

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO SUL

LETÍCIA MARIA MOSSMANN

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM ARGAMASSAS COM ADIÇÃO  
DE FINOS DE TIJOLOS E CARVÃO VEGETAL**

Farroupilha

2024

LETÍCIA MARIA MOSSMANN

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM ARGAMASSAS COM ADIÇÃO  
DE FINOS DE TIJOLOS E CARVÃO VEGETAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para qualificação no Mestrado Profissional ou para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Materiais de Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti

FARROUPILHA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M913a Mossmann, Leticia Maria

Avaliação da resistência mecânica em argamassas com  
adição de finos de tijolos e carvão vegetal / Leticia Maria  
Mossmann ; orientador Edson Luiz Francisquetti. – Farroupilha,  
2024.  
xi, 60 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha.  
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de  
Materiais. Mestrado Profissional em Tecnologia e Engenharia  
de Materiais. Farroupilha, 2024.

1. Ciência dos materiais. 2. Resistência dos materiais.  
3. Argamassa. 4. Tijolos. 5. Carvão vegetal. 6. Resíduos sólidos.  
I. Francisquetti, Edson Luiz. II. Título.

CDU 620.17

**LETÍCIA MARIA MOSSMANN**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE  
FINOS DE TIJOLOS E CARVÃO VEGETAL**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Daniela Lupinacci Villanova – IFRS  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Janete Eunice Zorzi – UCS  
Universidade de Caxias do Sul

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mara Zeni de Andrade – IFRS  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

---

Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti – IFRS  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Apresentado e aprovado em: 05 de janeiro de 2024.

Local da defesa: IFRS – *Campus Farroupilha*

## DEDICATÓRIA

Ao Éverton, meu marido, por ser meu porto seguro, me apoiar e me amar.

Aos meus filhos, Mônica e Felipe, por serem minha luz, o motivo da minha persistência e a minha esperança por um mundo melhor.

## AGRADECIMENTOS

Sou grata a todos que estiveram comigo e me apoiaram para a concretização desse trabalho!

Agradeço imensamente ao Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti, por acolher e guiar-me por esta pesquisa. Sua orientação foi fundamental para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Sinto-me privilegiada pela oportunidade de partilhar sua experiência e conhecimento.

Ao técnico de laboratório do IFRS – *Campus* Farroupilha, Bruno Nonemacher por sempre estar pronto para auxiliar durante os ensaios.

Às parcerias com o Laboratório LCMIC – UCS, em especial aos Professores Cláudio Perottoni e Cesar Aguzzoli por me auxiliar com a realização das análises de DRX. E, também ao LDSM – UFRGS, ao Professor Fabio e ao bolsista Brendon por colaborarem com as análises de MEV/EDS.

À Construrohr, em especial ao Engenheiro Felipe Lima e ao supervisor Adriano, por disponibilizar o cimento Portland e à PM Materiais de Construção por ceder os resíduos de tijolos e carvão vegetal.

Ao meu companheiro Everton, por me apoiar incondicionalmente! O seu amor e compreensão tornaram possível a concretização deste sonho.

Aos meus filhos Mônica e Felipe que são a razão da minha persistência. Amo vocês mais que tudo!

“Só realmente vive  
quem se supera.”

Fabício Carpinejar

## RESUMO

A região do Vale do Caí - RS é um importante polo de produção de cerâmica vermelha e carvão vegetal. É essencial para a sustentabilidade ambiental e social, que os resíduos sólidos oriundos destas atividades sejam gerenciados adequadamente. Os finos de cerâmica vermelha podem possuir ação pozolânica comparável com o cimento Portland. A substituição deste por resíduos de tijolos em formulações de argamassa, esbarra na necessidade de ativação álcali, maior consumo de água e temperatura controlada de cura para manter resistência à compressão semelhante ao cimento Portland. O carvão vegetal, por sua vez, possui propriedades adsorventes. Por isso, o objetivo desse estudo consistiu na incorporação destes resíduos, a fim de substituir 25 % de cimento Portland em formulações de seis diferentes proporções de mistura de finos de carvão vegetal e de tijolos para produzir argamassa em temperatura ambiente de cura. A evolução da resistência à compressão das amostras foi avaliada em 7 idades de cura, entre 1 e 90 dias. A formulação com 20 % de finos de tijolo e 5 % de carvão vegetal apresentaram resistência mecânica à compressão maiores que a argamassa sem adição de resíduos, a partir de 28 dias de idade. As análises de termogravimetria e de fluorescência de raios X, demonstraram que o carvão vegetal não se comporta como um material pozolânico, mas por sua capacidade adsorvente, permitiu o suprimento de água no decorrer da reação pozolânica dos finos de tijolos com o cimento Portland.

**Palavras-chave:** Argamassa. Resíduos de tijolos. Finos de carvão vegetal. Gerenciamento de resíduos sólidos. Construção Civil.



## **ABSTRACT**

The Vale do Caí region - RS is an important hub for the production of red ceramics and charcoal. It is essential for environmental and social sustainability that solid waste arising from these activities is properly managed. Red ceramic fines have a pozzolanic action comparable to Portland cement. Replacing this with brick waste in mortar formulations comes up against the need for alkali activation, greater water consumption and controlled curing temperature to maintain compressive strength similar to Portland cement. Charcoal, in turn, has adsorbent properties. Therefore, the objective of this study was to incorporate these residues in order to replace 25% of Portland cement in formulations of six different mixing proportions of charcoal and brick fines to produce mortar at room curing temperature. The evolution of the compressive strength of the samples was evaluated at 7 curing ages, between 1 and 90 days. The formulation with 20% brick fines and 5% charcoal showed greater mechanical resistance to compression than the mortar without added residue, from 28 days of age. Thermogravimetric and X-ray fluorescence analyzes demonstrated that charcoal does not behave as a pozzolanic material, but due to its adsorbent capacity, it allowed the supply of water during the pozzolanic reaction of brick fines with Portland cement.

**Keywords:** Mortar. Brick waste. Charcoal fines. Solid waste management. Construction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de aplicação de argamassa .....	5
Figura 2 – Constituintes da argamassa.....	6
Figura 3 - Delineamento experimental .....	21
Figura 4 – Insumos empregados na formulação de argamassas .....	21
Figura 5 - Frações granulométricas de areia.....	21
Figura 6 - Resíduos de tijolos utilizados na formulação de argamassa .....	22
Figura 7 - Preparo dos finos de carvão vegetal.....	23
Figura 8 – Construção do molde para corpo de prova cilíndrico .....	23
Figura 9 – Comparação de estudos sobre a composição química dos tijolos .....	29
Figura 10 - Comparação da constituição da argila e dos tijolos do Vale do Caí – RS. .....	30
Figura 11 - Fluorescência de raios X dos tijolos do Vale do Caí – RS .....	30
Figura 12 – Teste de pozolanicidade do carvão vegetal .....	31
Figura 13 – Fluorescência de raios X do carvão vegetal .....	32
Figura 14 – Comparação da composição química .....	33
Figura 15 - Análise termogravimétrica (TGA) do tijolo e carvão vegetal .....	34
Figura 16 - Quantidade de água adicionada nas formulações de argamassa .....	36
Figura 17 - Resistência à compressão das formulações de argamassa .....	37
Figura 18 – Comparação da resistência à compressão de formulações de argamassas .....	40
Figura 19 – MEV das formulações de argamassa .....	41
Figura 20 – EDS observado nas amostras C25 e T5C20 .....	43
Figura 21 – EDS indicando a presença majoritária de quartzo .....	43
Figura 22 – EDS observado na amostra T20C5 .....	44
Figura 23 – EDS indicativo de CSH .....	45
Figura 24 – EDS indicativo de portlandita .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fases do cimento Portland.....	7
Tabela 2 – Composição química do cimento Portland .....	8
Tabela 3 - Materiais cimentícios suplementares (SCMs) .....	8
Tabela 4 - Granulometria de areias em argamassa .....	9
Tabela 5 – Dosagens em massa das formulações de argamassa .....	24
Tabela 6 - Composição química dos resíduos .....	28
Tabela 7 - Superfície específica do tijolo e carvão vegetal .....	35
Tabela 8 - Desvio padrão da resistência à compressão .....	37

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa e problema.....	2
1.2 Objetivos .....	4
1.2.1 Objetivo geral .....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
2 REVISÃO DA LITERATURA .....	5
2.1 ARGAMASSA .....	5
2.1.1 Aglomerante .....	7
2.1.2 Agregado.....	9
2.1.3 Água .....	11
2.2 RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA EM ARGAMASSAS.....	12
2.3 FINOS DE CARVÃO VEGETAL.....	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS .....	20
3.2 MISTURA DA ARGAMASSA .....	24
3.3 AVALIAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DE ARGAMASSA .....	25
3.3.1 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX).....	25
3.3.2 Análise termogravimétrica (TGA) .....	26
3.3.3 Resistência mecânica à compressão .....	26
3.3.4 Morfologia por microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS) ..	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
4.1 Caracterização química dos finos de tijolos e carvão vegetal.....	28
4.2 Características físicas dos finos de tijolos e carvão vegetal .....	33

4.3 Resistência mecânica à compressão.....	36
4.4 Caracterização microestrutural das argamassas .....	41
5 CONCLUSÕES.....	47
5.1 Possibilidades de trabalhos futuros.....	48
REFERÊNCIAS .....	49

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil faz uso massivo de materiais cimentícios, na forma de concretos e argamassas, estes, respectivamente, conferem sustentação e revestimento das edificações. No entanto, a indústria cimentícia depende de matérias-primas que contêm carbono e altas temperaturas para a produção do cimento Portland, tornando-se inerente à sua atividade, altos índices de emissão de gases do efeito estufa. Estima-se que o setor contribui com 6 % das emissões globais (OSTOVARI *et al.*, 2021).

Neste sentido, a partir do Acordo de Paris, a proposta do *Net Zero Roadmap* é reduzir até 2050, 93 % das emissões de gases do efeito estufa oriundos da moagem do clínquer e 86 % das emissões pelas fontes de energia térmica utilizadas para a produção do cimento (IEA, 2023). Os caminhos investigados para positivar estas metas é através do uso de fontes limpas de energia e insumos alternativos para a produção cimentícia (OSTOVARI *et al.*, 2021).

A substituição parcial de clínquer por *filler* de calcário é uma estratégia para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. Isso ocorre porque o *filler* de calcário não requer tratamento térmico, ao contrário do clínquer, que é produzido pela calcinação do calcário (GONÇALVES, 2021). Já a adição de resíduos de escória de alto forno, cinza volante e sílica ativa, são materiais que ao serem hidratados possuem propriedades pozolânicas, por conter óxidos de sílica, ferro e alumina; similares ao cimento Portland, o que contribui para a resistência à compressão de argamassas (CABRERA-MADRID; ESCALANTE-GARCÍA; CASTRO-BORGES, 2016).

Nesta mesma direção, estima-se que grande parte dos resíduos de demolição da construção civil (RCD), no Brasil, não são reciclados e ou armazenados para uso futuro, sendo que a grande maioria dos resíduos ainda são destinados para o aterro sanitário e lixões (NUNES; MAHLER, 2020). O RCD é composto majoritariamente por cimento, argamassa, tijolos e telhas. Apesar de diversos estudos demonstrarem que é possível a incorporação dos RCD à argamassa, viabilizando, inclusive, um aumento na resistência mecânica das argamassas com a adição destes materiais (ABUDUREHMAN *et al.*, 2021). Um dos entraves no Brasil, da logística reversa de reinserção dos RCD como matéria-prima civil esbarra na insuficiência de clareza

sobre as propriedades físico-químicas e mecânicas que os resíduos exercem sobre as propriedades dos materiais cimentícios (ROSADO *et al.*, 2019).

No entanto, a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), a ABNT NBR 10004 (2004) e a Resolução Conama nº 307 (BRASIL, 2002), versam sobre os procedimentos para a gestão de resíduos sólidos, tais como, os materiais inertes, que são passíveis de reciclagem e reutilização, como aqueles oriundos da construção civil e da produção de carvão vegetal, e restringem o descarte destes em lixões e aterros sanitários.

Desde então, concentram-se esforços no desenvolvimento de diversos estudos e tecnologias que visam reduzir as emissões de gases do efeito estufa (IEA, 2023) e incorporar resíduos inertes. No cenário atual há cada vez mais pesquisas que demonstram a viabilidade de incorporação de resíduos como alternativa para gerenciar os resíduos sólidos amplamente gerados na construção civil. Pois, estima-se que 60 % dos resíduos sólidos globais são gerados na construção civil (GUIMARÃES FILHO, 2016) e, 30 % de finos são produzidos durante a carbonização da madeira, transporte e empacotamento do carvão vegetal, que por sua vez, é amplamente utilizado como fonte energética siderúrgica (DELATORRE, *et al.*, 2020).

Neste viés, o presente trabalho objetivou avaliar a incorporação de finos oriundos de resíduos de tijolos e carvão vegetal produzidos na região do Vale do Caí, para substituir parcialmente o cimento Portland em formulações de argamassa, em condições de temperatura de cura aplicáveis em canteiros de obra, possibilitando uma produção sustentável sob o ponto de vista ambiental, econômico e social.

## **1.1 Justificativa e problema**

A construção civil é um setor estratégico no desenvolvimento econômico e social de um país. A região do Vale do Caí – RS se destaca como o segundo maior polo cerâmico do Brasil (RODRIGUES, 2012). E, também como produtor de 60 % do carvão vegetal gaúcho (APECÁVE, 2018).

No entanto, ambas as atividades são responsáveis por diversos impactos ambientais, desde a extração de recursos naturais, poluição do ar e da água e geração

de resíduos sólidos. Apesar da Política Nacional de Resíduos Sólidos impulsionar a coleta desses materiais, estima-se que, no Brasil, 92 % dos resíduos gerados na construção civil, ainda são descartados em aterros sanitários (NUNES; MAHLER, 2020). Os maiores entraves do reaproveitamento desses materiais estão relacionados à transposição dos experimentos laboratoriais para a implementação em situações reais, como na construção civil (LIMA, 2022; ROSADO *et al.*, 2019).

A substituição de cimento Portland por finos de tijolos em argamassas aumenta a absorção de água, diminui a trabalhabilidade e aumenta a porosidade, comprometendo, assim, a resistência à compressão (LASSEUGUETTE *et al.*, 2019; ARAÚJO, 2017; DOBIAS; POKORNY, 2017). Porém, a ativação álcali dissolve parte da fase cristalina em um aluminossilicato amorfo, de estrutura semelhante à dos precursores zeolíticos, proporcionando a geopolimerização (ROVNANÍK; *et al.*, 2018; USHA; NAIR; VISHNU DAS, 2017). Nesse processo, a pasta hidratada promove a formação de monocarboaluminato e etringita, potencializadas principalmente em temperatura de cura na faixa de 40 °C a 65 °C, o que ocasiona a aceleração da reação pozolânica, resultando em argamassas com desempenho mecânico superiores a formulações tradicionais (HOPPE *et al.*, 2021; PITARCH *et al.*, 2021; REIG *et al.*, 2017).

A principal diferença dos procedimentos, está no fato de que a reação pozolânica é uma reação lenta e que precisa de hidratação durante todo o processo. Caso contrário, o processo de geopolimerização cessa e os finos não reagidos passam a atuar como *filler* de preenchimento físico (SZELAG *et al.*, 2021; AMORIM; LIRA; FERREIRA, 2003), principalmente em adições de finos de cerâmica vermelha superiores a 20 %, na qual constata-se uma diminuição do empacotamento das partículas, resultando em uma argamassa de maior porosidade e, por isso, de menor resistência mecânica à compressão (ORTEGA *et al.*, 2018; VEJMELOVÁ *et al.*, 2010).

Porém, a implementação de condições de cura controladas, em um processo industrial ou em canteiro de obras torna-se dispendioso e, até mesmo, impraticável, o que inibe o reaproveitamento de resíduos de tijolos, por exemplo. Por esse motivo, a proposta deste estudo é formular argamassas, na qual o cimento Portland é parcialmente substituído por finos de tijolos, mas sem ativação álcali e elevação de



temperatura para a cura do material. Por isso, a adição do subproduto da carbonização da madeira, os finos de carvão vegetal, que por suas propriedades adsorventes (SOUZA *et al.*, 2021; REN, *et al.*, 2019; FROEHLICH; MOURA, 2014), possam ser aplicadas na manutenção da hidratação durante reação pozolânica e resultar em uma argamassa com resistência à compressão similares a formulações tradicionais. E, assim, sob a visão da logística reversa, é importante gerenciar os resíduos de tijolos e carvão vegetal produzidos na região do Vale do Caí – RS, de forma a agregar valor, tornando as formulações de argamassa mais sustentáveis sob o ponto de vista ambiental, econômico e social.

## **1.2 Objetivos**

Os objetivos deste estudo são definidos pelo objetivo geral, centralizado no propósito deste trabalho, e objetivos específicos, que versam sobre os resultados almejados nesta pesquisa.

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o efeito da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de tijolos e carvão vegetal em argamassas.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos do trabalho estão delineados por:

- a) Avaliar a viabilidade de usar resíduos de tijolos e carvão vegetal, produzidos na Região do Vale do Caí – RS, para fazer argamassas.
- b) Caracterizar a composição química dos resíduos de tijolos e carvão vegetal.
- c) Analisar a resistência mecânica à compressão das argamassas aos 1, 3, 7, 14, 28, 60 e 90 dias de idade.
- d) Identificar a morfologia e composição das formulações de argamassa aos 28 dias de idade.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste Capítulo serão apresentados conceitos sobre argamassa (2.1) e os materiais utilizados em sua formulação, como o cimento (2.1.1), areia (2.1.2) e a água (2.1.3). Aborda-se, também, os estudos sobre a utilização de finos de tijolos em formulações de argamassa (2.2) e as características dos finos de carvão vegetal (2.3).

