

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - IFRS
CAMPUS FELIZ

LETÍCIA MARIA MOSSMANN

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUOS DE
TIJOLOS E CARVÃO VEGETAL EM FORMULAÇÕES DE ARGAMASSA**

FELIZ
2023

LETÍCIA MARIA MOSSMANN

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUOS DE
TIJOLOS E CARVÃO VEGETAL EM FORMULAÇÕES DE ARGAMASSA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

Orientadora: Flávia Dagostim Minatto

Feliz

2023

LETÍCIA MARIA MOSSMANN

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUOS DE
TIJOLOS E CARVÃO VEGETAL EM FORMULAÇÕES DE ARGAMASSA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Química.

Feliz, 03 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Flávia Dagostim Minatto - (IFRS) - Orientadora

Prof. Alessandra Smaniotto - (IFRS)

Prof. Cinthia Gabriely Zimmer - (IFRS)

Ao Éverton, meu marido, pelo seu companheirismo, compreensão e paciência.
Aos meus filhos, Mônica e Felipe, por estarem sempre ao meu lado, tornando meus
dias mais cheios de vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido Éverton Finger por sempre estar ao meu lado, me apoiando e compreender todas as vezes que tive que deixar o nosso lar para me dedicar a este curso. Amo-te pra todo o sempre!

Aos meus filhos, Mônica e Felipe, que com a sua chegada, trouxeram uma motivação ainda maior para persistir na realização dos meus objetivos. Espero que vocês tenham muitos sonhos e que jamais desistam em realizá-los.

À Prof. Orientadora Flávia Dagostim Minatto pela forma atenciosa e compreensiva que partilhou na condução desta pesquisa.

À Construrohr e à PM Materiais de Construção por ceder gentilmente as matérias primas utilizadas nas formulações de argamassa.

“Um sonho vale a pena ser sonhado, quando se persiste em torná-lo realidade.”

Letícia Maria Mossmann

RESUMO

O gerenciamento de resíduos é uma importante premissa para a sustentabilidade ambiental e social. A região do Vale do Caí destaca-se na produção de cerâmica vermelha e carvão vegetal, atividades das quais resultam sólidos que não atendem os parâmetros de consumo. Estima-se que 60% dos resíduos sólidos são oriundos da construção civil. Já na fabricação do carvão vegetal são gerados cerca de 30% de finos. Diversos estudos demonstraram que a inserção de finos cerâmicos em argamassa de revestimento é viável em razão de suas propriedades pozolânicas, no entanto, sua aplicabilidade em canteiros de obra esbarra no maior consumo de água, ativação álcali e temperatura controlada de cura, a fim de obter propriedades mecânicas similares ao cimento Portland. Assim, o objetivo desse estudo consistiu na avaliação da utilização de finos de carvão vegetal e de tijolos para produzir argamassa em temperatura ambiente de cura, visando a substituição parcial do cimento Portland por 25% de seis diferentes proporções de misturas de cerâmica vermelha e carvão vegetal, estas foram avaliadas quanto à resistência mecânica à compressão. Já, os finos de tijolo e carvão vegetal foram avaliados quanto a sua massa específica, potencial pozolânico e atividade pozolânica por meio de titulação de determinação de hidroxilas livres e óxido de cálcio. Os finos possuem menor massa específica que o cimento Portland, sendo que o carvão vegetal não desenvolveu resistência mecânica à compressão ao reagir com hidróxido de sódio, a determinação de hidroxilas e cálcio livre também demonstraram que o carvão vegetal não se comporta como um material pozolânico, evidenciando sua atuação como *filler* nas amostras. 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, aos 28 dias de idade, com índice de desempenho de 112,5%.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma sobre os Tipos de Argamassa conforme NBR 13281:2005 ..	18
Figura 2 - Aplicação dos Tipos de Argamassa	19
Figura 3 - Produção do Carvão Vegetal	32
Figura 4 - Matérias-primas utilizadas na formulação de argamassa	34
Figura 5 - Preparo do tijolo utilizado na formulação de argamassa.....	35
Figura 6 - Preparo dos finos de carvão vegetal.....	346
Figura 7- Processo de peneiramento da areia	36
Figura 8 - Construção do molde para corpo de prova cilíndrico.....	37
Figura 9 - Preparo da Argamassa: insumos misturados na argamassa de referência	39
Figura 10 - Moldagem dos corpos de prova.....	40
Figura 11 - Cura úmida dos corpos de prova com cal.....	40
Figura 12 - Diagrama de Avaliação da pozolanicidade	43
Figura 13 - Amostras de cimento acondicionadas na estufa à 40°C	44
Figura 14 - Ensaio de Titulação de Álcalis livres: amostras antes e após o ponto de viragem	45
Figura 15 - Ensaio de Titulação de determinação de CaO: amostras com ajuste de pH, adição de murexida e após o ponto de viragem	46
Figura 16 - Retificação do topo e base dos corpos de prova	48
Figura 17 - Máquina de Ensaio Universal	49
Figura 18 - Diagrama de Avaliação do potencial pozolânico do cimento	52
Figura 19 - Avaliação da Reatividade dos finos de carvão vegetal com cal.....	53
Figura 20 - Aspecto dos corpos de prova de argamassa	56
Figura 21 - Resistência à compressão da argamassa	59
Figura 22 - Índice de desempenho das formulações de argamassa	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do Cimento Portland.....	20
Tabela 2 - Composição Química do Cimento Portland	21
Tabela 3 - Composição Química de argilas da Região do Vale do Caí-RS	26
Tabela 4 - Valores de Resistência à Compressão	29
Tabela 5 - Formulações de Argamassa em Percentuais de Massa	37
Tabela 6 - Identificação das Formulações de Argamassa.....	38
Tabela 7 - Mistura das Amostras de Cimento	43
Tabela 8 - Formulações da Argamassa com Cal	47
Tabela 9 - Massa Específica	51
Tabela 10 - Quantidade de água adicionada nas formulações de argamassa.....	55
Tabela 11 - Composição química do tijolo.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	MEIO AMBIENTE E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	15
2.2	ARGAMASSA	17
2.2.1	Cimento	20
2.2.2	Areia	22
2.2.3	Água	24
2.3	RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA EM ARGAMASSA	25
2.3.1	Geopolímero	27
2.4	CARVÃO VEGETAL	30
2.4.1	Processo de Carbonização do Carvão Vegetal	31
2.4.2	Propriedades do Carvão Vegetal	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS.....	34
3.2	PREPARO DOS MATERIAIS.....	35
3.3	PREPARO DA ARGAMASSA	37
3.4	MOLDAGEM E SECAGEM DOS CORPOS DE PROVA	39
3.5	AVALIAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DE ARGAMASSA	41
3.5.1	Massa específica	41
3.5.2	Potencial pozolânico	42
3.5.3	Atividade pozolânica	47
3.5.4	Análise visual	48
3.5.5	Resistência mecânica à compressão	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	MASSA ESPECÍFICA	51
4.2	POTENCIAL POZOLÂNICO DO CIMENTO.....	52
4.3	ATIVIDADE POZOLÂNICA	53
4.4	TRABALHABILIDADE	54
4.5	COR	56

4.6	POROSIDADE	57
4.7	RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO	58
5	CONCLUSÕES.....	62
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos naturais e o uso de seu potencial para produzir matéria e energia (SHACKELFORD, 2013) propiciaram condições de vida mais estáveis, possibilitando o aumento populacional e, conseqüentemente, a maior demanda por bens e serviços, que teve sua escala produtiva alavancada a partir da Revolução Industrial (BARBIERI, 2020).

Muitas vezes o desenvolvimento social está relacionado ao modelo econômico predatório da natureza, que acarreta em alterações climáticas que desafiam o acesso aos direitos humanos fundamentais, de vida digna, com acesso à comida, água e saúde (MARQUES; SCHMITT, 2021). A partir do consenso de que o humano é parte do meio ambiente, introduziu-se o conceito de sustentabilidade na segunda metade do século XX, compreendendo-se que a apropriação dos bens naturais constrói o conjunto de relações econômicas, sociais e políticas, mas estas não podem sobrepor as necessidades individuais às de bem estar coletivo (ANTUNES, 2021; BARBIERI, 2020).

Visto que os impactos da degradação ambiental são generalizados por todo o globo, os tratados intermediados pelas discussões nas Assembleias da Organização das Nações Unidas (ONU), instrumentalizaram mudanças jurídicas nos países, buscando garantir um ambiente global saudável (GONÇALVES; GONÇALVES, 2015). Dentre estes debates pode-se destacar a Convenção da Basileia, em 1989, que tratou sobre o gerenciamento de resíduos perigosos, sua redução, controle, tratamento, transporte e disposição final (UNEP, 1989).

No Brasil, este tratado foi ratificado, resultando na criação de diversos marcos instrutivos e normativos, onde pode-se destacar a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 que estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos e a Resolução Conama nº 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

Na prática, estas disposições legais tem remodelado os processos industriais de forma a reutilizar produtos como fontes de matérias-primas, a fim de reduzir a extração de insumos da natureza, a diminuição dos custos de produção e, ainda, agregar valor a estes resíduos, dando-lhes novas destinações. (BRASIL, 2010)

Dentre os diversos tipos de resíduos sólidos, Guimarães Filho (2016) considera que 60% da geração mundial possui ligação com o setor da construção civil. Estes resíduos causam diversos impactos ambientais, desde a extração de minérios aos rejeitos dos canteiros de obras e demolição, sendo compostos em sua maioria por cimento, argamassa, tijolos, telhas e vidro. O setor siderúrgico, por sua vez, faz o uso massivo de carvão vegetal como fonte energética para a fundição de ferro (SANTOS, HATAKEYMA; 2012). Estima-se que 10% a 30% de finos são gerados durante o processo de carbonização parcial da madeira para a produção de carvão vegetal (BERNARDINI, *et al.*, 2020; DELATORRE, *et al.*, 2020). Estes resíduos sólidos são classificados como materiais inertes pela norma NBR 10004 (2004), passíveis de reciclagem ou reutilização, enfatizado pela Resolução CONAMA n° 307 (2002).

Entretanto, a concretização da logística reversa preconizada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos esbarra, ainda, na falta de conhecimento sobre a interação destes materiais nas propriedades físico-químicas e mecânicas da argamassa, inibindo, assim, seu uso extensivo na construção civil (ROSADO *et al.*, 2019).

Diversos estudos demonstram que é possível reinserir estes resíduos como matéria prima na construção civil, ao incorporá-los em formulações de argamassa, tais como os trabalhos que utilizaram pó de vidro (MOSER, 2019), resíduos de cerâmica vermelha (ARAÚJO, 2017) e entulho de demolição (BAVARESCO, 2001). Foi possível observar, inclusive, um aumento na resistência mecânica das argamassas com a adição destes materiais, mediante ativação álcali e em condições controladas de temperatura de cura (ABUDUREHMAN *et al.*, 2021). Mas, nem sempre tais técnicas de preparo de materiais são acessíveis e viáveis em canteiros de obra.

Desta forma, no cenário atual, uma grande demanda das empresas e cidades é gerenciar os resíduos sólidos. No contexto da região do Vale do Caí – RS, localizam-se indústrias que fornecem produtos para a construção civil, tais como tijolos, telhas e blocos pré-moldados, sendo considerado o segundo maior polo cerâmico do Brasil (RODRIGUES, 2012). Estima-se, também, que 60% da produção gaúcha de carvão vegetal também se concentra no mesmo território, no qual a agricultura familiar representa a maior mão de obra envolvida no processo

(APECAVE, 2018). Em predomínio, o produto é consumido no preparo do churrasco, representando a culinária e cultura do Rio Grande do Sul (RIO GRANDE DO SUL, 2003).

Neste viés, o presente trabalho visa contribuir com a logística reversa dos resíduos de tijolos e carvão vegetal produzidos na região do Vale do Caí, ao incorporar na substituição parcial do 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 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa estão delimitados em objetivo geral, que descreve a proposta central deste trabalho, e objetivos específicos, que apresentam os resultados que se espera alcançar a partir desta investigação.

1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem por objetivo geral investigar a substituição parcial de cimento Portland por resíduos de tijolos e carvão vegetal em formulações de argamassa.

1.1.2 Objetivos específicos

Para que esse objetivo geral possa ser alcançado, faz-se necessário o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar o potencial de reutilização dos resíduos de tijolos e carvão vegetal, produzidos na Região do Vale do Caí – RS, para utilização na formulação das argamassas;
- b) Avaliar o potencial pozolânico dos resíduos de tijolos e carvão;
- c) Caracterizar as formulações de argamassa quanto a resistência mecânica à compressão, aos 28 dias de cura;

- d) Comparar a argamassa sem adição de resíduos com as formulações de diferentes proporções de resíduos de tijolo e carvão vegetal.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo apresenta um panorama sobre a geração de resíduos sólidos (2.1), principalmente, na construção civil e na produção de carvão vegetal e suas consequências para o meio ambiente. Aborda-se a viabilidade de reaproveitamento do tijolo (2.3), em formulações de argamassa, em razão da sua atuação como geopolímero (2.3.1), como também, do carvão vegetal (2.4), seu processo de carbonização (2.4.1) e suas características (2.4.2). Desta maneira, fez-se necessário, também compreender os tipos de argamassa (2.2) e os materiais utilizados em sua formulação, como o cimento (2.2.1), areia (2.2.2) e a água (2.2.3).

