

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

Vitor Affonso Lopes Silveira

**Resíduo da Indústria de Cerâmica Sanitária como Material Cimentício  
Suplementar**

**CEFET-MG**

**ARAXÁ**

**2022**

Vitor Affonso Lopes Silveira

**Resíduo da Indústria de Cerâmica Sanitária como Material Cimentício  
Suplementar**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio Resende

**ARAXÁ**

**2022**

S587r	<p>Silveira, Vitor Affonso Lopes Resíduo da indústria de cerâmica sanitária como material cimentício suplementar / Vitor Affonso Lopes Silveira. – 2022. 63 f. : il.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio Resende.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2022. Bibliografia.</p> <p>1. Resíduos sólidos industriais – Teses. 2. Cimento Portland – Teses. I. Resende, Domingos Sávio. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 628.54</p>
-------	---

Dissertação de Mestrado “RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA SANITÁRIA COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR” apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Autor: Vitor Affonso Lopes Silveira

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

---

Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende (ORIENTADOR)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

---

Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra (COORIENTADOR)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

---

Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

---

Prof. Dr. Marcela Maria Nascimento de Souza Soares

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

---

Prof. Dr. Antônio Maria Claret Gouveia

Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me ouvir, acompanhar e manter no caminho de sua luz e proteção.

Agradeço aos meus pais Edna Mara Lacerda e José Affonso Silveira por sustentar a base para que todo este trabalho fosse concretizado. Nós sabemos o quanto foi difícil concluir esse desafio, mas graças a vocês, sinto no coração mais uma vez aquela sensação incrível de dever cumprido. Eu te amo.

Agradeço ao meu Orientador Domingos Sávio de Resende por proporcionar a oportunidade de conhecer um novo segmento industrial tão importante para o desenvolvimento deste país. Obrigado pela disponibilidade, sugestões e apoio durante toda a caminhada.

Agradeço ao meu Coorientador Augusto César da Silva Bezerra por abrir as portas de sua grande casa, o CEFET-MG Campus I, em Belo Horizonte. Os momentos em que estive presente foram fundamentais para essa evolução. Muito obrigado por me fazer encontrar o caminho nos momentos em que estive perdido.

Agradeço aos colegas e técnicos dos laboratórios em que foram executados os ensaios. Em especial ao grande Richard, que não mediu esforços para me ajudar sempre que precisei. Torço para que seu futuro seja brilhante!

Agradeço ao grupo Santa Clara Louças Sanitárias, em especial a um dos seus comandantes Eduardo Lusvarghi. Espero que este trabalho possa contribuir para a solução que a empresa procura. Obrigado pela parceria.

Agradeço a minha namorada e toda sua família por fazer parte de tudo isso e saber passar com todo carinho pelos momentos mais difíceis. Vocês também sempre estiveram ao meu lado, sigo procurando formas para agradecer e retribuir.

*“O senhor é meu pastor, nada me faltará.”*

## RESUMO

O processo de fabricação da cerâmica sanitária acarreta na geração de resíduos industriais com diferentes características, obtidas em função das etapas do processamento a qual são gerados e dos produtos fabricados. A composição química desses materiais é similar ao de sua matéria prima, e suas propriedades físicas podem ser facilmente modificadas buscando sua reutilização. Dessa forma, diversos tem sido os trabalhos desenvolvidos no sentido de se valorizar materiais dessa natureza. Acredita-se que eles possam ser utilizados como matéria prima suplementar na produção de utensílios da construção civil, seja através de sua aplicação como agregados ou até em substituição parcial ao cimento Portland. Com objetivo de contribuir para redução das emissões de gás carbônico, bem como na preservação de recursos minerais, a indústria cimenteira tem utilizado os materiais cimentícios suplementares (MCS) como substituição parcial do clínquer no cimento Portland. Nesse sentido, o presente trabalho avaliou o potencial de reutilização do resíduo sólido acumulado em uma lagoa de decantação de uma indústria localizada no triangulo mineiro. Para isso, a amostra coletada foi caracterizada por meio de análise granulométrica, difração de raios X, fluorescência de raios X, microscopia e perda ao fogo. Para avaliação do resíduo como MCS foram realizados ensaios de calor de hidratação, condutividade elétrica em solução de hidróxido de cálcio e determinação do índice de desempenho com cimento Portland. Foram produzidas argamassas com substituição parcial (12,5% e 25%) do cimento CPF II-F-32 com adições reduzidas pelo resíduo. Essas argamassas foram avaliadas por meio da resistência à compressão aos 7 e 28 dias, massa específica, índice de vazios, absorção de água e desempenho frente à ataque ácido. A composição química por FRX indicou os óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e a análise por DRX aponta para a presença de quartzo, caulinita e bassanita como minerais predominantes. A aplicação do resíduo reduziu o calor de hidratação e a porosidade da argamassa, levando a um aumento de sua durabilidade. Embora os resultados de condutividade elétrica apontem para não pozolanicidade, a resistência à compressão não apresentou alterações significativas, o que sugere que o resíduo pode ser utilizado em argamassas.

**PALAVRAS-CAHVE:** resíduo sólido, cerâmica sanitária, reutilização, material cimentício suplementar, cimento Portland.

## ABSTRACT

The manufacturing process of sanitary ceramics leads to the generation of industrial waste with different characteristics, obtained according to the processing steps in which they are generated and the products manufactured. The chemical composition of these materials are similar of their raw material, and their physical properties can be easily modified in order to reuse them. Thus, several works have been developed to value materials like this. It is believed that they can be used as a supplementary raw material in the production of civil construction objects, either through their application as aggregates or even as a partial replacement for Portland cement. To contribute to the carbon footprint, as well as the preservation of mineral resources, the cement industry has used supplementary cementitious materials (SCM) as a partial replacement of clinker in Portland cement. In this sense, the present work evaluated the reuse potential of solid waste accumulated in a settling pond of an industry located in the Minas Gerais triangle. For this, the collected sample was characterized by granulometric analysis, X-ray diffraction, X-ray fluorescence, microscopy, and loss on ignition. To evaluate the residue as SCM, tests of heat of hydration, electrical conductivity in calcium hydroxide solution and determination of the performance index with Portland cement were carried out. Concrete mortars were produced with partial replacement (12.5% and 25%) of a cement with reduced additions by the residue. These mortars were evaluated by means of compressive strength at seven and 28 days, specific mass, voids ratio, water absorption and performance against acid attack. The chemical composition by XRF indicated the oxides  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and the XRD analysis points to the presence of quartz, kaolinite and bassanite as predominant minerals. The application of the residue reduced the heat of hydration and the porosity of the mortar, leading to an increase in its durability. Although the electrical conductivity results point to non-pozzolanicity, the compressive strength did not show significant changes, which suggests that the residue can be used in pozzolanic cement compositions (CP IV).

**KEYWORDS:** solid waste, sanitary ceramics, reuse, supplementary cement material, Portland cement.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Similaridade entre o resíduo e o cimento .....	29
Figura 2 - Corpos de prova para cada composição.....	35
Figura 3 - Curva granulométrica da amostra de resíduo .....	38
Figura 4 - Difratoograma da amostra de resíduo.....	39
Figura 5 - Micrografia da amostra de resíduo (x500 e x1000).....	41
Figura 6 - Micrografia da amostra de resíduo (x2500 e x5000).....	41
Figura 7 - Curvas do fluxo de calor para cimento e resíduo .....	43
Figura 8 - Calor acumulado para o cimento e resíduo .....	44
Figura 9 - Resultados índice de desempenho com cimento Portland .....	46
Figura 10 - Detalhe do rompimento das composições .....	47
Figura 11 - Resultado absorção de água e índice de vazios.....	48
Figura 12 - Resultado massa específica .....	49
Figura 13 - Resultados ataque ácido.....	50
Figura 14 - Perda de massa devido ao ataque ácido .....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação das unidades industriais de louça sanitária em 2017 .....	17
Tabela 2 - Frações granulométricas da areia normalizada IPT .....	30
Tabela 3 - Quantidade de corpos de prova para o programa experimental .....	31
Tabela 4 - Composição das pastas para ensaio de calor de hidratação .....	33
Tabela 5 - Critério de classificação de pozolanicidade.....	34
Tabela 6 - Composição das argamassas para moldagem dos CP's .....	35
Tabela 7 - Composição química da amostra de resíduo .....	40
Tabela 8 - Resultado perda ao fogo .....	42
Tabela 9 - Resultado da condutividade elétrica da amostra de resíduo .....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MSC	Material Cimentício Suplementar
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
MME	Ministério de Minas e Energia
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CP	Corpo de Prova

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>14</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Materiais Cerâmicos .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Indústria de Cerâmica Sanitária.....</b>	<b>16</b>
3.2.1 Panorama Indústria nacional.....	16
3.2.2 Matéria Prima .....	18
3.2.3 Processo de fabricação .....	19
3.2.4 Geração de Resíduos.....	20
3.2.5 Santa Clara Louças Sanitárias .....	21
<b>3.3 Cimento Portland .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4 Materiais Cimentícios Suplementares.....</b>	<b>24</b>
<b>3.5 Estudos de Reutilização: Resíduo Cerâmica Sanitária.....</b>	<b>26</b>
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1 Materiais.....</b>	<b>29</b>
4.1.1 Resíduo Cerâmica Sanitária.....	29
4.1.2 Cimento Portland CII-F-32 .....	30
4.1.3 Areia Normal .....	30
4.1.4 Água.....	30
<b>4.2 Métodos.....</b>	<b>30</b>
4.2.1 Caracterização das amostras de resíduo .....	31
4.2.2 Atividade pozolânica do resíduo.....	33
4.2.3 Caracterização do concreto.....	34

<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>38</b>
<b>5.1 Caracterização das amostras de resíduo</b> .....	<b>38</b>
5.1.1 Análise Granulométrica a Laser .....	38
5.1.2 Difração de Raios X.....	39
5.1.3 Fluorescência de Raios X.....	40
5.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura .....	41
5.1.5 Perda ao Fogo.....	42
<b>5.2 Atividade pozolânica do resíduo</b> .....	<b>42</b>
5.2.1 Calor de hidratação .....	42
5.2.2 Condutividade elétrica em solução de hidróxido de cálcio .....	45
<b>5.3 Caracterização da argamassa</b> .....	<b>45</b>
5.3.1 Índice de Desempenho com cimento Portlnad .....	45
5.3.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica .....	47
5.3.3 Desempenho frente à ataque ácido .....	49
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>52</b>
<b>7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>54</b>

## **REFERÊNCIAS**

## 1 INTRODUÇÃO

O segmento de louças sanitárias integra o ramo dos produtos de minerais não-metálicos da Indústria de Transformação, que faz parte, junto com outras indústrias, do conjunto de cadeias produtivas que compõem o Complexo da Construção Civil. Trabalhos conduzidos por Junior et al. (2019), Prado e Bressiani (2013) apresentam informações disponíveis coletadas com empresas líderes e profissionais do setor, as quais indicam que a produção da indústria brasileira deva se situar entre as maiores no mundo, nas quais devem participar, além do Brasil, países como China, México, Turquia, Bulgária e Rússia.

Como acontece em outros segmentos industriais, o processo de fabricação da cerâmica sanitária produz resíduos com diferentes características, obtidas em função das etapas do processo na qual são geradas, da tecnologia utilizada e dos produtos fabricados. Restos de matéria-prima, moldes de gesso, produtos acabados fora da especificação e lamas provenientes do tratamento de água, são os tipos de resíduos mais comuns do setor.

O longo período para biodegradação classifica esses materiais como não biodegradáveis. Dessa forma, sua deposição de forma incorreta causa contaminação do ambiente e seu acúmulo gera um impacto visual significativo (HALICKA, OGRODNIK, ZEGARDLO; 2013). Entretanto, a similaridade com a matéria prima que os origina viabiliza estudos relacionados ao potencial de reutilização desses materiais. Naturalmente, os diferentes tipos de resíduos do processo produtivo da cerâmica sanitária, apresentam condições adequadas para serem reutilizados no próprio setor ou em outros empreendimentos relacionados à construção civil.

Nesse sentido, devido ao fato de as estruturas em concreto incorporarem uma grande quantidade de agregados, diversas pesquisas têm sido direcionadas para que cada uma possa se tornar um pequeno aterro de inertes, o que pode contribuir para minimizar os problemas ambientais associados a deposição de materiais dessa natureza (BRASILEIRO, MATOS; 2015).

Além disso, a substituição parcial do clínquer por outros materiais no processo de fabricação do cimento Portland é uma estratégia antiga da indústria do cimento, com foco na obtenção de vantagens ambientais, técnicas e até econômicas. Esses materiais são conhecidos hoje como materiais cimentícios suplementares (MCS). Seu uso na produção do cimento Portland é uma prática capaz de contribuir para redução

das emissões de CO<sub>2</sub>, bem como na redução do consumo de matéria-prima (ABRÃO, 2019).

Por isso, uma das alternativas para reutilização dos resíduos de cerâmica sanitária está relacionado a sua aplicação na composição do concreto, seja como agregado ou como material cimentício suplementar. Zegardlo et al. (2016) explica que a vantagem do resíduo da louça sanitária está no fato de que para ser aplicado dessa forma, não demanda nenhum tipo de processamento especial.

Este estudo traz uma proposta para reutilização do material sólido acumulado em um lago de decantação de uma empresa de cerâmica sanitária localizada em Minas Gerais. O método consiste basicamente na substituição parcial (25% em massa) do cimento Portland pelo resíduo coletado na lagoa, como forma de verificar como a introdução deste material afeta nas propriedades da argamassa. Para isso as amostras foram submetidas a ensaios de caracterização, testes mecânicos e de durabilidade. Os resultados são satisfatórios e sugerem que o resíduo sólido é um material adequado para ser aplicado junto ao cimento Portland na composição de argamassas. Dessa forma, este estudo defende sua aplicação em materiais cimentícios (HELENE, TUTIKIAN 2005; MEHTA, MONTEIRO, 2014; MARTINS et al. 2021).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Investigar o potencial pozolânico do resíduo sólido da indústria de cerâmica sanitária para aplicação como material cimentício suplementar na composição de argamassas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterização química, física e mineralógica das amostras de resíduo de modo a permitir a verificação dos critérios de materiais pozolânicos
- Avaliar as propriedades pozolânicas do resíduo
- Estudar a viabilidade de aplicação do resíduo como material cimentício suplementar
- Verificar as propriedades mecânicas e de durabilidade da argamassa incorporando o resíduo

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Materiais Cerâmicos

Callister (2008) descreve os cerâmicos como materiais inorgânicos e não metálicos, onde o termo “cerâmica” vem de *kerameikos* uma palavra grega que significa “matéria queimada”. Esse termo indica que as características desejadas para estes materiais são normalmente atingidas através de tratamento térmico a altas temperaturas, o qual pode ser denominado cozimento, queima ou sinterização. A alta dureza e elevada temperatura de fusão, são duas das principais características que diferem os cerâmicos das outras demais classes de materiais.