### 2.1 ARGAMASSA

Os materiais cimentícios são essenciais na construção civil. A norma ABNT NBR 11172 (1990) estabelece que estes materiais são constituídos de minerais, que na forma de pó fino, reage com a água para formar uma pasta aglomerante. Neste grupo, destacam-se as argamassas, que são definidas pela ABNT NBR 13281 (2005) como uma mistura preparada com aglomerante, agregados miúdos e água, podendo conter aditivos. E é classificada de acordo com a finalidade de sua aplicação (Figura 1).

**Figura 1** – Diagrama de aplicação de argamassa

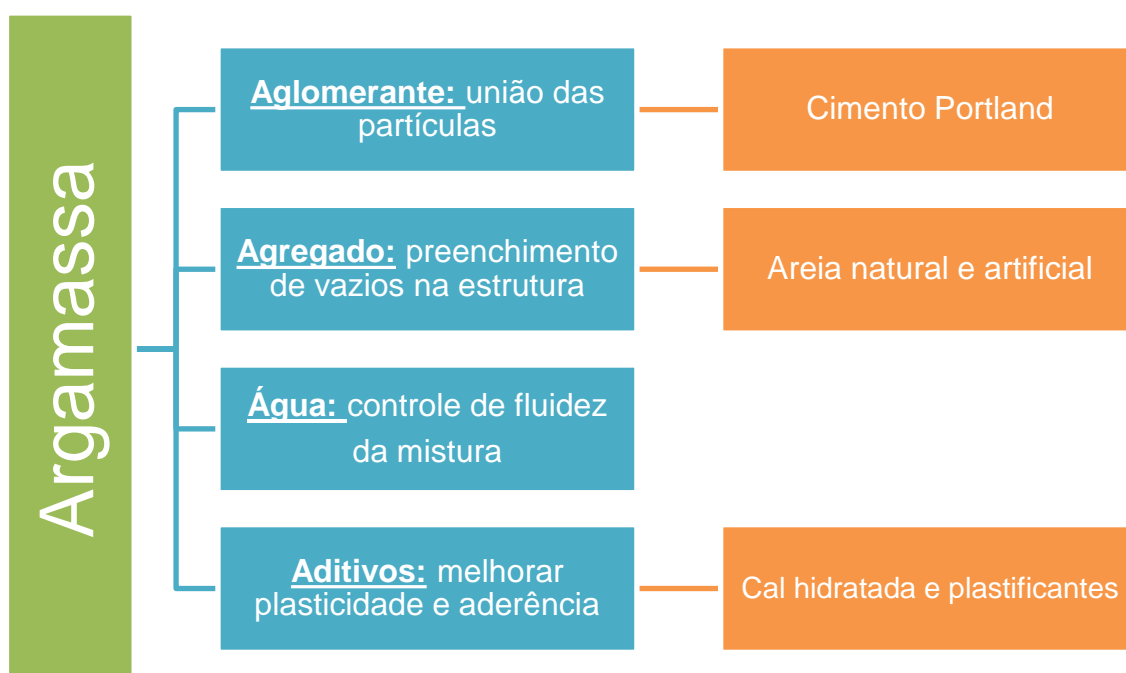


Fonte: Adaptado ABNT NBR 13281 (2005).

A argamassa é uma mistura de materiais aglomerantes, agregados e água, que possui a função de unir blocos de pedra em uma alvenaria. No estado fresco, ela permite que os blocos sejam posicionados com firmeza na estrutura. Quando seca, a argamassa distribui os esforços na superfície, proporcionando aderência e resistência à flexão, compressão e tração (MOLITERNO, 1995).

Cada constituinte da argamassa, possui uma função específica (Figura 2). A proporção destes, sua granulometria e o volume de água necessário para hidratar a mistura, como também, as condições de temperatura e umidade durante a cura interferem na resistência mecânica da argamassa (CALLISTER JUNIOR, 2014).

**Figura 2 – Constituintes da argamassa**



Adaptado: Kalil, Leggerini e Bonacheski (2007).

Nas seções a seguir, serão aprofundadas as propriedades e respectivas influências que o aglomerante (2.2.1), o agregado (2.2.2) e a água (2.2.3) possuem nas características físicas e mecânicas da argamassa.

### 2.1.1 Aglomerante

Os aglomerantes mais utilizados estão os ligantes hidráulicos do tipo Portland. O cimento é um material inorgânico particulado que após reagir com a água, forma um produto insolúvel e endurecido. A norma ABNT NBR 16697 (2018) define este tipo de cimento como produto resultante da moagem de clínquer Portland, na qual é adicionado uma ou mais formas de sulfato de cálcio e demais minerais.

O cimento Portland é classificado em cinco tipos, identificados pela sigla CP seguido de um algarismo romano que indica a composição. Os cimentos CP-IV e CP-V são os mais utilizados para argamassa, pois a cinética da reação é mais lenta, o que permite a absorção de pequenas deformações (NEVILLE; BROOKS, 2010). O cimento Portland é composto por clínquer, um produto oriundo da mistura da rocha de calcário, argila e aditivos, como a bauxita. A fusão desses materiais a 1500 °C, resulta nas fases denominadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Fases do cimento Portland**

Nome do composto	Nomenclatura	Composição química	Sigla	Fração no cimento
Silicato tricálcico	Alita	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	50 a 70 %
Silicato dicálcico	Belita	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15 a 30 %
Alumínio tricálcico	Etteringita	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	5 a 10 %
Ferro aluminato de cálcio	Brownmillerita	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{FA}$	5 a 15 %

Fonte: adaptado Neville e Brooks (2010), e Tenório et al. (2003).

A hidratação do cimento inicia pela reação química com o aluminato tricálcico e, após da alita, que por sua vez, é a maior responsável pelas propriedades mecânicas após a hidratação e cura do cimento. Já a belita contribui para a resistência à compressão tardia. E a propriedade principal do ferro aluminato de cálcio é a

resistência à corrosão química e coloração cinzenta do clínquer (TENÓRIO *et al.*, 2003).

O cimento Portland é composto majoritariamente por óxido de cálcio, sílica, alumínio, ferro (Tabela 2). A combinação destes óxidos no cimento, resultam nas fases apresentadas anteriormente na Tabela 1.

**Tabela 2 - Composição química do cimento Portland**

<b>Composição química (%)</b>						
	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>
<b>CP IV-32</b>	9,41	28,44	3,66	45,3	2,83	2,25
<b>CP V-ARI</b>	4,47	18,62	2,88	61,59	3,18	2,83
<b>CP II-Z-32</b>	8,58	21,25	3,23	52,74	2,69	2,55

Fonte: Adaptado de Itambé Cimentos (2023).

A utilização de materiais cimentícios suplementares (SCMs) na produção de cimento é uma estratégia comum para reduzir custos, impactos ambientais e valorizar as matérias-primas regionais. A suplementação consiste na substituição de parte do clínquer por insumos (Tabela 3) como calcário, cinzas volantes, escória granulada de alto forno, pozolanas naturais, argilas calcinadas, cinzas vegetais, resíduos de sílica. A seleção de SCMs deve considerar a sua capacidade reativa, composição química, tamanho de partícula (GONÇALVES, 2021).

**Tabela 3 - Materiais cimentícios suplementares (SCMs)**

<b>SCMs</b>	<b>Fonte</b>	<b>Composição química</b>
Escória granulada de alto forno	Resíduos da produção de ferro gusa	Porcentagem de CaO entre 30 a 50 %
Pozolanas	Origem natural, resíduo agrícola ou industrial	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≥70 %

Fonte: adaptado das normas ABNT NBR 16697 (2018) e ABNT NBR 12653 (2015), e Gonçalves (2021).

Os materiais pozolânicos preenchem os vazios intersticiais, através da reação com o hidróxido de cálcio para formar silicato de cálcio hidratado e aluminossilicato de cálcio hidratado. Assim, aumenta o empacotamento estrutural e por isso possui maior impermeabilidade ao ataque de sulfatos e maior resistência mecânica em idades avançadas de cura (ABNT NBR 12653, 2015; MINATTO, 2012).

### 2.1.2 Agregado

A areia é um dos principais componentes da argamassa. Ela fornece volume e contribui com resistência à compressão e trabalhabilidade da argamassa, pois atua no preenchimento dos espaços vazios entre o cimento e a cal (FERREIRA, 2010). É um agregado inerte de fonte natural e ou artificial; oriunda de miúdos da britagem, composta majoritariamente por sílica, tendo por requisitos baixo teor de umidade e matéria orgânica (ABNT NBR 7214, 2015). A granulometria é um fator importante que afeta as propriedades da argamassa (Tabela 4).

**Tabela 4 –** Granulometria de areias em argamassa

<b>Nome popular</b>	<b>Mesh peneira</b>	<b>Abertura nominal da peneira (mm)</b>
Areia grossa	16	2,4 - 1,2
Areia média grossa	30	1,2 - 0,6
Areia média fina	50	0,6 – 0,3
Areia fina	100	0,3 – 0,15

Fonte: adaptado das normas ABNT NBR 7214 (2015) e ABNT NBR 7215 (2019).

A uniformidade da areia proporciona maior volume de vazios entre os grãos. Por isso, a mistura de diferentes frações granulométricas, contribui no aumento da área específica e na retenção de água, promovendo uma secagem lenta da

argamassa e, assim, influencia diretamente na resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade (VENÂNCIO, 2008).

A areia de menor granulometria reduz a energia de mistura, ameniza o efeito da morfologia, fazendo com que a mistura tenha uma curva de carga de compressão mais contínua e com menor necessidade de adição de água na formulação, proporcionando argamassa com maior aderência. Enquanto que as frações grossas de agregado suportam as tensões de deformação (KUDO, 2012; KALIL; LEGGERINI; BONACHESKI, 2007).

Agregados de origem natural possuem maior esfericidade, pois suas partículas são mais arredondadas. As areias artificiais resultam em argamassas menos densas, pelo menor empacotamento das partículas, que são mais alongadas e rugosas e, por isso, dificultam o fluxo, devido à fricção causada pelo imbricamento dos grânulos (KUDO, 2012).

Resíduos de construção e demolição (RCD) tem sido testados como agregados inertes (LEDESMA *et al.*, 2015; SILVA; BRITO; VEIGA, 2010). A incorporação de agregados moídos oriundos de alvenaria, para substituir parcialmente a areia natural, diminui a densidade da argamassa, aumenta a absorção de água, proporcionando maior retração nos corpos de prova e diminuição da resistência à compressão (LEDESMA *et al.*, 2015).

No entanto, a adição de resíduos oriundos de cerâmica vermelha proporcionou maior resistência à compressão e menor incorporação de água na mistura, sendo verificado melhor distribuição granulométrica e ação pozolânica com o aglomerado (SILVA; BRITO; VEIGA, 2010), ao formar uma zona de transição interfacial entre os constituintes (CABRAL *et al.*, 2010).

A adição de tijolo proporciona uma argamassa com menor densidade, tanto no estado fresco como endurecido (LÓPEZ GAYARRE *et al.*, 2017). As propriedades da argamassa fresca são influenciadas principalmente pela absorção, forma, textura e densidade do agregado miúdo reciclado (EVANGELISTA; TAM; SANTOS, 2019). Na substituição da areia, o material cerâmico apresenta maior irregularidade na forma das partículas e, por isso, maior absorção de água (JIMÉNEZ *et al.*, 2013). Em razão dos teores elevados de sílica e alumina, os tijolos atuam como pozolanas, preenchendo os espaços na matriz, em formulações de argamassa que utilizaram até

50 % de tijolos como agregado. Contudo, observa-se a diminuição da resistência mecânica à compressão, devido a menor fluidez da pasta, maior tempo de pega e, também, maior retração na secagem da argamassa em substituição superior a 30 % (WU *et al.*, 2021; CABRERA-COVARRUBIAS *et al.*, 2015). Mas, em formulações de 1:4 de cimento e areia substituída por 30 % de tijolos demonstrou melhores propriedades mecânicas de flexão, compressão e módulo de elasticidade, propiciando maior capacidade de secagem e aderência, quando o propósito da argamassa é a reabilitação de estrutural (TORRES; MATIAS; FARIA, 2020).

A lavagem e secagem da areia (ABNT NBR 7215, 2019) é indicada para remover impurezas orgânicas húmicas, argila e contaminantes que diminuem a massa unitária de areia e podem contribuir para menor incorporação de ar na argamassa (RESENDE, 2010).

### **2.1.3 Água**

A água é responsável pela fluidez e trabalhabilidade da argamassa. A quantidade da mesma é um fator importante que afeta as propriedades da mistura. Uma quantidade insuficiente pode tornar a pasta seca e difícil de trabalhar. Mas um volume excessivo de água pode sedimentar os sólidos e tornar a argamassa fraca e suscetível a fissuras (VENÂNCIO, 2008).

A demanda de água no preparo da argamassa é fortemente influenciada pela distribuição granulométrica dos agregados. Quanto maior a granulometria maior a quantidade de água. Assim, agregados artificiais, como RCD incorporam 2 % a mais de água (KUDO, 2012).

A incorporação de ar pela pasta de argamassa influencia a absorção de água, pois o espaço preenchido por ar, limita a incorporação de água da mistura (RESENDE, 2010).



## 2.2 RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA EM ARGAMASSAS

A utilização de argilas tratadas termicamente como pozolanas é uma técnica de construção antiga. O tratamento térmico na faixa de 900 °C, temperatura em que a maioria das indústrias cerâmicas operam (MATIAS; FARIA; TORRES, 2014), ativa as propriedades pozolânicas, pois modifica-se a estrutura cristalina da argila, disponibilizando a sílica e a alumina em estado amorfo para reagir (BARONIO; BINDA, 1997). Desta forma, viabiliza-se a incorporação de resíduos cerâmicos oriundos da produção de tijolos e telhas (SÁNCHEZ DE ROJAS *et al.*, 2006), mediante processos operacionais simples como britagem, moagem e peneiramento (HE *et al.*, 2021), sendo que estes materiais são denominados como pozolanas artificiais (BARONIO; BINDA, 1997).

De forma geral, a inclusão de partículas cerâmicas aumenta a durabilidade da argamassa e resistência à sulfatos (SAMADI *et al.*, 2020). Independente da finalidade de substituição, em incorporações de até 5 % de tijolos não se constata a ação pozolânica (SZELAG *et al.*, 2021), mas a diminuição da fluidez da pasta de argamassa é observada ao se substituir o cimento por tijolo em percentuais superiores a 10 % (WONG *et al.*, 2020).

O tamanho de partícula tem forte influência nas características mecânicas macroscópicas da argamassa, uma vez que partículas de tijolos menores que 20 µm possuem maior superfície de contato, favorecendo a zona interfacial entre a pasta de cimento e areia (XUE *et al.*, 2021). Já em tamanho de partículas maiores é notável maior volume de poros e maior difusão da umidade (POMMER *et al.*, 2021) e fissuras, devido à maior retração do material após a secagem (BRNDUŞ-SIMUŢ *et al.*, 2018). A retração das argamassas atinge valores semelhantes para substituição de agregado natural por finos de tijolos e percentuais de até 50 %, sendo que estes valores são duplicados para argamassas com porcentagens superiores a 70 % (LÓPEZ GAYARRE *et al.*, 2017).

Em sistemas que se consegue uma maior distribuição dos finos de tijolos, obtêm-se uma pasta com fator de empacotamento maior, propiciando assim, maior resistência mecânica (XUE *et al.*, 2021; EVANGELISTA; TAM; SANTOS, 2019). Mas a mistura de partículas de diferentes diâmetros pode proporcionar a combinação da

atuação como pozolanas na geopolimerização, quando são de menor granulometria, e como agregado na matriz quando são de maior diâmetro (POMMER *et al.*, 2021).

Ao se utilizar tijolos com tamanho de partícula semelhantes ao clínquer do cimento, em proporção de 20 %, tem-se comportamento mecânico semelhante argamassa de cimento Portland, uma vez que, a maior superfície de contato dos finos de tijolo proporciona maior superfície de contato para a atividade pozolânica. Contudo, a trabalhabilidade é reduzida e o aumento de incorporação de água é maior (GRELLIER *et al.*, 2021).

A avaliação de Sarkar e Dana (2021) demonstrou que o controle da porosidade em uma argamassa é crucial para obter maior resistência mecânica, uma vez que os poros na estrutura não compartilham o campo de tensão durante a aplicação de uma carga mecânica. Na argamassa, a variável microestrutural que afeta a porosidade é o empacotamento entre as partículas. Então, ao se adicionar resíduos de cerâmica vermelha tem-se uma melhora no empacotamento, em razão da distribuição granulométrica dos finos. Mas, a incorporação destes resíduos se limita a 33 %, pois o aumento da quantidade de aglutinante geopolimérico leva a uma diminuição da quantidade de ligações na fase de argamassa e, logo, uma diminuição da resistência à compressão. Na argamassa com 33 % de resíduos cerâmicos a resistência à compressão foi de 50 MPa, já com 67 % de resíduos triturados incorporados a resistência foi de 25 MPa. Efeito similar foi observado por Vejmelková *et al.* (2010), sugerindo, inclusive, a incorporação de até 20 % de agregado cerâmico para manter as propriedades da argamassa.

Argamassas com resíduos de tijolos exibem uma matriz mais densa com poros refinados em comparação com a argamassa de cimento; no entanto, em um processo de geopolimerização pode-se observar as partículas que não reagiram, o que pode diminuir a resistência à compressão (AMERI *et al.*, 2019).