2.1 MEIO AMBIENTE E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional do Meio Ambiente instituída pela Lei nº 6939 (1981) entende por meio ambiente todas as formas e interações que abrigam e regem a vida. Sendo assim, considera como recursos ambientais, “a atmosfera, as águas interiores, superficiais e subterrâneas, os estuários, o mar territorial, o solo, o subsolo, os elementos da biosfera, a fauna e a flora” (BRASIL, 1981). Pela Constituição Federal de 1988, estes recursos são classificados como bens ambientais de uso comum do povo e que são essenciais para garantir os direitos sociais, que possibilitam o exercício da cidadania e a dignidade da pessoa humana com sadia qualidade de vida. O meio ambiente é um dos fatores determinantes e condicionante à saúde das pessoas, expressando o nível de organização econômica e social do país (BRASIL, 1990).

As formas de interação com o meio ambiente através das atividades, produtos ou serviços de uma pessoa, grupo de pessoas ou organização geram impactos ambientais, que modificam de forma adversa ou benéfica o estado ou as características da biodiversidade, do ecossistema ou do clima. A norma ABNT ISO 14001 (2015) salienta que as consequências causadas pela intervenção adversa no ambiente podem ser gerenciadas para prevenir, reduzir e controlar estes efeitos.

A utilização de um recurso ambiental nas atividades humanas tem um ciclo de vida, pontuado pela norma ABNT ISO 14001 (2015), que passa pelos estágios de obtenção da matéria-prima, seu uso até a sua disposição final. O material restante

pós descarte é definido como resíduo. Dentre os diversos tipos de resíduos gerados destacam-se os resíduos sólidos, que são definidos como materiais nos estados sólido e semissólido, resultantes das atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, serviços de limpeza urbana e de saneamento básico, dos serviços de mineração, transporte e àqueles gerados na construção civil (NBR, 2004; BRASIL, 2010).

A geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) tem registrado aumento de 23%, no período de 2010 a 2020, estimando-se 1,07 Kg de resíduos per capita descartados diariamente. A partir da implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, observou-se um aumento na cobertura de coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU): no período de 2010 a 2021, aumentou de 88% para 92,2%, sendo que 74,4% dos municípios brasileiros apresentaram iniciativas de coleta seletiva. Porém, 39,8% dos RSU coletados, em 2021, foram descartados inadequadamente em lixões e aterros sanitários (ABRELPE, 2021).

No Brasil, atribui-se que entre 50 e 70% em massa de RSU são originários das atividades de construção (BRASIL, 2005). Indiretamente, os finos gerados na fabricação do carvão vegetal também possuem ligação com o setor de materiais destinados às obras, uma vez que, o Brasil produz 1/3 do carvão vegetal, na qual, 30% são utilizados na produção de ferro-gusa nacional (BERNARDINI, *et al.*, 2020). De acordo com o art. 2.º, inciso I da Resolução CONAMA nº 307 (2002), os resíduos da construção civil são oriundos de:

construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeira e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. (BRASIL, 2005).

Majoritariamente os resíduos da construção civil são compostos por materiais inertes, ou Classe II B de acordo com a NBR 10004 (2004). Já a Resolução CONAMA nº 307 (2002) denomina-os como resíduos de Classe A, que são passíveis de reutilização ou reciclagem como agregados, podendo ter a mistura de materiais como argamassa, concreto, componentes cerâmicos de tijolos, blocos,

telhas, placas de revestimento, por exemplo, e também materiais de pavimentação e solos provenientes de terraplanagem.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos impulsionou o aumento de 42% na coleta dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD), no período de 2010 a 2020 (ABRELPE, 2021). Entretanto, estima-se que apenas 8% dos resíduos coletados são reciclados. Já em outros países, como os Estados Unidos, reciclam cerca de 30%, e na Alemanha, em 2016, foram reciclados 88% dos RCD, sendo que deste montante apenas 9,8% foram descartados em aterros sanitários (NUNES; MAHLER, 2020).

No caso do carvão vegetal, estima-se que durante o processo de fabricação, manuseio e transporte são gerados 30% de finos, em geral, estes resíduos são acumulados no pátio da carvoaria, sem tratamento prévio para descarte, podendo causar incêndios (ALMEIDA, 2019; PAGANELLA, 2020), como também, impactos ambientais, econômicos e sociais (DELATORRE, *et al.*, 2020).

Apesar das usinas de reciclagem brasileira serem de pequeno porte, com capacidade mensal de 2.000 à 10.000 m³, estas funcionam com apenas 35% de suas capacidades máximas, que por muitas vezes estão paradas pela falta de material para ser processado. Destaca-se que a falta de rastreabilidade dos resíduos gerados, combinado com a baixa demanda por reutilização dos mesmos, pois os insumos naturais extraídos possuem preço acessível e qualidade maior que os reciclados, são fatores que estimulam o descarte de forma indevida (NUNES; MAHLER, 2020).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o gerenciamento de resíduos sólidos deve ocorrer de forma integrada, portanto a responsabilidade pelos resíduos gerados é compartilhada entre todos que participaram do ciclo de vida do produto, priorizando-se a logística reversa e ações de destinação para a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético (BRASIL, 2010).

2.2 ARGAMASSA

A Norma NBR 13281 (2005) define argamassa como uma mistura homogênea composta de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água,

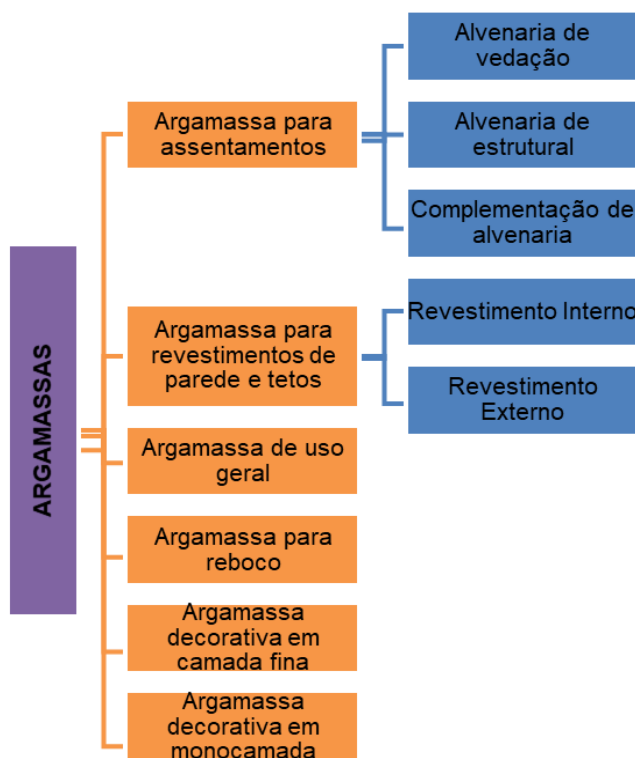
podendo conter ainda aditivos e adições, possibilitando sua formulação em obra ou de forma industrializada.

A argamassa no estado fresco serve para juntar os materiais pétreos, naturais ou artificiais em uma alvenaria, favorecendo o posicionamento firme da estrutura. Quando a argamassa endurece, após a secagem, ela atua na distribuição dos esforços na superfície das pedras, estabelecendo aderência e resistência aos esforços de flexão, compressão e tração (MOLITERNO, 1995).

A resistência mecânica da argamassa varia de acordo com a proporção entre aglomerante e agregado, granulometria do agregado, quantidade de água, compactação da massa, modo de lançamento da massa e condições de temperatura e umidade (MOLITERNO, 1995).

Mediante as diversas possibilidades de formulação e aplicação, as argamassas são classificadas pela mesma norma NBR 13281 (2005), como sintetizado no fluxograma a seguir (Figura 1).

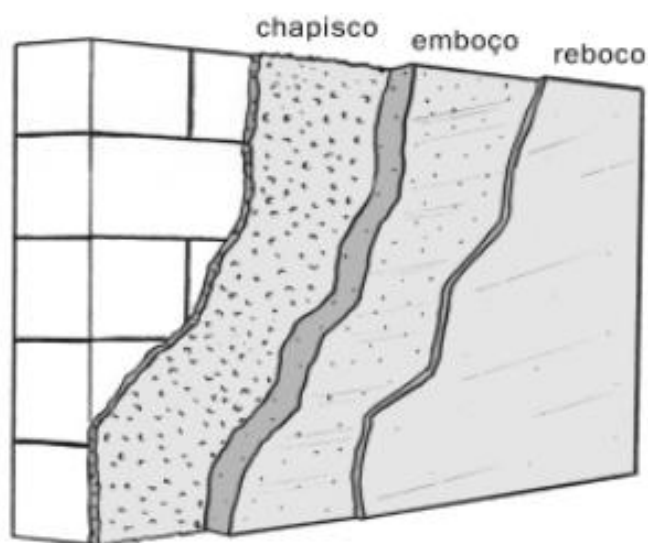
Figura 1 - Fluxograma sobre os Tipos de Argamassa conforme NBR 13281:2005



Fonte: Adaptado NBR 13281 (2005).

A argamassa utilizada para assentamento pode ser representada pela parte exposta da estrutura, na Figura 2, aplicam-se também a formulação de argamassa de uso geral. Os demais tipos de argamassa são utilizados para revestimentos. Popularmente, estes revestimentos são denominados de chapisco, emboço e reboco. A função da camada de chapisco é uniformizar a base da alvenaria, permitindo melhorar a aderência das camadas de revestimento subsequentes. O emboço possui função similar ao chapisco, tendo normalmente espessura maior que a anterior e podendo, inclusive, dispensar a aplicação de chapisco, preparando a superfície para a camada de reboco ou revestimento decorativo. O reboco é aplicado para o acabamento da superfície, sendo utilizado materiais de menor granulometria para nivelar e alisar a alvenaria, permitindo a aplicação de camadas decorativas de argamassa ou pintura (ABCP, 2002).

Figura 2 - Aplicação dos Tipos de Argamassa



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (2002).

Conforme a aplicação da argamassa, varia-se a proporção dos constituintes. O cimento atua como aglomerante que possui a propriedade de manter unidas as partículas da argamassa. Para aumentar a plasticidade da argamassa e melhorar a retenção de água e ampliar a extensão da aderência ao substrato é utilizado cal hidratada ou plastificantes comerciais. A areia é o agregado inerte, que é mantido unido pelo aglomerante (KALIL; LEGGERINI; BONACHESKI, 2007).

As argamassas se diferenciam do concreto pelo tamanho dos agregados que são miúdos como a areia nas argamassas, sendo que no concreto estão partículas maiores, como a brita (CALLISTER, 2014).

Nas seções seguintes as características específicas do cimento, da areia e da água são apresentadas, bem como suas respectivas influências na composição da argamassa e nas suas propriedades físicas e mecânicas.

2.2.1 Cimento

Os cimentos mais comuns e mais consumidos no mundo são do tipo Portland. A Norma 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 um ligante hidráulico e é identificado 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 porque reagem mais lentamente, absorvendo melhor as pequenas deformações (NEVILLE; BROOKS, 2010). Os principais compostos químicos do cimento Portland são silicatos, aluminatos e ferroaluminatos, que possuem uma nomenclatura específica, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do Cimento Portland

Nome do composto	Nomenclatura	Composição química	Abreviação
Silicato tricálcico	Hatrurita	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	Larnita	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	Etteringita	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminossilicato tetracálcico	Brownmillerita	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4FA

Fonte: adaptado Neville; Brooks (2010).

Silicatos são compostos anidros. Na presença de água a reação começa pelo aluminato tricálcico, que apesar de iniciar a reação, contribui muito pouco para a resistência mecânica do cimento em relação aos silicatos e não aumenta, de forma significativa, sua resistência mesmo em idades mais avançadas. Em seguida reage o silicato tricálcico, que é o componente que mais produz resistência mecânica em idades precoces. Aos 28 dias, a resistência do cimento se deve basicamente a esse componente. Os silicatos dicálcicos reagem mais tarde e contribuem para uma evolução mais lenta na resistência, porém atingem altos valores em idades mais avançadas (BAUER, 2000).

O aumento da resistência mecânica é favorecido pelo consumo de cimento, pois a argamassa apresenta menor porosidade e maior fator de empacotamento. O cimento juntamente com a água funciona como lubrificante das partículas de agregado. Em formulações com menor teor de aglomerante o contato entre as partículas de agregado é maior, resultando no aumento da demanda de água (VENÂNCIO, 2008).

A composição do Cimento Portland (Tabela 2), varia entre 15 e 50% em massa de pozolana. De acordo com a norma ABNT NBR 5736 (2018), esse material confere maior impermeabilidade ao ataque de sulfatos e maior resistência mecânica em idades avançadas de cura.

Tabela 2 - Composição Química do Cimento Portland

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

Fonte: adaptado Itambé Cimentos (2023).

As pozolanas são definidas, pela norma ABNT NBR 5736 (2015), como materiais silicosos ou silicoaluminosos que finamente divididos e hidratados, reagem com o hidróxido de cálcio do concreto para formar compostos cimentícios. Estes materiais precisam ser formados majoritariamente ($\geq 70\%$) por sílica, alumina, óxido

de ferro. Por sua microporosidade e maior área superficial demandam mais água em formulações de concreto e argamassa.

O mecanismo da reação pozolânica que ocorre com o hidróxido de cálcio para formar silicato de cálcio hidratado e aluminossilicato de cálcio hidratado, é lento com baixa taxa de liberação de calor e ganho vagaroso de resistência no concreto comparado com cimentos sem a adição destes materiais, sendo que a resistência mecânica final costuma se igualar ou até aumentar, uma vez que terá baixa porosidade no estado endurecido, conferindo menor permeabilidade e resistência em ambientes ácidos (MINATTO, 2012).

2.2.2 Areia

A areia é o agregado inerte, que é mantido unido pelo aglomerante (KALIL; LEGGERINI; BONACHESKI, 2007). As especificações técnicas de preparo de argamassa para revestimento, indicam a proporção em volume de 1:2:8-9 (cimento, cal e areia) utilizadas tanto externa quanto internamente. Contudo, Ferreira (2010) identificou que 87% de edificações vistoriadas apresentam fissuras no revestimento da argamassa e que a sua composição traço é 1:2:5 (cimento, cal e areia, em volume).