Os silicatos são os principais componentes químicos dos materiais cerâmicos. Compostos principalmente por silício e oxigênio, os dois elementos mais abundantes da crosta terrestre, eles estão presentes na maior parte dos solos, rochas, argilas e areia, principal matéria prima utilizada para obtenção dos produtos cerâmicos.

Quimicamente, o silicato mais simples é o dióxido de silício, ou sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Esse material apresenta carga eletricamente neutra e todos os átomos possuem estruturas eletrônicas estáveis, devido a sua estrutura de arranjo atômico. Caso essa estrutura seja arranjada de maneira regular e ordenada, uma estrutura cristalina será formada. Existem três formas principais para a sílica: quartzo, cristobalita e tridimita. Nessas formações, os átomos não estão densamente compactados uns aos outros, o que confere as sílicas cristalinas uma propriedade de massa específica relativamente baixa (KLEIN, DUTROW; 2009).

À temperatura ambiente, o quartzo possui uma massa específica de apenas  $2,65 \text{ g/cm}^3$ . Por outro lado, a força das ligações interatômicas Si-O se reflete em uma temperatura de fusão relativamente elevada, em torno de  $1710^\circ\text{C}$ .

A variedade das propriedades físicas e mecânicas permite que os materiais cerâmicos sejam aplicados em diferentes campos como: tijolos, refratários, dispositivos eletrônicos, fibras, louças, componentes aeroespaciais e abrasivos. Portanto, devido às diferenças nas propriedades dos produtos cerâmicos, a Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM (2021) divide os materiais cerâmicos em Cerâmica Vermelha (telhas e tijolos), Cerâmica de Revestimento (pisos e porcelanatos), Cerâmica Branca (que inclui cerâmica de mesa, sanitários e isoladores

elétricos), Materiais Refratários, Isolantes Térmicos, Abrasivos e Cerâmicos Avançados (materiais de implantes, sensores de umidade).

## **3.2 Indústria de Cerâmica Sanitária**

### *3.2.1 Panorama Indústria nacional*

O segmento de louças sanitárias integra o ramo dos produtos de minerais não-metálicos da Indústria de Transformação, que faz parte, junto com outras indústrias, do conjunto de cadeias produtivas que compõem o Complexo da Construção Civil. O Ministério de Minas e Energia (2019) descreve que o setor tem como principal atividade a fabricação de bacias, caixas d'água, bidês, lavatórios, colunas, mictórios, tanques de lavar roupas e acessórios.

Diferentemente dos setores de revestimentos e cerâmica vermelha, que são constituídos por uma estrutura industrial desconcentrada e de capital nacional, o segmento de sanitários é concentrado e conta com importante participação de capital estrangeiro. Internacionalmente, a indústria de sanitários constitui um mercado oligopolizado, dominado por cerca de uma dezena de empresas multinacionais, que integram uma cadeia produtiva globalizada (JUNIOR et al; 2010). O Brasil, um dos maiores produtores mundiais de louça sanitária, não foge à regra, predominando, em sua estrutura de mercado, unidades industriais de grande escala de produção, apoiadas em fornecedores de insumos minerais (matérias-primas naturais e sintéticas) e de bens de capital (Ministério de Minas e Energia, 2019).

Em um estudo recente sobre a cadeia produtiva da indústria de cerâmica no estado de São Paulo, Junior et al. (2019) apresenta a relação das unidades industriais de louça sanitária no ano base de 2017, disponível na Tabela 1. Dessa forma, as informações disponíveis no trabalho mostram que hoje o Brasil conta com 17 unidades fabris de porte médio a grande (capacidade produtiva em torno de 1 milhão peças/ano ou mais) e pelo menos outras 7 de porte pequeno (menos de 200 mil peças/ano). Os dados mostram ainda que os estados brasileiros líderes em capacidade instalada e produção de louças sanitárias são Minas Gerais, Pernambuco e São Paulo.

Tabela 1 - Relação das unidades industriais de louça sanitária em 2017

EMPRESA / GRUPO	UNIDADES	LOCALIDADE	UF	CAPACIDADE ANUAL INSTALADA (mil)
DURATEX S.A	1 DECA Louças - PB	João Pessoa	PB	2.000
	2 DECA Louças - PE	Cabo Sto Agostinho	PE	2.800
	3 DECA Louças - RJ	Queimados	RJ	2.400
	4 DECA Louças - RS*	São Leopoldo	RS	1.400
	5 DECA Louças - SP	Jundiaí	SP	3.000
ROCA BRASIL	6 CELITE - MG	Santa Luzia	MG	4.200
	7 LOGASA	Serra	ES	2.200
	8 CELITE - PE	Recife	PE	2.200
	9 INCEPA CSC - Cia Sulam de	Jundiaí	SP	1.430
ETERNIT	10 Cerâmica	Caucaia	CE	1.500
KOHLER	11 Fiori / Kohler Cerâmica Ind. de	Andradas	MG	1.700
HERVY	12 Taubaté Ind. Cerâmica	Taubaté	SP	950
ICASA	13 Andradense	Andradas	MG	2.400
LORENZETTI	14 Lorenzetti Louças	Poços de Caldas	MG	1.400
LUZARTE	15 Luzarte Estrela Mari Louças	Caruaru	PE	2.400
MARI	16 Sanitárias Onix Louças	São Caetano	PE	1.200
ONIX	17 Sanitárias Louças Sanitária	Uberaba	MG	120
SANTA CLARA	18 Santa Clara	Araxá	MG	150
CASA SANTAMARINA	19 Casa Santamarina Louças Sanitárias	Perdizes	MG	100
ZETA	20 Zeta	Itupeva	SP	120
MGA	21 MGA	Itupeva	SP	140
MELATE (ASTRA)	22 Melate/Japi	Itupeva	SP	100
MONDIALLE	23 Mondialle	Santa Bárbara do Oeste	SP	100
<b>TOTAL</b>				<b>34.010</b>

Fonte: Adaptado de Junoir et al. 2019

Quanto à comercialização, atualmente as empresas nacionais são responsáveis por 60% da produção no país, sendo que as duas empresas líderes (Roca e Deca) detêm mais de 60% do mercado. O mercado interno brasileiro consome a maior parte da produção nacional e está plenamente atendido com os produtos convencionais e de maior valor agregado. Há uma grande variação de preços em função dos tipos de louças, e da qualidade e sofisticação dos produtos, com peças

mais simples, populares (bacias convencionais, cubas, lavatórios, colunas), até conjuntos sofisticados, tecnicamente e em seu design, que podem alcançar valores superiores (JUNIOR et al., 2019).

Finalmente, as informações disponíveis, bem como as apreciações coletadas com empresas líderes e profissionais do setor indicam que a produção da indústria brasileira deva se situar entre as maiores no mundo, nas quais devem participar, além do Brasil, países como China, México, Turquia, Bulgária e Rússia. O Brasil detém também um consumo interno expressivo de louças sanitárias, que o coloca entre os principais mercados mundiais ao lado de China, EUA, Índia, Japão, Rússia, Espanha, entre outros (PRADO, BRESSIANI; 2013).

### *3.2.2 Matéria Prima*

A qualidade dos produtos oferecidos pela indústria da cerâmica é diretamente afetada pelas propriedades da matéria prima utilizada no processo produtivo. Dessa forma, a seleção desses minerais leva em conta tanto as características químicas, físicas e mineralógicas, quanto sua disponibilidade e potencialidade de extração. Composição química, pureza, reatividade e tamanho de partícula são alguns dos fatores de seleção da matéria prima para composição da massa (barbotina) que origina as peças de louça sanitária.

Na indústria de cerâmica sanitária, são utilizados dois tipos de matéria prima classificadas como plásticas e não plásticas, além de possíveis aditivos e água. A proporção entre esses componentes depende do produto cerâmico que se deseja obter, já que cada um dos tipos confere ao material determinadas propriedades físicas essenciais para seguir no processo produtivo das peças (MOTTA et al., 2004).

No trabalho de Albuquerque (2009) a autora descreve como os dois tipos de matéria prima interferem nas propriedades da massa durante o processo de fabricação. O grupo de matéria prima classificada como plástica é primordial na fase de conformação dos produtos, uma vez que confere as propriedades mecânicas necessárias para que a massa possa ser moldada nas mais variadas formas. Por outro lado, a matéria prima não plástica atua na fase do processamento térmico, por isso são conhecidas também como fundentes. Esse grupo atua na redução da deformação piropástica da massa, com a finalidade de controlar o encolhimento (retração) e baixar a temperatura de vitrificação.

Os minerais mais comuns utilizados como matéria prima plástica compreendem o grupo das argilas e caulins. Já os materiais não plásticos utilizados são feldspatos, filito, talco, calcita, quartzo, entre outros.

### 3.2.3 *Processo de fabricação*

Cavalcante (2004) explica que a louça sanitária esmaltada consiste no corpo cerâmico, vertido em molde de gesso ou de resina, proveniente de barbotinas defloculadas, o qual é seco, dado acabamento, aplicada camada de esmalte e finalmente sinterizado entre 1200°C a 1350°C, para que sua absorção de água seja praticamente nula e sua resistência mecânica torne-se elevada.

Dessa forma, em termos de configuração as plantas industriais mais estruturadas são compostas, basicamente, de três segmentos: unidade de beneficiamento de matéria prima mineral (composição da massa), setor de fundição (conformação das peças cerâmicas), e sinterização realizada em fornos túneis de queima contínua ou intermitente (JUNIOR et al., 2019).

Na primeira etapa do processo de fabricação da louça sanitária, ocorre o beneficiamento da matéria prima mineral e a composição da massa, conhecida como barbotina. Logo, a moagem e peneiramento dos materiais é fundamental para alcançar o ajuste granulométrico desejado, o qual interfere na homogeneização e comportamento reológico da massa. Para acerto reológico, a barbotina é disposta em tanques agitados onde serão realizadas as correções de suspensão utilizando água ou silicato de sódio como agente defloculante. A barbotina no tanque deve ser constantemente amostrada como forma de verificar suas propriedades reológicas, já que essa propriedade afeta diretamente nos custos operacionais bem como na qualidade final dos produtos.

A próxima etapa consiste na conformação das peças, que também é conhecida no segmento como fundição. O processo se dá através do preenchimento dos moldes de gesso com barbotina, onde ela permanece por tempo determinado até que o gesso do molde absorva a água contida na suspensão e as partículas sólidas se moldem em sua superfície, formando o que será posteriormente o corpo da peça. O objetivo desta etapa é garantir que a peça conformada apresente resistência mecânica suficiente para permanecer firme durante as fases de transporte e secagem.

Em geral, após a etapa de fundição, as peças ainda possuem umidade elevada, e segundo a ABCERAM (2021) a água deve ser eliminada de forma lenta e gradual

para evitar tensões e, conseqüentemente, defeitos nas peças. Então, após serem retiradas dos moldes, elas seguem para estufas (temperatura variável entre 50°C e 150°C) para garantir que toda a umidade tenha sido eliminada.

Enquanto livres de umidade, as peças estão prontas para receber a aplicação dos esmaltes cerâmicos e carimbos da marca, onde a aparência em questão de cor e acabamento, será definida pelo revestimento (esmalte) aplicado após as etapas de fundição e secagem.

A última etapa do processo de fabricação da cerâmica sanitária é conhecida como queima, tecnicamente chamada sinterização. Nesta fase, os produtos adquirem suas propriedades finais, onde a barbotina passa por uma série de transformações físicas e químicas em função de seus componentes minerais. Silva (2008) explica que quando materiais à base de argila são aquecidos a temperaturas elevadas, ocorrem reações bem conhecidas atualmente. Uma delas é a vitrificação, ou seja, a formação gradual de um vidro líquido que flui para dentro e preenche parte do volume dos poros. Assim, como resultado é esperado o desenvolvimento de novas fases cristalinas e a soldagem interna dos grãos.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia – MME (2019), a indústria de louça sanitária conta basicamente em sua matriz energética com o consumo do combustível gás natural no processo de combustão para secagem e queima das peças. A estimativa de consumo de gás natural varia de 153 m<sup>3</sup>/t a 388 m<sup>3</sup>/t de louça, com a média nacional situando-se em torno de 306 m<sup>3</sup>/t. O ciclo de queima compreende três fases: aquecimento, patamar e resfriamento. Dependendo do tipo de produto, esta etapa pode durar de alguns minutos até dias.

Após a sinterização, finalmente as peças são submetidas às práticas de controle de qualidade, como forma de assegurar a integridade dos produtos que serão comercializados.

#### *3.2.4 Geração de Resíduos*

Com os avanços tecnológicos, aumento do número de indústrias, o alto consumo de bens, além de promover o crescimento econômico, ocasiona o aumento da produção de lodos e resíduos industriais (HANSEN et al., 2015).

De acordo com Cavalcante (2004), no processo de fabricação da cerâmica sanitária são gerados resíduos industriais com diferentes características, obtidas em função das etapas do processo a qual são concebidos, da tecnologia utilizada e dos

produtos fabricados. Deste modo, podem ser citados os principais resíduos obtidos neste segmento:

- Restos de matéria prima, barbotina e peças cruas
- Efluente líquido (lamas e lodo)
- Produtos acabados fora de especificação (cacos, scrap)
- Moldes de gesso

Com relação aos moldes de gesso, Silva (2017) comenta que grande parte da massa descartada é consumida pela indústria cimenteira. Essa massa deriva do descarte dos moldes, à medida que eles perdem a capacidade de absorção da umidade presente na barbotina.

Os produtos acabados que não apresentam os requisitos necessários para serem comercializados, se tornam rejeitos inertes normalmente destinados a aterros dentro da própria empresa. No aterro, muitas vezes esse material é fragmentado em pedaços menores, vindo a se transformar no que é conhecido como cacos ou scrap (RESENDE, 2015).

O efluente líquido é gerado principalmente nas operações de limpeza industrial. Dessa forma, o fluxo de água é capaz de carregar os restos de matéria prima, bem como os resíduos sólidos acumulados nos moldes e nas cabines de esmaltação. O efluente líquido segue então para lagos de decantação, onde geralmente a água é recuperada em estações de tratamento e a massa sólida permanece concentrada (SILVA, 2017).

A composição desse resíduo é muito similar às matérias-primas, porém com adição de elementos pesados como zinco, chumbo, cádmio, cromo, cobre, níquel e cobalto oriundos de esmaltes e corantes (SILVA, 2008).

### *3.2.5 Santa Clara Louças Sanitárias*

A Santa Clara Louças Sanitárias é uma indústria de cerâmica que produz peças destinadas ao uso sanitário. De acordo com as informações disponíveis no site oficial da empresa, atualmente as operações são realizadas em apenas uma unidade. Localizada no Distrito Industrial de Araxá-MG, a empresa tem sua estrutura em um ponto estratégico, cerca de 442 km de distância de São Paulo e 318 km de Belo Horizonte.

O grupo iniciou suas atividades produtivas em 2001, e no ano de 2013 ampliou suas operações para novas plataformas de carregamento, o que foi capaz de desafogar os processos de despacho e agilizar a entrega dos produtos.