A temperatura de queima dos tijolos possui influência no tamanho de poros na argamassa. Temperaturas de sinterização menores que 900 °C diminuem a resistência mecânica à compressão, mesmo em idades de cura avançadas da argamassa (O'FARRELL; SABIR; WILD, 2006). Em temperaturas próximas a 1000 °C, percebe-se um refinamento dos poros em idades entre 28 e 90 dias (WILD; KHATIB; O'FARRELL, 1997). O diâmetro de poro menor, aumentou a resistência mecânica à

compressão (WILD; KHATIB; O'FARRELL, 1997), em formulações de argamassa que utilizaram 50 % de tijolos como agregado; observou-se uma diminuição do diâmetro médio do poro, em até 16 % (WU *et al.*, 2021). Logo, tem-se uma diminuição da retração linear de até 45 % mediante a adição de finos de cerâmica vermelha (SZELAG *et al.*, 2021). Já a cura dos corpos de prova em ambiente úmido demonstrou a diminuição do tamanho médio dos poros (ABDOLLAHNEJAD *et al.*, 2020).

O aumento do teor ou a diminuição do tamanho de partícula reduz a consistência e a trabalhabilidade dos compósitos cimentícios (AGRAWAL *et al.*, 2021; HE *et al.*, 2021). A resistência à compressão das argamassas com tijolos ativados aumenta à medida que se reduz a proporção de água e aglutinante (TUYAN; ANDIÇ-ÇAKIR; RAMYAR, 2018), a um limite de 0,27, quando observa-se efeito inverso, em razão da presença de resíduos cerâmicos que não reagiram (SILVA *et al.*, 2019), uma vez que, em proporções abaixo de 0,4 a mistura perde a trabalhabilidade (TUYAN; ANDIÇ-ÇAKIR; RAMYAR, 2018) pela maior compactação da pasta e, assim, menor espaço de vazios para acomodar a formação do gel de aluminatos de cálcio e sílica hidratados (SÁNCHEZ DE ROJAS *et al.*, 2006). Na incorporação de 40 % de resíduos cerâmicos e comparando-se a relação de água/aglutinante 0,35 e 0,45, constatou-se que quanto menos água disponível após a hidratação da mistura, menor será o processo de difusão e evaporação da mesma e, assim, menor a probabilidade de formação de poros e rachaduras na argamassa (REIG *et al.*, 2013).

A composição química percentual dos resíduos de cerâmica vermelha, que incluem os pós cerâmicos gerados durante o processo de produção e, também, os tijolos e telhas descartados, são compostos majoritariamente por sílica e alumina em razão da fonte de matéria-prima ser argilosa. Outros óxidos que podem estar presentes em frações menores são  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ . A composição mineralógica corrobora com a química, pois indica a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), feldspato (ortoclásio –  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ , albita –  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ , anortita –  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) predominantemente e frações variáveis de hematita, mulita, ilita, magnetita, mica, calcita e dolomita (KEPPERT *et al.*, 2017; AMORIM; LIRA; FERREIRA, 2003; HOPPE *et al.*, 2021; LEDESMA *et al.*, 2015; PASALIC *et al.*, 2012; PITARCH *et al.*, 2021; REIG *et al.*, 2013; SARKAR; DANA, 2021).

A variabilidade da composição química da cerâmica vermelha depende do tipo de argila utilizada e da temperatura de sinterização do tijolo (O'FARRELL; SABIR; WILD, 2006). Na formulação de uma argamassa preparada com agregados silicosos (quartzo) apresentaram propriedades mecânicas inferiores às preparadas com agregados calcários. Essa diferença deve-se à forma de interação dos agregados com a matriz. Nos agregados de calcário tem-se uma superfície mais áspera e porosa, quando comparado com os silicosos, proporcionando maior superfície de contato com a pasta. Os minerais de quartzo ao reagir com o cimento são quimicamente mais estáveis do que o calcário (REIG *et al.*, 2017). Na comparação de resíduos de tijolos oriundos da Argentina e da República Tcheca, obteve-se argamassas com resistência à compressão de 30 MPa e 40 MPa, respectivamente, essa diferença é devido à quantidade de sílica e óxido de cálcio que compõem esses tijolos (RAHHAL *et al.*, 2019). Observou-se que tijolos de argila caulínica possuem melhor desempenho, em razão do maior teor de cálcio disponível, quando comparado com tijolos de argila ílítica. No entanto, os melhores resultados são obtidos ao se misturar as argilas calcinadas de ilita e caulinita, pois há maior solubilidade do silício e alumínio (MSINJILI *et al.*, 2021).

A temperatura de queima de cerâmicas vermelhas não influencia significativamente a composição química, a capacidade de retenção de água e a capacidade de incorporação de ar, mas influencia a resistência à compressão, pois cerâmicas queimadas em baixa temperatura possuem um excesso de hidróxido de cálcio livre para reagir com o silicato de cálcio, este último responsável pela resistência da argamassa (ALEXANDRE *et al.*, 2014).

Nessa mesma direção, Hoppe *et al.* (2021) sinalizaram que os resíduos triturados oriundos da sinterização de cerâmicas vermelhas possuem potencial pozolânico, em razão do processo de sinterização permitir a desidroxilação da caulinita e a formação de uma estrutura amorfa. Mas, a temperatura de sinterização da cerâmica vermelha influencia o potencial de reatividade pozolânica (PEREIRA-DE-OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Além disso, Schackow, Correia e Efftig (2020) apontam que a reatividade também é favorecida com menores percentuais de  $K_2O$ , que pode ser obtido com a queima em temperaturas a 800 °C. Também, nesta temperatura de queima é possível

verificar a presença de feldspato, mica e anfibólios que contribuem na formação de fase vítrea, diminuindo a presença de poros.

Nos ensaios de Pitarch *et al.* (2021), com três tipos diferentes de resíduos cerâmicos, também constataram que a composição química tem correlação com a temperatura de sinterização do material cerâmico. A maior variação é da fase amorfa e do percentual de SiO<sub>2</sub>. Ao comparar tijolo, telhas e louça sanitária, a variação de fase amorfa é de 35 %, 60 % e 46 % respectivamente. Os tijolos são queimados em temperatura próxima a 900°C, já as telhas em temperaturas entre 1120 °C e 1200 °C, por isso apresenta um teor de SiO<sub>2</sub> 50 % e 61 %, respectivamente. Apesar da louça cerâmica ter temperatura de queima próxima a 1220 °C e 1280 °C e teor de SiO<sub>2</sub> de 66 %, sua fase amorfa é menor em razão da maior presença Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (24 %) e menor de CaO (1,2 %). Por isso, os autores defendem combinar estes resíduos cerâmicos em substituições de 25 % do cimento, para minimizar os efeitos das diferentes composições químicas e manter valores de resistência à compressão de 50 MPa.

Além disso, as argamassas à base de materiais de ligação com maior teor de alumina, possuem desempenho de resistência à compressão maior, quando os resíduos cerâmicos são queimados em temperaturas acima de 800 °C (AMERI *et al.*, 2019). Elevados teores de alumina favorecem a reação com o hidróxido de cálcio e água disponível, formando gel de aluminato de cálcio hidratado, que com a sílica produzem cristais de aluminato silicato de cálcio, densificando a matriz, pois preenche os espaços, reduzindo a porosidade e microfissuras da argamassa (SAMADI *et al.*, 2020).

O cálcio na complexação de silicatos/aluminossilicatos é impulsionado pelo poder de polarização do íon cálcio, em meio aquoso, em relação aos metais alcalinos de sódio e potássio. Observa-se que o cátion cálcio desloca o sódio na estrutura zeólita de alumino silicato de sódio hidratado, quando há quantidade suficiente de óxido de cálcio, em pH acima de 12 (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2011). Há uma diminuição da taxa de energia necessária para formar o oligômero, uma vez que, o cátion cálcio apresenta menor mobilidade e dissolução mais lenta do que comparada com o cátion potássio (PEYNE *et al.*, 2017).

As cerâmicas vermelhas devem ter teores reduzidos de óxido de magnésio (< 6,5 %), de trióxido de enxofre (< 5 %), pois durante a sua hidratação, ocorre a

expansão volumétrica, que pode causar a ruptura do material (CARVALHO *et al.*, 2020; ARAÚJO *et al.*, 2019). O mesmo é observado na presença de óxido de sódio, que estimula a expansão por estimular a reação dos agregados alcalinos na mistura (ARAÚJO *et al.*, 2019).

### **2.3 FINOS DE CARVÃO VEGETAL**

O carvão vegetal tem substituído o coque como fonte para abastecimento de fornos siderúrgicos (BELTRAME *et al.*, 2020), em razão de seu elevado grau de pureza em relação ao carvão mineral, com baixos traços de enxofre e cinzas (FROEHLICH; MOURA, 2014). O Brasil, em 2021, produziu 6,8 milhões de toneladas, correspondendo a 12 % da produção mundial de carvão vegetal. No setor siderúrgico brasileiro, o carvão vegetal abastece 20 % dos fornos para a produção de aço, sendo que as perspectivas são de crescimento da utilização de carvão vegetal em substituição ao coque. No entanto, a produção gaúcha é destinada para o preparo de churrasco, sendo a principal mão de obra oriunda da agricultura familiar (APECÁVE, 2018), utilizando-se as madeiras das espécies florestais de acácia negra (61 %) e eucalipto (39 %) (AGEFLOR, 2022).

O carvão vegetal é produzido em um forno de alvenaria do tipo “rabo quente” acoplado a uma chaminé para a saída dos gases da combustão. As madeiras, com comprimento próximo a 100 cm e 20 cm de diâmetro são acondicionadas no forno. O ciclo de carbonização pode durar até 7 dias, dependendo das dimensões do forno. No início, em temperaturas entre 200 °C e 280 °C ocorrem reações endotérmicas, com liberação de ácido acético, metanol, água e dióxido de carbono. Já em temperaturas de até 500 °C ocorrem reações exotérmicas, com a liberação dos gases de combustão, acima desta temperatura, o carvão encontra-se estável. (BERNARDINI, 2020; APECÁVE, 2018; SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

O rendimento estimado de produtividade é de 30 % por fornada de carbonização, sendo gerado como subprodutos madeira que não completou o ciclo de carbonização, o extrato pirolenhoso, gases combustíveis e os finos de carvão vegetal (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012). As condições da madeira utilizada para a

carbonização influenciam nas propriedades do carvão vegetal. Sendo que a formação de finos está condicionada à maior umidade da madeira (> 20 %), uma vez que, durante o processo a água no estado gasoso gera maior pressão interna de vapor propagando trincas, tornando o material mais quebradiço (DELATORRE *et al.*, 2020).

A formação de carvão vegetal depende da quantidade de lignina presente na madeira, em idades precoces de corte há menor densidade e menor teor de lignina. Já a temperatura de carbonização influencia na densidade aparente e no tamanho de poros. Essa característica influencia no poder de adsorção do material (DELATORRE *et al.*, 2020; FROEHLICH; MOURA, 2014).

Uma amostragem de finos de carvão analisada por Bernardini *et al.* (2020), apresentou um teor de umidade de 2,5 %, materiais voláteis de 58 %, 40 % de carbono fixo e cinzas 82 %. Destas cinzas destacam-se majoritariamente os óxidos de alumínio, silício e cálcio. Formando fases de quartzo, calcita, berlinita e lithosita, com 50 % de cristalinidade.

O carvão vegetal resultante de escórias de alto forno, tem sido investigados para a substituição do clínquer. Um importante critério para a utilização deste material em cimentos é a relação do teor de CaO e SiO<sub>2</sub>. Escórias geradas em fornos a carvão vegetal, apresentam relação CaO/SiO<sub>2</sub> baixa, sendo assim consideradas ácidas e aquelas geradas em fornos a carvão mineral são consideradas básicas. Em testes de pastas curadas à 40 °C, observou-se que as escórias ácidas, ativadas alcalinamente com Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, formaram de silicato de cálcio hidratado (CSH) o que contribuiu para o aumento da resistência mecânica, apesar do baixo teor de cálcio presente no material. (BEUTLER *et al.*, 2020).

A escória ativada por álcalis apresentou maior profundidades de carbonatação e diminuição a resistência à compressão devida à intensa retração e descalcificação do CSH. Apesar das escórias de carvão vegetal terem consideráveis frações de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13 %) e MgO (6 %), estes não formaram aluminossilicato ou hidrotalcita, o que poderia reduzir a suscetibilidade à carbonatação da pasta cimentícia (CADORE *et al.*, 2019). Contudo, em formulação sem ativação álcali, as cinzas de carvão vegetal apresentaram diminuição do avanço da carbonatação (MARTINEZ-MOLINA *et al.*, 2021).

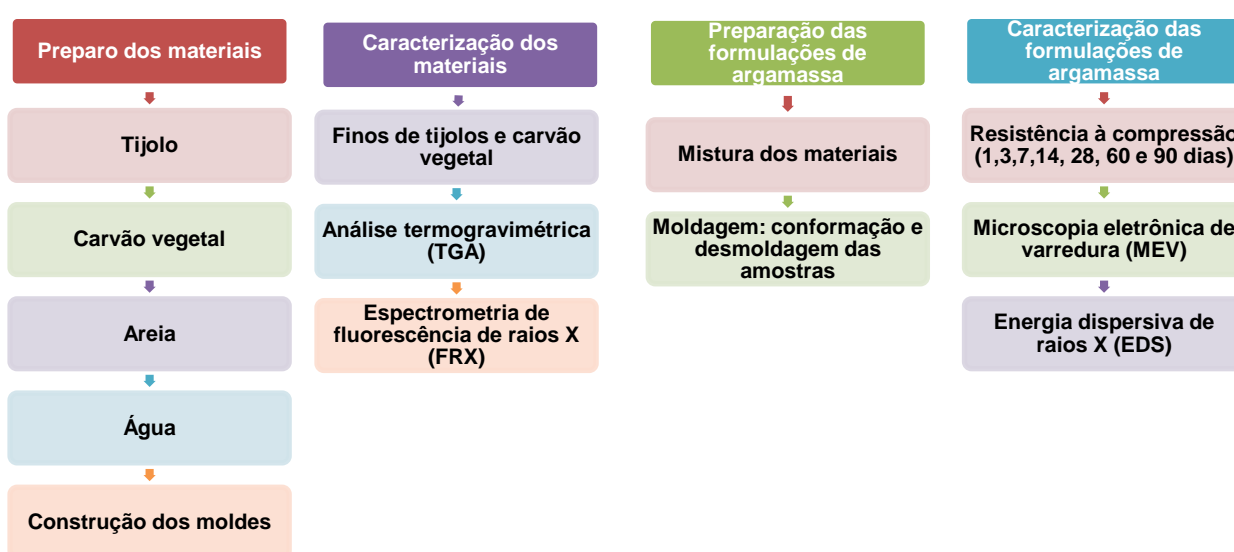
Argamassas com carvão vegetal e calcário são mais leves, e possuem bom desempenho hidrotérmico. Além disso, apresentam baixa condutividade térmica, mantendo boa resistência mecânica, alta permeabilidade ao vapor de água e baixa inflamabilidade (ANTÓNIO *et al.*, 2021). No entanto, em argamassas formuladas com cimento Portland e carvão vegetal, a resistência à compressão diminuiu consideravelmente com o aumento da adição de finos (AHMED *et al.*, 2020). Isto se deve à maior porosidade causada pela liberação de gases na hidratação do cimento Portland. Em adições superiores a 1 %, as partículas de carvão auxiliam na hidratação da argamassa, mas não participam da reação química, apenas ocupam os interstícios da matriz (BELTRAME *et al.*, 2020). Notou-se que o carvão vegetal contribui para a hidratação da pasta cimentícia (DINESH; SUJI; PICHUMANI, 2023), além de melhorar o isolamento térmico, pois é um material com baixa condutividade (0,084 W/m.K) (AHMED *et al.*, 2020). Por isso, foram recomendados por Boiaprav *et al.* (2023) para uso em blindagem eletromagnética de ambientes.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os instrumentos, técnicas e procedimentos adotados para o desenvolvimento da pesquisa (Figura 3). A seleção de materiais (3.1), as formulações de argamassa desenvolvidas (3.2) e a caracterização dos finos de tijolos e carvão vegetal e as amostras de argamassa (3.3) são aprofundados a seguir.

**Figura 3 – Delineamento experimental**



Fonte: A Autora (2023).

#### 3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

As argamassas foram preparadas com cimento Portland, areia, água, finos de tijolo e carvão vegetal, conforme apresentado na Figura 4.

**Figura 4 - Insumos empregados na formulação de argamassas**

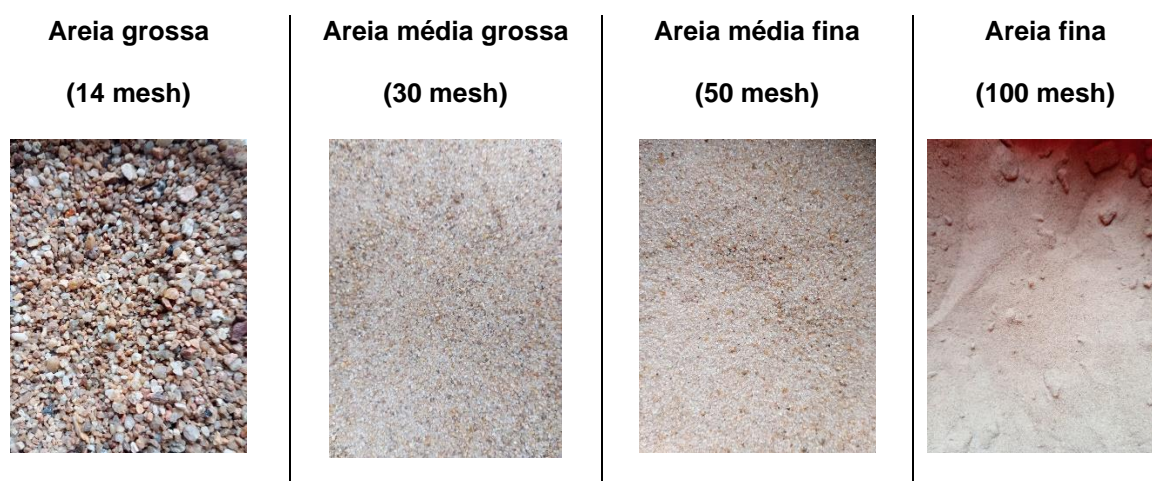


Fonte: Mossmann (2023).