A areia atua na argamassa preenchendo os espaços vazios entre o cimento e a cal. Quando se utiliza uma areia de granulometria menor, a proporção está usualmente em 2,5 vezes a soma dos volumes. Mas quando a granulometria da areia é maior, a proporção indicada é de 3 vezes a soma dos volumes de cimento e cal (FERREIRA, 2010).

Resende (2010) destaca que a presença de impurezas orgânicas húmicas e argila na areia contribuem para uma diminuição da massa unitária de areia, sendo que quanto maior for a massa unitária de areia, maior será a resistência mecânica e menor o consumo de cimento. Além do mais, as areias contaminadas por matéria orgânica e efluentes industriais pode promover maior incorporação de ar na argamassa.

As areias com maior granulometria tendem a aumentar a resistência à compressão enquanto aquelas que só possuem partículas menores formam argamassas com maior aderência (KALIL; LEGGERINI; BONACHESKI, 2007). Uma

formulação composta pela mistura de areia grossa e fina apresenta significativa melhora no desempenho nos ensaios de resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade (VENÂNCIO, 2008).

Dentre os tipos de areia utilizada destacam-se a areia natural e a areia artificial, oriunda de miúdos da britagem. Em um estudo realizado por Kudo (2012), identificou-se que partículas de diâmetro de 0,15 mm de areia natural possuem maior valor de esferecidade, quando comparado com a areia artificial. A areia artificial possui partículas alongadas e rugosas. Já a areia natural possui partículas mais redondas e sem cantos. Por isso, a mistura com areia artificial produz uma argamassa menos densa. Em razão das partículas serem alongadas e rugosas, não haverá o máximo de empacotamento. Ocorre, ainda, a tendência de dificultar o fluxo pelo embricamento das partículas, uma vez que, quanto maior a irregularidade da partícula, maior será a viscosidade, devido à fricção entre as partículas que surgem a partir de superfícies irregulares (KUDO, 2012).

Quanto maior a uniformidade da areia utilizada, maior o volume de vazios entre os grãos. Ao se misturar uma areia de granulometria fina e grossa diminui-se a proporção de vazios, pela melhora da distribuição granulométrica. Assim, promove o aumento da área específica e o aumento da retenção de água na matriz, favorecendo um processo de secagem mais lento da argamassa (VENÂNCIO, 2008).

A fração dos finos mostrou-se importante na composição de uma argamassa, pois contribui na redução da 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 (KUDO, 2012).

Efeito similar foi observado por Ledesma *et al.* (2015) ao incorporar agregados moídos oriundos de alvenaria, para substituir parcialmente a areia natural, na formulação de uma argamassa de 1:5 de cimento e agregado. A densidade da argamassa no estado fresco e endurecido diminuiu ao aumentar o percentual de areia reciclada. Isto porque esta última possui menor densidade a seco que a areia natural, influenciando na diminuição da resistência à compressão em percentuais de substituição superiores a 25%, na argamassa com 28 dias de

cura, sendo que a absorção de água também foi superior, resultando em uma maior retração nos corpos de prova.

A composição química do agregado influencia o desempenho de argamassas com alto teor de resíduos cerâmicos. As argamassas preparadas com agregados siliciosos (quartzo) apresentaram propriedades mecânicas ruins. Já as argamassas preparadas com agregados calcários tiveram seu desempenho ótimo ligado à temperatura de cura de 65°C. 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 siliciosos, proporcionando maior superfície de contato com a pasta. Os minerais de quartzo, ao reagir com o cimento, são quimicamente mais estáveis do que os calcários (REIG; *et al.*, 2017).

A substituição de 20% de areia por agregados finos oriundos de tijolos em uma formulação de argamassa 1:4 (cimento e areia parcialmente substituída por pó de tijolo), apresentou resistência à flexão e compressão cerca de 12% maior, e 16% menor incorporação de água na matriz. Os efeitos nas propriedades são atribuídos a uma melhor distribuição granulométrica e a ação pozolânica que a cerâmica vermelha apresenta (SILVA; DE BRITO; VEIGA, 2010).

Na revisão de Cabral *et al.* (2010), a substituição de agregados graúdos produz um efeito maior do que a substituição de finos em uma formulação de argamassa. Na maioria dos casos, a substituição dos agregados naturais por reciclados reduz a resistência, com exceção dos agregados finos de tijolo. Estes, por seu efeito pozolânico, melhoram a zona de transição interfacial entre a pasta de argamassa e os agregados constituintes de partículas rugosas que fornecem maior ligação entre os constituintes.

2.2.3 Água

A água controla a fluidez da mistura, sua alteração influencia na trabalhabilidade das argamassas. A demanda de água no preparo da argamassa é fortemente influenciada pela distribuição granulométrica dos agregados. Quanto mais grossa for a areia maior será a necessidade de água. Quando partículas mais finas são adicionadas percebe-se uma melhora na trabalhabilidade da massa (VENÂNCIO, 2008).

A areia artificial possui maior área de superfície específica e possui uma superfície irregular, aumentando a necessidade de inclusão de água na argamassa. As argamassas preparadas com areia artificial, conforme relatado por Kudo (2012), incorporaram 23,5% de água, sendo que a formulação com areia natural se adicionou 21,5% de água, já que as partículas arredondadas, encontradas em agregados naturais facilitam o fluxo, pois diminuem a viscosidade plástica (KUDO, 2012).

A adição de água nem sempre melhora a trabalhabilidade da argamassa, pois, a partir de certo teor, percebe-se a tendência à sedimentação dos sólidos (VENÂNCIO, 2008).

A taxa de incorporação de ar na argamassa influencia de forma inversa a taxa de absorção de água. Quanto maior for a incorporação de ar, menor será a absorção de água, pois os interstícios estão preenchidos de ar, limitando a incorporação de água na mistura (RESENDE, 2010).

2.3 RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA EM ARGAMASSA

Um dos mais antigos materiais de engenharia são os cerâmicos. De forma geral, as cerâmicas tradicionais são obtidas a partir de argilominerais e areia. Esta combinação forma materiais ambientalmente duráveis, quimicamente estáveis, resistentes a altas temperaturas, mas frágeis (CALLISTER, 2014).

O cimento e concreto também são classificados como materiais cerâmicos, mas são compostos por silicatos de cálcio, enquanto que as cerâmicas tradicionais são formulados por diferentes tipos de argila.

As argilas são aluminossilicatos compostos por alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2) que contêm água quimicamente ligada. Um estudo de caracterização das argilas da Região do Vale do Caí – RS (Tabela 3), realizada por Zorzi *et al.* (2012), constatou predominância de caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Tabela 3 - Composição química de argilas da Região do Vale do Caí – RS

Composição Química (%)						
	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	K₂O	MgO
Média Amostragem 1	45,5	27,6	12,3	0,0	0,1	0,2
Média Amostragem 2	57,6	15,4	14,5	0,2	0,5	0,4
Média Amostragem 3	54,8	16,6	11,8	1,1	1,0	1,1

Fonte: adaptado Zorzi et al. (2012)

A mistura de argila e água permite que a massa formada seja plástica, moldável e conformada em produtos como tijolos, telhas e azulejos, mantendo sua forma durante o manuseio e secagem (CALLISTER, 2014).

O processo de conformação mais comum de tijolos é a extrusão, na qual uma massa cerâmica plástica rígida é forçada através do orifício de uma matriz que apresenta a geometria de seção transversal desejada (CALLISTER, 2014).

O processo de secagem visa a remoção da água pela difusão das moléculas para a superfície do material, na qual ocorre a evaporação. E, assim, ocorre a contração da peça, pois a separação entre as partículas diminui. Se a taxa de evaporação for maior que a taxa de difusão é provável a formação de defeitos como bolhas, trincas e rachaduras. Logo, parâmetros como temperatura de secagem, umidade e taxa de escoamento do ar são importantes durante a etapa de secagem do material (CALLISTER, 2014).

A porosidade de cerâmicas tradicionais é diminuída durante o processo de queima, que ocorre em temperaturas em torno de 900°C em materiais como tijolos. Esse processo permite a vitrificação e controla características como a resistência, a durabilidade e a massa específica (CALLISTER, 2014).

Um estudo realizado por Araújo (2017), permitiu verificar as propriedades pozolânicas de resíduos oriundos da produção de telhas. Materiais pozolânicos, de acordo com a norma NBR 12653 (2015), contêm substâncias sílicas e sílicoaluminosas, que ao estarem na forma de partículas finas e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio e, assim, adquirem propriedades cimentícias.

A substituição parcial de cimento por resíduos de cerâmica vermelha, em percentuais de 10 a 20% demonstraram melhoria nos testes de resistência de tração na flexão e na compressão axial da argamassa em uma formulação de 1:1:6 (traço em volume de cimento, cal e areia grossa) e a utilização de plastificante. Porém, as argamassas com resíduos de cerâmica vermelha apresentaram maior capacidade de deformação, em razão da maior absorção de água por capilaridade (ARAÚJO, 2017).

2.3.1 Geopolímero

O geopolímero é caracterizado pela utilização de matéria-prima rica em sílica e alumina, tendo seu processo de polimerização ativado com o uso de soluções de álcalis (WONG *et al.*, 2020). Dentre as matérias primas mais utilizadas destacam-se a argila, assim como materiais cerâmicos que utilizam a argila em suas formulações, como tijolos, telhas e porcelanas.

Atualmente, telhas e tijolos têm sido amplamente utilizados para a produção de pastas geopoliméricas (WONG *et al.*, 2020), uma vez que permitem reutilizar estes materiais rejeitados em seu processo de produção ou na construção civil, diminuindo seu acúmulo e destinação inadequada (XUE *et al.*, 2021). Estima-se que a substituição parcial entre 10% a 20% de Cimento Portland por resíduos de tijolos possui o potencial de reduzir até 10% das emissões de CO₂ da indústria cimenteira brasileira, se essa prática fosse totalmente implementada (TOLEDO FILHO *et al.*, 2007).

Apesar dos estudos da reutilização de resíduos de cerâmica vermelha terem ganhado maior ênfase a partir das menções do Protocolo de Kyoto (1997) e com a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010), a utilização destes materiais pozolânicos como agregados em argamassas de cal e concreto era prática comum na construção civil no passado (TORRES; MATIAS; FARIA, 2020).

Nas argilas ao serem calcinadas, ocorre a desidroxilação da caulinita e a transformação dos cristais de sílica e alumina em estruturas amorfas (HOPPE FILHO *et al.*, 2021). Assim, cerâmicas vermelhas sinterizadas acima de 800°C (AMERI *et al.*, 2019), quando hidratadas agem como pozolanas, com o hidróxido de cálcio formando um gel de aluminato de cálcio hidratado, que tornam a matriz da

argamassa mais densa, pois preenche os espaços, reduzindo a porosidade e a tendência a fissuras (SAMADI *et al.*, 2020).

O tamanho de partícula do tijolo em dimensões menores que 45 μm (HOPPE FILHO *et al.*, 2021) estimulam a atividade pozolânica, por haver maior superfície de contato para reagir (GRELLIER *et al.*, 2021). Quando comparados com finos maiores, as argamassas tendem a retrair mais pela maior difusão de umidade, volume de poros (POMMER *et al.*, 2021) e, assim, menor fator de empacotamento da matriz, reduzindo a resistência mecânica (XUE *et al.*, 2021).

As argamassas incorporadas com tijolos caracterizam-se como fluidos com elevadas tensões de escoamento e viscosidade, por isso, absorvem maior teor de água para serem trabalháveis (VYŠVAŘIL; VEJMEJKOVÁ; ROVNANÍKOVÁ, 2018). A fim de diminuir essa resistência, o emprego de álcalis, dissolve a parte cristalina dos minerais argilosos, formando um geopolímero (ROVNANÍK *et al.*, 2018), que necessita de menor percentual de água para hidratação da argamassa (REIG *et al.*, 2013). Além do mais, é possível incorporar maiores frações de cerâmicas vermelhas sinterizadas mediante ativação com NaOH e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ em concentrações superiores a 5 mol/L, resultando, inclusive, aumento da resistência à compressão (REIG *et al.*, 2013). Contudo, elevadas concentrações de sódio podem favorecer reações de carbonatação, visualizadas na argamassa como eflorescência (BONILLA *et al.*, 2021).

Dobias e Pokorny (2017) compararam a atividade pozolânica dos tijolos com caráter ácido (teor de $\text{SiO}_2=73,64\%$) e alcalino (teor de $\text{CaO}= 6,92\%$), também para uma composição traço de 1:3:0,50, com substituição parcial do cimento Portland por finos de tijolos (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores de Resistência à compressão

Resistência à compressão (MPa)		
Argamassa	Resíduo com elevado teor SiO₂	Resíduo com elevado teor CaO
10% tijolo	16,0	15,8
20% tijolo	16,5	14,0
30% tijolo	12,8	12,5
40% tijolo	11,8	11,0

Fonte: adaptado Dobias; Pokorny (2017)

O estudo concluiu que a argamassa que possuía resíduos de cerâmica vermelha com maiores teores de sílica apresentava melhor desempenho mecânico, principalmente em temperaturas de cura elevadas. Reig *et al.* (2017) atribuem que as partículas siliciosas são mais inertes e, por isso, o aumento de temperatura favorece as reações químicas. Quando comparadas com a superfície mais rugosa e porosa das partículas de calcário, percebe-se a cristalização e dissolução parcial do agregado e a difusão do cálcio. Dobias e Pokorny (2017) perceberam que a substituição por 10% de tijolo diminui a porosidade da argamassa, mas o efeito inverso é observado com 40% de tijolos.