No estudo da cadeia produtiva deste segmento industrial conduzido por Junior et al. (2019), a Santa Clara Louças Sanitárias ocupa a 17ª posição na tabela que apresenta a relação das unidades industriais de louça sanitária no Brasil. Com capacidade produtiva instalada estimada em 150 mil peças por ano, segundo o autor, no ano de 2017 a empresa foi capaz de alcançar essa marca. Informações coletadas junto aos proprietários sugerem que esse valor tende a crescer.

Com relação a matéria prima, atualmente a empresa utiliza os seguintes materiais para composição da barbotina:

- Argila AD46
- Argila Darci
- Argila São Simão
- Filito Bambuí
- Granito moído

O material é recebido in natura, onde são armazenados em galpões dentro da própria empresa. Dessa forma, as argilas representam o grupo de matéria prima plástica, e como não plástica (fundente) é utilizado filito e granito. O agente defloculante aplicado é o Silicato de Sódio.

No tocante à geração de resíduos, informações coletadas na empresa revelam que são gerados cerca de 5.000 L diários de efluente líquido, com um total de resíduo sólido da ordem de 350 toneladas por ano. Além disso, este efluente líquido é proveniente de três setores: conformação, esmaltação e em pequena parte pela modelagem. Não é feito nenhum tipo de reutilização da massa sólida (resíduo) proveniente desse efluente, que é acumulado em um lago de decantação, onde atualmente a empresa consegue reutilizar somente a água.

Por este motivo, o volume de resíduo sólido na lagoa aumenta a cada dia, e ao chegar ao ponto de saturação, esse material é transferido para aterros sanitários, o que gera despesas para a empresa. Então, os proprietários buscam constantemente uma forma de reaproveitamento deste material, e sugerem sua reutilização na própria fábrica ou em outros segmentos da Construção Civil. Nesse sentido, estudos

anteriores já foram realizados (RESENDE, 2015; CASTRO, 2016; SILVA, 2017) em parceria com a empresa, que se mostra sempre aberta para que trabalhos com esse objetivo sejam desenvolvidos.

### 3.3 Cimento Portland

A Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2021) define o cimento como:

[...] um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água. Na forma de concreto, torna-se uma pedra artificial que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada obra. Graças a essas características, o concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água. (ABCP, 2021).

O cimento Portland é obtido por meio da moagem do clínquer Portland, com a adição de pequenas quantidades de sulfato de cálcio (3% a 5% em massa). A obtenção do clínquer se dá por meio de uma extensa operação, que começa com a extração da matéria prima rocha calcária, seguida por britagem, moagem, homogeneização, queima e resfriamento (BATTAGIN, ISAIA, 2011).

Devido às altas temperaturas necessárias para se alcançar as propriedades ligantes do clínquer (próximas a 1400°C), a produção deste material é acompanhada por grandes emissões de CO<sub>2</sub> e um alto consumo de matéria prima. De acordo com Mohammed (2017) para cada quilograma de cimento produzidos são emitidos na atmosfera cerca de 830 gramas de gás carbônico. Essas emissões estão relacionadas não só a alta temperatura demandada no processo, mas também pela decomposição da rocha calcária.

O Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON tem em sua bibliografia o livro técnico “Concreto: Ciência e Tecnologia”. Neste, os autores Battagin e Isaia (2011) mostram os diversos tipos de cimentos normalizados no Brasil. Um deles, é o cimento Portland comum, chamado de CPS (Cimento Portland Simples). Para este tipo, caso feitas adições minerais de até 5%, ele será chamado CPI-S. Quando essas adições forem superiores a 5% e inferiores a 34% para escória granulada de alto forno, 14% para pozolana e 10% para fíler, o cimento passa a ser chamado de CII-E (Cimento Portland Composto com Escória), CII-Z (Cimento Portland Composto com Pozolana) ou CII-F (Cimento Portland Composto com Fíler). Nos casos em que as proporções

da escória de alto forno ou pozolana é maior que 34% e 14% respectivamente, os cimentos serão classificados como cimento Portland de alto forno (CPIII) e cimento Portland Pozolânico (CPIV). Existem também os tipos que apresentam um baixo percentual de adição, como por exemplo o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV ARI), que possui no máximo 5% de adição de fíler calcário. Os cimentos resistentes a sulfatos são designados pela sigla inicial de seu tipo, acrescida de RS. O cimento que apresenta teor mínimo ou ausência de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) é classificado como cimento Portland Branco (CPB), e o cimento Portland para Poços Petrolíferos (CPP) é o cimento que apresenta características favoráveis para aplicação na indústria do petróleo.

### **3.4 Materiais Cimentícios Suplementares**

A reutilização de subprodutos da mineração na construção civil como agregados e fílers para a composição de materiais cimentícios é comumente proposta. Além de reduzir o volume de resíduos acumulados, essa prática também pode contribuir para a redução das emissões de gás carbônico. Dessa forma, do ponto de vista ambiental, a aplicação mais desejada é aquela em que o material descartado substitui ou suplementa um aglomerante, ou seja, reduz a utilização do clínquer de cimento Portland. Acompanhada à produção de clínquer, tem-se um processo que consome uma enorme quantidade energética e resulta em uma alta liberação de  $\text{CO}_2$ . Então, os materiais alternativos utilizados para substituir parte do clínquer no cimento Portland são denominados materiais cimentícios suplementares (MCS) ou adições minerais (PARIS et al., 2016). Como exemplo, pode-se citar o que é feito atualmente com o CPII-E e CPIII, cimentos compostos com escória de alto forno muito bem aceitos comercialmente no Brasil.

Entretanto, o que motiva as pesquisas atuais relacionadas à incorporação de materiais alternativos em matrizes cimentícias não são apenas as reduções de  $\text{CO}_2$  ou mesmo a reciclagem de resíduos da mineração. São verificadas ainda melhorias consideráveis nas propriedades da matriz tanto no estado fresco quanto no endurecido. Ao se incorporar MCS nas matrizes cimentícias, pode-se obter aumento na resistência mecânica, elevando a resistência à tração e compressão, melhorias na durabilidade através da redução da porosidade e permeabilidade, liberação de calor

no processo de hidratação e reduzindo ou inibindo a reação álcali agregado (DE SOUZA MORAIS et al., 2018). Dessa forma, os MCS são definidos como:

[...] materiais compostos de partículas finas com características semelhantes ou complementares às do cimento e, na maioria das vezes, obtidos por beneficiamento de resíduos industriais e de mineração. Porém, como já são conhecidos e difundidos seus benefícios, pode haver a produção especificamente para este fim, como é o caso da sílica ativa e do metacaulim, comercializados como adições minerais e que não são parte do ciclo de produção de nenhum outro material. (FIGUEREIDO e KUSTER, 2019)

As adições minerais no cimento podem ser classificadas como materiais cimentantes, pozolanas e fílers. Os materiais que foram submetidos a tratamentos térmicos ou subprodutos industriais com atividade pozolânica são definidos na NBR 12653 (ABNT, 2014) como pozolanas artificiais. De forma geral, as pozolanas possuem grãos menores que os do cimento, característica capaz de exercer efeito fíler no concreto ou argamassa, preenchendo espaços vazios entre os agregados e o aglomerante.

As pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que possuem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos no cimento Portland, resultando em uma produção adicional de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, compostos mais estáveis do cimento e que possuem propriedades aglomerantes. Assim, a reação pozolânica é a reação química entre o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) resultante do processo de hidratação do cimento e o material pozolânico, formando principalmente silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, composto que confere resistência ao cimento (BATTAGIN, 2011).

O fíler de calcário tornou-se o substituto de clínquer mais utilizado globalmente, com um teor médio de cerca de 7%, que se mantém desde 2010. Até 10% de fíler calcário pode ser adicionado sem exercer influências negativas nas propriedades mecânicas e físicas dos concretos e argamassas, visto que uma fração do calcário reage com a alumina disponível no meio para formar fases de carboaluminato que contribuem para resistência mecânica e durabilidade, além de que as partículas mais finas também aumentam a nucleação do C-S-H formando uma microestrutura mais densa (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016).

### 3.5 Estudos de Reutilização: Resíduo Cerâmica Sanitária

O gerenciamento de subprodutos industriais consiste em um dos maiores problemas que o mundo globalizado enfrenta nos diversos segmentos. Com relação à indústria de cerâmica sanitária, apesar dos resíduos gerados apresentarem uma condição química inerte, seu período de biodegradação ultrapassa os 4000 anos, o que classifica esses materiais como não biodegradáveis. Dessa forma, sua deposição de forma incorreta causa contaminação do ambiente e seu acúmulo gera um impacto visual significativo (HALICKA, OGRODNIK, ZEGARDLO; 2013).

Entretanto, a similaridade química e física entre os resíduos gerados neste setor com a matéria prima que os origina, viabiliza estudos relacionados ao potencial de reutilização desses materiais. Devido ao fato de as estruturas em concreto incorporarem uma grande quantidade de agregados, diversas pesquisas têm sido direcionadas para que cada uma possa se tornar um pequeno aterro de inertes. Segundo Zegardlo (2016) a vantagem de se incorporar resíduo de cerâmica sanitária na composição do concreto, é que este material não requer nenhum tipo específico de processamento para este fim.

No estudo de Cavalcante (2004), o autor incorpora quatro tipos diferentes de resíduos da indústria cerâmica sanitária na composição da massa que dá origem a peças de revestimento. O autor conclui que a indústria de revestimento cerâmico pode ser uma possível fonte de reutilização dos resíduos gerados na produção da cerâmica sanitária.

Albuquerque (2009), avalia o potencial de reutilização de três diferentes tipos de resíduos cerâmicos da indústria de louça sanitária, dentro do próprio setor. O autor aplica resíduo da lavagem da argila, da massa da barbotina e da estação de tratamento de água na composição de massas que foram testadas e comparadas a massa padrão utilizada no processo produtivo de uma empresa no Nordeste do Brasil. Os resultados demonstram que existe um alto potencial para aplicação desses materiais na composição das massas, sem comprometer a qualidade final dos produtos.

Em um estudo conduzido por Medina (2012), foram elaborados quatro tipos de argamassas, um como referência e outros três incorporando os cacos cerâmicos em sua composição. O método consiste na substituição parcial (15%, 20% e 25%) em massa do agregado graúdo pelos cacos. Os resultados sugerem que este método é

promissor, uma vez que a resistência mecânica (compressão e tração) aumentou à medida em que o percentual de substituição foi maior. Além disso, a substituição não interferiu nas reações químicas relacionadas a hidratação e endurecimento do.

No estudo de Halicka, Ogodnik e Zegardlo (2013), os autores descrevem os procedimentos adotados para a produção de uma mistura de concreto utilizando agregados finos e grosso provenientes de resíduo sólido reciclado da indústria de cerâmica sanitária. No trabalho, foi apresentado uma avaliação das propriedades dos cacos cerâmicos enquanto agregados, bem como das composições de concreto contendo esse material.

Em trabalhos mais recentes, Lucas et al. (2016) produziram argamassas de revestimento contendo diferentes proporções de areia e cacos cerâmicos da indústria sanitária. Os autores substituíram o volume de agregados por cacos cerâmicos em quatro proporções (0%, 25%, 50% e 100%) e testaram as misturas. Como resultado, é descrito um desempenho mecânico satisfatório para as proporções contendo até 50% de substituição.

Zegardlo (2016) descreve um modelo para produção de concretos de ultra resistência, o qual incorpora mais de 60% em massa os resíduos de cerâmica sanitária. Além do agregado reciclado, microsílica e um superplastificante compõem o traço, nas proporções de 10% e 1,5%, respectivamente. O autor utilizou duas faixas granulométricas para os agregados reciclados (0-4mm e 4-8mm), o que corresponde a utilização dos agregados finos e grossos naturais. Como resultado, o concreto produzido com agregado reciclado apresentou média de 126,99 MPa para resistência à compressão, quase 25% maior quando comparada aos 95,57 MPa do concreto contendo agregado graúdo basáltico (cascalho).

Com relação a atividade pozolânica, os estudos de Reig et al. (2021) e Pitarch et al. (2021) avaliam como a incorporação de resíduos de louça sanitária misturados com cimento Portland interfere nas propriedades dos concretos produzidos. O método consiste na moagem dos cacos cerâmicos, caracterização e aplicação como substituto (0-50%) em massa do cimento em pastas e argamassas, curadas à temperatura ambiente de 3 a 365 dias. Como resultado, não foram observadas variações significativas de trabalhabilidade à medida em que o aumento do teor de resíduo aumenta. Os autores comentam que embora a atividade pozolânica do resíduo tenha sido relativamente lenta, essa propriedade melhora com o tempo de cura. Após 90 dias de cura, as argamassas preparadas com até 25% de substituição

atenderam aos requisitos estabelecidos para materiais pozolânicos, da mesma forma que as cinzas volantes.

Finalmente, é importante destacar os trabalhos já desenvolvidos nesse sentido dentro da própria instituição CEFET-MG em parceria com a empresa Santa Clara Louças Sanitárias.

Resende (2015) avaliou o potencial de aplicação do resíduo sólido acumulado na lagoa da empresa como adição mineral em compósitos cimentícios. Na ocasião, a autora utiliza o método descrito na NBR 5752 (ABNT, 1992), o qual prescreve a substituição de 35% do volume de cimento pelo material supostamente pozolânico. Dessa forma, não foram encontrados resultados satisfatórios, já que o índice de atividade pozolânica se manteve abaixo dos 75% estabelecido. Contudo, esse resultado vai de acordo com o que é descrito por Reig et al. (2021) e Pitarch et al. (2021), percentuais máximos de 25% produzem resultados aceitáveis. Vale ressaltar que a versão mais recente da norma em questão, NBR 5752 (ABNT, 2014) estabelece um percentual de 25% de substituição para se avaliar o índice de atividade pozolânica.

Os trabalhos de Castro (2016) e Silva (2017) defendem a reutilização de diferentes tipos de resíduo dentro da própria empresa. Castro (2016) utilizou cacos cerâmicos moídos para substituir uma das matérias primas fundentes, o granito. Foram testadas as composições contendo os percentuais de substituição de 5, 10, 25, 50 e 100% para confecção das peças. Os resultados apontam para a reutilização desse material na linha de produção das peças ou até em outros compósitos cimentícios.

De maneira similar, Silva (2017) utiliza o conteúdo sólido acumulado na lagoa em duas formulações, substituindo a matéria prima fundente granito e filito. Foram avaliadas seis proporções diferentes de resíduos (100, 75, 50, 25, 10 e 5%) para cada formulação, onde os corpos de prova foram ensaiados segundo as propriedades de reologia, massa específica, cor de secagem e queima, retração linear, ruptura por flexão, deformação piropelástica, absorção de água e produção de peças. Segundo o autor, os resultados obtidos mostram que este resíduo apresenta um alto potencial de reutilização no processo de produção da empresa.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Materiais

#### 4.1.1 Resíduo Cerâmica Sanitária

Este trabalho utilizou o resíduo sólido oriundo do processo de fabricação da indústria de cerâmica sanitária como material cimentício suplementar. Acredita-se que este possa ser incorporado na composição de argamassas, uma vez conhecida sua composição química e algumas de suas propriedades (RESENDE, 2015; CASTRO, 2016; SILVA, 2017). Dessa forma, os estudos relacionados não avaliam o potencial de aplicação deste resíduo como material pozolânico, segundo a versão mais recente da norma brasileira NBR 5752 (ABNT, 2014).