O cimento do tipo Portland CP V-ARI foi adquirido de uma fábrica de pré-moldados. Esse tipo de aglomerante é amplamente utilizado no preparo de argamassa e por não conter adições pozolânicas permite replicar a aplicabilidade das formulações propostas.

A areia é proveniente do Rio Caí/RS e adquirida sob as classificações de granulometria comercial denominadas de arreião, areia média e fina. Após a coleta, foram separadas em quatro frações granulométricas (Figura 5), através da utilização de peneiras de mesh 6, 14, 30, 50 e 100. O material retido em cada peneira foi lavado em água corrente para remover impurezas. Em seguida, foi seco em estufa, marca Biomatic, em temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 24 h (ABNT NBR 7214, 2015).

**Figura 5 – Frações granulométricas de areia**



Fonte: Mossmann (2023).

A água foi previamente destilada, de acordo com a recomendação da norma ABNT NBR 5752 (2014), para ser adicionada ao preparo das argamassas e na cura dos corpos de prova.

Os tijolos do tipo 6 furos, foram coletados em uma loja de materiais de construção em São José do Sul/RS, estes foram fabricados em uma olaria da cidade Bom Princípio/RS e sofreram avarias durante o transporte, manuseio e estocagem.

O processamento dos resíduos de tijolos (Figura 6) e carvão vegetal (Figura 7) foi realizado de forma similar. Os tijolos foram previamente quebrados com um auxílio de um martelo, antes de serem inseridos no moinho de bolas.

**Figura 6** – Resíduos de tijolos utilizados na formulação de argamassa



Fonte: Mossmann (2023).

Os finos de carvão vegetal, por sua vez, são resíduos gerados do peneiramento do material de carbonização da madeira de acácia negra e foram recolhidos em uma propriedade rural de São José do Sul/RS. Por isso, foram diretamente moídos em moinho de bolas. Após a moagem do tijolo e do carvão vegetal, os materiais foram separados pela malha de 325 mesh para selecionar os finos com tamanho de partículas menores que 45  $\mu\text{m}$ , a fim de atender os requisitos da norma ABNT NBR 12653 (2015) para utilização como material pozolânico (Figura 7).

**Figura 7 – Preparo dos finos de carvão vegetal**

**Resíduo de carvão vegetal**



**Moagem**



**Peneiramento**



Fonte: Mossmann (2023).

Os moldes para corpo de prova (Figura 8) seguem os requisitos da norma ABNT NBR 7215 (2019). Estes foram construídos com um cano de PVC de 50 mm de diâmetro, o qual foi cortado em pedaços de 100 mm com uma serra automática. Para facilitar a desmoldagem das amostras, o molde foi cortado ao meio e colado com fita isolante, os fundos do corpo de prova foram preparados cortando discos de vasilhames de polietileno de alta densidade (PEAD).

**Figura 8 - Molde para corpo de prova cilíndrico de tamanho 50 mm por 100 mm**



Fonte: Mossmann (2023).

### 3.2 MISTURA DA ARGAMASSA

A dosagem das argamassas (Tabela 5) foi determinada com base na formulação recomendada pela norma ABNT NBR 5752 (2014). Uma formulação padrão foi usada como referência (REF) e a partir desse traço foram adicionados os finos de tijolos e carvão vegetal. As adições desses materiais foram feitas na proporção de 25% em relação à massa total do aglomerante, alternando-se as substituições de finos de tijolos e carvão vegetal.

**Tabela 5** – Dosagens em massa das formulações de argamassa

Argamassa	Cimento	Tijolo	Carvão Vegetal	Areia	Água
<b>REF</b>	624 g	-	-	1872 g	300 g
<b>T25</b>	468 g	156 g	-	1872 g	300 g
<b>C25</b>	468 g	-	156 g	1872 g	300 g
<b>T20C5</b>	468 g	124,8 g	31,2 g	1872 g	300 g
<b>T15C10</b>	468 g	93,6 g	62,4 g	1872 g	300 g
<b>T10C15</b>	468 g	62,4 g	93,6 g	1872 g	300 g
<b>T5C20</b>	468 g	31,2 g	124,8 g	1872 g	300 g

Fonte: Mossmann, 2023.

Em todas as misturas manteve-se constante a quantidade de areia, sendo 1872 g, oriundas das 468 g de cada uma das quatro frações granulométricas das peneiras de 16, 30, 50, 100 mesh apresentadas na Figura 7. Desse modo, a dosagem de argamassa foi de 1 parte de aglomerante (cimento Portland, finos de tijolo e carvão vegetal) para 3 partes de agregado (areia). A razão de água para aglomerante utilizada foi 0,48 na amostra de referência (REF).

Inicialmente, foi preparada a argamassa de referência (REF), dosando-se cimento e as quatro frações de areia em uma balança semi-analítica. Os insumos foram misturados a seco e, em seguida, acrescentou-se água, homogeneizando a mistura. A partir da consistência dessa argamassa foi adicionado água às demais

formulações, de forma a obter trabalhabilidade similar nas formulações parcialmente substituídas por finos de tijolo e carvão vegetal.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 5752 (2014). Imediatamente após o preparo de cada formulação de argamassa, a massa foi distribuída nos corpos de prova preenchendo-os em quatro camadas. Para cada camada, foram aplicados 30 golpes manualmente no soquete, a fim de adensar a mistura.

Os moldes foram colocados em uma bacia e imersos em um tanque de água para cura úmida, conforme a ABNT NBR 5752 (2014). Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, removendo-se a fita das laterais e do fundo do cilindro. As amostras foram armazenadas em um tanque fechado, imersos em água com excesso de cal e em temperatura ambiente até a avaliação da resistência à compressão nas idades de 1, 3, 7, 14, 28, 60 e 90 dias.

### **3.3 AVALIAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DE ARGAMASSA**

Os finos de tijolo e carvão vegetal foram caracterizados quanto a sua composição química (3.3.1) e seu comportamento termogravimétrico (3.3.2).

Já os corpos de prova das formulações de argamassa foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão (3.3.3), aos 1, 7, 14, 28, 60 e 90 dias de idade. A caracterização das amostras aos 28 dias de idade se deu por microscopia eletrônica de varredura e energia dispersiva de raios X (3.3.4)

Os procedimentos dos ensaios são detalhados a seguir.

#### **3.3.1 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)**

Os resíduos de tijolos e carvão vegetal foram analisados após peneiramento, sendo utilizados finos com tamanho de partícula menor que 45  $\mu\text{m}$ , para a determinação da composição química em forma de óxidos por meio da técnica de fluorescência de raios X (FRX). O equipamento empregado foi o espectrômetro de

fluorescência de raios X, marca Shimadzu, modelo EDX-7000. Foi utilizado um colimador de 5 mm e as análises foram realizadas sob vácuo. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais (LCMat 1), na Universidade de Caxias do Sul (UCS).

### 3.3.2 Análise de termogravimetria (TG)

A análise de TG dos finos de tijolo e carvão vegetal foram realizadas no Laboratório de Materiais do IFRS *Campus* Farroupilha, no equipamento da marca Perkin Elmer, modelo 6000 TGA, na faixa de temperatura de 25 °C a 130 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min sob uma atmosfera inerte de N<sub>2</sub> com fluxo de 20 mL/min. Após a temperatura foi mantida constante à 130 °C por 18 minutos.

### 3.3.3 Resistência mecânica à compressão

Os testes foram realizados em uma máquina de ensaio universal Emic DL 20000 com capacidade máxima de compressão de 250 N, disponível no Laboratório de Ensaio Mecânicos do IFRS *Campus* Farroupilha.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em seis corpos de prova de cada formulação, para cada uma das idades de cura de 1, 3, 7, 14, 28, 60 e 90 dias. Antecedendo o ensaio, foi realizado o preparo das bases do corpo de prova (ABNT NBR 5739, 2018) mediante retificação. E, também foi medido o diâmetro dos corpos de prova submetidos ao ensaio, com auxílio de um paquímetro.

Para o cálculo da resistência à compressão foi utilizada a Equação 1, apresentada na norma ABNT NBR 5739 (2018).

$$F_c = \frac{4F}{\pi x D^2} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$F_c$  = é a resistência à compressão, em megapascals (MPa).

$F$  = é a força máxima alcançada, em newtons.

$D$  = é o diâmetro do corpo de prova cilíndrico, em milímetros.

A média foi calculada a partir de 6 ensaios para cada formulação, em cada idade da argamassa.

#### **3.3.4 Morfologia por Microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)**

Os corpos de prova de cada formulação de argamassa foram avaliados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) aos 28 dias de idade, no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) – UFRGS, em microscópio modelo TM 3000 (Hitachi), voltagem de aceleração de até 15 kV. As amostras foram depositadas sob uma placa de aço e fixadas com uma fita de carbono, sem metalização prévia. Foram geradas imagens com 600 e 2000 vezes de ampliação. A fim de estimar a composição química das argamassas, foi realizado o estudo por energia dispersiva de raios X (EDS), em espectroscópio da marca Oxford Instruments, modelo SwiftED3000.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na caracterização dos finos de tijolos e carvão vegetal e as formulações de argamassa no estado endurecido.

### 4.1 Caracterização química dos finos de tijolos e carvão vegetal

A composição percentual dos óxidos presentes nos resíduos de finos de tijolos e carvão vegetal, obtida pela análise de fluorescência de raios X (FRX) é apresentada na Tabela 6.

**Tabela 6-** Composição química dos resíduos

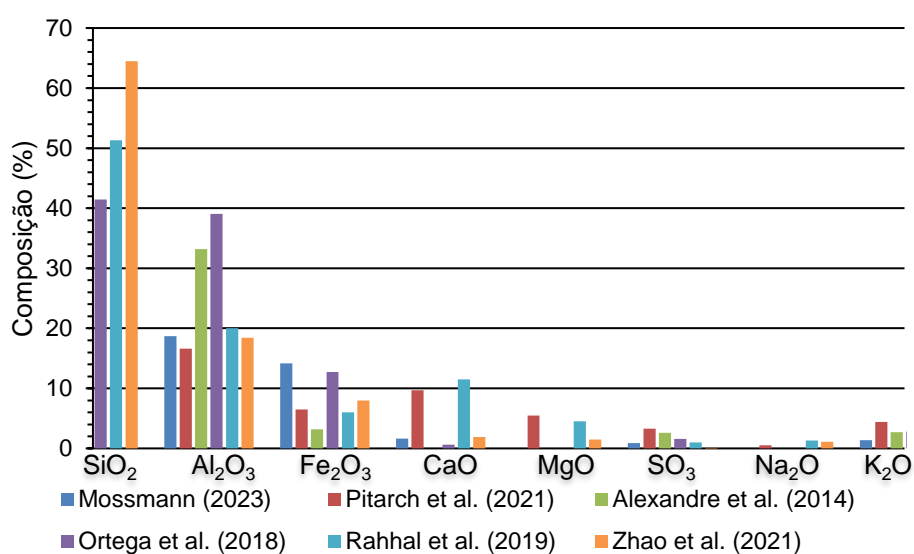
<b>Composição (%)</b>	<b>Tijolo</b>	<b>Carvão vegetal</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	59,41	19,84
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	18,68	4,64
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14,14	18,35
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1,89	1,23
<b>CaO</b>	1,66	35,28
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	1,49	2,74
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,36	9,64
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,87	3,91
<b>MnO</b>	0,32	3,26

Fonte: LCMat 1 – UCS (2023).

Os finos de tijolos, de acordo com a norma ABNT NBR 12653 (2015), precisam ser compostos majoritariamente (> 70 %) pelos óxidos de sílica, alumina e ferro para utilização como aditivo pozolânico. No caso do resíduo utilizado, a soma

destes óxidos ultrapassa os 92 %. Em comparação com outros estudos (Figura 9) pode haver significativa variabilidade da quantidade de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

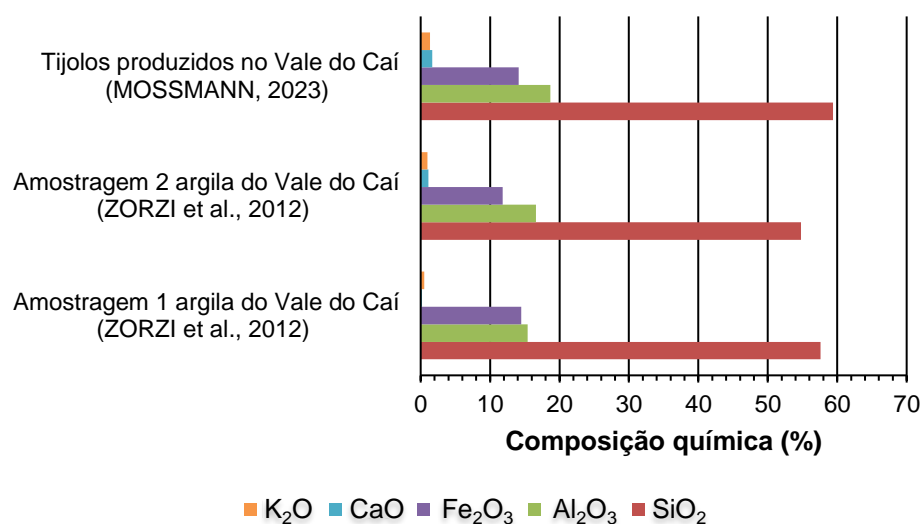
**Figura 9** – Comparação de estudos sobre a composição química de tijolos



Diversos fatores podem influenciar a composição química dos finos de tijolos, tais como os tipos de argilas utilizadas na fabricação, que podem variar de acordo com a localização geográfica, como nos tijolos argentinos analisados por Rahhal *et al.* (2021) e os da República Tcheca (ORGTEGA *et al.*, 2018) e a temperatura de queima (ALEXANDRE *et al.*, 2014). Na comparação da Figura 9, é notável que os tijolos utilizados neste estudo possuem composição química dos óxidos pozolânicos dentro da faixa percentual obtida em outros trabalhos.

As argilas utilizadas para a fabricação dos tijolos utilizados neste estudo são oriundas da Região do Vale do Caí – RS. Em uma caracterização das argilas realizadas na região por Zorzi *et al.* (2012), assemelha-se a composição química dos tijolos analisados (Figura 10).

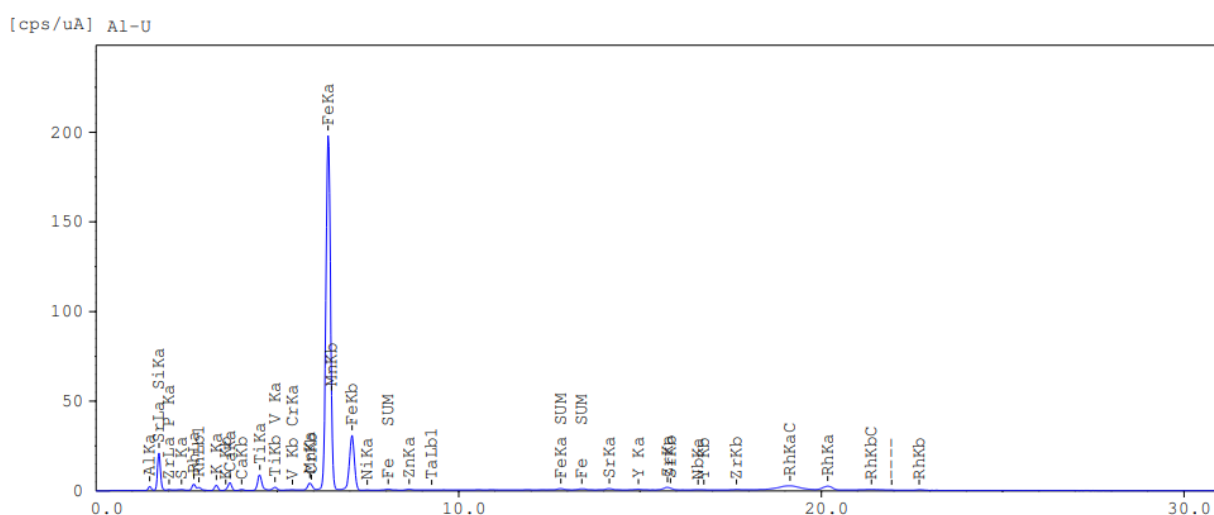
**Figura 10** – Comparação da constituição da argila e dos tijolos do Vale do Caí - RS.



Fonte: Mossmann (2023) e Zorzi et al. (2012).

A composição destes óxidos está associada a predominância dos minerais de quartzo (SiO<sub>2</sub>), caulinita (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) e hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) identificados por Zorzi *et al.* (2012) nas argilas do Vale do Caí – RS, na qual a composição mineralógica é semelhante a dos resíduos de tijolos analisados (Figura 11).

**Figura 11** – Fluorescência de raios X dos tijolos do Vale do Caí - RS.



Fonte: A Autora (2023).

