

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIA DOS MATERIAIS E MEIO AMBIENTE

MÔNICA CARIANE DENIS CABRAL

**DO DESCARTE À ARTE: REVESTIMENTOS CERÂMICOS COM USO DO LODO
DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E CINZA DA CASCA DE ARROZ**

Alegrete

2025

MÔNICA CARIANE DENIS CABRAL

**DO DESCARTE À ARTE: REVESTIMENTOS CERÂMICOS COM USO DO LODO
DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E CINZA DA CASCA DE ARROZ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Marco Antônio Durlo Tier

Alegrete

2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C117d Cabral, Mônica Cariane Denis

Do Descarte à Arte: Revestimentos Cerâmicos com Uso do Lodo
de Estação de Tratamento de Água e Cinza da Casca de Arroz /
Mônica Cariane Denis Cabral.

106 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2025.

"Orientação: Marco Antônio Durlo Tier".

1. Economia Circular. 2. Cinza da Casca de Arroz. 3. Lodo
de Estação de Tratamento de Água. 4. Revestimento Cerâmico
Sustentável. 5. Propriedades Mecânicas . I. Título.

MONICA CARINE DENIS CABRAL

DO DESCARTE À ARTE: REVESTIMENTOS CERÂMICOS COM USO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E CINZA DA CASCA DE ARROZ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 04/12/2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marco Antonio Durlo Tier
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr^a. Angelica Bordin Colpo
UNIPAMPA

Prof. D.SC Raquel Mariano Linhares
UNIPAMPA

SISBI/Folha de Aprovação 1903091 SEI 23100.020481/2025-11 / pg. 1

Prof. Dr. Wladimir Hernandez Flores
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MARCO ANTONIO DURLO TIER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/12/2025, às 17:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **WLADIMIR HERNANDEZ FLORES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/12/2025, às 18:17, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ANGELICA BORDIN COLPO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/12/2025, às 19:59, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RAQUEL MARIANO LINHARES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/12/2025, às 17:09, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1903091** e o código CRC **708A3CF6**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua compaixão infinita e por renovar minhas forças a cada dia.

À minha mãe, Adriane. Meu porto seguro em todos os momentos, obrigada por estar sempre à minha espera e por ter o abraço que acalma até as tempestades.

Ao meu namorado, Eduardo. Teu incentivo, amor e carinho foram essenciais para o início e conclusão deste trabalho. Obrigada por estar ao meu lado nos momentos delicados e por comemorar comigo cada conquista.

Aos meus familiares pelo apoio, orações, amor, amizade e palavras de incentivo.

Ao meu orientador, Marco Tier, pela confiança depositada em mim ao longo desta jornada. Tua paciência e incentivo foram essenciais para a conclusão do mestrado. Acima de tudo, contigo aprendi que a resiliência transforma desafios em conquistas.

Ao Matthews, meu mentor e conselheiro. Obrigada por acreditar em mim, mesmo quando eu duvidava. Pelos mates, pelas conversas e pela paciência nos dias difíceis. Tua compreensão tornou essa jornada muito mais leve.

À banca examinadora, Dra. Angélica, D. Sc. Raquel e Dr. Wladimir, pelas valiosas considerações. O direcionamento de vocês foi essencial para a construção deste trabalho.

Aos técnicos de laboratórios Marcelo, Raquel, Clarissa, Dieison e Milene, muito obrigada pelo apoio e pelas instruções durante a realização dos ensaios.

Aos colegas que me ajudaram na parte experimental, em especial à Andreza, pela colaboração e companheirismo.

A UNIPAMPA pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional, e por todo suporte concedido ao longo desta trajetória.

As empresas parceiras, Grupo Pilecco pela doação da cinza da casca de arroz e Helager Indústria e Comércio Abrasivos pela doação argila caulim.

“A vitória mais bela que se pode alcançar é
vencer a si mesmo.”