Ao se observar a Figura 1 é possível perceber a similaridade entre uma amostra de resíduo (após processo de preparação) à esquerda, com o cimento Portland (CPII-F-32) à direita.

Figura 1 - Similaridade entre o resíduo e o cimento



Fonte: Autoria própria

#### 4.1.2 Cimento Portland CII-F-32

Para composição das pastas bem como moldagem dos corpos de prova, foi utilizado o cimento Portland CII-F-32. De acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1997), esse tipo possui concentrações entre 96 e 100% de clínquer e sulfato de cálcio, com adições de 6 a 10% de fíler calcário.

#### 4.1.3 Areia Normal

A areia utilizada como agregado miúdo para moldagem dos corpos de prova no programa experimental é normalizada pela NBR 7214 (ABNT, 2015). Este material foi classificado e comercializado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo e recebe quatro diferentes denominações de acordo com suas frações granulométricas, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Frações granulométricas da areia normalizada IPT

<b>Areia Normal</b>	
<b>Denominação</b>	<b>Abertura (mm)</b>
Grossa	2,4 a 1,2
Média grossa	1,2 a 0,6
Média fina	0,6 a 0,3
Fina	0,3 a 0,15

Fonte: Aatoria própria

#### 4.1.4 Água

A água utilizada é fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e destilada no Laboratório de Edificações do Departamento de Minas e Construção Civil – CEFET-MG, Campus IV Araxá.

## 4.2 Métodos

Para realização do programa experimental, foram coletados cerca de 300kg do resíduo sólido acumulado na lagoa de decantação da Santa Clara Louças Sanitárias. A etapa de coleta foi realizada de acordo com a NBR 8952 (ABNT, 1992) e o material armazenado em tambores plásticos para facilitar seu transporte. Para que fosse incorporado às misturas, todo esse conteúdo passou por um processo de preparação

o qual consiste basicamente na secagem em estufa mantida a 100°C durante 24 horas e peneiramento com objetivo de se eliminar impurezas (folhas, galhos, pedras e outras). Devido à umidade presente no material enquanto acumulado na lagoa, após sua secagem foi necessário um segundo processo de peneiramento para se alcançar a granulometria similar ao cimento Portland. Para isso, foram utilizadas peneiras normalizadas #200 (abertura de 0,074mm).

A primeira etapa do programa experimental compreende na caracterização química, física, mineralógica e visual da amostra. Para isso, foram realizadas as técnicas de fluorescência de raios X, difração de raios X, análise granulométrica a laser, microscopia eletrônica de varredura e determinação de perda ao fogo.

Para avaliar a atividade pozolânica do material, foram realizados os ensaios de calor de hidratação, condutividade elétrica em solução de hidróxido de cálcio e determinação do Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28 dias. Finalmente, os corpos de prova produzidos foram submetidos a testes de caracterização física, mecânica e de durabilidade, com objetivo de se avaliar como a incorporação do resíduo interfere nas propriedades da argamassa. A Tabela 3 mostra a quantidade de corpos de prova moldados para cada teste do programa experimental.

Tabela 3 - Quantidade de corpos de prova para o programa experimental

Argamassa	Substituição (%)	Resistência à Compressão		Absorção de água	Ataque Ácido
		7 dias	28 dias		
A	0	4	4	3	3
B	25	4	4	3	3
C	12,5	4	4	3	3

Fonte: Autoria própria

#### 4.2.1 Caracterização das amostras de resíduo

##### 4.2.1.1 Análise Granulométrica a Laser

A distribuição do tamanho de partícula para o resíduo foi determinada utilizando um granulômetro a laser CILAS 1090. A análise foi realizada a úmido, utilizando água destilada. A amostra foi gradualmente adicionada ao fluxo de água, com a bomba

centrífuga e agitador ligados, até se atingir um intervalo de obscuração entre 11 e 15%. Após acerto da obscuração, a sonda ultrassônica foi ligada por 60 s e a medição do tamanho de partícula foi realizada.

#### 4.2.1.2 Difração de Raios X

As fases cristalinas da amostra foram detectadas utilizando difratômetro de raios X da marca SHIMADZU, modelo XRD-7000, com tubo de raios X de cobre (Cu K-alpha) com tensão de 40 kV e corrente elétrica de 30,0 mA, ângulo de varredura de  $2\theta$  de 10 a 90° e passo de 2°/min. Os picos foram identificados utilizando o software Match! 3 com a base de dados da Crystallography (COD).

#### 4.2.1.3 Fluorescência de Raios X

Os óxidos presentes na amostra foram identificados através da espectrometria de fluorescência de raios x por energia dispersiva, em um espectrômetro ZSX/Primus II, Rigaku.

#### 4.2.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para visualização microestrutural da amostra foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura de baixo vácuo da marca Hitashi, modelo TM 3000 com magnitude de aumento de 15 a 30.000, aceleração variável entre 5kV e 15kV e detector de elétrons retroespalhados.

#### 4.2.1.5 Perda ao Fogo

A perda ao fogo consiste em avaliar o percentual matéria orgânica que foi perdido em uma amostra durante sua queima. Neste estudo a perda ao fogo foi determinada de acordo com a NBR NM 18 (ABNT 2004). Para isso, foi pesada  $1 \pm 0,01$  g de amostra e acrescentada a um cadinho de porcelana de massa conhecida. Em seguida, o material foi queimado em um forno mufla mantido a uma temperatura entre 900°C e 1000°C, durante cinquenta minutos. Este método foi reproduzido em triplicata.

A porcentagem de perda ao fogo (PF) foi calculada através da seguinte equação:

$$PF = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100$$

onde,

PF = % de Perda ao fogo;

$m_1$  = Massa do cadinho mais a massa da amostra ensaiada, em gramas;

$m_2$  = Massa do cadinho mais amostra, após a calcinação, em gramas;

$m$  = Massa da amostra utilizada no ensaio, em gramas.

#### 4.2.2 Atividade pozolânica do resíduo

##### 4.2.2.1 Calor de Hidratação

O ensaio de calorimetria foi realizado por ser capaz de medir o fluxo e acúmulo de calor resultantes da reação de hidratação de pastas contendo cimento. Como forma de verificar se a temperatura alcançada corresponde ao esperado para o material cimentício suplementar estudado, os resultados foram comparados aos valores estabelecidos pela norma C1897 (ASTM, 2020). Para tal, foram compostas duas pastas, uma referência (PR) contendo apenas Cimento Portland (100% cimento, 0% resíduo) e na outra (PS) foi aplicado o percentual de substituição (75% cimento + 25% resíduo). A relação água cimento foi mantida em 0,48. A Tabela 4 mostra a composição das pastas.

Tabela 4 - Composição das pastas para ensaio de calor de hidratação

	<b>Cimento (g)</b>	<b>Resíduo (g)</b>	<b>Água (g)</b>
PR (0%)	30	0	14,4
PS (25%)	22,5	7,5	14,4

Fonte: Autoria própria

O calor de hidratação das pastas nas primeiras 48h foi mantido a 23°C, e a pressão atmosférica foi analisada utilizando um calorímetro isotérmico de alta precisão, como forma de medir o fluxo de calor das pastas de cimento. A mistura foi executada por um misturador interno em duas sequências, iniciadas após 30 minutos a partir do fechamento do compartimento da amostra. A primeira sequência consistiu em 40 ciclos (sentido horário e anti-horário) de arcos a 720°. A segunda sequência consistiu em mais 40 ciclos em arcos de 360°. A velocidade de mistura foi mantida em 200 rpm para ambas as sequências. A água foi adicionada no décimo ciclo da primeira

sequência, então começa o calor de hidratação. Os parâmetros foram configurados para obter dados a cada 5 segundos.

#### 4.2.2.2 Condutividade Elétrica em Solução de hidróxido de cálcio

O ensaio de condutividade elétrica em solução de hidróxido de cálcio proposto por Luxan, Madruga e Saavedra (1989) consiste na medição da variação da condutividade elétrica sofrida por solução saturada de hidróxido de cálcio após ser adicionado o material que se deseja avaliar a propriedade pozolânica. O método consiste na medição da condutividade inicial de 200ml de uma solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$  em água destilada, mantida a 40°C. Então, foram adicionados à solução 5g do resíduo e após agitação constante durante 120 segundos a condutividade foi medida novamente. Foi utilizado um condutímetro da marca DIGIMED (DM-32). Este teste foi reproduzido em triplicata.

A partir da diferença da condutividade elétrica da solução antes e após a adição do material testado, é possível classificá-lo de acordo com a Tabela 5:

Tabela 5 - Critério de classificação de pozolanicidade

<b>Classificação do material</b>	<b>Variação da Condutividade (<math>\Delta\text{ms/cm}</math>)</b>
Não pozolânico	$\Delta\text{ms/cm} < 0,4$
Pozolanicidade Variável	$0,4 < \Delta\text{ms/cm} < 1,2$
Boa Pozolanicidade	$\Delta\text{ms/cm} > 1,2$

Fonte: Adaptado de Luxan, Madruga e Saaveedra (1989)

#### 4.2.3 Caracterização do concreto

##### 4.2.3.1 Índice de Desempenho com cimento Portland

A resistência à compressão da argamassa foi avaliada usando corpos de prova cilíndricos (50 mm diâmetro x 100 mm altura). Foram moldados quatro corpos de prova para cada traço. A composição das argamassas A, B e C está listada na Tabela 6. A norma brasileira NBR 5752 (ABNT, 2014) prescreve o método para se determinar o índice de atividade pozolânica de um material, como substituto parcial ao Cimento Portland. Para isso, duas argamassas com composições distintas foram preparadas. A argamassa A (controle) contém apenas Cimento Portland, quantidades iguais de areia normalizada em diferentes diâmetros (1.19, 0.595, 0,297 e 0,140 mm) e água.

Na composição da argamassa B, 25% (em massa) do Cimento Portland foi substituído pelo resíduo estudado. As proporções de areia e água foram mantidas.

Tabela 6 - Composição das argamassas para moldagem dos CP's

Composição (g)	Argamassa		
	A	B	C
Cimento CP II-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4	546 ± 0,4
Resíduo	-	156 ± 0,2	78 ± 0,4
Areia normal*	1872,0	1872,0	1872,0
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2	300 ± 0,2

\*Frações de (468 ± 0,3)g para cada um dos quatro diâmetros

Fonte: Autoria própria

Dessa forma, ambas as argamassas têm uma razão ligante/agregado de 3 e a relação água/cimento igual a 0,48, conforme estabelece a norma NBR 7215 (ABNT, 2019). Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em uma solução saturada de hidróxido de cálcio para cura até a idade de ruptura conforme estabelece a NBR 9479 (ABNT, 2016). A Figura 2 exibe um corpo de prova (A, B e C respectivamente) para cada uma das composições estudadas.

Figura 2 - Corpos de prova para cada composição



Fonte: Autoria própria

Neste estudo, foi proposta uma terceira composição a qual apresenta uma proporção intermediária de substituição. A argamassa C foi composta com objetivo de se verificar de forma qualitativa como a adição de resíduo interfere no comportamento da resistência à compressão dos compósitos. Nesse sentido, a argamassa C apresenta o percentual de 12,5% (massa) da substituição do cimento pelo resíduo.

O resíduo foi previamente misturado e homogeneizado ao cimento em um recipiente fechado dois minutos antes da composição das argamassas B e C.

A resistência a compressão foi medida aos 7 e 28 dias utilizando uma máquina de teste universal com capacidade de 300kN (DL30000, EMIC). Os corpos de prova foram submetidos a um incremento constante de carga de 0,25 MPa.s<sup>-1</sup> como forma de promover uma aproximação de condição estática, o que garante a consistência nos resultados (BEZERRA, AGUILAR e CELTIN, 2012).

Finalmente, o índice de atividade pozolânica foi calculado utilizando a seguinte equação:

$$I(\%) = \frac{I_{CB}}{I_{CA}} \times 100$$

Onde:

$I_{CA}$  é a resistência à compressão da argamassa controle;

$I_{CB}$  é a resistência à compressão da argamassa que contém o percentual de substituição do Cimento Portland pelo resíduo;

I (%) o índice de atividade pozolânica.

#### 4.2.3.2 Absorção de Água, índice de vazios e massa específica

A absorção de água, índice de vazios (porosidade), massa específica (seca e saturada) e a densidade aparente foram determinados de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005). Para isso, três corpos de prova cilíndricos para cada traço foram pesados aos 28 dias de cura. O teste foi realizado utilizando uma balança hidrostática com uma cesta anexada para sustentar a amostra durante a pesagem. Os corpos de prova foram pesados em três condições: (1) saturados, (2) submersos em água e (3) secos. Para a terceira condição, os corpos de prova foram mantidos em uma estufa durante 24h à temperatura de 100°C antes da pesagem. Os valores foram calculados através das seguintes equações:

$$\text{Absorção de Água (\%)} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100$$

$$\text{Índice de vazios (\%)} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100$$

$$\text{Massa específica da amostra seca } \left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i}$$

$$\text{Massa específica da amostra saturada } \left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i}$$

$$\text{Massa específica real } \left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{m_s}{m_s - m_i}$$

Onde:

$m_{sat}$  (g) é a massa do corpo de prova saturado em água;

$m_s$  (g) é a massa do corpo de prova após secagem na estufa;

$m_i$  é a massa do corpo de prova imerso em água;

#### 4.2.3.3 Desempenho frente à ataque ácido

Para avaliar a durabilidade do compósito cimentício contendo resíduo foi realizado o ensaio de ataque ácido. Para isso, foram utilizados três corpos de prova para cada traço estudado. Após 28 dias de cura, os corpos de prova foram secos em uma estufa durante 24h mantido a 100°C, para então serem pesados e submersos em uma solução de ácido sulfúrico. A concentração da solução foi fixada em 5% volume/volume, e os três CP's para cada traço foram armazenados em recipientes diferentes. Este ácido, bem como sua concentração, foram escolhidos por gerar um ambiente extremamente agressivo aos compósitos cimentícios (Magalhães et al., 2020). Após 7 dias os CPs foram retirados do recipiente, lavados com água corrente, escovados para eliminar o restante da solução, e mais uma vez secos na estufa para serem novamente pesados como forma de se determinar a perda de massa causada pelo ataque do ácido.