Ao contrário, os resíduos de carvão vegetal (Tabela 6) não se classificam como material pozolânico, conforme critérios da norma ABNT NBR 12653 (2015), uma

vez que os óxidos de sílica, alumina e ferro totalizam aproximadamente 43 % de sua composição, o que diverge dos > 70 % preconizados. Por isso, experimentalmente (Figura 12) os finos de carvão vegetal não apresentam ação pozolânica com aglomerantes hidráulicos, como a cal e o cimento Portland, mesmo quando submetidos a elevação de temperatura de cura, resultando em um material frágil e quebradiço (MOSSMANN, 2023). Na investigação de Ren *et al.* (2019) também foi constatado a diminuição da resistência à compressão em adições de 20 % de carvão vegetal na pasta cimentícia, devido ao aumento da porosidade destas formulações.

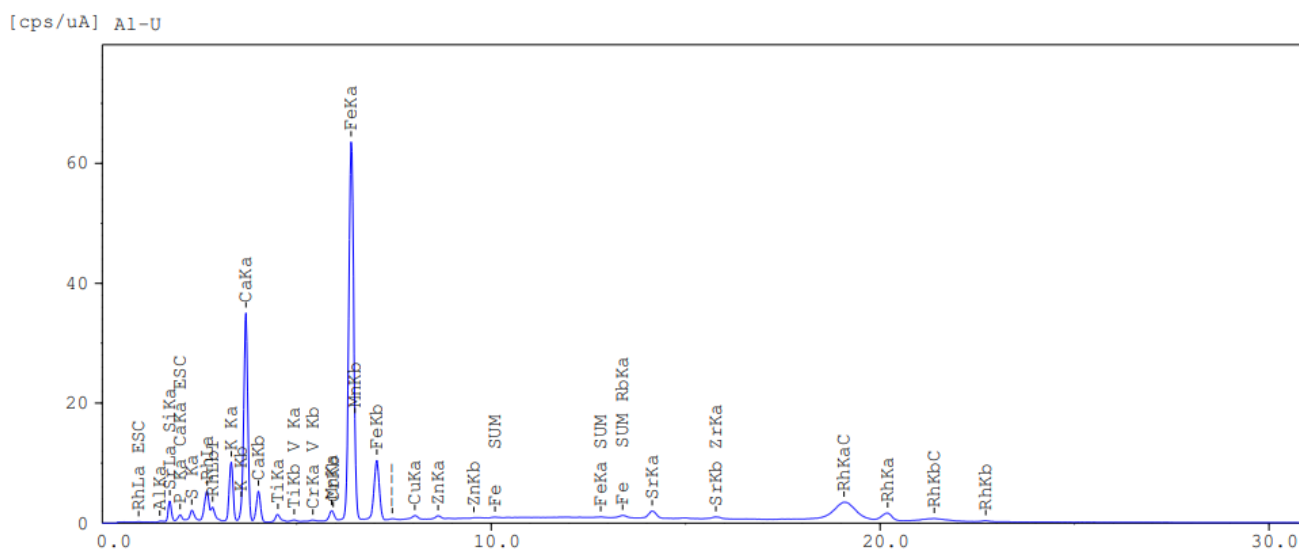
**Figura 12** – Teste de pozolanicidade do carvão vegetal



Fonte: Mossmann (2023).

No entanto, o alto percentual de óxido de cálcio (35,28 %) encontrado no resíduo de carvão vegetal (Figura 13), é uma característica favorável para aplicação como material cimentício suplementar (CCS), uma vez que, a disponibilidade de óxido de cálcio favorece maior reatividade ao ser hidratado e a formação de hidróxido de cálcio que reage com materiais silicoaluminosos para formar compostos cimentícios (CADORE *et al.*, 2019; ROMANO *et al.*, 2016).

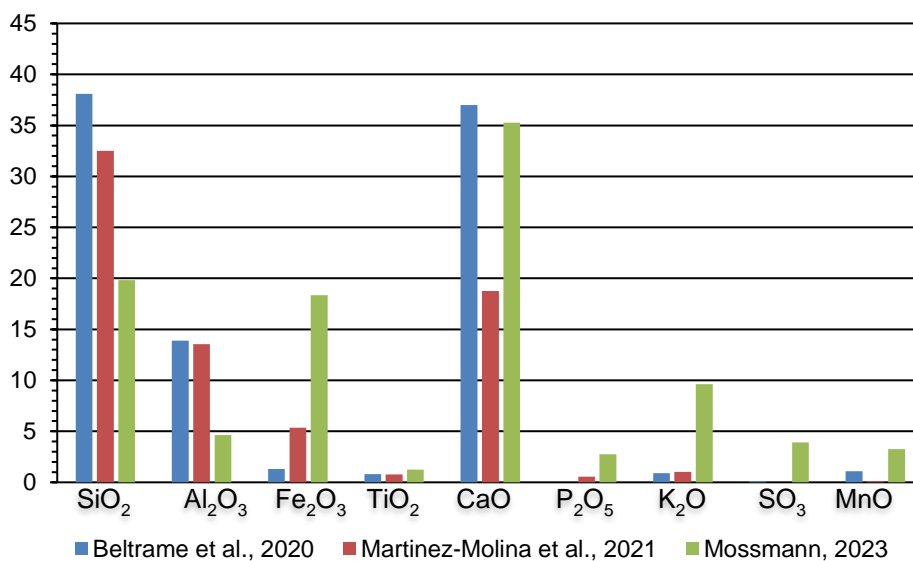
**Figura 13** – Fluorescência de raios X do carvão vegetal.



Fonte: A Autora (2023).

O carvão vegetal é tipificado como ácido (BEUTLER; LUZ; BONINI, 2020; SOUZA JUNIOR, 2007) quando a relação de  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1$ . No entanto, os finos utilizados na formulação da argamassa possuem perfil de basicidade, pois a razão de  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  é igual a 1,78, diferentemente das amostragens apresentadas por Beltrame *et al.* (2020) e Molina *et al.* (2021), que contradizem essa relação (Figura 14). É provável que essa diferença esteja associada ao local no qual o resíduo foi gerado, que neste estudo foi obtido diretamente do forno de carvão vegetal e, nos demais estudos, como escória de alto forno siderúrgico. A carbonização da madeira em forno de alvenaria é por abafamento e temperaturas máximas de 500 °C, na qual o carvão vegetal é obtido (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012), preservando-se, assim, um perfil de basicidade. Já o resíduo vegetal oriundo de alto forno siderúrgico é submetido a temperaturas acima de 1600 °C, na qual ocorre a combustão da madeira e, por isso, resulta em um caráter ácido (BELTRAME *et al.*, 2020).

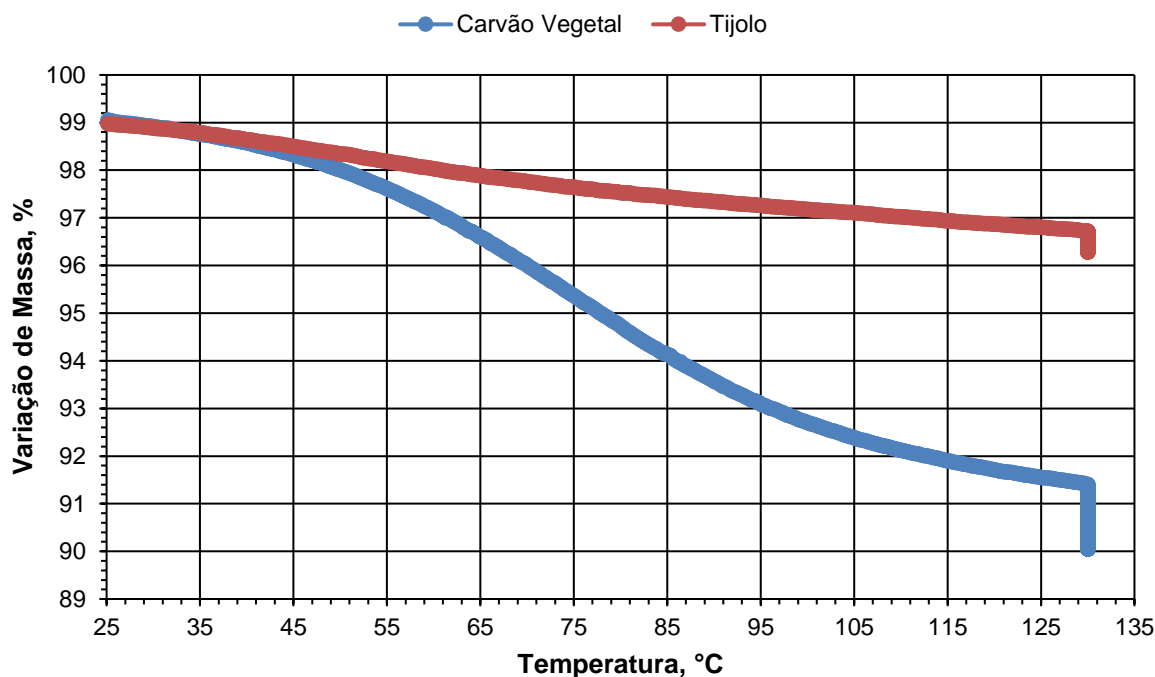
**Figura 14 – Comparação da composição química**



De acordo com a norma ABNT NBR 16697 (2018) a composição química da escória de alto forno deve ter razão em massa de  $(CaO+MgO+Al_2O_3)/SiO_2 > 1$  para adição em cimento Portland. Neste caso, os finos de carvão vegetal empregados atende esse critério  $[(CaO+MgO+Al_2O_3)/SiO_2 > 2]$ .

#### 4.2 Características físicas dos finos de tijolos e carvão vegetal

A análise termogravimétrica (TG) apresenta a perda de massa dos materiais em função da variação de temperatura. A Figura 15 apresenta as curvas de TG, para os resíduos de finos de tijolos e carvão vegetal.

**Figura 15** – Análise termogravimétrica (TG) do tijolo e do carvão vegetal

Fonte: A Autora (2023).

O carvão vegetal possui maior perda de massa (10 %) em comparação com o tijolo (4 %). Na isoterma (130 °C) as variações do carvão vegetal (1,5 %) e do tijolo (1 %) apresentam comportamento similar. Para ambos os materiais, a maior diminuição da massa situa-se na faixa de 50 °C e 100 °C e está associada a volatilização da água (HOPPE *et al.*, 2021, SOUZA *et al.*, 2021).

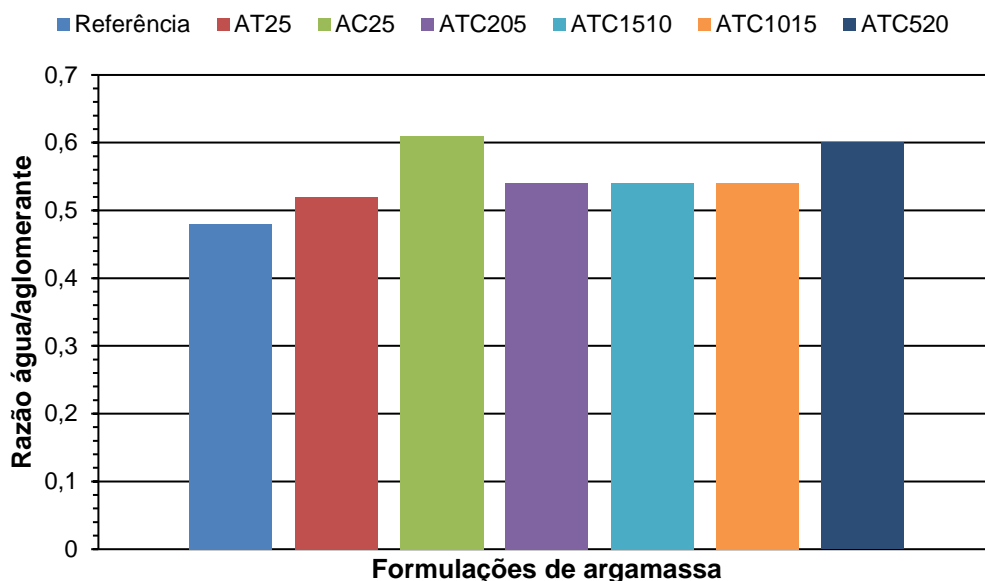
A maior retenção de água do carvão vegetal está associada a diferença de área superficial (Tabela 7), que é maior no carvão vegetal, devido a maior rugosidade das partículas, em comparação com os finos de tijolos (REN *et al.*, 2019).

**Tabela 7 – Superfície específica do tijolo e carvão vegetal**

	Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)	
	Tijolo	Carvão Vegetal
Beutler, Luz, Boninni (2020)		512
Nobre <i>et al.</i> (2015)		697,3
Cabrera-Covarrubias <i>et al.</i> (2021)	1,82	
Grellier <i>et al.</i> (2021)	1,84	

Desta maneira, a substituição do cimento Portland por finos de tijolos e carvão vegetal na argamassa, demandará maior volume de água para conferir a lubrificação necessária para aglomerar as partículas e interagir com o agregado, inclusive durante as reações de polimerização da argamassa (SZELAG *et al.*, 2021). Por isso, durante a mistura das matérias-primas apresentadas anteriormente na Figura 4, de acordo com as proporções da Tabela 5, observou-se que a água adicionada (Figura 16) na formulação de referência era suficiente para hidratar a mistura, porém, ao substituir o cimento por pó de tijolo e carvão vegetal, a argamassa perdeu a fluidez proporcionalmente ao teor de tijolo e carvão vegetal adicionado, por isso a necessidade de maior adição de água (WONG *et al.*, 2020).



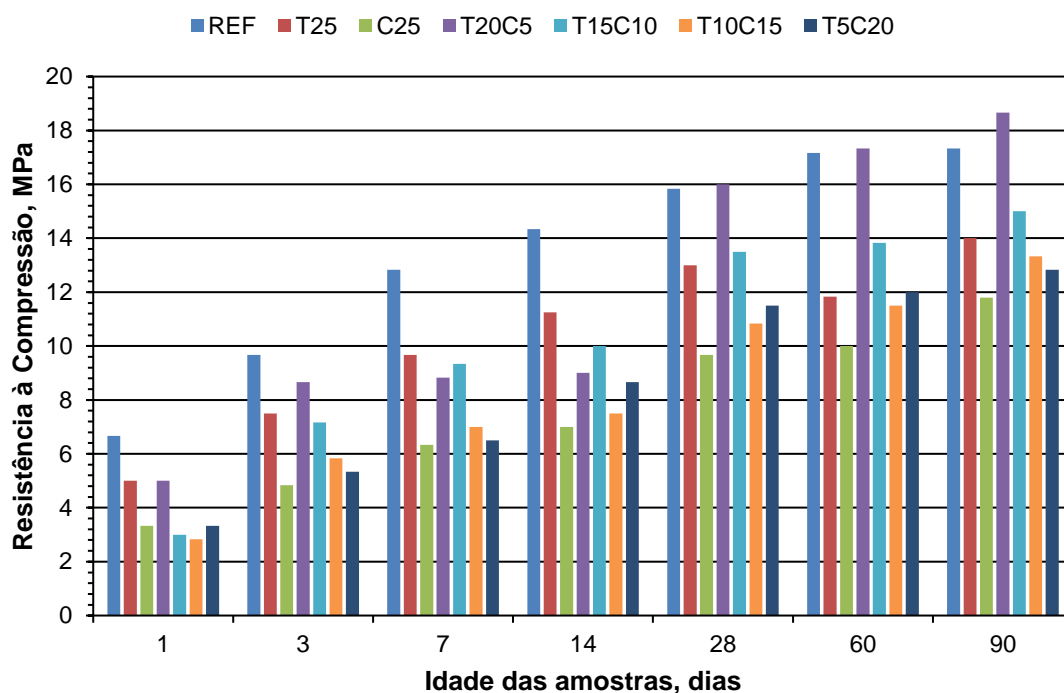
**Figura 16** - Quantidade de água adicionada nas formulações de argamassa

Fonte: A Autora (2023).

O formato irregular das partículas cerâmicas, proporcionam maior tensão de escoamento e viscosidade plástica (XUE *et al.*, 2021), por isso a necessidade de maiores teores de adição de água (entre 10 % a 27 %), principalmente nas substituições com finos de carvão vegetal, que como visto na Tabela 7 possuem maior capacidade de adsorção de água (REN *et al.*, 2019; FROEHLICH; MOURA, 2014), quando comparado com o tijolo. No entanto, a razão de água e aglomerante entre 0,4 e 0,65 não causa alterações significativas na resistência mecânica (SILVA *et al.*, 2019).

### 4.3 Resistência mecânica à compressão

A Figura 17 apresenta a média da resistência mecânica à compressão das formulações de argamassa nas idades de 1 a 90 dias.

**Figura 17 - Resistência à compressão das formulações de argamassa**

Fonte: A Autora (2023).

Já a Tabela 8 apresenta o desvio padrão amostral da resistência média à compressão das formulações de argamassa, nas idades analisadas. O desvio padrão foi menor que 3 para um nível de confiança de 95 %.

**Tabela 8 – Desvio padrão da resistência à compressão**

Argamassa	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	60 dias	90 dias
REF	1,2	2,44	2,3	1,97	2,81	1,17	2,3
T25	0,6	2,07	1,37	1,26	1,79	1,47	2,0
C25	0,52	1,3	0,82	2,0	1,37	1,58	2,16
T20C5	0,63	0,82	0,98	2,12	1,55	1,03	0,52
T15C10	0	1,94	2,80	2,09	1,52	0,98	1,10
T10C15	0,75	0,98	1,67	0,55	1,60	1,38	2,3
T5C20	0,52	1,21	1,76	1,86	2,17	0,89	1,33

Fonte: A Autora (2023).

É notável o aumento da resistência à compressão com o avançar da idade dos corpos de prova para todas as formulações, corroborando, assim, com a avaliação de Pitarch *et al.*, (2021) e Hoppe *et al.*, (2021).