O aumento na temperatura de cura das pastas de argamassa corrobora para a eficiência da reação de geopolimerização. Nos testes (REIG *et al.*, 2017), as argamassas curadas por 28 dias a 20°C apresentaram resistência à compressão entre 5 e 12 MPa, enquanto as amostras curadas a 65°C, após 7 dias de cura, apresentaram 25 a 40 MPa de resistência mecânica. A análise de amostras de geopolímeros curadas, por 7 dias, a 65°C e 80°C não apresentam significativas diferenças na resistência à compressão, em média 37 MPa (SILVA; *et al.*, 2019). Ao se elevar a temperatura para 90°C, durante 5 dias, utilizando a razão de 1,6 de SiO₂/Na₂O para 10% em massa de aglutinante, resultou em 36,2 MPa de resistência à compressão (TUYAN; ANDIÇ-ÇAKIR; RAMYAR, 2018). No entanto, em temperaturas de cura à 95°C, notou-se uma rápida evaporação de água, inibindo as

reações de polimerização após 3 dias, resultando na mudança do comportamento dos modos de falhas dúctil para frágil, pois os geopolímeros a base de cerâmica vermelha precisa de maior tempo para reagir e, assim, melhorar as propriedades mecânicas (SILVA; *et al.*, 2019).

2.4 CARVÃO VEGETAL

O fogo foi a primeira fonte energética utilizada intencionalmente pelo homem. Desde a Era Paleolítica há registros de sua utilização, evoluindo a técnica de sua produção, manutenção através de fogueiras e o uso de resinas para que não apagassem tão facilmente (MUSITANO, 2021). Pela sua disponibilidade, a madeira passou a ser a matéria-prima mais utilizada. No entanto, o homem primitivo percebeu que a madeira carbonizada não gerava chama e menos fumaça, porém fornecia calor controlável, assim os pedaços pretos e friáveis de madeira, denominados carvão vegetal, passaram a ser utilizados como combustível (BERNARDINI, 2020; SANTOS, HATAKEYAMA, 2012).

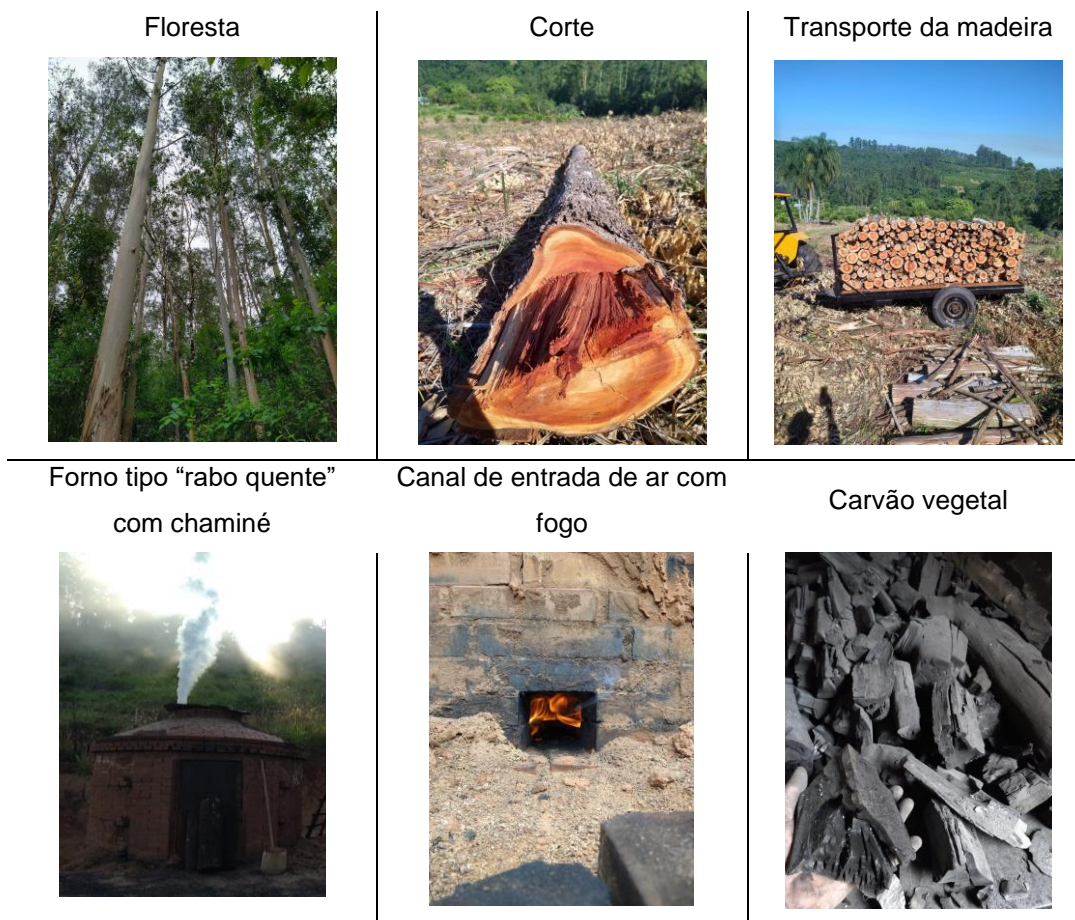
Mundialmente, o continente africano é o maior produtor de carvão vegetal, tendo seu principal uso destinado para suprimento energético básico (SANTOS, (HATAKEYAMA, 2012). Por ser uma fonte renovável de energia, substitui as de origem fósseis, sendo utilizado como redutor na indústria siderúrgica, em razão de seu elevado grau de pureza em relação ao carvão mineral, com baixos traços de enxofre e cinzas (FROEHLICH, MOURA, 2014), diminuindo, assim, os gases geradores do efeito estufa (GEE) (BERNARDINI, 2020). O Brasil produziu 6,8 milhões de toneladas, correspondendo a 12% da produção mundial, em 2021. Do volume nacional, o estado de Minas Gerais é o maior contribuinte, sendo que o Rio Grande do Sul participou com 1,1% da produção, correspondendo a 46% do quantitativo da região Sul do Brasil (AGEFLOR, 2022), destes 60% são oriundos da Região do Vale do Caí – RS (APECÁVE, 2018), sendo o município de Brochier a capital do carvão vegetal no Estado (BROCHIER, 2003).

A produção de carvão vegetal do Rio Grande do Sul é predominantemente 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 (61,3%) e eucalipto (38,7%) (AGEFLOR, 2022).

2.4.1 Processo de Carbonização do Carvão Vegetal

A técnica de produção de carvão vegetal (Figura 3) é passada por gerações, consistindo em um forno de alvenaria do tipo “rabo quente” acoplado-se uma chaminé para a saída dos gases da combustão. Sendo que a lenha, com idade em torno de 7 anos e com 20 a 30% de umidade, é inserida em duas camadas, a inferior na posição horizontal e a superior na posição vertical. Na sequência, a porta metálica é fechada e o acendimento do fogo é feito pelo topo do forno, a fim de ocorrer a secagem e o início da decomposição térmica da madeira em temperaturas de até 200°C. Após 12 horas do acendimento da chama fecha-se os canais de entrada de ar com tijolo e barro, de acordo com a sinalização da presença de chama. 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; APECAVE, 2018; SANTOS, HATAKEYAMA, 2012). Todo esse ciclo de queima varia de 4 a 7 dias, dependendo da capacidade do forno, havendo tamanhos que comportam de 6 a 10 metros cúbicos de lenha. Quando todas as entradas de ar estiverem fechadas para impedir a entrada de oxigênio, extingue-se o fogo, iniciando-se o ciclo de resfriamento até temperaturas em torno de 40°C e 50°C, que dura em torno de três dias (SANTOS, HATAKEYAMA, 2012). A descarga do forno é feita de forma manual, com auxílio de uma pá, ensacando-se o carvão para ser transportado à unidade de empacotamento, onde o carvão é previamente peneirado.

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).

Figura 3 – Produção do Carvão Vegetal

Fonte: Autoria própria.

2.4.2 Propriedades do Carvão Vegetal

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, 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.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

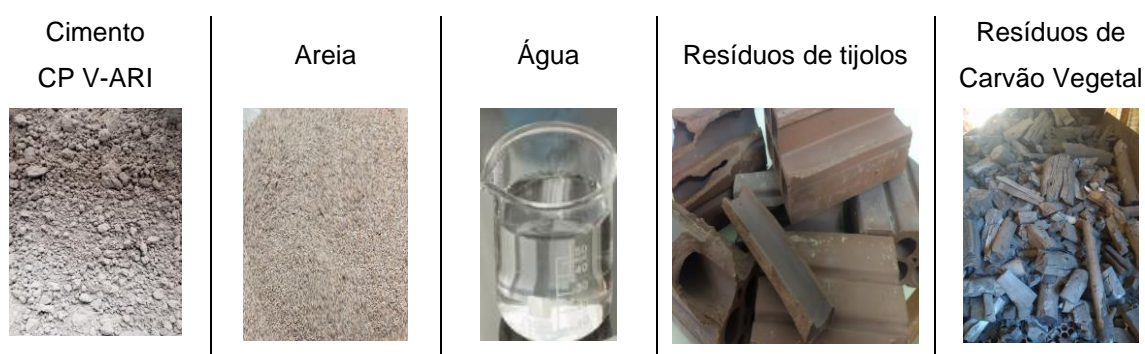
O presente estudo adota uma metodologia de pesquisa exploratória, descritiva e experimental de natureza qualitativa e quantitativa.

Neste capítulo serão apresentados os materiais, os métodos e os procedimentos adotados para o desenvolvimento do trabalho.

3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais selecionados para a formulação da argamassa são cimento, areia, água, finos de tijolo e carvão vegetal, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Matérias-primas utilizadas na formulação de argamassa



Fonte: Autoria própria.

O cimento utilizado foi do tipo Portland CP V-ARI, obtido junto a uma fábrica de pré-moldados de concreto. O tipo de cimento foi escolhido em função de não ter adição de material pozzolânico e ser um dos mais utilizados no preparo de argamassa, permitindo, assim, simular a aplicabilidade das formulações propostas.

A areia é procedente do Rio Caí/RS, sendo utilizado frações classificadas como areia grossa, média e fina. Esta é rotineiramente utilizada em argamassas para revestimentos como reboco.

A água utilizada no preparo das formulações e na cura dos corpos de prova, foi previamente destilada conforme recomendação da norma ABNT NBR 5752 (2014).

O tijolo do tipo 6 furos foi fabricado em uma olaria na cidade de Bom Princípio/RS. Estes tijolos foram danificados durante o processo de transporte e armazenagem em uma loja de materiais de construção da cidade de São José do Sul/RS, onde foram coletados.

Os finos de carvão vegetal foram obtidos de uma propriedade rural de São José do Sul/RS, oriundos do peneiramento do material obtido da carbonização da acácia negra.

3.2 PREPARO DOS MATERIAIS

Os resíduos de tijolos (Figura 5) foram, primeiramente, triturados, com auxílio de um martelo e, na sequência moídos em moinho de bolas, para produção do material particulado. Em seguida, o material miúdo foi separado em peneira de mesh 325, de forma a selecionar as partículas menores que 45 μm , conforme requisito da norma ABNT NBR 12653 (2015) para utilização como material pozolânico.

Figura 5 - Preparo do tijolo utilizado na formulação de argamassa



Fonte: Autoria própria.

O carvão passou similarmente pelo processo (Figura 6), conforme preconizado na da norma ABNT NBR 12653 (2015) para utilização como material pozolânico, no qual o carvão coletado na propriedade rural foi moído em moinho de bolas e após separado na peneira de 325 mesh.

Figura 6 – Preparo dos finos de carvão vegetalResíduo de Carvão
vegetal

Moagem



Peneiramento

*Fonte: Autoria própria.*

A areia também foi preparada (Figura 7) conforme ABNT NBR 7214 (2015), procedendo-se a separação nas peneiras de mesh 6, 14, 30, 50 e 100, de forma a selecionar o material retido nas peneiras de 14, 30, 50 e 100 mesh, mediante a lavagem em água corrente, de forma a remover sujidades e contaminantes e, após secada na estufa (marca Biomatic) em temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 h. Obteve-se assim 4 tipos de areia separadas por sua granulometria.

Figura 7 - Processo de peneiramento da areiaAreia Grossa
(14 mesh)Areia Média Grossa
(30 mesh)Areia Média Fina
(50 mesh)Areia Fina
(100 mesh)*Fonte: Autoria própria.*

Os moldes para corpo de prova foram construídos utilizando cano de PVC de diâmetro de 50 mm. Este por sua vez foi cortado, em serra automática, em pedaços de 100 mm, de forma a atender os requisitos da norma ABNT NBR 7215

(2019). A fim de facilitar o processo de desmoldagem dos corpos de prova, o molde foi cortado ao meio e colado com fita isolante (Figura 8), os fundos do corpo de prova foram preparados reutilizando vasilhames de polietileno de alta densidade (PEAD).

Figura 8 - Construção do molde para corpo de prova cilíndrico



Fonte: Autoria própria.

3.3 PREPARO DA ARGAMASSA

O preparo das misturas de argamassas fundamentou-se na norma ABNT NBR 5752 (2014), a dosagem em massa dos insumos utilizados é apresentada na Tabela 5. Foram utilizadas 468 g de cada uma das quatro frações de areia de diferentes granulometrias, conforme Figura 7, totalizando o quantitativo expresso abaixo.

Tabela 5 - Formulações de Argamassa em Percentuais de Massa

Argamassa	Cimento CP V	Tijolo	Carvão Vegetal	Areia	Água
Referência	624 g	-	-	1872 g	300 g
AT25	468 g	156 g	-	1872 g	300 g
AC25	468 g	-	156 g	1872 g	300 g
ATC205	468 g	124,8 g	31,2 g	1872 g	300 g

ATC1510	468 g	93,6 g	62,4 g	1872 g	300 g
ATC1015	468 g	62,4 g	93,6 g	1872 g	300 g
ATC520	468 g	31,2 g	124,8 g	1872 g	300 g

Fonte: Autoria própria.