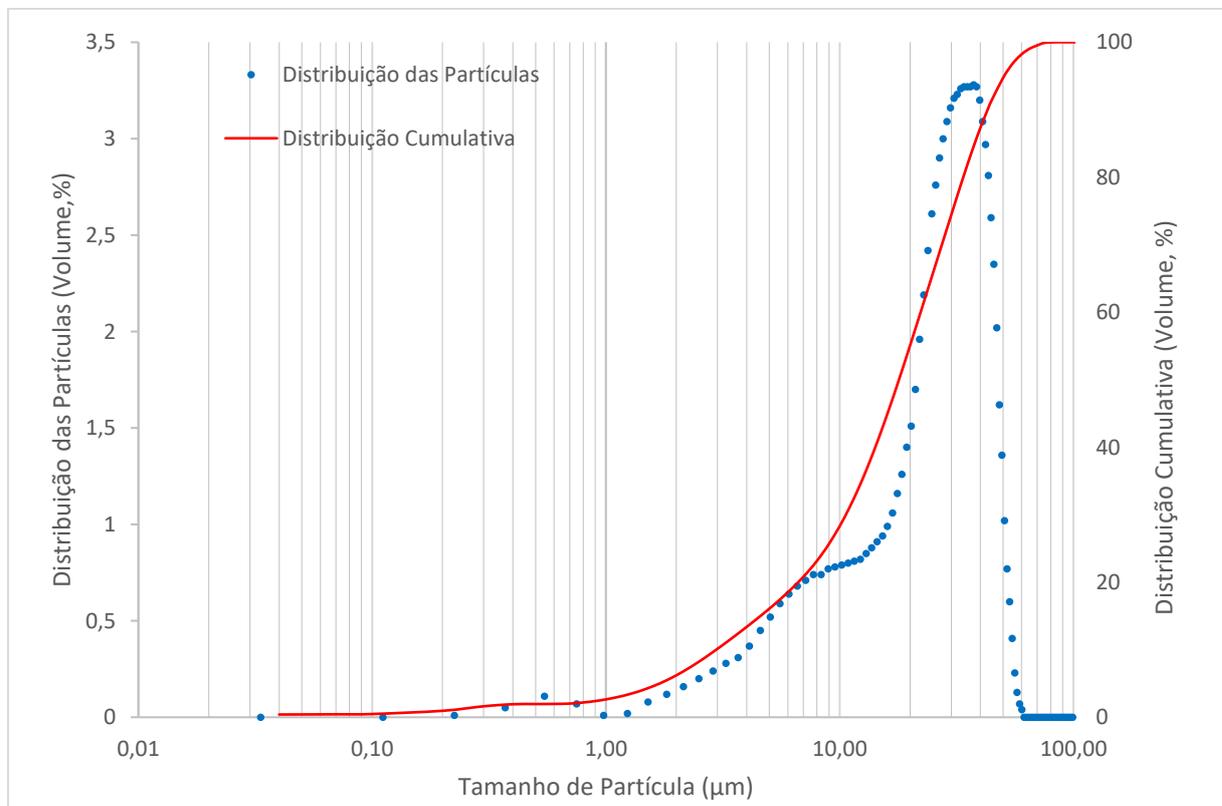
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização das amostras de resíduo

#### 5.1.1 Análise Granulométrica a Laser

A curva da distribuição cumulativa do tamanho de partícula para o resíduo é exibida na Figura 3. O tamanho de partícula se encontra no intervalo de 0.10 – 100.00  $\mu\text{m}$ , com 90% ( $D_{90}$ ) abaixo de 42,94  $\mu\text{m}$ . O diâmetro médio ( $D_{med}$ ) das partículas pode ser observado na curva, centrado em um valor próximo a 21.00  $\mu\text{m}$ . No ponto em que foram coletadas as amostras o material já havia passado por todo processo industrial, que inclui moagem e peneiramento, o que explica este ajuste no tamanho de partícula. A norma brasileira NBR 12653 (ABNT, 2014) estabelece que para ser classificado como pozolânico, o material deve ter menos de 20% de partícula retida em malha menor que 45  $\mu\text{m}$ , o que implica que este resíduo é apropriado para uso como material cimentício suplementar.

Figura 3 - Curva granulométrica da amostra de resíduo



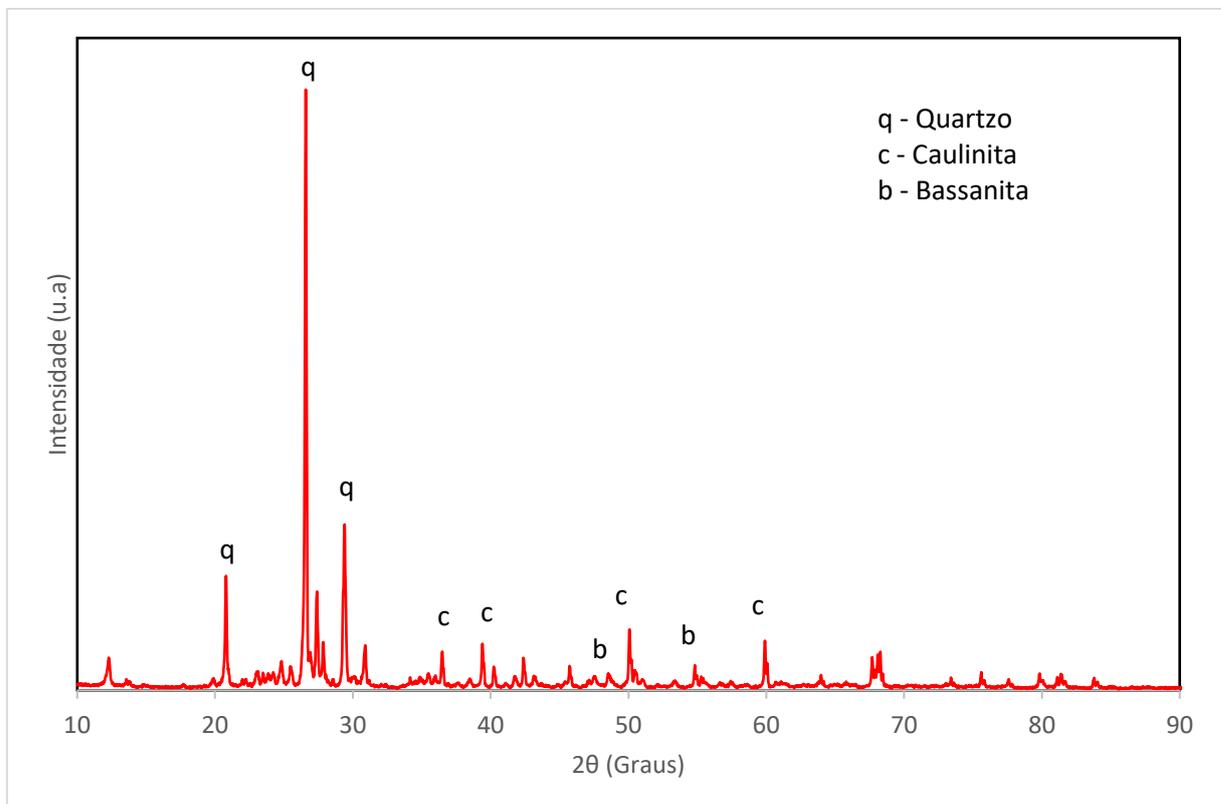
Fonte: Autoria própria

O tamanho e forma das partículas dos materiais cimentícios suplementares afeta diretamente no processo de hidratação do cimento, de modo que grandes valores de área superficial contribuem de forma positiva na reatividade (LILKOV, DIMITROVA, GAIDARDZHIEH, 1999; ZHANG et al., 2016). Os poros formados durante o processo de hidratação do cimento devem ser evitados, já que podem levar o composto a fratura. Um material com propriedades pozolânicas e partículas finas é benéfico, visto sua capacidade em preencher vazios nas argamassas de cimento, o que melhora suas propriedades físicas através do efeito fíler (SCRIVENER et al., 2019; KHAN, et al., 2017; LIU et al., 2020).

### 5.1.2 Difração de Raios X

A Figura 4 mostra o difratograma da amostra. As fases mineralógicas de quartzo, caulinita e bassanita foram identificadas. A presença de quartzo pode ser associada ao alto teor de óxido de sílica presente nas matérias primas que compõem a amostra, mineral predominante das argilas.

Figura 4 - Difratograma da amostra de resíduo



Fonte: Autoria própria

Na análise química foi verificado um alto teor de óxido de cálcio, contudo a análise por difração de raios x identifica a fase cristalina bassanita, um sulfato de cálcio hemihidratado comumente encontrado nos moldes de gesso. Sua presença na amostra se explica pela degradação dos moldes nas etapas de fundição e lavagem (Morín et al., 2014; Silva et al., 2022). É importante frisar que após a fundição, a fase de cálcio presente no gesso é provavelmente gipsita, mas como a amostra foi seca antes da análise de DRX, a fase predominante identificada foi a original bassanita dos moldes (Geraldo et al., 2017).

### 5.1.3 Fluorescência de Raios X

A composição química da amostra verificada pela espectrometria está listada na Tabela 7. A amostra é composta basicamente pelos óxidos de silício, alumínio e cálcio. Contudo, a soma dos percentuais de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  satisfaz as condições para que o material possa seja classificado como pozolânico, conforme estabelece a norma NBR 12653 (ABNT, 2014) a qual indica que a soma desses três óxidos deve ser maior que 50% ou 70% dependendo do tipo de pozolana. Apesar do baixo teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , a presença dos demais óxidos contribui para a formação de hidratos essenciais para a durabilidade e resistência dos materiais cimentícios suplementares. Seu efeito é observado na etapa de formação do C-S-H, principal fase proveniente da hidratação do Cimento Portland (Simonsen et al., 2020; Yao et al., 2020).

Tabela 7 - Composição química da amostra de resíduo

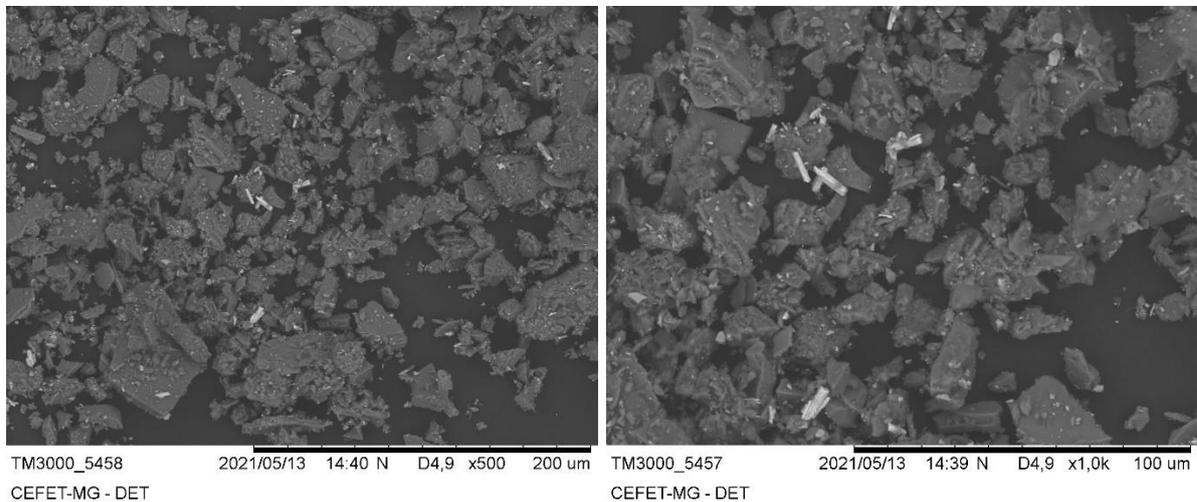
<b>Composição Química</b>	<b>(%)</b>
$\text{SiO}_2$	57,13
$\text{CaO}$	17,40
$\text{Al}_2\text{O}_3$	10,36
$\text{K}_2\text{O}$	5,10
$\text{ZrO}_2$	3,68
$\text{P}_2\text{O}_5$	2,01
$\text{BaO}$	1,92
$\text{ZnO}$	1,14
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,10
$\text{Co}_2\text{O}_3$	0,02
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,01
$\text{Rb}_2\text{O}$	0,01
$\text{SrO}$	0,00

Fonte: Autoria própria

#### 5.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

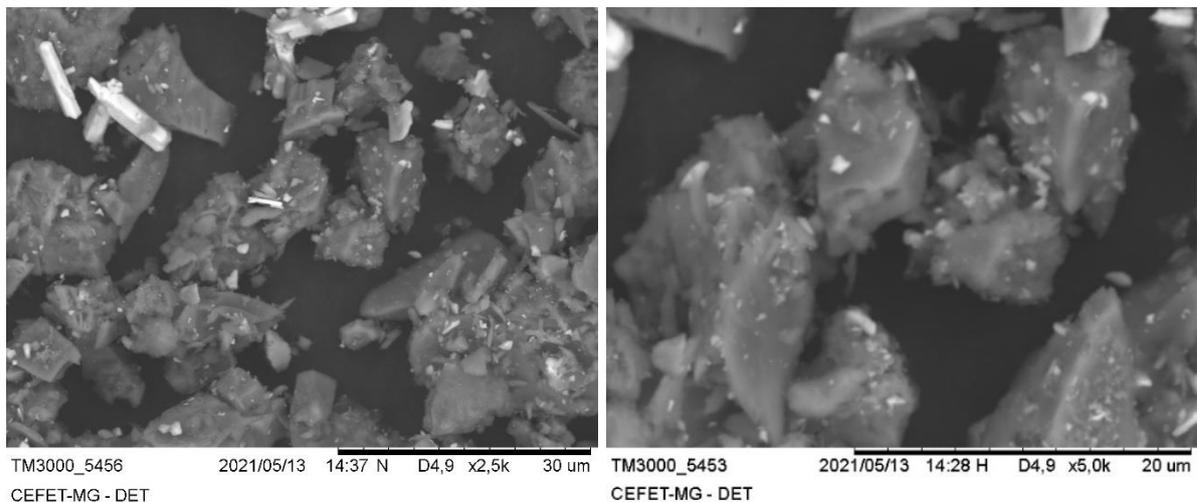
Ao visualizar as Figuras 5 e 6, percebe-se que o material possui grãos de tamanhos heterogêneos com ângulos retos e arestas vivas. Tendo em vista que as imagens foram capturadas através de detectores com feixe de elétrons retroespalhados, as partículas de cor em tons de cinza claro apresentam densidade elementar superior aos tons mais escuros. É possível identificar também que as partículas maiores são formadas por camadas ou lamelas, característica marcante presente nos materiais argilosos.

Figura 5 - Micrografia da amostra de resíduo (x500 e x1000)



Fonte: Autoria própria

Figura 6 - Micrografia da amostra de resíduo (x2500 e x5000)



Fonte: Autoria própria

### 5.1.5 Perda ao Fogo

A Tabela 8 exibe os resultados das três medições de massa para determinação da perda ao fogo da amostra de resíduo. Dessa forma, o ensaio revela uma porcentagem baixa (<0,50%) de matéria orgânica e substâncias voláteis na amostra, o que indica que o resíduo apresenta condições adequadas para ser aplicado como pozolânico segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014).

