_materi.pdf&Expires=1676515295&Signature=fcgUW74cjZmzSahx7S1LHHmeg8gUuPLK9p1Y7G48E2qP2uO4q-mLr54Y3FMDFOK303trKjSTkeLFE4J8~zE198sAQRfhxUeLlkXdChqWnHZqm3kN)

acl6e0PrgC-g03UHOTbQ-Nxc95eJJZaeMv-JBa~xSwLJqWWbnc5hBU3ybRPI1XXjqbT9pgkpATmyuCNWjfr1cuhjEi~sL76G3QsahYTnmbagBt6DlID6zr9csOYxr3RHOZ0o9oQOFFiA4krPNRDrI5INfaeR-lvUBJIraAenaBUxemlKcW1JNcRlK3v22mFxiwi6poSBfufcwyMARVbF-3e2HO1xL6ST320Q\_\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 10 jan. 2023.

MOLIN, D.; SOUZA, P. S. L. ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, IX, 2002, Foz do Iguaçu. **Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como pozolanas de alta reatividade**. Disponível em: [https://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/Num15/Pag\\_45-54.pdf](https://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/Num15/Pag_45-54.pdf). Acesso em: 23 fev. 2022.

OBONYO E., EXELBIRT J.; BASKARAN M. Durability of compressed earth bricks: assessing erosion resistance using the modified spray testing. **Sustainability**, Basel, 2010, v.1, p. 2-10, 2010. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/2/12/3639>. Acesso em: 23 fev. 2022.

PUGLIESI, N. **O que é cimento?** Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/11959>. Acesso em: 25 jan. 2023.

REN, P. *et al.* Utilization of recycled concrete fines and powders to produce alkali-activated slag concrete blocks. **Journal of Cleaner Production**, Hunan, 2020, v. 267. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620321624>. Acesso em: 25 jan. 2023.

SALAZAR, R. A. *et al.* Eco-house prototype constructed with alkali-activated blocks: material production, characterization, design, construction, and environmental impact. **Materials**, Basel, 2021. p. 2-4, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/5/1275>. Acesso em: 25 jan. 2023.

SILVA, G. J. B. **Geopolímeros na construção: aglomerantes sustentáveis**. Disponível em: <https://blogreciclos.wordpress.com/2016/05/02/geopolimeros-aplicados-na-construcao-civil/>. Acesso em: 25 jan. 2023.

VERONEZI, D. **Quanto tempo leva para construir com os tijolos ecológicos de solo-cimento?** Disponível em: <https://www.tijoloecologico.net.br/tijolo-ecologico-publicacoes/tijolo-ecologico-quanto-tempo-leva-para-construir-com-tijolos-ecologicos-solo-cimento.php>. Acesso em: 01 fev. 2023.

WANG, H.; LI, H.; YAN, F. Synthesis and mechanical properties of meta-kaolinite based geopolymer. **Colloids and Surfaces A**, Lanzhou, 2004. v. 1, p. 1-6, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775705000804>. Acesso em: 23 fev. 2022.

ZAMPIERI, V. A. **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico**. 1993. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-25062015-102757/pt-br.php>. Acesso em: 23 fev. 2022.