Convencionou-se denominar como amostras de referência aquelas em que não se adicionou tijolo e nem carvão vegetal. Como pode-se observar na Tabela 5, foram mantidas constantes a quantidade de areia e água, substituindo-se uma fração de 25% em massa de Cimento Portland, conforme recomendação da norma ABNT NBR 5752 (2014), por porções de resíduos de tijolo e carvão vegetal. A fim de facilitar a identificação das formulações, atribuiu-se abreviações, que são detalhadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Identificação das Formulações de Argamassa

Argamassa	Descrição
Referência	Formulação sem adição de resíduos de tijolo e carvão vegetal
AT25	Argamassa com adição de tijolo, substituindo 25% do Cimento Portland
AC25	Argamassa com adição de carvão vegetal, substituindo 25% do Cimento Portland
ATC205	Argamassa com substituição de 25% do Cimento Portland, sendo 20% de tijolo e 5% de carvão vegetal.
ATC1510	Argamassa com substituição de 25% do Cimento Portland, sendo 15% de tijolo e 10% de carvão vegetal.
ATC1015	Argamassa com substituição de 25% do Cimento Portland, sendo 10% de tijolo e 15% de carvão vegetal.
ATC520	Argamassa com substituição de 25% do Cimento Portland, sendo 5% de tijolo e 20% de carvão vegetal.

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, a dosagem de formulação foi de 1:3, traço em massa de aglomerante (cimento Portland, finos de tijolo e carvão vegetal) e agregado (areia). A razão de água para aglomerante utilizada foi 0,48.

Inicialmente, foi realizada a mistura das amostras de argamassa de referência, a qual foi dosado em uma balança semi-analítica: o cimento e as quatro frações de areia misturando-os a seco e, depois acrescentou-se a água, homogeneizando a mistura. A partir do ponto de consistência dessa argamassa (Figura 9), adicionou-se água nas demais formulações, de forma a obter trabalhabilidade similar das argamassas com substituição parcial do cimento Portland por tijolo e carvão vegetal particulado.

Figura 9 - Preparo da Argamassa: insumos misturados na argamassa de referência



Fonte: Autoria própria.

3.4 MOLDAGEM E SECAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem dos corpos de prova (Figura 10) seguiu a norma ABNT NBR 5752 (2014), na qual imediatamente após o preparo de cada formulação de argamassa, distribuiu-se a massa com auxílio de uma espátula, nos moldes, preenchendo-os em quatro camadas, onde para cada camada dava-se 30 golpes manualmente com soquete, a fim de adensar a mistura.

Figura 10 - Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

Os moldes foram acondicionados em uma bacia e levados a um tanque de água, sendo desmoldados após 24 horas, retirando-se a fita preta nas laterais e fundo do cilindro.

Conforme preconizado pela norma ABNT NBR 5752 (2014), os corpos de prova foram armazenados em um tanque fechado, imersos em água saturada de cal e em temperatura ambiente, por um período de 28 dias (Figura 11).

Figura 11 - Cura úmida dos corpos de prova com cal.



Fonte: Autoria própria.

3.5 AVALIAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DE ARGAMASSA

O cimento, os finos de tijolo e carvão tiveram a sua massa específica avaliada (3.5.1). Já a mistura de cimento com adição das proporções de finos de tijolo e carvão vegetal (Tabela 2) foram ensaiadas quanto ao potencial pozolânico (3.5.2) e sua atividade pozolânica (3.5.3).

Os corpos de prova das formulações de argamassa foram submetidos à análise visual (3.5.4) e a resistência à compressão (3.5.5) das amostras, aos 28 dias de cura.

Os procedimentos dos ensaios são detalhados a seguir.

3.5.1 Massa específica

A massa específica foi determinada a partir da variação de volume de um reagente insolúvel com as amostras testadas, o xilol e, se adicionou um quantitativo conhecido de cimento CPV-ARI, hidróxido de cálcio P.A. (cal) e as amostras de finos de tijolos e carvão preparadas no item 3.2. Optou-se por realizar o ensaio com um solvente que não reaja quimicamente com os materiais analisados, conforme sugerido pela norma NBR NM 23 (2000). Com o auxílio de um picnômetro e de uma balança, primeiramente, testou-se a densidade do xilol comparando-se a massa ocupada em um volume de 100 mL. A partir dos resultados obtidos, foi possível calcular a razão entre a massa e o volume (Equação 1).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

ρ = é a massa específica, em gramas por mililitros (g/mL).

m = é a massa de xilol, em gramas (g).

v = é o volume de xilol, em mililitros (mL).

O mesmo procedimento foi repetido em triplicata, mas adicionando-se uma massa conhecida das amostras e completando o picnômetro até a marca de 100 mL de xilol. A diferença entre a massa de xilol e amostra adicionada, pode-se determinar o volume que o material deslocou no picnômetro (Equação 2):

$$\beta = \frac{m_{amostra}}{(v - \beta_{xilol})} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

β = é a massa específica, em gramas por mililitros (g/mL).

$m_{amostra}$ = é a massa de amostra, em gramas (g).

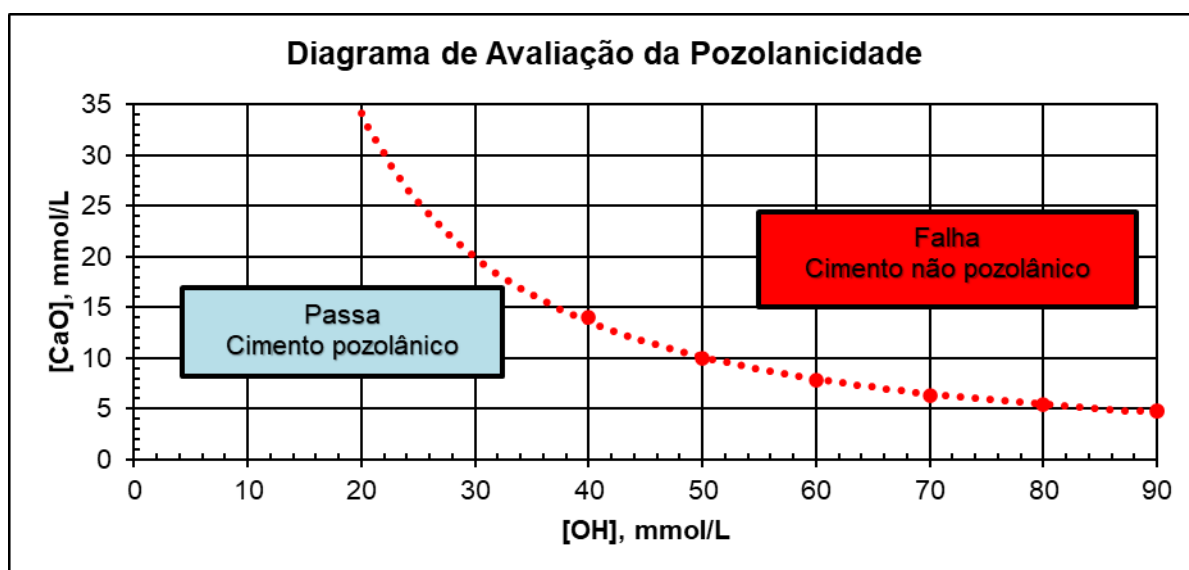
v = é o volume total, em mililitros (mL).

β_{xilol} = é a massa específica do xilol, em gramas por mililitros (g/mL).

3.5.2 Potencial pozolânico

De acordo com a norma ABNT NBR 5753 (2016), a pozolanicidade do cimento é definida pela saturação de uma solução alcalina por óxido de cálcio, neste sentido, o requisito de aptidão é mediante a concentração do íon cálcio seja menor que a concentração de saturação. A partir da Figura 12, é possível compreender que o cimento satisfaz a condição de pozolanicidade quando o ponto plotado no gráfico fica abaixo da curva de saturação.

Figura 12 – Diagrama de Avaliação da Pozolanidade



Fonte: Adaptado norma ABNT NBR 5753 (2016).

O ensaio foi realizado em triplicata, na qual para cada uma misturou-se 20g de amostra (Tabela 7) e 100 mL de água destilada e fervida, acondicionando-se em uma estufa a 40°C por 15 dias, testando-se as amostras aos 8 dias e, caso apresentasse falha no comportamento pozolânico, repetiu-se as análises aos 15 dias. (Figura 13).

Tabela 7 – Mistura das Amostras de Cimento

	Cimento CP V	Tijolo	Carvão Vegetal
Amostra 1	20 g	-	-
Amostra 2	-	20 g	-
Amostra 3	-	-	20 g
Amostra 4	15 g	5 g	-
Amostra 5	15 g	-	5 g
Amostra 6	15 g	3 g	2 g
Amostra 7	15 g	2 g	3 g
Amostra 8	15 g	4 g	1 g

Amostra 9	15 g	1 g	4 g
------------------	------	-----	-----

Fonte: Autoria própria.

A proporção das misturas de substituição do cimento Portland por 25% de finos de resíduos, segue a mesma da apresentada na Tabela 5, testando-se ainda o comportamento dos finos de tijolo (Amostra 2) e de carvão (Amostra 3) sem a presença do cimento CPV-ARI.

Figura 13 – Amostras de Cimento acondicionadas na estufa à 40°C



Fonte: Autoria própria.

Os aparelhos volumétricos foram previamente aferidos com água destilada. Os reagentes utilizados no preparo das soluções eram de qualidade analítica e seguiram o disposto pela norma ABNT NBR 5753 (2016).

A determinação de álcalis livres $[OH^-]$ consistiu na utilização de uma alíquota de 20 mL do filtrado à vácuo das amostras da Figura 13 para titular com ácido clorídrico 0,1 mol/L, na presença de 5 gotas do indicador alaranjado de metila, constatando-se o ponto de viragem na mudança de coloração amarela para laranja (Figura 14).

Figura 14 – Ensaio de titulação de álcalis livres: amostras antes e após o ponto de viragem



Fonte: Autoria própria.

O cálculo da concentração de íons hidroxila seguiu a Equação 3:

$$[OH^-] = \frac{1000 \times 0,1 \times V_1 \times f_1}{20} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$[OH^-]$ = é a concentração de íons hidroxila, em milimol por litro (mmol/L).

V_1 = volume de ácido clorídrico 0,1 mol/L gasto na titulação, em mililitros (mL).

f_1 = é o fator de correção da concentração de ácido clorídrico 0,1 mol/L.

20 = é a alíquota de amostra utilizada, em mililitros (mL).

A determinação da concentração de óxido de cálcio partiu da amostra titulada, na qual a mesma teve seu pH ajustado, com auxílio de um pHmetro, para 12,8. A solução foi titulada com EDTA (sal dissódico di-hidratado de ácido etilenodiaminotetraacético) 0,01 mol/L na presença do indicador de murexida (purpurato de amônio). A alteração de cor vermelha para violeta (Figura 15) indicou o ponto final da titulação.

Figura 15 – Ensaio de titulação de determinação de CaO: amostras com ajuste de pH, adição de murexida e após o ponto de viragem



Fonte: Autoria própria

O cálculo da concentração de óxido de cálcio seguiu a Equação 4:

$$[CaO] = \frac{1000 \times 0,01 \times V_2 \times f_2}{20} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$[CaO]$ = é a concentração de óxido de cálcio, em milimol por litro (mmol/L).

V_2 = volume de EDTA 0,01 mol/L gasto na titulação, em mililitros (mL).

f_2 = é o fator de correção da concentração de EDTA 0,01 mol/L.

20 = é a alíquota de amostra utilizada, em mililitros (mL).

3.5.3 Atividade pozolânica

A atividade pozolânica dos finos de tijolo e carvão vegetal em argamassa foi avaliada mediante o consumo de hidróxido de cálcio por um período de sete dias. O ganho de resistência mecânica é um indicativo da formação de silicatos e aluminossilicatos de cálcio hidratado e, portanto, de reatividade pozolânica.

O preparo das misturas de argamassas fundamentou-se na norma ABNT NBR 5751 (2015), na qual a dosagem em massa dos insumos utilizados é apresentada na Tabela 8. Foram utilizadas 234 g de cada uma das quatro frações de areia de diferentes granulometrias, conforme Figura 7, totalizando o quantitativo expresso abaixo.

Tabela 8 - Formulações de Argamassa com Cal

Argamassa	Hidróxido de Cálcio (P.A.)	Tijolo	Carvão Vegetal	Areia	Água
Tijolo	109,47 g	$m(g) = 2x \frac{\hat{\rho}_{\text{tijolo}}}{\hat{\rho}_{\text{cal}}} x 104$	-	936 g	Ver 3.3
Carvão Vegetal	109,47 g		$m(g) = 2x \frac{\hat{\rho}_{\text{tijolo}}}{\hat{\rho}_{\text{cal}}} x 104$	936 g	Ver 3.3

Fonte: Autoria própria.

A determinação da massa específica dos finos de tijolos, carvão vegetal e do reagente de hidróxido de cálcio seguiu o procedimento descrito em 3.5.1. A massa de água destilada empregada nas formulações partiu da análise do ponto de consistência adquirido no preparo das argamassas com cimento Portland, apresentado anteriormente no item 3.3. O processo de moldagem dos corpos de prova foi o mesmo empregado em 3.4. A cura dos corpos de prova foi realizada dentro dos moldes, sendo que nas primeiras 24h, a secagem foi em temperatura ambiente e pelas 144h seguintes foi à temperatura de 55°C, na estufa. A fim de preservar a umidade, os moldes foram envolvidos em papel alumínio.