A perda ao fogo obtida por Resende (2015) mostrou um percentual de 9,5% que é muito elevado em relação aos parâmetros, o qual define que para ser considerado como material pozolânico classe E, deve ser no máximo de 6,0%. Com relação aos resultados apresentados neste trabalho, acredita-se que foram alcançados devido ao processo de preparação das amostras, que passou por duas etapas de peneiramento e secagem, o que pode ter contribuído para a redução da matéria orgânica.

Tabela 8 - Resultado perda ao fogo

	Massa (g)		
	1	2	3
<b>m</b>	22,35	22,10	23,06
<b>m<sub>1</sub></b>	23,35	23,09	24,07
<b>m<sub>2</sub></b>	23,24	23,01	24,00
<b>Perda ao Fogo (%)</b>	0,49	0,36	0,30

Fonte: Autoria própria

## 5.2 Atividade pozolânica do resíduo

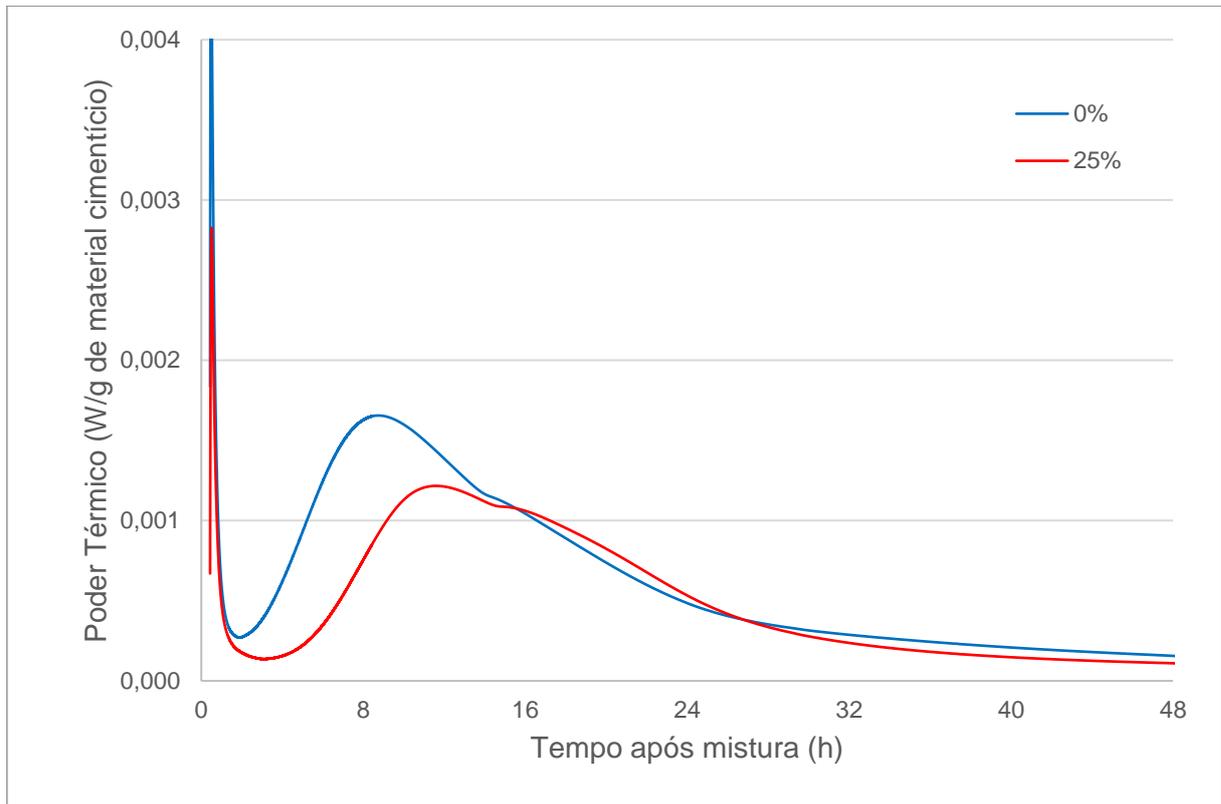
### 5.2.1 Calor de hidratação

O fluxo de calor gerado e o calor acumulado na reação das pastas de referência (0%) e substituição (25%) são exibidos nas Figuras 7 e 8 respectivamente. Ao analisar a curva do fluxo de calor (Figura 7) podem ser observados os quatro estágios típicos da reação do cimento: (1) reação inicial e dissolução; (2) período de indução ou dormência; (3) período de aceleração; (4) período de desaceleração.

No primeiro estágio ocorre a maior parte da liberação de energia na forma de calor, devido a três motivos principais: molhagem das partículas, dissolução rápida do C<sub>3</sub>S e do C<sub>3</sub>A, compostos altamente reativos. Essas reações duram poucos minutos e dão origem à etringita (ASTM, 2014; BENTZ et al, 2018; TAVARES et al., 2020).

Dessa forma, a substituição do cimento pelo resíduo afeta diretamente no fluxo de calor liberado durante os primeiros minutos de reação, o qual diminui consideravelmente.

Figura 7 - Curvas do fluxo de calor para cimento e resíduo



Fonte: Autoria própria

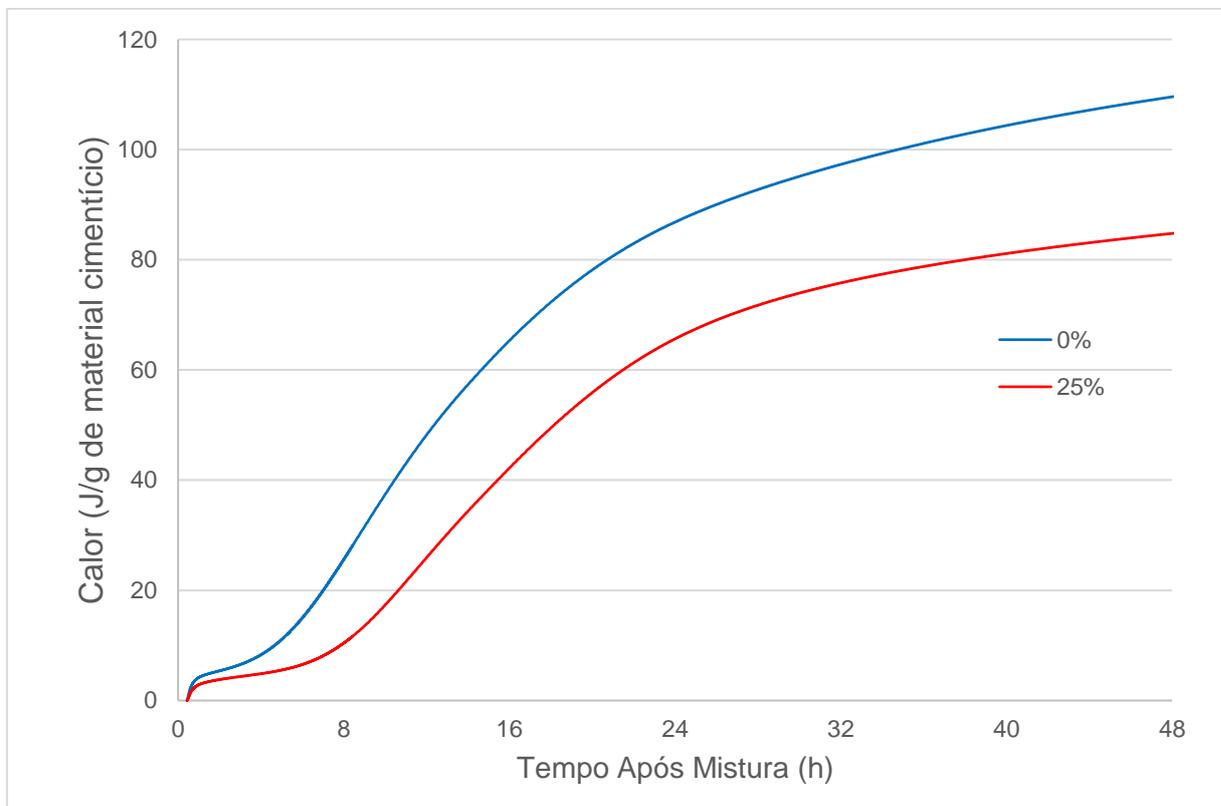
O segundo período é denominado como de indução ou dormência devido à redução na velocidade das reações de hidratação. Nesse período começam a ser formados os compostos hidratados como o C-S-H, que ocorre nas primeiras 8 horas (BENTZ et al., 2018; PALOU et al., 2020, TAVARES et al., 2020). Para a pasta contendo resíduo, foi registrado um pico de liberação de calor após 8 horas, e um fluxo de calor liberado menor.

No terceiro período as reações de hidratação C-S-H ocorrem mais rapidamente, o que resulta na resistência mecânica do composto. Este estágio está associado a formação de aluminato, que ocorre após 12 horas (BENTZ et al., 2018; PALOU et al., 2020, TAVARES et al., 2020). A substituição do cimento pelo resíduo afeta o comportamento térmico da reação, onde pode ser observado um ligeiro aumento no fluxo de calor para o mesmo intervalo de tempo.

O quarto período é caracterizado pela redução gradativa da taxa de reação após atingir o calor máximo liberado. Após 24 horas, o calor liberado pela pasta contendo resíduo é proporcionalmente menor à pasta referência.

No tocante ao acúmulo de calor (ver Figura 8), os resultados mostram que a pasta contendo resíduo (PS) produziu valores consideravelmente menores que a pasta de referência. Outros estudos os quais incorporam resíduo como aditivo mineral na composição de materiais cimentícios também exibem alteração no comportamento térmico em relação à pasta referência (HAN, Fanghui et al, 2021; TANG, Pei et al, 2020; DE MATOS, Paulo R. et al, 2020). Dessa forma, o menor valor de calor acumulado sugere que o uso de resíduos como material cimentício suplementar promoveu a nucleação dos hidratos formados (LOTTHENBACH, Barbara; SCRIVENER, Karen; HOOTON, R.D.; 2011). Outro fator relevante é que a temperatura atingida pode ter favorecido a atividade pozolânica dos resíduos, com uma formação mais rápida de hidratos e, conseqüentemente, uma estrutura menos porosa (AVET, François et al, 2016).

Figura 8 - Calor acumulado para o cimento e resíduo



Fonte: Autoria própria

### 5.2.2 Condutividade elétrica em solução de hidróxido de cálcio

Os resultados obtidos pelo método de medição da condutividade elétrica são expressos na Tabela 9. Ao observá-los pode ser afirmado que, segundo o critério proposto por Luxan, Madruga e Saavedra (1989) o resíduo não apresenta a condutividade elétrica necessária para atuar como pozolânico, já que os valores das três medições permanecem abaixo de 0,4.

Tabela 9 - Resultado da condutividade elétrica da amostra de resíduo

	<b>Condutividade Inicial (mS/cm)</b>	<b>Condutividade Final (mS/cm)</b>	<b>Varição da Condutividade (<math>\Delta</math>mS/cm)</b>
<b>1</b>	7,7380	7,4670	0,2710
<b>2</b>	7,5200	7,2730	0,2470
<b>3</b>	7,9340	7,4590	0,4750

Fonte: Autoria própria

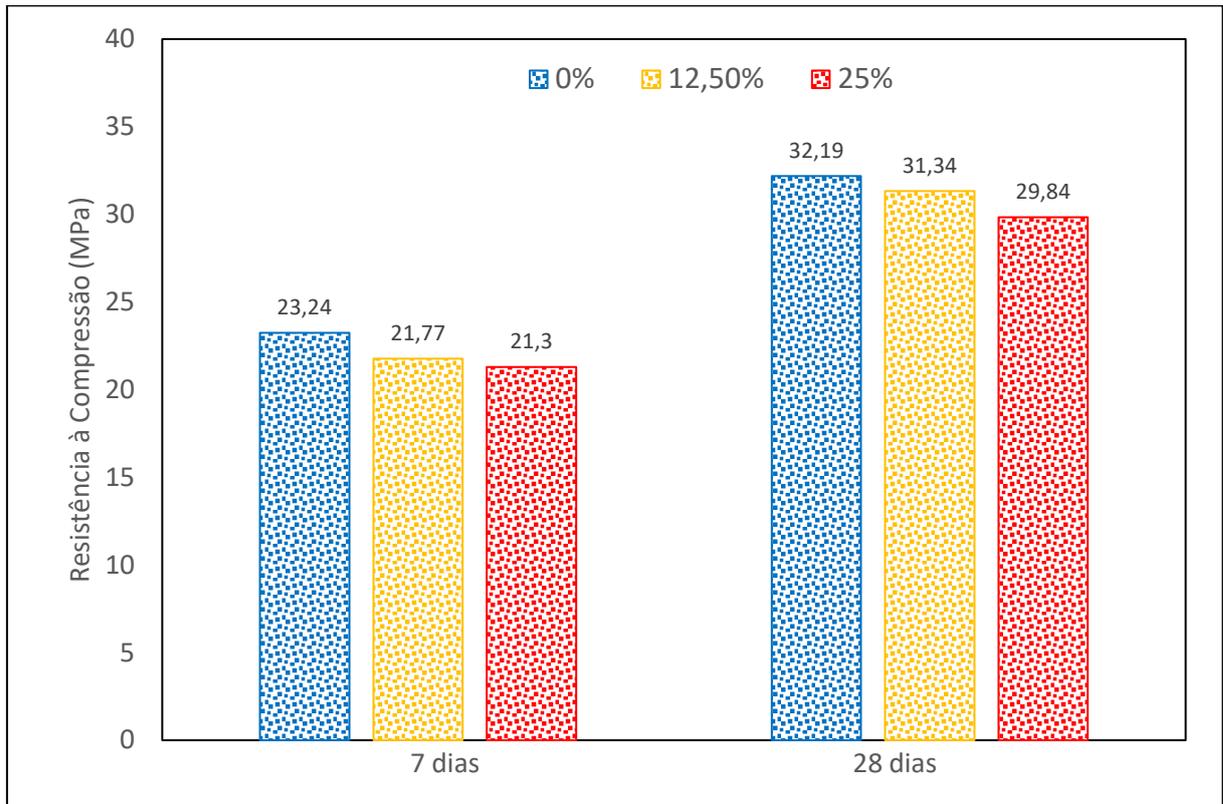
## 5.3 Caracterização da argamassa

### 5.3.1 Índice de Desempenho com cimento Portland

A Figura 9 apresenta os resultados da resistência a compressão dos corpos de prova aos 7 e 28 dias de cura. Os valores representam a média obtida após 4 rompimentos para cada traço. O desvio padrão se manteve abaixo dos valores estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 2019).

Os resultados mostram que aos 7 e 28 dias o grupo controle (0%) apresenta os maiores valores de resistência a compressão, em relação às amostras que incorporam os percentuais de substituição parcial (25% e 12,5%). Este fato pode ser explicado visto que a taxa de reação pozolânica desse material é menor quando comparada à do cimento Portland (Abrão, Cardoso e John, 2020; Jain 2012; Martins 2021) nas primeiras idades de cura. Apesar dos valores serem significativamente menores nas amostras contendo resíduo, os resultados se aproximam bastante ao grupo controle dentro deste período. Ambos os traços que contém resíduo apresentam índice de atividade pozolânica superior ao que estabelece a norma NBR 5752 (ABNT, 2014).