Nas idades entre 1 e 3 dias, o aumento da resistência está relacionado a hidratação do silicato de cálcio presente no aglomerante que em meio alcalino forma compostos metaestáveis de aluminatos de cálcio hidratados, que induz o endurecimento da pasta (GONÇALVES, 2021). As amostras T15C10, T10C15 e T20C05 alcançaram os melhores desempenhos entre as idades de 1 a 3 dias, devido a maior disponibilidade de íons cálcio durante a complexação dos aluminossilicatos (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2011). No entanto, as formulações com maior adição de finos de carvão vegetal (C25 e T5C20) apresentaram o menor ganho de resistência. Justamente estas misturas apresentaram também maior consumo de água, creditado à ação adsorvente do carvão vegetal (FROEHLICH; MOURA, 2014).

No período de 3 a 7 dias, as amostras de referência (REF) apresentaram o melhor desempenho mecânico, pois o cimento Portland CP V-ARI é um aglomerante de pega rápida, diferentemente dos materiais pozolânicos que reagem de forma lenta com o hidróxido de cálcio na argamassa (FOŘT *et al.*, 2020). Pitarch *et al.* (2021) observaram que a reatividade pozolânica é dependente das fases amorfas formadas, que são dependentes da desidroxilação da argila e fusão de feldspato, por isso, os finos de cerâmica vermelha apresentam menor desempenho mecânico em idades precoces da argamassa.

A formulação substituída apenas com finos de tijolos (T25) destacou-se no ganho de resistência à compressão entre 7 e 14 dias de idade das amostras. Credita-se a ação pozolânica dos finos cerâmicos (ZHAO *et al.*, 2021), na qual os minerais sílico aluminosos reagem com os íons de cálcio do cimento Portland (FOŘT *et al.*, 2020). Nas formulações de Pitarch *et al.* (2021) a de adição de 25 % de cerâmica vermelha também obteve o melhor desempenho mecânico, associado a reatividade do material.

As formulações substituídas com a mistura de finos de tijolos e carvão vegetal (T20C5, T15C10 e T10C15) apresentaram maior ganho de resistência à compressão, no período de 14 a 28 dias. Efeito similar foi observado por Ren *et al.* (2019), que atribui ao fato de os finos de carvão vegetal atuarem como agentes de cura interna da

argamassa, uma vez que liberam gradualmente a água, promovendo uma hidratação contínua do cimento. Notavelmente os corpos de prova T20C5 superaram a formulação de referência (REF). Outras pesquisas demonstraram que a adição de finos cerâmicos diminui a resistência à compressão em idades de cura até 28 dias (FOŘT *et al.*, 2020; LASSEUGUETTE *et al.*, 2019; MEMIŞ *et al.*, 2018). Mas a ação combinada dos finos de tijolos com o de carvão vegetal, em uma proporção de 4:1 (finos de tijolos e carvão vegetal), proporcionaram a ação pozolânica dos finos cerâmicos, com uma hidratação gradual dos finos de carvão vegetal, que possivelmente também disponibilizaram íons de cálcio para reagir com minerais sílico aluminosos do tijolo.

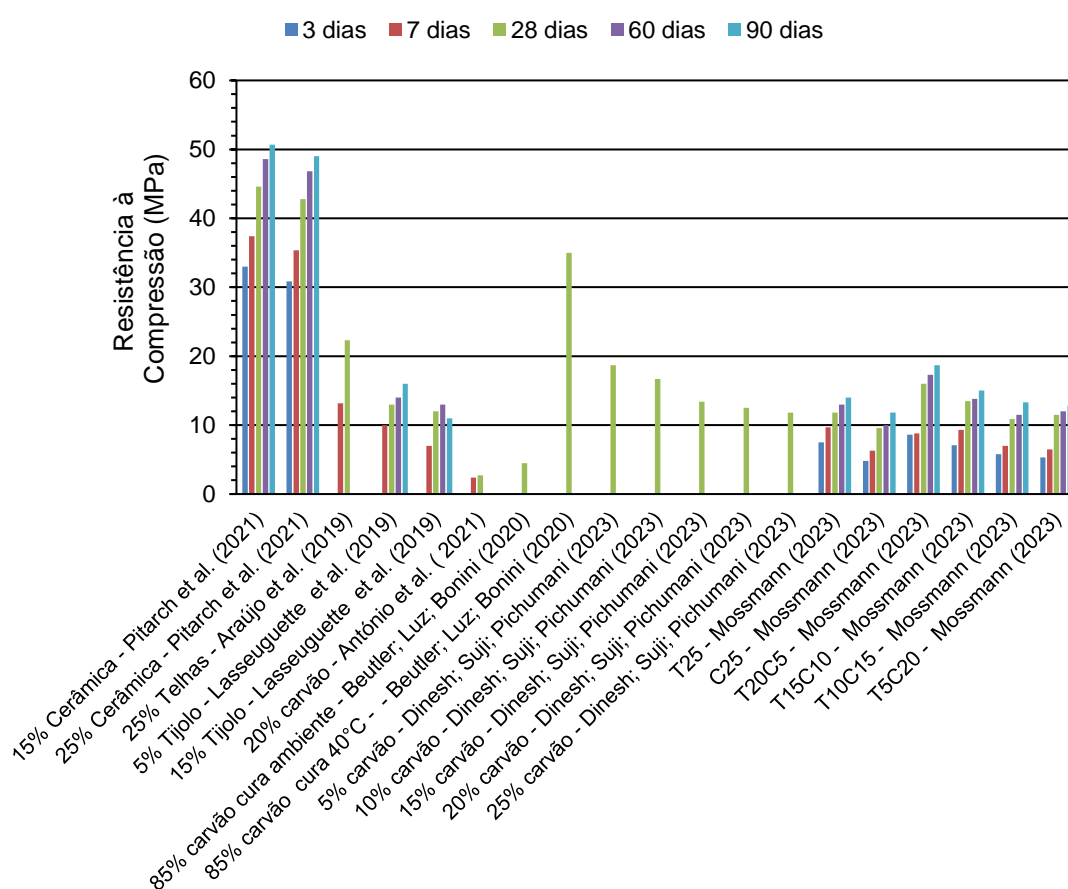
No período de 28 a 90 dias todas as amostras apresentaram um incremento de resistência mecânica, com tendência a estabilidade. As amostras com finos de carvão vegetal (C25, T5C20, T10C15, T15C10, T20C5) tiveram os maiores aumentos de resistência à compressão (entre 11 e 23 %), sendo que os corpos de prova substituídos apenas com finos de tijolos apresentaram um aumento 7,7 % de resistência. Tais resultados também foram relatados por Memiş *et al.* (2018), que consideram que o potencial máximo das formulações parcialmente substituídas por tijolos ocorre aos 90 dias de idade.

A partir dos 28 dias de idade a formulação T20C5 apresentou maior resistência mecânica que as demais formulações, inclusive a de referência. As amostras T25 e T15C10 alcançaram valores similares de resistência à compressão (14 e 15 MPa), devido a formação de geopolímero, na qual os finos de cerâmica vermelha atuam como pozolanas (REIG *et al.*, 2016).

É perceptível que a argamassa substituída por finos de carvão vegetal (C25) apresentou o menor desempenho, pois as partículas não participam ativamente das reações químicas, assim atuam como *filler* na argamassa, que em maiores frações limitam as deformações elástica, pela indisponibilidade de espaço físico para o rearranjo estrutural (GONÇALVES *et al.*, 2009). Contudo, estas amostras atendem o requisito técnico de resistência a compressão maior que 8 MPa, para aplicação como argamassa para assentamentos e revestimentos, conforme a norma (ABNT NBR 13281, 2005).

Ao comparar a resistência à compressão das formulações obtidas com outros estudos (Figura 18), percebe-se que maiores ganhos de resistência à compressão são possíveis mediante cura em temperaturas elevadas (40 e 65 °C), uma vez que, acelera as reações químicas de endurecimento do cimento, tanto em substituições com carvão vegetal (BEUTLER; LUZ; BONINI, 2020) e cerâmica vermelha (PITARCH *et al.*, 2021).

**Figura 18** – Comparação da resistência à compressão de formulações de argamassas



A combinação da ativação álcali dos finos de cerâmica vermelha com condições de cura em temperatura elevada proporcionam elevadas resistências à compressão (PITARCH *et al.*, 2021), inclusive permitindo maiores percentuais de substituição de cimento Portland (REIG *et al.*, 2021).

A temperatura de cura influencia a resistência à compressão (PITARCH *et al.*, 2021; BEUTLER; LUZ; BONINI, 2020). Mas quando realizada em temperatura

ambiente, os resultados obtidos se assemelham com os outros trabalhos, nos quais são esperadas menores resistências à compressão (ARAUJO *et al.*, 2019; LASSEUGUETTE *et al.*, 2019, AHMED; AHMED; SAIED, 2020; DINESH; SUJI; PICHUMANI, 2023).

Os resultados da amostra T20C5 corroboram com a resistência à compressão nas substituições de finos de tijolos realizadas por Lasseuguette *et al.* (2019) e de carvão vegetal realizadas por Dinesh; Suji; Pichumani (2023). Uma vez que substituições inferiores a 5 % de finos de tijolos, não são representativas quanto às reações pozolânicas na argamassa (SZELAG *et al.*, 2021), sendo que 5 % de adição de finos de carvão vegetal proporcionam a adsorção de água necessária para a hidratação da argamassa durante o seu processo de cura (REN *et al.*, 2019).

#### 4.4 Caracterização microestrutural das argamassas

Na Figura 19 são apresentadas as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das formulações de argamassa, aos 28 dias. Em todas as formulações observa-se a formação de silicato de cálcio hidratado (CSH) dos produtos da hidratação, portlandita, etringita e quartzo.

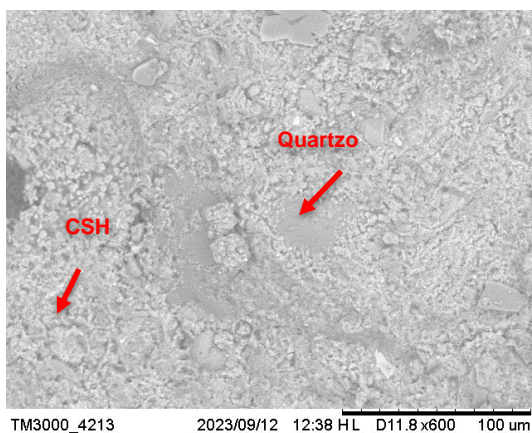
**Figura 19 – MEV das formulações de argamassa**

REF

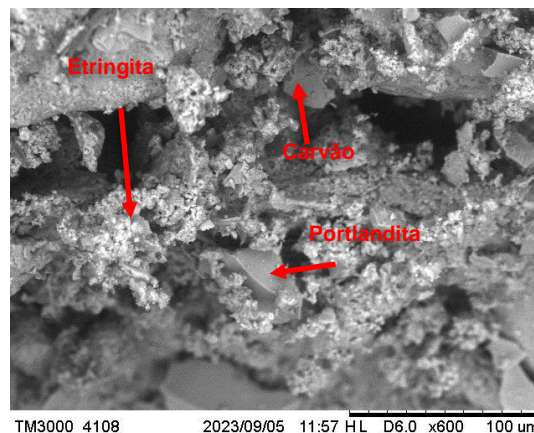


TM3000\_4227 2023/09/12 13:14 HL D9.7 x600 100 um

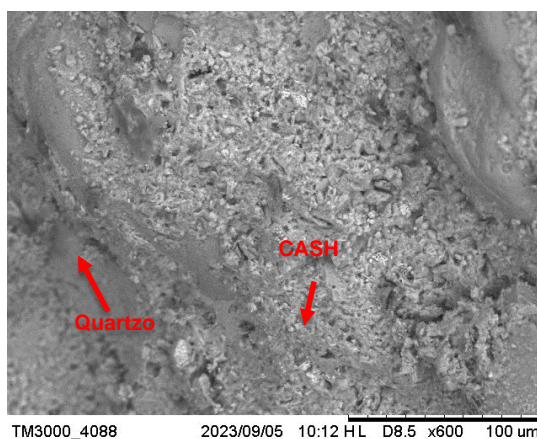
T25



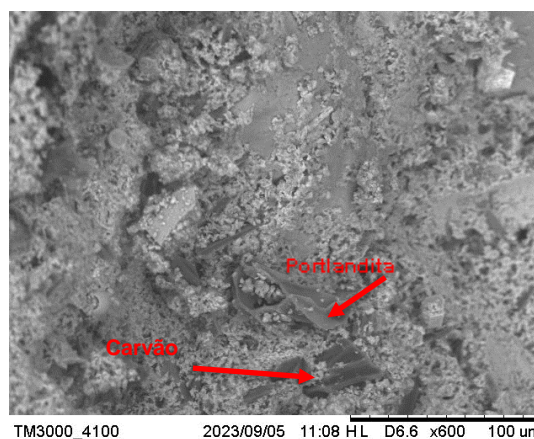
C25



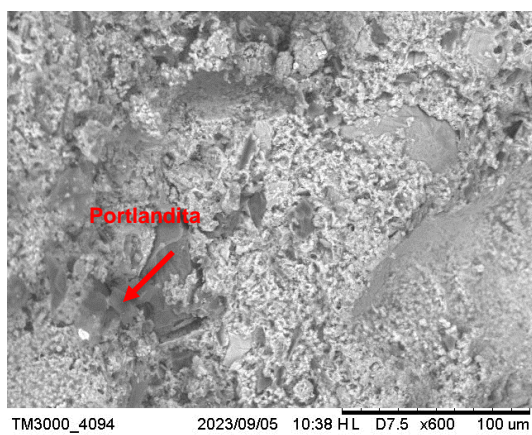
T20C5



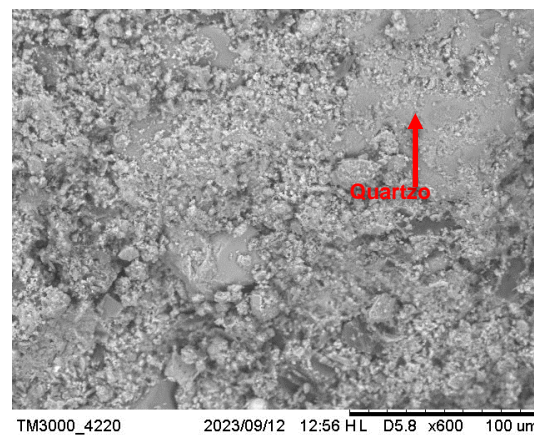
T5C20



T15C10



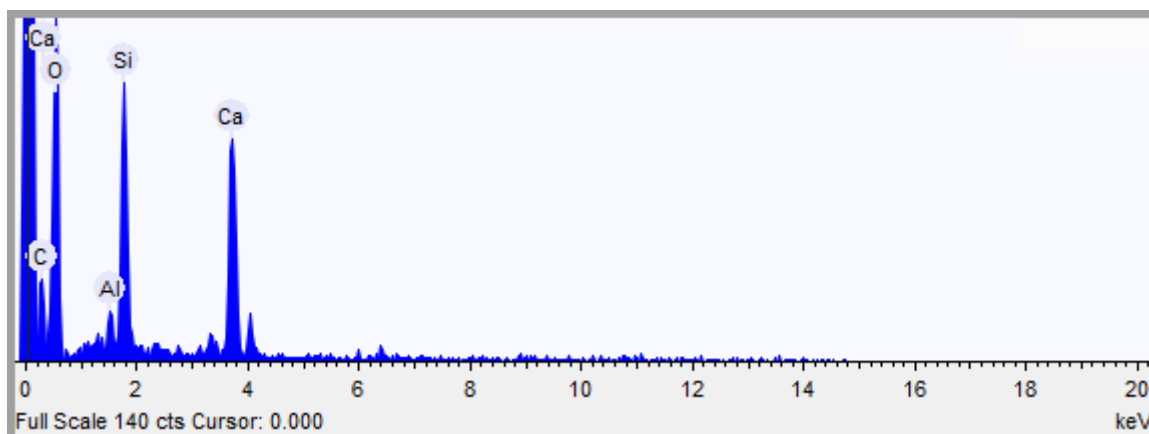
T10C15



Fonte: A Autora (2023).

Nas formulações C25 e T5C20 verifica-se finos de carvão (Figura 20) que não reagiram, por isso não contribuem para a resistência mecânica da argamassa, atuando apenas como *filler* de preenchimento físico. Relato semelhante é apresentado por Dinesh; Suji; Pichumani (2023) que aplicaram a ativação álcali em finos de carvão vegetal.

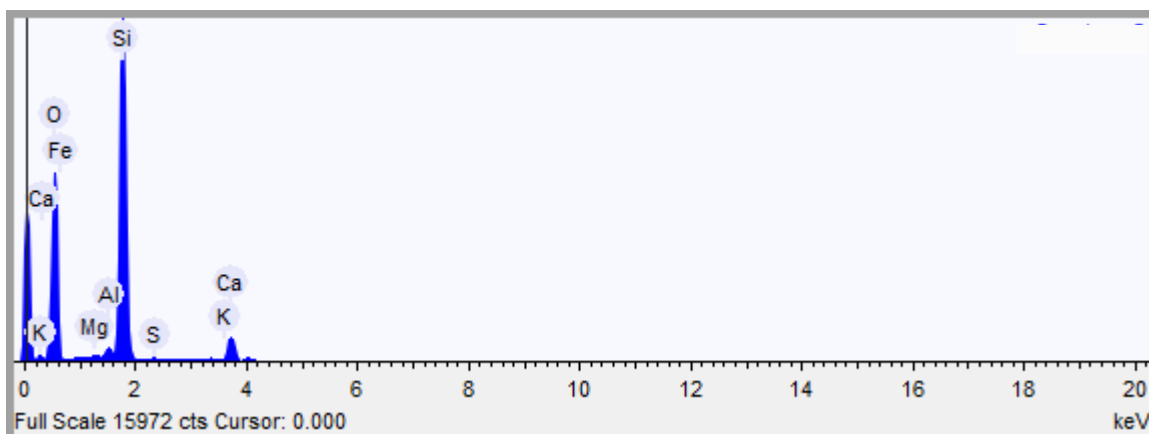
**Figura 20** – EDS observado nas amostras C25 e T5C20



Fonte: A Autora (2023).