A desmoldagem das amostras ocorreu após 2h de sua retirada da estufa, conforme recomendação da norma ABNT NBR 5751 (2015). O preparo dos corpos de prova, assim como o ensaio de resistência mecânica, foi o mesmo utilizado para

as formulações de argamassa com cimento Portland (Tabela 5), sendo os procedimentos detalhados no item 3.5.5.

3.5.4 Análise visual

Utilizou-se a análise visual como critério para a determinação da trabalhabilidade da argamassa e, conseqüentemente, a necessidade de adição de água nas formulações de argamassa com finos de tijolos e carvão vegetal.

Após a desmoldagem e o período de cura, foi realizada a avaliação visual da modificação de cor dos corpos de prova, uniformidade da coloração e a verificação da existência de eflorescência, bem como o aparecimento de poros superficiais nas amostras, devido a adição de finos de tijolos e carvão vegetal nas formulações de argamassa.

Analisou-se também, mediante simples manuseio, se as amostras eram frágeis e apresentavam tendência à quebra e esfarelamento das bordas e camadas superficiais.

3.5.5 Resistência mecânica à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em seis corpos de prova de cada formulação. Antecedendo o ensaio, conforme a norma ABNT NBR 5738 (2016), foi realizado o preparo das bases do corpo de prova, mediante retificação (Figura 16). Ademais, foi avaliado, com auxílio de um paquímetro, o diâmetro dos corpos de prova submetidos ao ensaio.

Figura 16 - Retificação do topo e base dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

Os testes foram realizados em uma máquina de ensaio universal (Figura 17) com capacidade máxima de compressão de 250 N, marca Quantec, disponível no Laboratório de Metrologia do IFRS - *Campus* Farroupilha.

Figura 17 – Máquina de Ensaio Universal



Fonte: Autoria própria.

O cálculo da resistência à compressão utilizou a Equação 5, apresentada na norma ABNT NBR 5739 (2018).

$$F_c = \frac{4 F}{\pi \times D^2} \quad (\text{Equação 5})$$

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 partir dos resultados de resistência à compressão é possível estimar o índice de desempenho do material pozolânico das formulações propostas na Tabela 5. Este índice expressa a razão entre a resistência média a compressão da argamassa com o material pozolânico com a argamassa de referência, conforme Equação 6 adaptada da norma ABNT NBR 5752 (2014).

$$I_{cimento} = \frac{f_p}{f_r} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$I_{cimento}$ = é o índice de desempenho com cimento Portland, aos 28 dias, expresso em %;

f_p = é a resistência à compressão médio dos corpos de prova com adição de tijolo particulado, em MPa;

f_r = é a resistência média à compressão dos corpos de prova de referência (sem adição de tijolo), em MPa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, assim como, a análise estatística dos dados. E, ainda, a repercussão do presente estudo em comparação com pesquisas similares.

4.1 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica do cimento Portland CPV-ARI, dos finos de tijolos e carvão vegetal, com tamanho de partícula menor que 45 μm , são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Massa específica

	Massa específica (g/cm³)
Cimento Portland CPV-ARI	3,0
Finos de Tijolo	2,10
Finos de Carvão Vegetal	0,48
Hidróxido de cálcio P.A. (cal)	0,40

Fonte: dados obtidos experimentalmente.

A massa específica dos materiais tem relação com a composição química dos aglomerantes, os resultados corroboram com os ensaios realizados em outros estudos (GONÇALVES, *et al.*, 2009; ALEXANDRE *et al.*, 2014, DELATORRE, *et al.*, 2020). O cimento Portland é composto majoritariamente por óxido de cálcio e o tijolo por óxido de silício, resultando, assim, em diferenças da massa específica, que é menor para as cerâmicas vermelhas e, principalmente, para os finos de carvão vegetal.

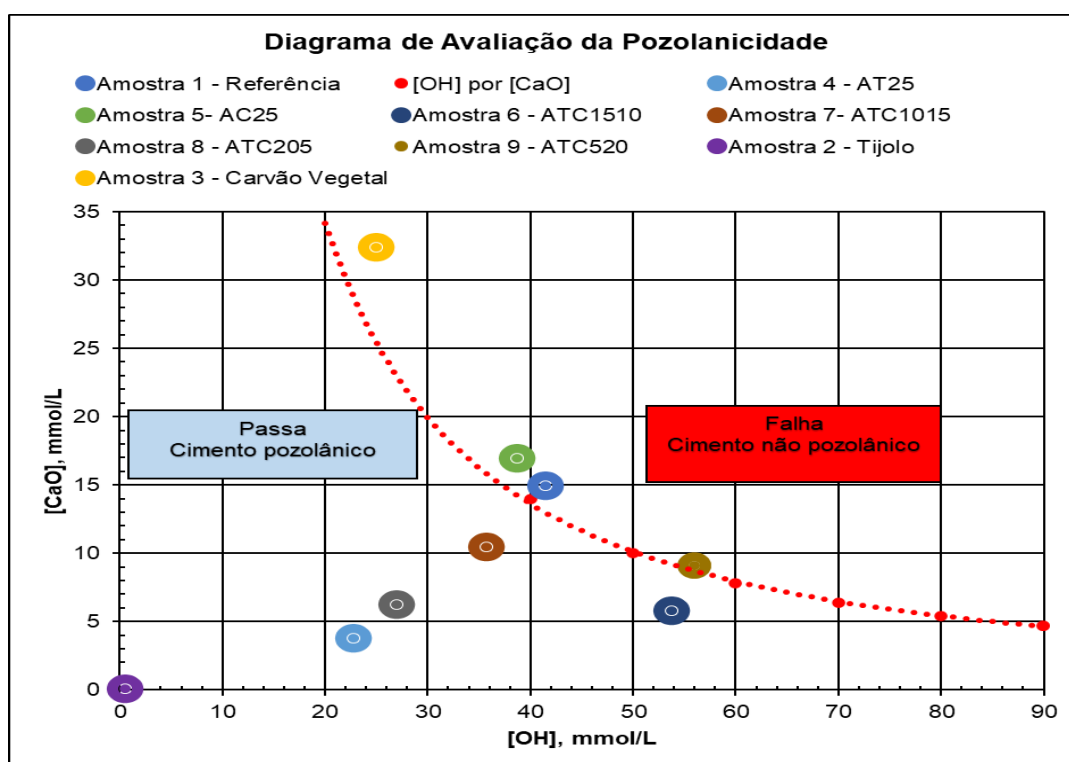
Desta forma, ao se substituir o cimento Portland por finos de tijolos e carvão vegetal haverá uma diminuição densidade da argamassa, proporcionalmente ao teor adicionado, tanto no estágio inicial ou final de cura. Porém, há maior quantidade de

partículas presentes ao se adicionar material cerâmico, resultando, em maior área superficial, por isso, a necessidade maior de água para conferir a lubrificação necessária para ocorrer a interação na pasta e promover as ligações secundárias de polimerização na pasta de argamassa (SZELAG; *et al.*, 2021).

4.2 POTENCIAL POZOLÂNICO DO CIMENTO

A avaliação da pozolacidade das misturas cimentícias utilizadas nas formulações de argamassa da Tabela 5 é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Diagrama de avaliação do potencial pozolânico do cimento



Fonte: Dados obtidos experimentalmente.

As Amostra 2, Amostra 4, Amostra 6, Amostra 7 e Amostra 8, que tinham em sua composição finos de tijolos, apresentam-se aptas a serem classificadas como cimentos pozolânicos. No entanto, é perceptível que a Amostra 1 falhou neste comportamento, pois o cimento CPV-ARI não possui a adição destes materiais. O mesmo ocorre para a Amostra 3, por isso, é possível afirmar que os finos de carvão

vegetal não atuam como pozolanas em uma argamassa, uma vez que, um material pozolânico precisa ter ao menos 70% dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , de acordo com a norma ABNT NBR 12653 (2015). O carvão vegetal não se enquadra como pozolana pois o óxido de ferro é visto como um contaminante no material, de acordo com o estudo de Bernardini, *et al.* (2020). Logo, a Amostra 5 também falhou no teste, pois havia em sua composição cimento CPV-ARI e carvão vegetal.

Já Amostra 9 ficou sob a curva entre as concentrações de $[\text{OH}^-]$ por $[\text{CaO}]$, pois nesta mistura havia uma pequena fração (5%) de finos de tijolos, que apesar de apresentar ação pozolânica seu potencial foi de baixo impacto. Esse efeito foi analisado por Szelag *et al.* (2021), onde em incorporações de até 5% de tijolos não se constata a ação pozolânica, mesmo que se denote a diminuição da densidade e área específica da argamassa resultante, nestes casos, as partículas atuam como *filler* na estrutura.

4.3 ATIVIDADE POZOLÂNICA

A avaliação da reatividade com cal dos finos de carvão vegetal e tijolo após 7 dias de cura, sendo que por 6 dias as amostras estavam na estufa a $55\text{ }^\circ\text{C}$, a fim de catalisar a reação pozolânica, demonstraram que os finos de cerâmica vermelha se comportaram como pozolanas, uma vez que apresentaram 4 MPa de resistência mecânica à compressão, enquanto que os corpos de prova de carvão vegetal tiveram um desempenho de 0,14 MPa.

Figura 19 – Avaliação da reatividade dos finos de carvão vegetal com cal



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 19 é possível perceber a fragilidade das amostras de argamassa de carvão vegetal, que ao serem desmoldadas já se esfarelavam, apresentando em sua estrutura finos que não reagiram, apesar de preservarem umidade, diferentemente dos corpos de prova formulados com resíduos de tijolos, na qual a matriz era uma estrutura compactada e seca.

Os resultados corroboram com os ensaios de potencial pozolânico do cimento (4.2), na qual as amostras com maiores frações de carvão vegetal demonstraram baixa interação química com o cimento Portland, como também, com a cal. Neste caso, estas partículas atuaram com maior ênfase no micropreenchimento físico da estrutura (SZELAG; *et al.* 2021).

4.4 TRABALHABILIDADE

Durante a mistura das matérias primas apresentadas anteriormente na Figura 3, de acordo com as proporções da Tabela 5, observou-se que a água adicionada (Tabela 10) na formulação de referência era suficiente para hidratar a mistura, porém, ao substituir o cimento por pó de tijolo e carvão vegetal, a quantidade de água tornava-se insuficiente, permanecendo material seco e, logo, como enfatizado por Wong *et al.* (2020), a pasta de argamassa perde a fluidez proporcionalmente ao teor de tijolo e carvão vegetal adicionado. Isso acontece, pois, comparado com o cimento Portland, as partículas cerâmicas possuem tamanhos e formas irregulares, promovendo maior superfície de contato (SHAH; *et al.*, 2021), assim, estas formulações de argamassas necessitam maior adição de água por apresentar maior tensão de escoamento e viscosidade plástica, do que as pastas de argamassa formuladas somente com cimento Portland (XUE; *et al.*, 2021).

Tabela 10 - Quantidade de água adicionada nas formulações de argamassa

Argamassa	Água (g)	Razão água/cimento
Referência	300 g	0,48
AT25	330 g	0,52
AC25	380 g	0,61
ATC205	340 g	0,54
ATC1510	340 g	0,54
ATC1015	340 g	0,54
ATC520	375 g	0,60

Fonte: Dados obtidos experimentalmente.

O comportamento observado tem relação direta com o estudo de Cabrera-Covarrubias; *et al.* (2021) que relata que ao se adicionar materiais cerâmicos na argamassa há maior absorção de água da mistura, a fim de ter a mesma trabalhabilidade. O percentual de adição de água entre 10% a 27% maiores que a amostra de referência vão ao encontro das formulações de argamassa com finos cerâmicos desenvolvidas por Minatto (2012).

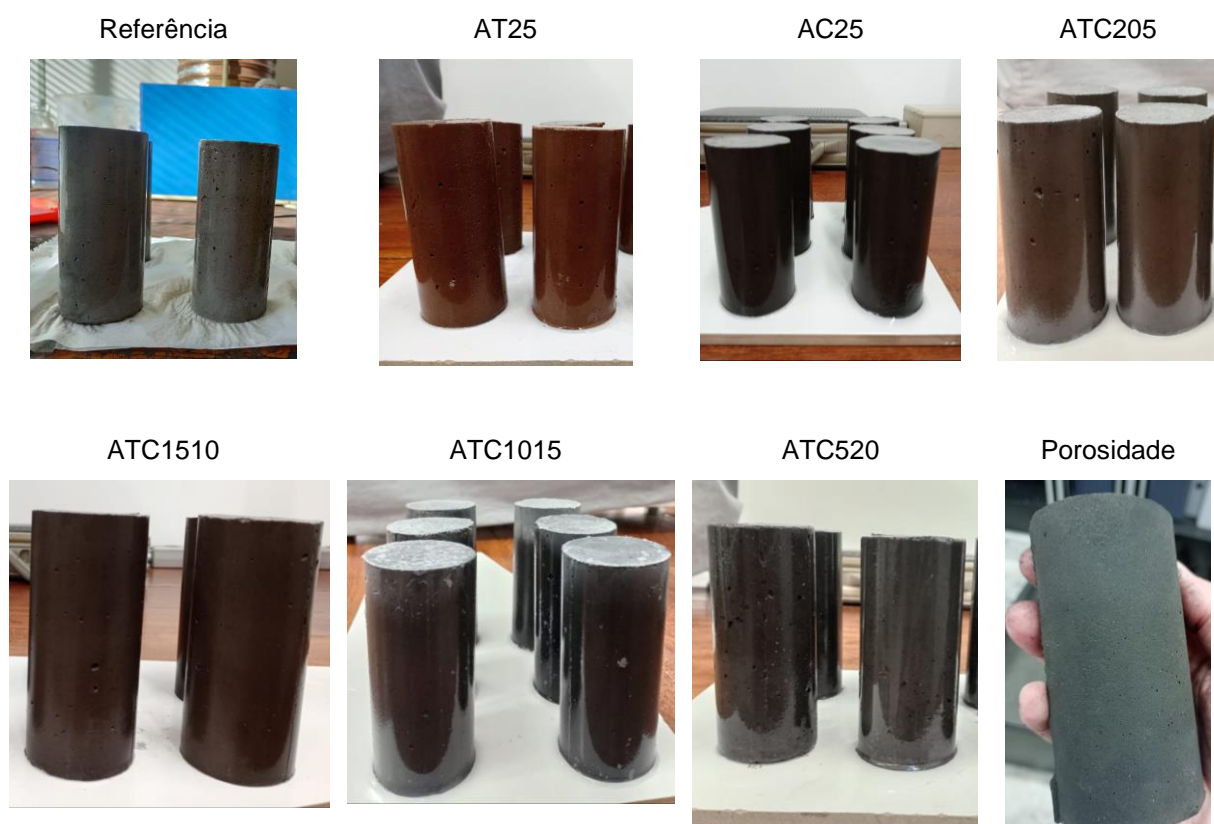
Comparando-se as formulações (Tabela 10), é possível perceber que a adição de água foi maior para as substituições com finos de carvão vegetal, principalmente em teores acima de 20% (amostras ATC520 e AC25), atribui-se esse efeito às propriedades adsorventes do material (FROEHLICH, MOURA, 2014). Mesmo assim, a razão de água/cimento entre 0,4 e 0,65 não interfere significativamente na resistência mecânica (SILVA, *et al.*, 2019).