Figura 9 - Resultados índice de desempenho com cimento Portland



Fonte: Autoria própria

De forma qualitativa, também foi verificado que a resistência a compressão diminui à medida em que o percentual de substituição do resíduo aumenta. Este resultado indica que a incorporação do resíduo de cerâmica sanitária interfere na resistência mecânica dos compósitos cimentícios nas primeiras idades de cura, quando utilizado de forma alternativa ao cimento Portland.

Ao se comparar os valores apresentados aos resultados de estudos similares, a resistência a compressão dos corpos de prova contendo resíduo da indústria de cerâmica sanitária exibe um comportamento similar, e em alguns casos valores até maiores, como no caso do fumo de sílica e cinzas volantes por exemplo (Medina et al., 2016; Pitarch et al., 2021; Reig et al.; 2021).

Reig et al. (2021) explica que apesar da resistência a compressão aos 7 dias de cura apresentarem valores menores nas composições contendo resíduo de cerâmica sanitária, a reatividade pozolânica melhora com o tempo. Valores de índice de atividade pozolânica próximos a 100% (mesma resistência ao grupo controle) são descritos em argamassas contendo 15% (em massa) aos 90 dias de cura, bem como

nas composições contendo 25% (em massa) curadas durante longos períodos de 180 e 365 dias.

Ao se observar a Figura 10 pode-se perceber os diferentes tipos de rompimento obtidos no ensaio:

Figura 10 - Detalhe do rompimento das composições



Fonte: Autoria própria

### 5.3.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

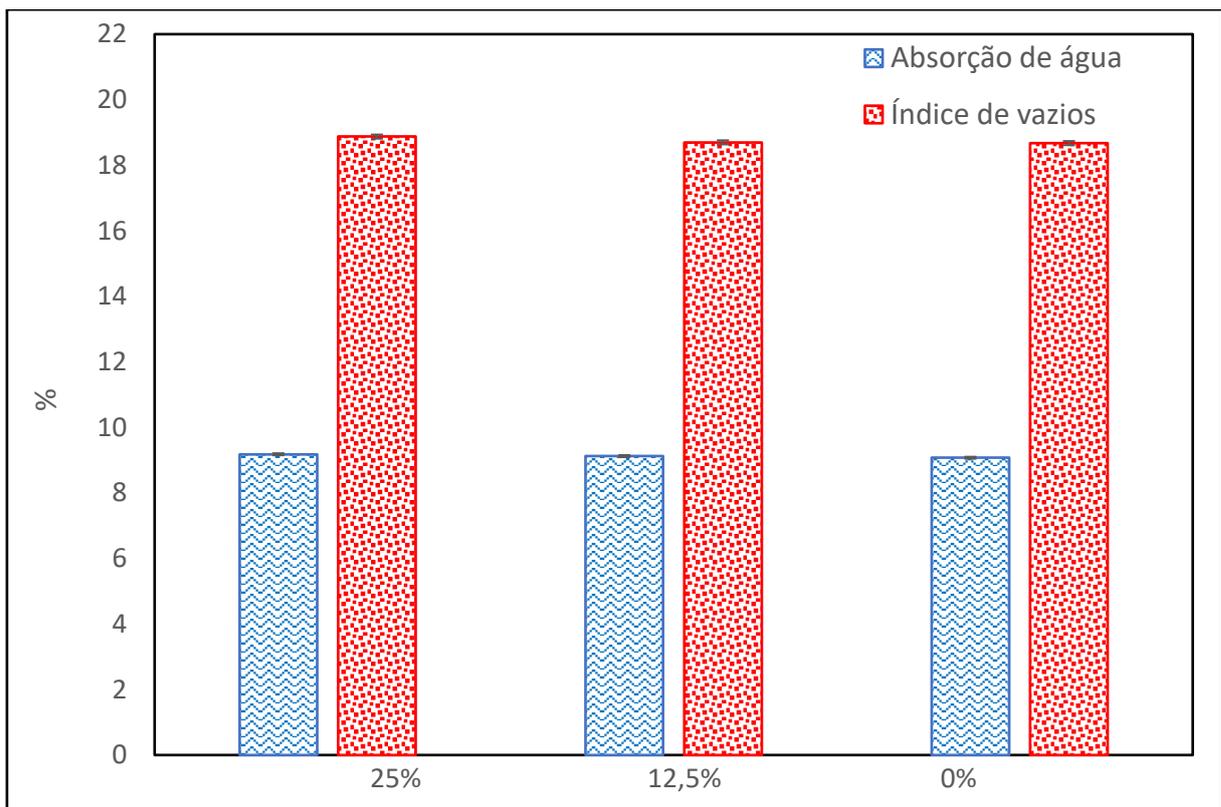
A absorção de água, o índice de vazios e a massa específica para as composições contendo resíduo (25% e 12,5%), bem como do grupo controle (0%) são exibidos nas Figuras 11 e 12 respectivamente. Os valores representam a média dos três pesos obtidos para cada traço estudado.

Como pode ser observado na Figura 11, os resultados para a absorção de água das composições contendo o resíduo podem ser considerados similares ao grupo controle. Essa característica é explicada devido ao ajuste granulométrico do resíduo, já que a quantidade de água consumida no processo de hidratação está relacionada à área superficial das partículas (MAIMOUNI, Houda et al; 2018).

Para o índice de vazios, os valores encontrados estão de acordo com o estabelecido pela norma. Além disso, a porosidade dos corpos de prova contendo os percentuais de substituição não apresentam diferenças significativas ao grupo controle, o que sugere que o comportamento mecânico do compósito não será comprometido (CHEN, Xudong; WU, Shengxing; ZHOU, Jikai; 2013).

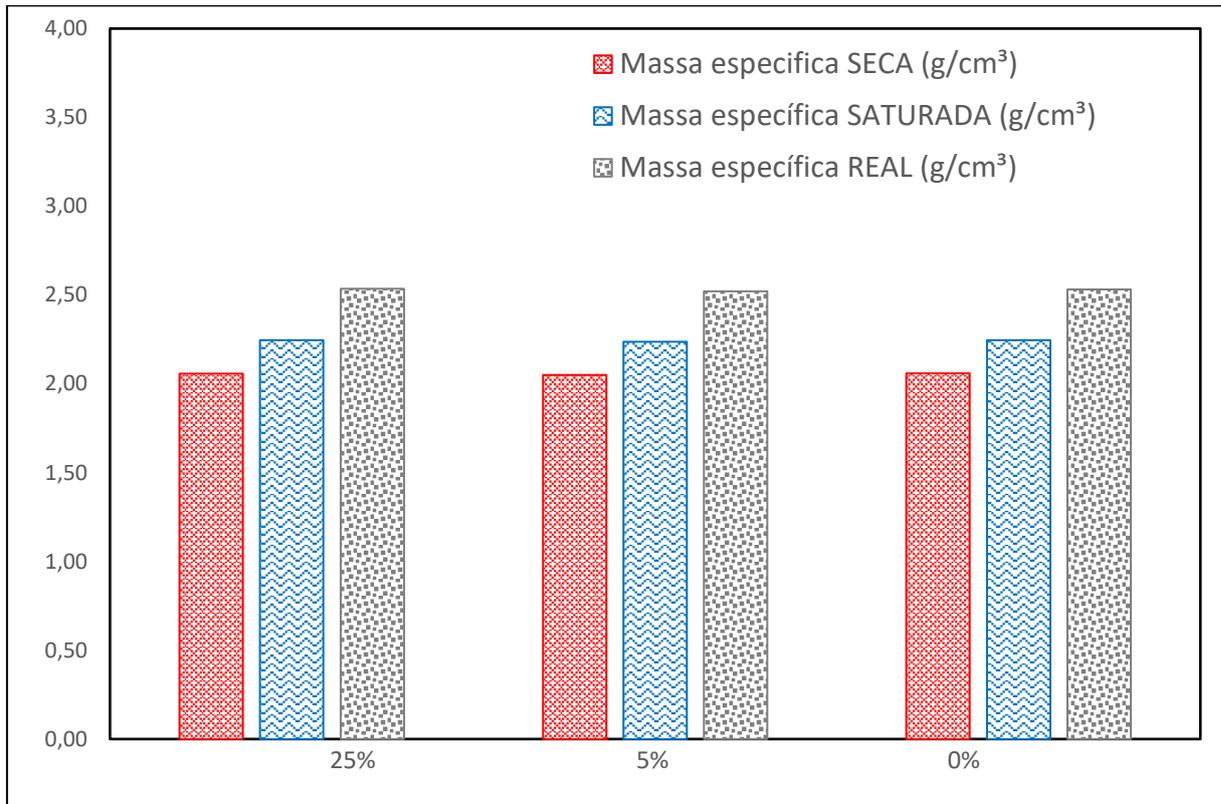
Os resultados para a massa específica seca, saturada e a real são apresentados na Figura 12. Como pode ser observado, os percentuais de substituição (25% e 12,5%) não altera a densidade dos corpos de prova aos 28 dias quando comparados ao grupo controle. O peso dos corpos de prova também foi mantido, o que indica que este resíduo atende às especificações para atuar como material cimentício suplementar como substituto parcial ao Cimento Portland na formulação dos compósitos cimentícios (BALONIS, M.; GLASSER, Fredrik P; 2009).

Figura 11 - Resultado absorção de água e índice de vazios



Fonte: Autoria própria

Figura 12 - Resultado massa específica



Fonte: Autoria própria

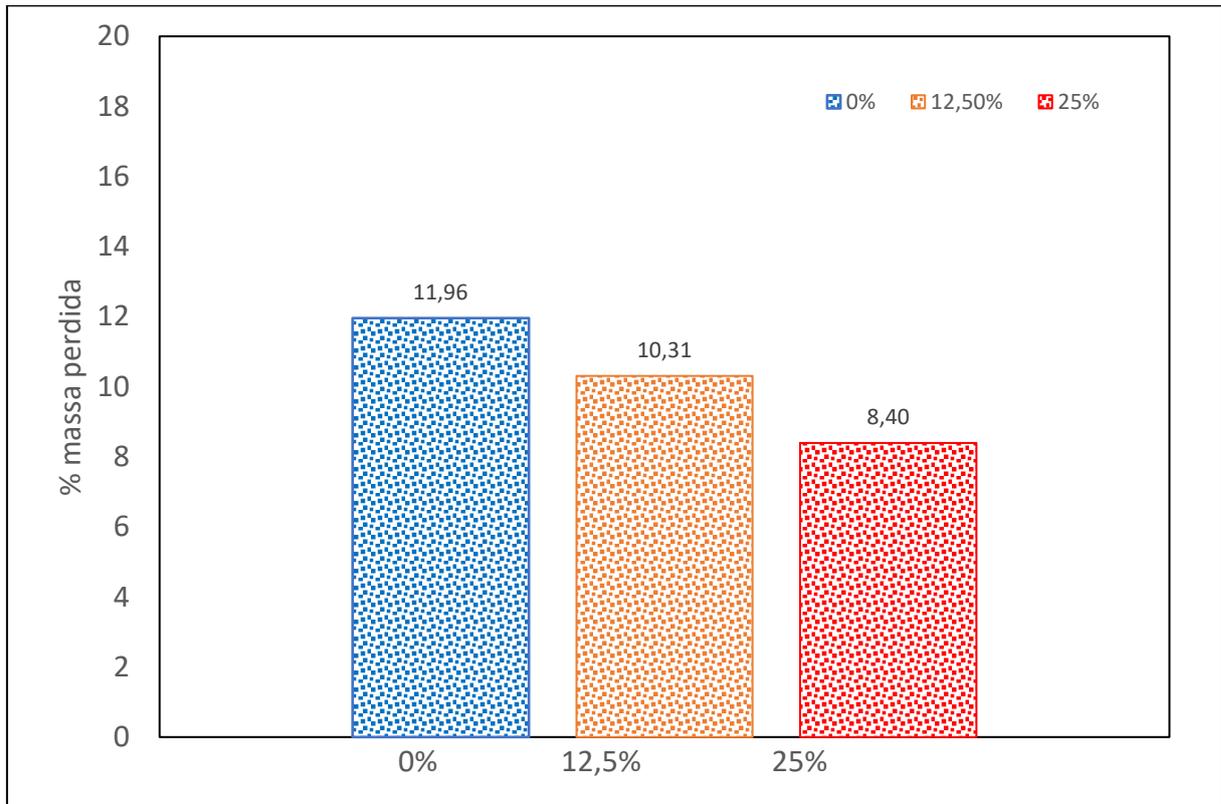
### 5.3.3 Desempenho frente à ataque ácido

A porcentagem de perda de massa para as composições contendo resíduo (25% e 12,5%) bem como grupo controle (0%) são exibidos na Figura 13. Os valores representam a média dos três pesos obtidos para cada traço estudado.

O uso de ácido sulfúrico para degradação de argamassas foi avaliado em outros estudos, incluindo Zivica e Bajza (2001), Zivica (2004), Gutberlet et al. (2015) e Lara e Cordeiro (2019).

Como pode ser observado na Figura 13, os traços contendo resíduo apresentam menor valor de perda de massa quando comparados ao grupo controle. A medida em que o teor de resíduo na composição aumenta, a porcentagem de perda de massa diminui, no sentido de que o maior teor de resíduo (25%) apresentou o menor percentual de perda de massa entre as três composições. Este resultado indica que a introdução do resíduo interfere nas propriedades de durabilidade do compósito cimentício.

Figura 13 - Resultados ataque ácido



Fonte: Autoria própria

Zivica e Bajza (2001) explicam que a resistência ao ataque ácido está relacionada principalmente à distribuição do tamanho de partícula, os agregados envolvidos e a composição química do compósito cimentício. Nesse sentido, a maior resistência ao ataque nos traços contendo resíduo pode ser explicada devido ao seu ajuste granulométrico e ao alto teor de CaO em sua composição química, já que foram utilizados os mesmos agregados para compor todos os três traços.

No tocante a composição química, o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) gerado no processo de hidratação do cimento Portland é o componente com menor estabilidade química e mais vulnerável à substâncias ácidas. Na reação entre o ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e o hidróxido de cálcio é formada a gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), a qual reage com o aluminato de cálcio na matriz e dá origem a etringita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ) (Zivica e Bajza, 2002). Dessa forma, a maior resistência ao ataque ácido nas composições contendo resíduo provavelmente está relacionada à alteração no balanço  $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) / \text{CaO}$  proporcionada pela introdução deste material (LARA e CORDEIRO; 2019), proporcionado pelo alto teor de CaO e baixo teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na composição química do resíduo.

A Figura 14 mostra a perda de massa dos copos de prova para cada composição (A, B e C respectivamente) no estado em que foram pesados.