Nas formulações de referência (REF), T25, T20C5, T15C10 e T10C15 há a presença de quartzo (Figura 21), indicando a disponibilidade de material cimentício e finos de tijolos para reagir. O estudo de Reig *et al.* (2020) também observou ampla formação de quartzo em argamassas com altas adições de finos de cerâmica vermelha, apesar de terem realizado a ativação álcali em condições de cura controladas pela elevação de temperatura.

**Figura 21** – EDS indicando presença majoritária de silício

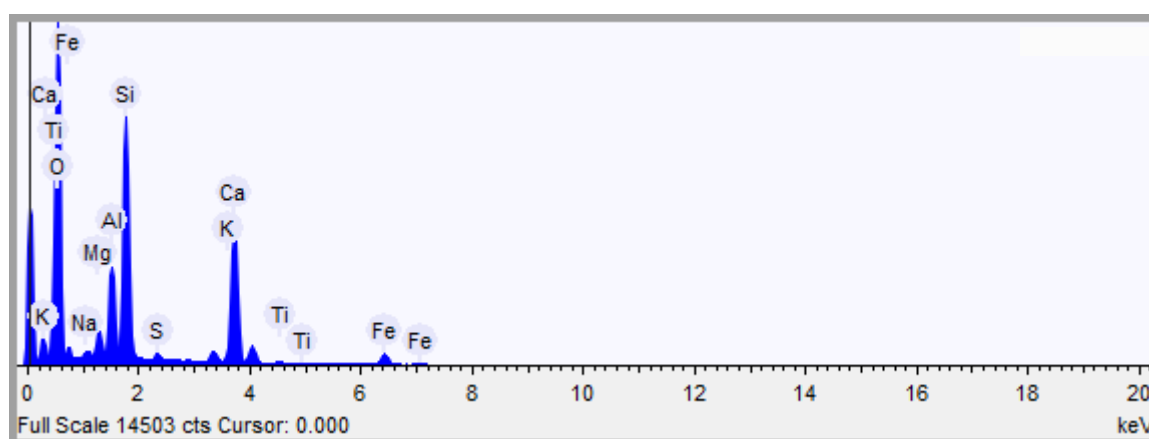


Fonte: A Autora (2023).



Na formulação T20C5 foi evidenciada a presença de alumínio silicato de cálcio hidratado (CASH), de acordo com a Figura 22. Esta fase de material contribui para a resistência à compressão e, possivelmente o melhor desempenho desta formulação esteja associado a extensa formação de CASH. Na análise de Zhao *et al.* (2021) associaram a presença de CASH à formação de gel oriundo da reação pozolânica dos finos de tijolos em meio básico. O carvão vegetal utilizado apresentou caráter básico, possivelmente a proporção de 5 % na formulação, pode ter contribuindo para alcalinizar o meio. Sendo que a proporção de 20 % de finos de tijolos também foi apontada por outros estudos (SZELAG *et al.*, 2021; WONG *et al.*, 2020), como uma proporção que oferece o melhor desempenho mecânico, por permitir uma melhor distribuição granulométrica que possibilita o consumo deste material na reação pozolânica.

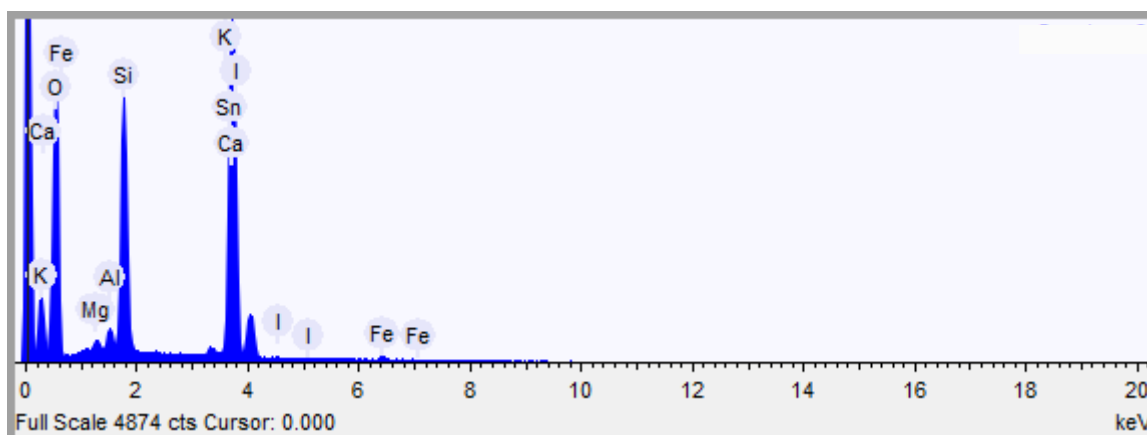
**Figura 22** – EDS observado na amostra T20C5



Fonte: A Autora (2023).

A formação de silicato de cálcio hidratado (CSH) foi observada em todas as formulações (Figura 23). Esta fase contribui diretamente para a resistência da argamassa, conforme análise de estudos semelhantes de adição de finos de tijolos (ARAUJO *et al.*, 2019; REIG *et al.*, 2020, ZHAO *et al.*, 2021) e de carvão vegetal (BELTRAME *et al.*, 2020; DINESH; SUJI; PICHUMANI, 2023).

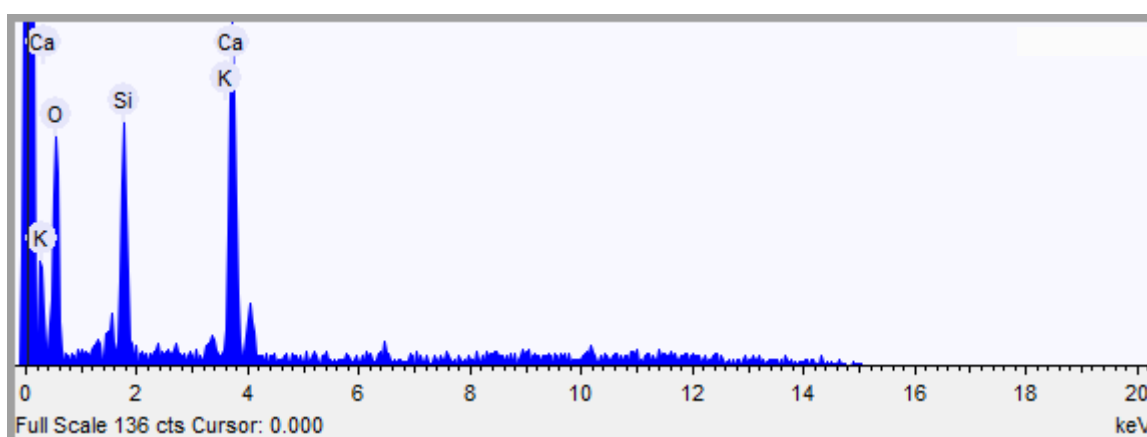
**Figura 23 – EDS indicativo de CSH**



Fonte: A Autora (2023).

A presença de portlandita (Figura 24), observada nas amostras C25, T5C20 e T15C10, pode estar associada a reação que ainda está em andamento. Pois, o hidróxido de cálcio é visualizado em idades precoces de cura. Como os finos de carvão vegetal são pouco reativos, apesar da presença de óxido de cálcio, é possível a visualização de portlandita no material. As caracterizações microestruturais de Beltrame *et al.*, (2020), Dinesh; Suji; Pichumani (2023) também indicaram a presença desta fase nas formulações com a presença de finos de carvão vegetal.

**Figura 24 – EDS indicativo de Portlandita**



Fonte: A Autora (2023).

A caracterização microestrutural das formulações de argamassa corrobora com os resultados de resistência à compressão. Pois, as amostras com maiores

adições finos de carvão, apresentaram material não reagido (carvão e portlandita) e, por isso apresentaram menor desempenho. A amostra T20C5 apresenta a formação de alumino silicato de cálcio hidratado, diferentemente das outras formulações, indicando que a proporção entre finos de tijolos e argamassa pode contribuir para a formação desta fase. A ampla presença de quartzo na amostra T25 indica que os finos de tijolos apresentam desempenho inferior quando não há ativação álcali e temperatura que propiciem a reação pozolânica.

## 5 CONCLUSÕES

As amostras da formulação TC20C5 alcançaram a proposta desta pesquisa, na qual é possível substituir parcialmente cimento Portland, inserindo resíduos de tijolos e de carvão vegetal, não necessitando ativação álcali e nem de elevação de temperatura para catalisar a reação pozolânica na argamassa.

Os ensaios demonstraram que os finos de tijolos possuem propriedades pozolânicas, diferentemente do carvão vegetal. Por isso, os cimentos formulados com maiores proporções de carvão vegetal não apresentaram ação pozolânica e, também, reduziram a resistência mecânica à compressão. Mas, mesmo esse material consumir maior massa de água nas formulações de argamassa, quando comparado com os resíduos de cerâmica vermelha e a amostra de referência, eles demonstraram sua atuação como *filler* para micro preenchimento dos interstícios estruturais e, principalmente as amostras com resíduos carvoeiros adsorvem água e fornecem hidratação para a reação pozolânica se desenvolver. Por isso, as amostras T20C5, com frações de 20 % de tijolo combinadas com 5 % de carvão vegetal, apresentaram resistência mecânica superior a argamassa de referência (REF), aos 28 dias de cura.

No caso, das amostras T15C10 e T10C15 apresentaram desempenho mecânico semelhante a argamassa T25, mesmo elas tendo menores frações de tijolos, percebe-se a ação do carvão vegetal na estrutura do material. No entanto, substituições de 20 e 25 % (T5C20 e C25) diminuem consideravelmente a resistência à compressão da argamassa, pois as partículas atuam como *filler* na matriz, infere-se que havia um excesso de material que limitou a capacidade de suportar deformações elásticas, levando a menores resistências à compressão, em razão do menor fator de empacotamento.

Consoante a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os resíduos de tijolos e carvão vegetal produzidos na Região do Vale do Caí – RS são viáveis para serem utilizados como aglomerantes em substituições parciais do Cimento Portland em argamassas para assentamentos e revestimentos, possibilitando a cura em temperatura ambiente, sem a necessidade de ativação álcali. Além do mais, é possível agregar valor a estes resíduos, impedindo, assim, o descarte inadequado destes materiais, contribuindo no papel social da construção civil que é de propiciar qualidade de vida à sociedade.

### **5.1 Possibilidades de trabalhos futuros**

Desta forma, considerando os resultados obtidos experimentalmente, sugere-se para investigações futuras, que seja avaliado, a formulação T20C5, na qual foi realizada a adição de 1 parte de finos de carvão vegetal para 4 partes de finos de tijolos, se essa proporção é válida para substituições em percentuais superiores a 25%. É viável também analisar se os finos de carvão vegetal contribuem para a alcalinidade e, se propiciam condições de meio adequadas para a reatividade pozolânica dos finos de tijolos.

## REFERÊNCIAS

ABDOLLAHNEJAD, Z.; LUUKKONEN, T.; MASTALI, M.; *et al.* Microstructural Analysis and Strength Development of One-Part Alkali-Activated Slag/Ceramic Binders Under Different Curing Regimes. **Waste and Biomass Valorization**, v.11, p. 3081-3096, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00626-9>. Acesso em: 08 abril 2022.

ABUDUREHMAN, Ababaikere; STABILE, Paola; CARROLL, Michael R.; *et al.* Mineralogical and chemical characterization of cdw as function of particle size and thermal treatments for potential recycling. **Detritus**, v.15, p.40-50, 2021.

AGRAWAL, Anjali; SARAVANAN, T. Jothi; BISHT, Kunal; *et al.* Synthesis of Cement Composites Utilizing Ceramic Waste as a Partial Replacement for Portland Cement: Literature Review. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v.25 (4), p.1-18, 2021. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000637](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000637). Acesso em: 08 abril 2022.

AHMED, Payman Sahbah; AHMED, Manar Nazar; SAIED, Samal Osman. Effect of carbon reinforcements on selected properties of mortar. **World Journal of Engineering**, v. 17, n. 4, p. 543-551, 6 jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/wje-01-2020-0040>. Acesso em: 6 dez. 2023.

ALEXANDRE, Jonas; AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de; CASTRO XAVIER, Gustavo de; *et al.* Addition of grog-clay ceramic waste in multiple use mortar. *In: Materials Science Forum*. [s.l.: s.n.], v. 798-799, p. 235-239, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.798-799.235>. Acesso em 02 maio 2022.

AMERI, Farshad; SHOAEL, Parham; ZAREEI, Seyed Alireza; *et al.* Geopolymers vs. alkali-activated materials (AAMs): A comparative study on durability, microstructure, and resistance to elevated temperatures of lightweight mortars. **Construction and Building Materials**, v. 222, p.49-63, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.079>. Acesso em 02 maio 2022.

AMORIM, L. V.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. Use of residential construction waste and residues from red ceramic industry in alternative mortars. **Journal of Environmental Engineering**, v.129, n.10, p.916-920, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2003\)129:10\(916\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:10(916)). Acesso em: 04 out. 2021.

ANTÓNIO, J. *et al.* Influence of different dosages of limestone dust and charcoal on the properties of lightweight cement composites. **Journal of Materials in Civil**

**Engineering**, v. 33, n. 10, out. 2021. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003891](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003891). Acesso em: 6 dez. 2023.

ARAÚJO, Rizia Amaral. **Influência da utilização de resíduos de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas**. 2017. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

ARAÚJO, R. A.; DE MENEZES, A. L.R.; CABRAL, K. C.; *et al.* Evaluation of the pozzolanic activity of red ceramic waste using mechanical and physicochemical methods. **Cerâmica**, v.65, p. 461-469, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653752649>. Acesso em: 03 abril 2022.

ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES E EMPACOTADORES DE CARVÃO VEGETAL DO RIO GRANDE DO SUL – APECAVE. **Produção Sustentável do Carvão Vegetal**. Porto Alegre: Emater – RS/Ascar, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:2018**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5752:2014**. Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7214:2015**. Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215:2019**. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11172:1990**. Aglomerantes de origem mineral. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653:2015**. Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13281:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). 2015. **ABNT NBR ISO 14001** – Sistema de gestão ambiental: especificação e diretrizes para uso. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 2004. **ABNT NBR 10004/2004** – Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697:2018**. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS – AGEFLOR. **O setor de base florestal no Rio Grande do Sul 2022**. Porto Alegre: RDK Logs, 2022.

BARONIO, Giulia; BINDA, Luigia. Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. **Construction and Building Materials**, v.11, p.41-46, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(96\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(96)00032-3). Acesso em 02 maio 2022.

BELTRAME, N. A. M. et al. Alkali activated cement made from blast furnace slag generated by charcoal: Resistance to attack by sodium and magnesium sulfates. **Construction and building materials**, v. 238, n. 117710, p. 117710, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117710>. Acesso em: 29 nov. 2023.

BERNARDINI, Luara Pires; MELO, Aline Resmini; CAMPOS, Débora De Pellegrin; et al. Valorização dos finos de carvão vegetal no desenvolvimento de frita cerâmica para formulação de engobe. **Cerâmica industrial**, v.25, n.1, p. 43-60, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cerind.2019.024>. Acesso em: 02 junho 2023.

BEUTLER, Cheila Sirlene; LUZ, Caroline Angulski da; BONINI, Janaina Sartori. Comportamento do cimento supersulfatado (CSS) obtido a partir de escórias de alto forno geradas a carvão vegetal e mineral e sujeito à cura térmica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0897>. Acesso em: 29 nov. 2023.

BOIPRAV, O. et al. Charcoal-containing building materials for electromagnetic radiation shielding. **Magazine of Civil Engineering**, v.117(1), 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.34910/MCE.117.9>. Acesso em: 6 dez. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Conama nº 307, de 05 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, 2002.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências, 2010.

BRNDUŞ-SIMUŢ, J.; VYŠVAŘIL, M.; BAYER, P.; et al. Effect of particle size of waste brick powder on the properties of alkaline activated materials. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [s.l.: s.n.], 379 012019, 2018.



Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/379/1/012019>. Acesso em 17 maio 2022.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra; SCHALCH, Valdir; MOLIN, Denise Carpena Coitinho Dal; et al. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v.24(4), p.421-430, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011>. Acesso em 08 fev. 2022.

CABRERA-COVARRUBIAS, Francisca Guadalupe; GÓMEZ-SOBERÓN, José Manuel; ROSAS-CASAREZ, Carlos Antonio; et al. Recycled mortars with ceramic aggregates. Pore network transmutation and its relationship with physical and mechanical properties. **Materials**, v.14, n.6, p.14061543, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14061543>. Acesso em 02 maio 2022.

CABRERA-MADRID, J. A.; ESCALANTE-GARCÍA, J. I.; CASTRO-BORGES, P. Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado. **Revista ALCONPAT**, v. 6, n. 1, p. 64–83, 16 mar. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.116>. Acesso em: 6 dez. 2023.

CADORE, D. E.; ANGULSKI DA LUZ, C.; FARIAS DE MEDEIROS, M. H. An investigation of the carbonation of alkaline activated cement made from blast furnace slag generated by charcoal. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 117-125, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.209>. Acesso em: 29 nov. 2023.