Nos próximos tópicos será aprofundado que a adsorção de fluidos pelo carvão vegetal contribuiu no fornecimento de água para a reação pozolânica do cimento com os finos de tijolo, sendo perceptível a menor porosidade (Figura 20) dos corpos de prova com adição de carvão vegetal quando comparadas com as amostras de referência e de tijolo (AT25), tendo, portanto, uma influência significativa na melhoria das propriedades da argamassa.

4.5 COR

A mistura de finos de tijolos e carvão vegetal nos corpos de prova de argamassa alterou a coloração das amostras proporcionalmente à quantidade de material adicionado, de acordo com a Figura 20.

Figura 20 - Aspecto dos corpos de prova de argamassa



Fonte: Autoria própria.

É possível observar que a coloração modificou da tonalidade acinzentada para avermelhada nas adições de finos de tijolo, devido a presença de óxido de ferro presente na argila (LOPES, 2016) utilizada como matéria-prima do tijolo. Dependendo do tipo de argila majoritariamente utilizada há considerável variação de óxido de ferro, como apresenta o estudo de Fernandez et al. (2011), na qual pode-se verificar na Tabela 11, as argilas calcinadas de ilita e montmorilonita possuem maiores quantidades de ferro do que a argila caulínica.

Tabela 11 - Composição química do tijolo

ARGILAS	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	Outros
Caulinita	48	36,4	0,85	0,14	0,11	0,03	0,02	0,48	13,97
Ilita	58,68	19,25	5,04	1,29	2,5	0,17	0,19	6,12	6,76
Montmorilonita	63,15	20,09	3,96	1,15	2,27	0,51	2,22	0,54	6,11

Adaptado Fernandez et al. (2011)

A coloração avermelhada dos materiais cimentícios pode ser um fator que limita a aceitabilidade da argamassa em alvenaria (CARVALHO *et al.*, 2020). No entanto, a alteração da coloração não compromete a obra, ao se utilizar como camadas de chapisco e emboço.

Nas amostras ATC1510 e ATC1015 em que foram misturados os finos de tijolo e carvão vegetal, nota-se uma menor variação da tonalidade da argamassa, em comparação com as de referência. Já nas formulações AC25 e ATC520 há a predominância da coloração escura do carvão vegetal, característica para os materiais que sofreram combustão incompleta de hidrocarbonetos, na qual o elemento químico carbono encontra-se na hibridizado na forma sp^2 , refletindo pouca luz (ZARBIN, ORTH, 2019).

Mesmo havendo alterações de coloração, a adição de quaisquer teores de reaproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha, em larga escala, apresentam-se viáveis tanto economicamente, quanto ambientalmente (CARVALHO *et al.*, 2020). Sendo o mesmo válido para a gestão de resíduos gerados na produção do carvão vegetal (APECÁVE, 2018; BERNARDINI, 2020; DELATORRE *et al.*, 2020).

4.6 POROSIDADE

Os corpos de prova de todas as formulações de argamassa apresentaram visualmente poros com maior diâmetro, conforme imagens apresentadas anteriormente na Figura 20. Porém, pode-se observar visualmente, que a quantidade e o tamanho dos poros aumentam na proporção de resíduos de tijolos adicionados.

De acordo com os estudos de Ortega *et al.* (2018) e Vejmelková *et al.* (2010); a substituição de cimento Portland por resíduos cerâmicos se limita a 20%, pois a partir destes percentuais é possível observar material particulado que não reage no processo de geopolimerização, afetando o empacotamento das partículas, aumentando, assim, a porosidade da argamassa.

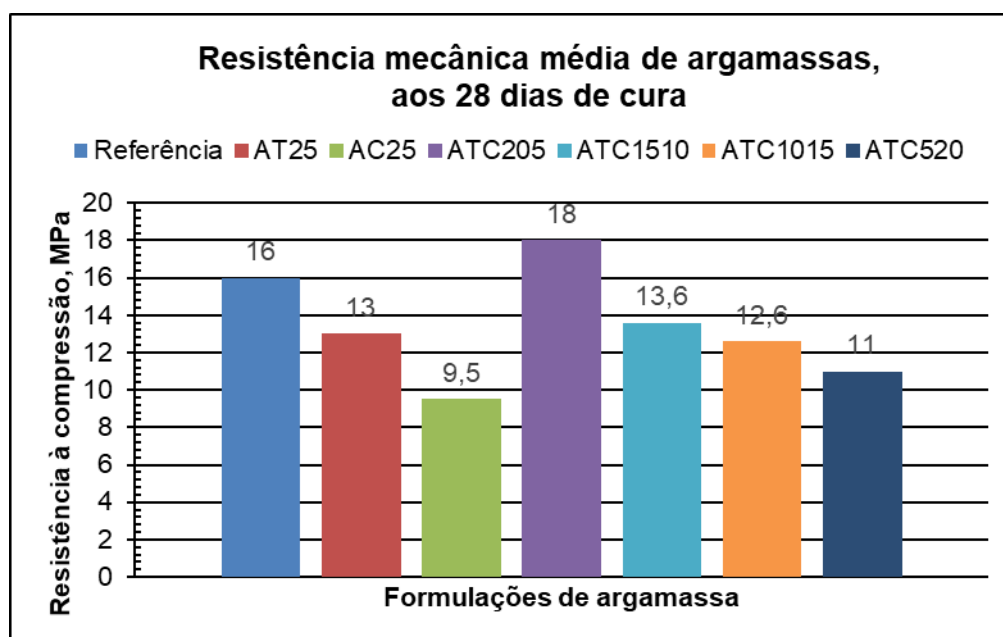
As amostras AC25 e ATC520 apresentaram poros menores, uma vez que, os finos de carvão vegetal por atuarem como partículas adsorventes, tornaram o processo de difusão e evaporação de água mais lento. Era notável, que após a desmoldagem dos corpos de prova estas formulações apresentavam-se com maior umidade, em comparação com aquelas de referência e que tinham maior percentual de tijolo.

As reações pozolânicas necessitam de hidratação para desenvolverem resistência mecânica. Os estudos de Reig, *et al.* (2013; 2016; 2017), sobre a incorporação de finos de cerâmica vermelha, constataram que ao realizar a ativação álcali da pozolana e realizar a cura da argamassa em temperaturas até 65°C permite acelerar a reação tendo a hidratação adequada, antes de sua difusão por capilaridade, uma vez que, a falta de água inibe a reação de polimerização que forma o geopolímero. Apesar de valores maiores de resistência mecânica em comparação com o cimento Portland, é comum o aparecimento de eflorescência, em razão da maior concentração de álcalis.

Nas formulações desenvolvidas não houve o aparecimento de eflorescência. Os corpos de prova também não se apresentaram frágeis, friáveis e quebradiços (Figura 20), não havendo perda de amostras por esfarelamento após a desmoldagem dos mesmos.

4.7 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

A Figura 21 apresenta a média da resistência mecânica à compressão simples das formulações de argamassa aos 28 dias de cura.

Figura 21 - Resistência à compressão da argamassa

Fonte: dados obtidos experimentalmente

É perceptível que a argamassa com finos de tijolos (AT25) possui desempenho mecânico inferior à argamassa de referência (Figura 21). Outros trabalhos demonstraram que a adição de finos cerâmicos diminui a resistência à compressão em idades de cura até 28 dias (MEMIŞ; *et al.*, 2018), pois o cimento Portland ao ser hidratado, forma óxido de cálcio hidratado, por conseguinte, é consumido para produzir silicato de cálcio hidratado, substância esta que confere a resistência à compressão da argamassa (LASSEUGUETTE; *et al.*, 2019). Apesar da ação pozolânica dos finos cerâmicos ser notável aos 7 dias de cura da pasta (ZHAO; *et al.*, 2021), as grandes quantidades dos minerais sílico aluminosos, presentes no tijolo, necessitam de disponibilidade de cálcio e hidratação para reagir; como a maior fonte de óxido de cálcio é o cimento Portland, é necessário a liberação do íon cálcio para haver a complexação de silicatos e aluminossilicatos (GARCIA-LODEIRO; *et al.*, 2011), logo a resistência à compressão das amostras parcialmente substituídas por finos de tijolos atinge seu potencial máximo e, até superiores às formulações tradicionais, aos 90 dias de cura (MEMIŞ; *et al.*, 2018), em razão da lenta interação da cerâmica vermelha com o hidróxido de cálcio, durante a hidratação da pasta de argamassa (DOBIAS; POKORNY, 2017).

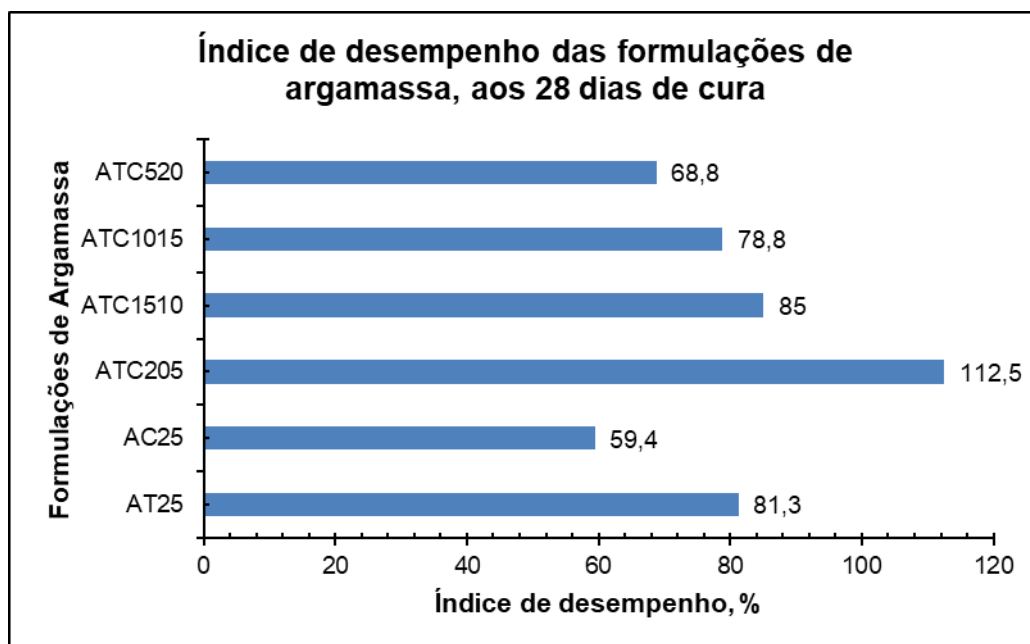
No caso da formulação substituída por finos de carvão vegetal (AC25), é possível atribuir seu desempenho inferior, pois o cimento não tem comportamento pozolânico (Figura 18), assim, infere-se que por restar consideráveis frações de aluminossilicatos na forma cristalina (FOŘT; *et al.*, 2020) estas atuam como *filler* na argamassa, porém a capacidade de micropreenchimento por toda a matriz limita que a argamassa suporte deformações elástica, pois não há espaço físico disponível para o rearranjo estrutural (GONÇALVES; *et al.*, 2009).

Contudo, as amostras da formulação AC25 parcialmente substituída com finos de carvão vegetal apresentaram resistência mecânica à compressão maior que 8 MPa (Figura 21), atendendo os requisitos técnicos de argamassas para assentamentos e revestimentos, conforme a norma ABNT NBR 13281 (2005).

Já as formulações ATC1510 e ATC1015 apresentaram resistência mecânica próximas a AT25, confirma-se que ocorre uma ação combinada de formação de geopolímero, na qual os finos de cerâmica vermelha atuam como pozolanas e os finos de carvão vegetal adsorventes preenchem o espaço físico da matriz. Os resultados obtidos vão ao encontro do trabalho desenvolvido por Lassegutte *et al.* (2019) ao produzir uma argamassa com traço 1:2,94:0,58 (cimento, areia e água) com substituição do cimento Portland por 5% e 15% de resíduos de tijolos (tamanho médio das partículas 19,7 μm) sem ativação álcali, obteve resistência à compressão, aos 28 dias, de 13 e 12 MPa respectivamente.