Figura 14 - Perda de massa devido ao ataque ácido



Fonte: Autoria própria

Com relação ao ajuste granulométrico, a adição de materiais cimentícios suplementares finos interfere de forma benéfica na resistência mecânica dos compósitos, visto sua capacidade em preencher poros (LIU et al., 2020). Nesse sentido, as partículas finas presentes no resíduo podem ter reduzido a disponibilidade de reação entre o hidróxido de cálcio e o ácido sulfúrico, já que sua disposição na microestrutura do compósito diminui a área de contato disponível para reação entre estes elementos.

## 6 CONCLUSÃO

Este estudo avalia a viabilidade de reutilização do resíduo sólido gerado pela indústria de cerâmica sanitária como material cimentício suplementar. A vantagem de se utilizar um material dessa natureza como substituto parcial do cimento Portland, é que não requer nenhum tipo de processamento especial, já que passou por todo processo de fabricação, o qual inclui moagem, peneiramento e tratamento térmico. Dessa forma, após coletado, o resíduo em questão deve ser apenas seco e peneirado para que possa atuar, junto ao cimento, como aglomerante na composição de determinados tipos de concreto.

Os principais óxidos presentes na amostra analisada são o  $\text{SiO}_2$ , seguido de  $\text{CaO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Embora apresente um baixo teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em sua composição, a soma dos demais óxidos, bem como os valores máximos de perda ao fogo, umidade e álcalis disponíveis, se mostram dentro dos limites de exigências químicas estabelecidas pela norma NBR 12653 (ABNT, 2014) para que o material possa atuar como pozolana tipo E. Com relação às exigências físicas, a porcentagem de material retido na peneira  $45\mu\text{m}$ , o índice de atividade pozolânica e a quantidade requerida de água também estão de acordo.

O ajuste granulométrico reduzido deste material favorece sua atividade pozolânica, além de contribuir para a promoção do efeito filler nas matrizes cimentícias. Este fator também interfere de forma positiva para a resistência e durabilidade das matrizes, melhorando sua porosidade e diminuindo a área de contato disponível para reação com agentes externos agressivos.

A incorporação do resíduo altera a quantidade e fluxo de calor liberados no processo de hidratação. Mudanças na velocidade e intensidade das reações foram observadas. Contudo, a avaliação da resistência mecânica dos corpos de prova indica que ambos os percentuais de substituição parcial (12,5% e 25%) foram capazes de alcançar os valores de resistência descritos em outros estudos. Apesar deste estudo não avaliar a resistência em idades superiores aos 28 dias de cura, outros autores descrevem que esse parâmetro melhora com o tempo.

A substituição parcial do cimento Portland pelo resíduo de cerâmica sanitária não compromete de forma significativa as propriedades da argamassa, o que pode ser considerado um resultado promissor para diversas aplicações no segmento da Construção Civil. Assim, o presente trabalho defende sua reutilização em concreto

com agregados, pisos de concreto industrial, pavimento, reboco, argamassa de assentamento, argamassa de revestimento, tijolos e blocos.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Traçar um planejamento com objetivo de consumir todo conteúdo do efluente já acumulado;

Avaliar o comportamento mecânico do concreto formulado com percentuais de substituição de 25% por períodos de cura maiores, de 90 até 365 dias, conforme descrito na literatura;

Investigar as propriedades de amostras incorporando percentuais de substituição superiores, entre 25 e 50%;

Estudar a viabilidade econômica para instalação de um processo de separação sólido-líquido no efluente, como forma de evitar o processo de preparação do conteúdo gerado;

Realizar a análise microestrutural das amostras do concreto preparadas (MEV, DRX, FTIR);

Realizar análise termogravimétrica das amostras do concreto preparado;

Investigar os fatores que interferem diretamente na propriedade de durabilidade do concreto preparado;

Estudar a similaridade química, física e mineralógica deste tipo de resíduo no Brasil com os materiais estudados em outros países.

## REFERÊNCIAS

ABRÃO, Pedro Cesar Rodrigues Alves. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ALBUQUERQUE, Lenita Moura da Costa. **Reciclagem e estudo de reaproveitamento de resíduos cerâmico de indústria de louça sanitária**. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Informações Técnicas – Definição e Classificação**. Disponível em: <http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acesso em: 10 de maio de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Processo de Fabricação**. Disponível em: <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>. Acesso em: 12 de maio de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Cimento**. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/>. Acesso em: 12 de agosto de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da Resistência a Compressão**. Rio de Janeiro, 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578: Cimento Portland composto - Especificações**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais Pozolânicos – requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais Pozolânicos - determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8952: Coleta e Preparação de Amostras de Materiais Pozolânicos - Procedimento.** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479, Argamassa e Concreto – Câmaras Úmidas e Tanques Para Cura de Corpos-de-Prova.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778 – Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica.** Rio de Janeiro, 2005.

ASTM, C1679 – Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry, Annu. B. ASTM Stand, vol. 04.01. 04, 2014, p.16. <https://doi.org/10.1520/C1679-17.2>.

ASTM, C1897 – 20 Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements 1, 2020

B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton, Supplementary cementitious materials, Cem. Concr. Res. 41 (12) (2011) 1244–1256, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.

BALONIS, M.; GLASSER, Fredrik P. The density of cement phases. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 9, p. 733-739, 2009.

BATTAGIN, A. F.; ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: ciência e tecnologia. **São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto**, v. 1, 2011.

BEZERRA, Augusto Cesar da Silva; AGUILAR, Maria Teresa Paulino; CETLIN, Paulo Roberto. The influence of specimen capping on the results of compression strength tests of cementitious composites. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 65, p. 291-296, 2012.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, p. 178-189, 2015.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução SOARES, S. M. S. – Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CASTILLO LARA, Rancés; CHAGAS CORDEIRO, Guilherme. Effect of rice husk ash as supplementary cementitious material on the performance of cement-based pastes continuously exposed to organic acid solution (Vinasse). **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 7, p. 04019102, 2019.

CASTRO, Ana Clara Mesquita. **Avaliação da Reutilização do Resíduo de Louça Sanitária em Compósitos Cerâmicos**. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / Campus IV – Araxá, 2016.

CAVALCANTE, Wagner Fabiano Viana. **Aproveitamento de resíduos cerâmicos da indústria de louça sanitária para produção de massas para revestimento cerâmico**. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

D.P. Bentz, S.Z. Jones, I.R. Bentz, M.A. Peltz, Towards the formulation of robust and sustainable cementitious binders for 3-D additive construction by extrusion, *Constr. Build. Mater.* 175 (2018) 215–224, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.167>.

DE MAGALHAES, Luciano Fernandes et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123260, 2020.

DE SOUZA MORAIS, Isabella et al. Sericitic phyllite as addition in Portland cement. In: **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications Ltd, 2018. p. 131-136.

ENVIRONMENT, U. N. et al. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.

F. Avet, R. Snellings, A. Alujas Diaz, M. Ben Haha, K. Scrivener, Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays, *Cem. Concr. Res.* 85 (2016) 1–11, <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2016.02.015>

F. Han, S. Song, J. Liu, R. Wu, Effect of water/binder ratio and temperature on the hydration heat and properties of ternary blended cement containing slag and iron tailing powder, *J. Therm. Anal. Calorim.* 144 (4) (2021) 1115–1128, <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09687-8>.

FIGUEIREDO, Aline e KUSTER, Luana. Materiais Cimentícios Suplementares: alto desempenho tecnológico. **Reciclos UFOP**. 2019. Disponível em: <https://reciclos.ufop.br/news/materiais-cimenticios-suplementares-alto-desempenho-tecnologico>. Acesso em 31 de agosto de 2021.

GERALDO, Rodrigo H. et al. Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 288-300, 2017

Gutberlet, T., Hilbig, H., Beddoe, R.E., 2015. Acid attack on hydrated cement deffect of mineral acids on the degradation process. *Cement Concr. Res.* 74, 35e43. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.011>.

HALICKA, Anna; OGRODNIK, Pawel; ZEGARDLO, Bartosz. Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 295-305, 2013.

HANSEN, Débora Magali et al. Aplicação de resíduo cerâmico calcinado como pozolana: uma revisão bibliográfica. **Universidade do Vale do Rio dos Sinos–UNISINOS. 6º Fórum Internacional de resíduos sólidos**, 2015.

HELENE, Paulo; TUTIKIAN, Bernardo F. Dosagem dos concretos de cimento Portland. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON**, v. 2, p. 439-471, 2005.

JUNIOR, Marsis Cabral et al. Estudo Estratégico da Cadeia Produtiva da Indústria Cerâmica no Estado de São Paulo: Parte III–Indústrias de Colorifícios, Sanitários e Cerâmica Técnica-Isoladores. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 3, p. 15-26, 2019.

JUNIOR, Marsis Cabral et al. Panorama da indústria cerâmica de sanitários no Brasil. **Revista Cerâmica**, 2010.

KHAN, M. N. N. et al. Filler effect of pozzolanic materials on the strength and microstructure development of mortar. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 21, n. 1, p. 274-284, 2017.

KLEIN, Cornelis; DUTROW, Barbara. **Manual de ciência dos minerais**. Bookman Editora, 2009.

L.R.C. Tavares, J.F.T. Junior, L.M. Costa, A.C. da Silva Bezerra, P.R. Cetlin, M.T. P. Aguilár, Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement, *Sci. Rep.* 10 (2020) 1–15, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78567-w>.

LILKOV, Vili; DIMITROVA, Ekaterina; GAIDARDZHIEV, Stoyan. Microscopic and laser granulometric analyses of hydrating cement suspensions. **Cement and concrete research**, v. 29, n. 1, p. 3-8, 1999.

LIU, Qiong et al. Workability and mechanical properties of mortar containing recycled sand from aerated concrete blocks and sintered clay bricks. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 157, p. 104728, 2020.

LUCAS, J. et al. The effect of using sanitary ware as aggregates on rendering mortars' performance. **Materials & Design**, v. 91, p. 155-164, 2016.

LUXAN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research, USA**, v. 19, p. 63-68, 1989.

M. Palou, M. Boháč, E. Kuzielová, R. Novotný, M. ěZemlička, J. Dragomirová, Use of calorimetry and thermal analysis to assess the heat of supplementary cementitious materials during the hydration of composite cementitious binders, *J. Therm. Anal. Calorim.* 142 (1) (2020) 97–117, <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09341-3>.

MAIMOUNI, Houda et al. Quantitative assessment of the saturation degree of model fine recycled concrete aggregates immersed in a filler or cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 496-507, 2018.

MARTINS, Maysa Lorena Figueiredo et al. Magnesium industry waste and red mud to eco-friendly ternary binder: Producing more sustainable cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125172, 2021.

MEDINA, C.; DE ROJAS, MI Sánchez; FRÍAS, Moisés. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. **Cement and concrete composites**, v. 34, n. 1, p. 48-54, 2012.

MEDINA, César et al. Mineralogy and microstructure of hydrated phases during the pozzolanic reaction in the sanitary ware waste/Ca (OH) 2 system. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 99, n. 1, p. 340-348, 2016.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo JM. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. McGraw-Hill Education, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos**. Brasília, Capítulo V, p. 31-36, 2019.

MOHAMMED, Siline. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 10-19, 2017.

MORÍN, Gladys; HUNG, Xavier; MILLÁN, Arnaldo. Vida útil y mecanismo de deterioro de los moldes de yeso para colado de piezas sanitarias. **Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela**, v. 29, n. 4, p. 127-136, 2014.

MOTTA, José Francisco Marciano et al. As matérias-primas plásticas para a cerâmica tradicional: argilas e caulins. **Cerâmica Industrial**, v. 9, n. 2, p. 33-46, 2004.

N. Jain, Effect of nonpozzolanic and pozzolanic mineral admixtures on the hydration behavior of ordinary Portland cement, *Constr. Build. Mater.* 27 (1) (2012) 39–44, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.006>

P. Tang, W. Chen, D. Xuan, Y. Zuo, C.S. Poon, Investigation of cementitious properties of different constituents in municipal solid waste incineration bottom ash as supplementary cementitious materials, *J. Clean. Prod.* 258 (2020) 120675, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120675>.

P.C.R.A. Abrão, F.A. Cardoso, V.M. John, Efficiency of Portland-pozzolana cements: water demand, chemical reactivity and environmental impact, *Constr. Build. Mater.* 247 (2020) 118546, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118546>

P.R. de Matos, R. Pilar, L.H. Bromerchenkel, R.A. Schankoski, P.J.P. Gleize, J. de Brito, Self-compacting mortars produced with fine fraction of calcined waste foundry sand (WFS) as alternative filler: Fresh-state, hydration and hardened-state properties, *J. Clean. Prod.* 252 (2020) 119871, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119871>.

PARIS, Jerry M. et al. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1-18, 2016.

PITARCH, A. M. et al. Pozzolanic activity of tiles, bricks and ceramic sanitary-ware in eco-friendly Portland blended cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123713, 2021.

PRADO, Ulisses Soares do e BRESSIANI, José Carlos. Panorama da indústria cerâmica brasileira na última década. 2013.

REIG, Lucía et al. Potential use of ceramic sanitary ware waste as pozzolanic material. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, 2021.

RESENDE, Melissa Cunha. **Caracterização do Resíduo Sólido da Lagoa de Rejeito de uma Indústria de Cerâmicas e Aplicação como Pozzolana**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / Campus IV – Araxá, 2015

SCRIVENER, Karen et al. Advances in understanding cement hydration mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105823, 2019.

SCRIVENER, Karen L.; NONAT, André. Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and concrete research**, v. 41, n. 7, p. 651-665, 2011

SILVA, Juliana Carvalho da. **Aproveitamento do lodo da estação de tratamento de efluentes de indústria cerâmica na composição de massa cerâmica para a produção de louças sanitárias**. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SILVA, Thiago Henrique et al. Valorization of ceramic sludge waste as alternative flux: A way to clean production in the sanitary ware industry. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 7, p. 100453, 2022.

SILVA, Thiago Henrique. **Reutilização de Resíduo da linha de produção da indústria de cerâmica sanitária**. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / Campus IV – Araxá, 2017.

SIMONSEN, Anne Mette T. et al. Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics. **Waste Management**, v. 102, p. 710-721, 2020.

X. Chen, S. Wu, J. Zhou, Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) 869–874, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072>.

YAO, Geng et al. Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement. **Powder Technology**, v. 360, p. 863-871, 2020.

ZEGARDŁO, Bartosz; SZELAĞ, Maciej; OGRODNIK, Paweł. Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes–The method of production and the interfacial transition zone. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 736-742, 2016.

ZHANG, Yanrong et al. Characterization of the mesostructural organization of cement particles in fresh cement paste. **Construction and building materials**, v. 124, p. 1038-1050, 2016.

Zivica, V.R., 2004. Acidic attack of cement based materials e a review part 3: research and test methods. *Construct. Build. Mater.* 18, 683e688. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.030>.

Zivica, V.R., Bajza, A., 2001. Acidic attack of cement based materialsda review: part 1. Principle of acidic attack. *Construct. Build. Mater.* 15, 331e340. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00012-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00012-5).

Zivica, V.R., Bajza, A., 2002. Acidic attack of cement-based materialsda review part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures. *Construct. Build. Mater.* 16, 215e222. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00011-9).