CALLISTER JUNIOR, W. D; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma abordagem integrada**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CARVALHO, C. M.; BARBOSA, N. P.; BEZERRA, U. T.; et al. Red ceramic industry residues: Used to produce Portland cement. **Case Studies in Construction Materials**, v.13, e00449, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00449>. Acesso em 03 maio 2022.

DELATORRE, Fabíola Martins; CUPERTINO, Gabriela Fontes Mayrinck; JUNIOR, Alfredo José dos Santos; et al. Insights acerca do uso de finos de carvão vegetal para geração de bioenergia. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v.16, n. 3, p. 138-144, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v16i3.1272>. Acesso em 12 junho 2023.

DINESH, A.; SUJI, D.; MOORTHI PICHUMANI. Concurrent Prospects to Develop Activated Charcoal Reinforced Self-Sensing Cement Composites for Structural Health Monitoring Applications. **Structural control & health monitoring**, v. 2023, p. 1–19, 7

mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2023/9731995>. Acesso em: 29 nov. 2023.

DOBIAS, Daniel; POKORNY, Petr. Influence of Partial Replacement of Hydraulic Binder by Ground Brick on the Characteristics of Composites. In: **Procedia Engineering**. v.190, p.568-574, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.381>. Acesso em 03 maio 2022.

EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge; TAM, Vivian W.Y.; SANTOS, Jorge. Recycled ceramic fine aggregate for masonry mortar production. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials**, v.172(5), p.225-236, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1680/jcoma.16.00063>. Acesso em 03 maio 2022.

FERREIRA, Beatriz Bernardes Dias. **Tipificação de patologias em revestimentos argamassados**. 2010. Dissertação - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2010.

FOŘT, Jan; VEJMEJKOVÁ, Eva; KEPPERT, Martin; *et al.* Alkaline activation of low-reactivity ceramics: Peculiarities induced by the precursors' dual character. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, p. 103440, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103440>. Acesso em 04 maio 2022.

FROEHLICH, Paulo Leandro; MOURA, Angela. CARVÃO VEGETAL: PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E PRINCIPAIS APLICAÇÕES. **Revista Tecnologia e Tendências**, v.9(1), p. 1-19, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.25112/rtt.v9i1.1329>. Acesso em 13 junho 2023.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; *et al.* Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. **Cement and Concrete Research**, v.41(9), p. 923-931, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>. Acesso em 04 maio 2022.

GRELLIER, Adèle; BULTEEL, David; EL KARIM BOUARROUDJ, Mohamed; *et al.* Alternative hydraulic binder development based on brick fines: Influence of particle size and substitution rate. **Journal of Building Engineering**, v.39, p. 10223, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102263>. Acesso em 11 maio 2022.

GONÇALVES, Beatriz. **Evolução de fases durante a hidratação do cimento Portland brasileiro por difração de raios X**. 2021. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

GUIMARÃES FILHO, Leopoldo Pedro. **A relação dos fatores de produção na geração de resíduos de construção civil**. 2016. Tese – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.

HE, Ziming; SHEN, Ai Qin; WU, Hansong; *et al.* Research progress on recycled clay brick waste as an alternative to cement for sustainable construction materials. **Construction and Building Materials**, v.274, p.122113, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122113>. Acesso em 11 maio 2022.

HOPPE FILHO, J.; PIRES, C. A. O.; LEITE, O. D.; *et al.* Characterization of Red Ceramic Waste for Application as Mineral Addition in Portland Cement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.33(6), p.04021108, 2021.

IEA. Cement: Net Zero Emissions Guide. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement-3>. Acesso em: 03 outubro de 2023.

ITAMBÉ CIMENTOS. **Relatórios de ensaio**. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/>. Acesso em 12 junho 2023.

JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; *et al.* Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**, v.40, p.679-690, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.036>. Acesso em 11 maio 2022.

SOUZA JUNIOR, Dilermando Salvador de. **Estudo do comportamento de escórias de alto-forno a carvão vegetal produzidas a partir de ativação a quente**. 2007. Universidade Federal de Minas Gerais, [s. l.], 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/ISMS-7WMK7E>. Acesso em: 29 nov. 2023.

KALIL, S. B.; LEGGERINI, M. R.; BONACHESKI, V. **Alvenaria estrutural**. PUC RS, 2007.

KEPPERT, Martin; URBANOVÁ, Martina; BRUS, Jiří; *et al.* Rational design of cement composites containing pozzolanic additions. **Construction and Building Materials**, v.148, p. 411-418, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.032>. Acesso em: 18 dez. 2021.

KUDO, Elisabete Kioko. **Caracterização reológica de argamassas colantes**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

LASSEUGUETTE, E.; BURNS, S.; SIMMONS, D.; *et al.* Chemical, microstructural and mechanical properties of ceramic waste blended cementitious systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 1228-1238, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.240>. Acesso em: 07 abril 2022.

LEDESMA, Enrique Fernández; JIMÉNEZ, José Ramón; AYUSO, Jesús; *et al.* Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production - Part-I: Ceramic masonry waste. **Journal of Cleaner Production**, v.87, p. 692-706, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.084>. Acesso em: 07 abril 2022.

LIMA, Daniela Aparecida Dutra de. **Obtenção e caracterização de argamassas de revestimento produzidas com resíduos de construção e demolição (RCD) como agregado reciclado**. 2022. Dissertação – Programa Mestrado Profissional *Stricto Sensu* em Engenharia Civil, Universidade São Judas, São Paulo, 2022.

LÓPEZ GAYARRE, Fernando; LÓPEZ BOADELLA, Íñigo; LÓPEZ-COLINA PÉREZ, Carlos; *et al.* Influence of the ceramic recycled aggregates in the masonry mortars properties. **Construction and Building Materials**, v.132, p.457-461, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.021>. Acesso em 05 maio 2022.

MARTINEZ-MOLINA, W. *et al.* Effect of the addition of agribusiness and industrial wastes as a partial substitution of Portland cement for the carbonation of mortars. **Materials**, v. 14, n. 23, p. 7276, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14237276>. Acesso em 29 maio 2023.

MATIAS, Gina; FARIA, Paulina; TORRES, Isabel. Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review. **Construction and Building Materials**, v.73, p. 125-136, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028>. Acesso em 11 maio 2022.

MEMIŞ, Selçuk; ÖZKAN, I. G.Mütevelli; YILMAZOĞLU, M. U.; *et al.* Behavior of mortar samples with waste brick and ceramic under freeze-thaw effect. In: **Lecture Notes in Civil Engineering**, v.7, p.189-202, 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-64349-6\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64349-6_15). Acesso em 11 maio 2022.

MINATTO, Flávia Dagostim. **Desenvolvimento de produto e de projeto conceitual para a fabricação de artefatos de cimento a partir de resíduos da indústria de revestimento cerâmico**. 2012. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2012.

MOLITERNO, Antonio. **Caderno de estruturas em alvenaria e concreto simples**. Editora São Paulo: Blucher 1995.

MOSSMANN, Letícia Maria. **Substituição parcial do cimento Portland por resíduos de tijolos e carvão vegetal em formulações de argamassa**. 2023. Monografia – Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharel em Engenharia Química, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul *Campus Feliz*, Feliz, 2023.

MSINJILI, Nsesheye S.; VOGLER, Nico; STURM, Patrick; *et al.* Calcined brick clays and mixed clays as supplementary cementitious materials: Effects on the performance of blended cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 120990, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120990>. Acesso em 11 maio 2022.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Concrete Technology**. 2nd. Ed. Harlow: Pearson, 2010.

NOBRE, João Rodrigo Coimbra; CASTRO, Jonnys Paz; BIANCHI, Maria Lúcia; *et al.* Caracterização do carvão ativado produzido a partir de serragens de maçaranduba. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 43, n. 107, p. 693-702, set. 2015. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr107/cap21.pdf>. Acesso em 21 de dezembro de 2023.

NUNES, K. R.A.; MAHLER, C. F. Comparison of construction and demolition waste management between Brazil, European Union and USA. **Waste Management and Research**, v.38, n.4, p. 415-422, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X20902814>. Acesso em: 09 março 2022.

O'FARRELL, M.; SABIR, B. B.; WILD, S. Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. **Cement and Concrete Composites**, v.28, n.9, p. 790-799, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.014>. Acesso em 18 maio 2022.

ORTEGA, José Marcos; LETELIER, Viviana; SOLAS, Carlos; *et al.* Long-term effects of waste brick powder addition in the microstructure and service properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v.182, p. 691-702, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.161>. Acesso em 18 maio 2022.

OSTOVARI, Hesam; MÜLLER, Leonard; SKOCEK, Jan; *et al.* From Unavoidable CO<sub>2</sub> Source to CO<sub>2</sub> Sink? A Cement Industry Based on CO<sub>2</sub> Mineralization. **Environmental Science and Technology**, v. 55, n.8, p. 5212-5223, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07599>. Acesso em: 18 maio de 2022.

PAŠALIĆ, Snežana; VUČETIĆ, Snežana; ZORIĆ, Dmtar; *et al.* Pozzolanic mortars based on waste building materials for the restoration of historical buildings. **Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly**, v. 18, n.2, p.147-154, 2012.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2298/CICEQ110829056P>. Acesso em: 12 nov. 2021.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, Luiz A.; CASTRO-GOMES, João P.; SANTOS, Pedro M.S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. **Construction and Building Materials**, v. 31, p.197-203, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110>. Acesso em: 20 dez. 2021.

PEYNE, J.; GAUTRON, J.; DOUDEAU, J.; *et al.* Influence of calcium addition on calcined brick clay based geopolymers: A thermal and FTIR spectroscopy study. **Construction and Building Materials**, v.152, p.794-803, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.047>. Acesso em 18 maio 2022.

PITARCH, A. M.; REIG, L.; TOMÁS, A. E.; *et al.* Pozzolanic activity of tiles, bricks and ceramic sanitary-ware in eco-friendly Portland blended cements. **Journal of Cleaner Production**, v.279, p.123713, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123713>. Acesso em: 9 fev. 2022.

POMMER, Vojtěch; VEJMELOVÁ, Eva; ČERNÝ, Robert; *et al.* Alkali-activated waste ceramics: Importance of precursor particle size distribution. **Ceramics International**, v.47, n.22, p.31574-31582, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.037>. Acesso em 18 maio 2022.

REIG, L.; TASHIMA, M. M.; SORIANO, L.; *et al.* Alkaline activation of ceramic waste materials. **Waste and Biomass Valorization**, v.4, p.729-736, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9197-z>. Acesso em 18 maio 2022.

REIG, L.; SANZ, M. A.; BORRACHERO, M. V.; *et al.* Compressive strength and microstructure of alkali-activated mortars with high ceramic waste content. **Ceramics International**, v.43, n.16, p. 13622-13634, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.072>. Acesso em 18 maio 2022.

REN, Q. *et al.* Incorporation of bamboo charcoal for cement-based humidity adsorption material. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 244–251, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.173>. Acesso em: 29 nov. 2023.

RESENDE, Paulo Sérgio de Oliveira. **Efeito do ar incorporado em argamassa de revestimento**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

RAHHAL, Viviana Fátima; TREZZA, Mónica Adriana; TIRONI, Alejandra; *et al.* Complex characterization and behavior of waste fired brick powder-Portland cement system. **Materials**, v.12, n.10, p. 12101650, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12101650>. Acesso em 18 maio 2022.

RODRIGUES, J. **Panorama da Indústria de Cerâmica Vermelha no Brasil**. [s. l.], p. 1– 83, 2012.

ROMANO, R. C. O. *et al.* Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**, v. 62, n. 363, p. 215-223, set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132016623632039>. Acesso em: 29 nov. 2023.

ROSADO, Laís Peixoto; VITALE, Pierluca; PENTEADO, Carmenlucia S.G.; *et al.* Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. **Waste Management**, v.85, p.477-489, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.011>. Acesso em 18 jun. 2022.

ROVNANÍK, Pavel; ROVNANÍKOVÁ, Pavla; VYŠVAŘIL, Martin; *et al.* Rheological properties and microstructure of binary waste red brick powder/metakaolin geopolymer. **Construction and Building Materials**, v.188, p.924-933, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.150>. Acesso em 17 maio 2022.

SCHACKOW, Adilson; CORREIA, Sivaldo Leite; EFFTING, Carneane. Microstructural and physical characterization of solid wastes from clay bricks for reuse with cement. **Environmental Engineering and Management Journal**, v.19, n.4, p.565-576, 2020. Disponível em: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000547480500003>. Acesso em: 04 jan. 2022.

SAMADI, Mostafa; HUSEIEN, Ghasan Fahim; MOHAMMADHOSSEINI, Hossein; *et al.* Waste ceramic as low cost and eco-friendly materials in the production of sustainable mortars. **Journal of Cleaner Production**, v.266, p.121825, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121825>. Acesso em 17 maio 2022.

SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; MARÍN, F.; RIVERA, J.; *et al.* Morphology and properties in blended cements with ceramic wastes as a pozzolanic material. **Journal of the American Ceramic Society**, v.89, n.12, p. 3701-3705, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01279.x>. Acesso em 17 maio 2022.

SANTOS, Sueli de Fátima de Oliveira Miranda; HATAKEYAMA, Kazuo. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Production**, v.22, n.2, p. 309-321, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132012005000010>. Acesso em 02 junho 2023.

SARKAR, Madhuchhanda; DANA, Kausik. Partial replacement of metakaolin with red ceramic waste in geopolymer. **Ceramics International**, v.47, n.3, p. 3473-3483, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.191>. Acesso em: 07 jan. 2022.

SILVA, Guido; CASTAÑEDA, David; KIM, Suyeon; *et al.* Analysis of the production conditions of geopolymer matrices from natural pozzolana and fired clay brick wastes. **Construction and Building Materials**, v. 215, p.633-643, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.247>. Acesso em 17 maio 2022.

SOUZA, Natallia Britto Azevedo *et al.* Caracterização e Avaliação do Potencial Adsorptivo de Materiais Produzidos à Partir do Resíduo da Casca da Acácia Negra (*Acacia Mearnsii* De Wild) para o Branqueamento do Óleo de Arroz. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 16, n. 16, p. 35-41, 14 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.17921/1890-1793.2021v16n16p35-41>. Acesso em: 1 dez. 2023.

SZELAG, Maciej; STYCZEŃ, Joanna; FEDIUK, Roman; *et al.* Properties and strength prediction modeling of green mortar with brick powder subjected to a short-term thermal shock at elevated temperatures. **Materials**, v.14, n.21, p.6331, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14216331>. Acesso em 17 maio 2022.

TENÓRIO, J.A.S.; ARAUJO, F.G.S.; PEREIRA, S.S.R., FERREIRA, A.V.; ESPINOSA, D.C.R.; BARROS, A.M. Decomposição da fase majoritária do cimento Portland, Parte II: alita pura, **REM**, v. 56, n.2, p. 113-117, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672003000200009>. Acesso em 14 de novembro de 2023.

TORRES, Isabel; MATIAS, Gina; FARIA, Paulina. Natural hydraulic lime mortars - The effect of ceramic residues on physical and mechanical behaviour. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p.101747, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101747>. Acesso em 23 maio 2022.

TUYAN, Murat; ANDIÇ-ÇAKIR, Özge; RAMYAR, Kambiz. Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer. **Composites Part B: Engineering**, v.135, p. 242-252, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.013>. Acesso em 23 maio 2022.

USHA, S; NAIR, Deepa G; VISHNUDAS, Subha. Study on Development of Geopolymer Binder from Terracotta Roof Tile Waste by Experimental and Statistical Method. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v.225, p. 242-



252, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/225/1/012120>. Acesso em 23 maio 2022.

VEJMELKOVÁ, E.; ONDRÁČEK, M.; SEDLMAJER, M.; et al. Fine-ground ceramics as an alternative binder in high performance concrete. In: **WIT Transactions on the Built Environment**, v.8, p.91-98, 2010. Disponível em: <https://doi:10.2495/HPSM100091>. Acesso em: 12 novembro 2021.

VENÂNCIO, Pollyana Benevides Freitas. **Dosagem de argamassa para estaca raiz**. 2008. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

XUE, Cuizhen; QIAO, Hongxia; CAO, Hui; et al. Analysis on the Strength of Cement Mortar Mixed with Construction Waste Brick Powder. **Advances in Civil Engineering**, v.2021, ID8871289, 10p., 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2021/8871280>. Acesso em 25 maio 2022.

WILD, S.; KHATIB, J. M.; O'FARRELL, M. Sulphate resistance of mortar, containing ground brick clay calcined at different temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 5, p. 697-709, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00059-8). Acesso em 25 maio 2022.

WONG, Chee Lum; MO, Kim Hung; ALENGARAM, U. Johnson; et al. Mechanical strength and permeation properties of high calcium fly ash-based geopolymer containing recycled brick powder. **Journal of Building Engineering**, v.32, p.101655, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101655>. Acesso em 25 maio 2022.

WU, Huixia; XIAO, Jianzhuang; LIANG, Chaofeng; et al. Properties of cementitious materials with recycled aggregate and powder both from clay brick waste. **Buildings**, v.11, n.3, p.119, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings11030119>. Acesso em 25 maio 2022.

ZHAO, Zengfeng; GRELLIER, Adèle; EL KARIM BOUARROUDJ, Mohamed; et al. Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars: Properties and durability. **Journal of Building Engineering**, v.43, p. 102898, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102898>. Acesso em 25 maio 2022.

ZORZI, J. E.; ECHEVERREGARAY, S. G.; EMILIANO, J. V.; et al. Caracterização de matérias-primas cerâmicas do Vale do Rio Ca. **Cerâmica**, v.58, p. 509-515, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132012000400016>. Acesso em 18 outubro 2022.