No entanto, a amostra ATC520 demonstrou menor resistência à compressão ao aumentar a fração de carvão vegetal, que atuaram como *filler*, mas não consegue alcançar o mesmo desempenho mecânico, frente às amostras na qual ocorreu maior reatividade pozolânica. Como esse cimento (Figura 18) apresentou-se sob a curva de saturação de $[\text{OH}^-]$ por $[\text{CaO}]$, pode-se inferir que é pelo comportamento pozolânico dos finos de tijolo.

As amostras da formulação ATC205 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. Aos 28 dias de cura, estes corpos de prova apresentaram índice de desempenho (Figura 22) superior ao cimento Portland CPV-ARI.

Figura 22 - Índice de desempenho das formulações de argamassa

Fonte: dados obtidos experimentalmente

Esse resultado atribui-se a ação adsorvente das partículas de carvão vegetal adicionados à argamassa que, como aprofundado anteriormente, contribui para a hidratação da reação pozolânica, na qual os finos de tijolos atuaram, aumentando a eficiência da geopolimerização. Notou-se que nestes corpos de prova havia maior uniformidade e menor quantidade de poros visíveis por onde a água tenha difundido (Figura 20). Assim, a combinação do geopolímero formado pelos finos de tijolos, sendo que o carvão vegetal não participou da reação pozolânica, restando, partículas que atuaram também como *filler* na estrutura, o que provavelmente resultou em amostras com maior fator de empacotamento e que influenciou na melhoria dos resultados de resistência mecânica à compressão. Por isso, infere-se que a argamassa ATC205 aplicadas em obra apresentará menor tendência à infiltração em razão do maior número de partículas que estão agrupadas, que pela ação do geopolímero com *filler*, diminuiu a porosidade e, assim, limitam a absorção de umidade por capilaridade.

5 CONCLUSÕES

A região do Vale do Caí – RS é um importante pólo de produção de cerâmicas vermelhas, tais como telhas e tijolos, assim como se destaca na produção de carvão vegetal para uso alimentício. Os resíduos gerados em ambas as atividades são classificados como inertes e, por isso, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o gerenciamento destes resíduos sólidos deve priorizar ações de reutilização e reciclagem destes materiais.

Diversos estudos demonstraram a viabilidade de se incorporar finos de cerâmica vermelha em argamassa, por suas propriedades pozolânicas. No entanto, a dificuldade de manutenção da hidratação da reação pozolânica está no fato da água difundir da matriz do material, antes de completar o processo de formação do geopolímero. Pesquisadores conseguiram reverter esse efeito mediante ativação alcali e cura em temperaturas variando entre 40°C e 65°C. Apesar de resultados maiores de resistência mecânica comparados com argamassas tradicionais, a aplicabilidade deste preparo torna-se inviável economicamente para fábricas de concreto pré-moldado e impraticáveis em canteiros de obra.

Neste sentido, o propósito deste estudo foi o desenvolvimento de argamassas com adição de resíduos de tijolos sem ativação alcali e com cura em temperatura ambiente. Por isso, se testou a adição de finos de carvão vegetal em diferentes proporções, como material adsorvente da água, para que a reação pozolânica tivesse hidratação suficiente para desenvolver o geopolímero.

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, não desenvolvem resistência mecânica à compressão quando reagem com cal, em temperaturas de cura de 55°C. 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, infere-se também que as amostras com resíduos carvoeiros adsorveram água e forneceram hidratação para a reação pozolânica se desenvolver. Por isso, as amostras ATC205,

com frações de 20% de tijolo combinadas com 5% de carvão vegetal, apresentaram resistência mecânica superior a argamassa de referência, aos 28 dias de cura.

O teor de partículas de tijolos e carvão vegetal adicionados modificam a coloração da argamassa para tonalidades avermelhadas e pretas, respectivamente, mas a combinação destes resíduos confere tonalidades que se aproximam da argamassa de referência.

No caso, das amostras ATC1510 e ATC1015 apresentaram desempenho mecânico semelhante a argamassa AT25, 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% (ATC520 e AC25) 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.

Desta forma, considerando os resultados obtidos experimentalmente, sugere-se para investigações futuras que seja avaliado, nas mesmas formulações e condições de cura propostas, o desempenho mecânico em diferentes idades de cura. Corroborando com outros estudos, é provável maior resistência mecânica em idades de cura maiores que 28 dias, pois as reações com materiais cerâmicos ocorrem de forma mais lenta na argamassa, que as formulações tradicionais. E talvez, as amostras ATC1510, ATC1015, ATC520 e AC25 apresentem maiores valores de resistência à compressão em idades maiores, tornando-se argamassas viáveis de também serem aplicadas em obras. Além do mais, percebe-se como viáveis estudos que caracterizem os finos de carvão vegetal e, principalmente, a estrutura formada em combinação com os resíduos de tijolos da argamassa ATC205, que apresentou propriedades superiores aos corpos de prova de referência.

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.

REFERÊNCIAS

- 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**, 2021.
- ALLEN, Edward; IANO, Joseph. **Fundamentos da Engenharia de Edificações - Materiais e Métodos**. 5ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.
- ALEXANDRE, Jonas; DE AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez; DE CASTRO XAVIER, Gustavo; et al. Addition of grog-clay ceramic waste in multiple use mortar. *In: Materials Science Forum*. [s.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.798-799.235>. Acesso em 02 maio 2022.
- ALMEIDA, CLARICE. **Incêndio de grande proporção atingiu empresa de Maratá**. Jornal Ibiá, Montenegro, 02 de março de 2019. Disponível em: <https://jornalibia.com.br/destaque/incendio-de-grande-proporcao-atinge-empresa-de-marata/>. Acesso em 12 junho 2023.
- AMERI, Farshad; SHOAEI, 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**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.079>. Acesso em 02 maio 2022.
- ANTUNES, Paulo de Bessa. **Direito Ambiental**. São Paulo: Atlas, 2021.
- 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.
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. Manual de Revestimentos de Argamassa. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002. Disponível em: <http://www.comunidadeconstrucao.com.br/ativos/279/manual-de-revestimentos-de-argamassa.html>. Acesso em 25 abril 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020/2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021>. Acesso em: 11 março 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. **NBR 15752:2014**. Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). 2015. **NBR ISO 14001** – Sistema de gestão ambiental: especificação e diretrizes para uso. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 2004. **NBR 10004/2004** – Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR13281:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5736:2018**. Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738:2016**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

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 5751:2015**. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias. Rio de Janeiro, 2015.

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 5753:2016**. Cimento Portland – Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 2016.

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 9778:2009**. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15261:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23:2000**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

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

BARBIERI, José Carlos. **Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo: Editora Vozes, 2020.

BAUER, L. A. F. (Coord.). **Materiais de Construção**. Vol. 1. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BAVARESCO, Carlos Roberto. **Utilização de entulho reciclado para produção de argamassas**. 2001. Dissertação - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

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**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cerind.2019.024>. Acesso em: 02 junho 2023.

BONILLA, A.; VILLAQUIRÁN-CAICEDO, M. A.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Novel Alkali-Activated Materials with Photocatalytic and Bactericidal Properties Based on Ceramic Tile Waste. **Coatings**, v. 12, n. 1, p. 35, 28 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings12010035>. Acesso em: 03 fevereiro 2022.

BRASIL. **Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências, 1981.

BRASIL. **Lei nº 8080, de 19 de setembro de 1990**. Dispõe sobre as condições para a promoção, proteção e recuperação da saúde, a organização e o funcionamento dos serviços correspondentes e dá outras providências, 1990.

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.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/379/1/012019>. Acesso em 17 maio 2022.

BROCHIER. **Lei Municipal nº 875, de 29 de dezembro de 2003.** Institui o Hino Municipal e dá outras providências, 2003.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra; SCHALCH, Valdir; MOLIN, Denise Carpena Coitinho Dal; et al. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, 2010.

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**, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14061543>. Acesso em 02 maio 2022.

CALLISTER, 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**, 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**, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v16i3.1272>. Acesso em 12 junho 2023.

DOBIAS, Daniel; POKORNY, Petr. Influence of Partial Replacement of Hydraulic Binder by Ground Brick on the Characteristics of Composites. In: **Procedia Engineering**. [s.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.381>. Acesso em 03 maio 2022.

FERNANDEZ, Rodrigo; MARTIRENA, Fernando; SCRIVENER, Karen L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. **Cement and Concrete Research**, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.013>. Acesso em: 03 abril 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; VEJMEKOVÁ, Eva; KEPPERT, Martin; *et al.* Alkaline activation of low-reactivity ceramics: Peculiarities induced by the precursors' dual character. **Cement and Concrete Composites**, 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**, 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 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. **Cement and Concrete Research**, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>. Acesso em 04 maio 2022.

GONÇALVES, J. P.; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R. D.; *et al.* Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. **Construction and Building Materials**, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.conbuildmat.2008.08.027>. Acesso em 05 maio 2022.

GONÇALVES, Alexandre Honig; GONÇALVES, Marcelino De Andrade. Fronteiras e Resíduos Sólidos: uma reflexão crítica e científica. **Revista Geopantanal**, Corumbá, n. 18, p. p. 193-204, 2015.

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**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102263>. Acesso em 11 maio 2022.

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.

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**, 2021.

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

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

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.

KULOVANÁ, T.; VEJMEJKOVÁ, E.; KEPPERT, M.; et al. Air-entrained concrete technology as an effective tool for increasing the limits of brick powder percentage in blended Portland cement binders. **Cement**, Wapno, Beton, 2015.

LASSEUGUETTE, E.; BURNS, S.; SIMMONS, D.; et al. Chemical, microstructural and mechanical properties of ceramic waste blended cementitious systems. **Journal of Cleaner Production**, 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**, 2015.

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**, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.021>. Acesso em 05 maio 2022.

LOPES, Marcelo Silvio. **Cerâmica**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2016.

MARQUES, Eduardo José da Silva Tomé; SCHMITT, Adriana Regina Vettorazzi. O Serviço Social Ambiental: compromisso com os objetivos do desenvolvimento sustentável e a defesa do meio ambiente enquanto direito humano. **Revista Katálysis**, 2021.

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**. [s.l.: s.n.], 2018. Disponível em: 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.

MOSER, Nivaldo José. **Avaliação da resistência mecânica em compósitos de argamassa com adição de pó de vidro após exposição a elevadas temperaturas**. 2019. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Farroupilha, 2019.

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**,

2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120990>. Acesso em 11 maio 2022.

MUSITANO, MANUELA. **O homem e o fogo**. Disponível em: <http://www.invivo.fiocruz.br/cienciaetecnologia/o-homem-e-o-fogo/>. Acesso em 13 junho 2023.

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

NUNES, K. R.A.; MAHLER, C. F. Comparison of construction and demolition waste management between Brazil, European Union and USA. **Waste Management and Research**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X20902814>. Acesso em: 09 março 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**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.161>. Acesso em 18 maio 2022.

PAGANELLA, EDUARDO. **Incêndio atinge empresa de embalagens de carvão em Brochier**. Jornal Zero Hora, Porto Alegre, 29 de dezembro de 2021. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2021/12/incendio-atinge-empresa-de-embalagens-de-carvao-em-brochier-ckxr5qc74004v015pkba33lwk.html>. Acesso em 12 junho 2023.

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

REIG, L.; TASHIMA, M. M.; BORRACHERO, M. V.; et al. Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. **Construction and Building Materials**, 2013.

REIG, L.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M. V.; et al. Influence of calcium aluminate cement (CAC) on alkaline activation of red clay brick waste (RCBW). **Cement and Concrete Composites**, 2016.

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**, 2017.

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

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº 11929, de 20 de junho de 2003**. Institui o churrasco como “prato típico” e o chimarrão como “bebida símbolo” do Estado do Rio Grande

do Sul e dá outras providências. Disponível em:

<http://www.al.rs.gov.br/FileRepository/repLegisComp/Lei%20n%C2%BA%2011.929.pdf>. Acesso em 02 junho 2023.

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

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**, 2019.

ROVNANÍK, Pavel; ROVNANÍKOVÁ, Pavla; VYŠVAŘIL, Martin; et al. Rheological properties and microstructure of binary waste red brick powder/metakaolin geopolymer. **Construction and Building Materials**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.150>. Acesso em 17 maio 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**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121825>. 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**, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132012005000010>. Acesso em 02 junho 2023.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2013.

SHAH, Mati Ullah; USMAN, Muhammad; HANIF, Muhammad Usman; et al. Utilization of solid waste from brick industry and hydrated lime in self-compacting cement pastes. **Materials**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14051109>. Acesso em 17 maio 2022.

SILVA, J.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2010.

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**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.247>. Acesso em 17 maio 2022.

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**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14216331>. Acesso em 17 maio 2022.

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

TOLEDO FILHO, R. D.; GONÇALVES, J. P.; AMERICANO, B. B.; *et al.* Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. **Cement and Concrete Research**, 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.005>. Acesso em 19 maio 2022.

TURANLI, L.; BEKTAS, F.; MONTEIRO, P. J.M. Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00101-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00101-7). 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**, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.013>. Acesso em 23 maio 2022.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **Basel Convention on the control of transboundary movements of hazardous waste and their disposal**. Genebra: UNEP, 1989.

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**. [s.l.: s.n.], 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.

VYŠVAŘIL, M.; VEJMELKOVÁ, E.; ROVNANÍKOVÁ, P. Rheological and mechanical properties of alkali-activated brick powder based pastes: Effect of amount of alkali activator. In: IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**. [s.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/379/1/012011>. Acesso em 25 maio 2022.

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**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2021/8871280>. 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**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101655>. Acesso em 25 maio 2022.

ZARBIN, Aldo J.G.; ORTH, Elisa S. Algumas estruturas do carbono elementar e sua importância para o desenvolvimento e soberania do Brasil. **Química Nova**, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170437>. Acesso em 12 junho 2023.

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**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.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**, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132012000400016>. Acesso em 18 outubro 2022.