— Santo Inácio de Loyola

RESUMO

As indústrias têm buscado implementar a fabricação com resíduo zero no seu ciclo de produção. Neste sentido, as indústrias cerealistas de arroz utilizam a casca derivada do beneficiamento do grão como fonte de energia térmica para geração de energia elétrica, resultando na cinza da casca de arroz (CCA). Quando a queima ocorre em temperaturas controladas, a CCA é amorfa e possui elevado teor de sílica, com diversas possibilidades de aplicações como polímeros, cerâmicos e cimento portland. As estações de tratamento de água geram lodo ETA com alto teor de óxido de alumínio como resíduo, sendo uma fonte de alumínio de baixo custo. A presente pesquisa tem como objetivo reduzir a quantidade de resíduos destinados ao descarte incorreto e reutilizá-los na criação de um revestimento cerâmico que alcance as propriedades físicas, mecânicas e termomecânicas especificadas em norma ABNT, e igual ou superior às comerciais. O estudo foi conduzido em três etapas, sendo a etapa 1: análise das composições entre 50 e 100% de resíduos; etapa 2: estudo do material na faixa de 20 a 60% de resíduos e etapa 3: estudo da influência do tempo de queima. A fabricação dos corpos de provas cerâmicos consistiu na substituição parcial da argila caulim por lodo ETA (10 a 30%) e CCA (10 a 30%). As cerâmicas foram sinterizadas a 1300°C por 0,5 h (etapa 1 e 2) e 4 h (etapa 3). As propriedades físicas foram avaliadas por meio dos ensaios de absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente; as propriedades químicas foram investigadas por meio da resistência ao manchamento; as propriedades mecânicas por meio dos ensaios de resistência à flexão em três pontos (RF3P) e quatro pontos (RF4P) e as propriedades termomecânicas por meio da resistência ao choque térmico. Verificou-se que a porosidade exerce influência significativa sobre o desempenho dos materiais, afetando tanto a resistência ao choque térmico quanto a resistência à flexão, sendo esta inversamente proporcional à porosidade aparente. As fases formadas durante a sinterização também apresentaram papel relevante nas propriedades mecânicas e termomecânicas, destacando-se o aumento de aproximadamente 50% na resistência à flexão da amostra 100AC sinterizada por 4h, associado a redução nos picos de cristobalita, enquanto a amostra 30CCA30LETA apresentou comportamento oposto devido a transformação polimórfica dessa fase. Além disso, observou-se que o ensaio RF3P apresentou valores cerca de 40% superiores aos obtidos no ensaio RF4P, resultado atribuído a distribuição do momento fletor, mais concentrado no primeiro caso. Esses resultados evidenciam que o controle da composição, da porosidade aparente e das fases formadas durante a sinterização é determinante para o desempenho dos revestimentos cerâmicos produzidos com resíduos.

Palavras-Chave: Economia Circular. Cinza da Casca de Arroz. Lodo de Estação de Tratamento de Água. Revestimento Cerâmico Sustentável. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Industries have been seeking to implement zero-waste manufacturing in their production cycle. In this sense, rice processing industries use the husk derived from grain processing as a source of thermal energy for electricity generation, resulting in rice husk ash (RHA). When combustion occurs at controlled temperatures, the RHA is amorphous and has a high silica content, with various possibilities for applications in polymers, ceramics, and Portland cement. Water treatment plants generate water treatment sludge (WTS) as waste, which has a high aluminum oxide content, making it a low-cost source of aluminum. This research aims to reduce the amount of waste destined for improper disposal and reuse it in the creation of a ceramic coating that meets the physical, mechanical, and thermomechanical properties specified in ABNT standards and is equal to or superior to commercial products. The study was conducted in three stages: stage 1: analysis of compositions between 50 and 100% waste; stage 2: study of the material in the range of 20 to 60% waste; and stage 3: study of the influence of firing time. The manufacturing of the ceramic test specimens consisted of the partial replacement of kaolin clay with WTS (10 to 30%) and RHA (10 to 30%). The ceramics were sintered at 1300°C for 0.5 h (stages 1 and 2) and 4 h (stage 3). Physical properties were evaluated through water absorption, apparent porosity, apparent relative density, and apparent density tests. Chemical properties were investigated through stain resistance. Mechanical properties were evaluated through three-point (3PFS) and four-point (4PFS) flexural strength tests, and thermomechanical properties through thermal shock resistance. It was found that porosity significantly influences the performance of the materials, affecting both thermal shock resistance and flexural strength, the latter being inversely proportional to apparent porosity. The phases formed during sintering also played a relevant role in the mechanical and thermomechanical properties, highlighting the approximately 50% increase in flexural strength of the 100AC sample sintered for 4 hours, associated with a reduction in cristobalite peaks, while the 30CCA30LETA sample showed opposite behavior due to the polymorphic transformation of this phase. Furthermore, it was observed that the 3PFS test showed values approximately 40% higher than those obtained in the 4PFS test, a result attributed to the distribution of the bending moment, which is more concentrated in the first case. These results demonstrate that controlling the composition, apparent porosity, and phases formed during sintering is crucial for the performance of ceramic coatings produced with waste materials.

Keywords: Circular Economy. Rice Husk Ash. Water Treatment Plant Sludge. Sustainable Ceramic Coating. Thermomechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de fases sílica.....	19
Figura 2 – Rede tridimensional do quartzo, tridimita e cristobalita	20
Figura 3 – Etapas do Tratamento de Água	21
Figura 4 – Distribuição de tamanho das partículas transportadas pela água.....	22
Figura 5 – Esquema da ação do coagulante.....	22
Figura 6 – Ilustração de decantador horizontal e lodo ETA.....	23
Figura 7 – Sistema sílica-alumina	28
Figura 8 – Preenchimento dos espaços vazios com partículas menores.....	31
Figura 9 – Fluxograma da Pesquisa.....	36
Figura 10 – (a) Floculadores; (b) decantadores; (c) filtros e (d) reservatórios.....	37
Figura 11 – (a) Limpeza do Decantador; (b) Armazenamento e secagem do lodo ETA	38
Figura 12 – Lodo seco (a) ao ar; (b) na estufa.....	38
Figura 13 – Lodo (a) seco; (b) destorroado; (c) antes da calcinação; (d) calcinado.....	39
Figura 14 – Lodo ETA	40
Figura 15 – Cinza da Casca de Arroz.....	41
Figura 16 – Argila Caulim.....	42
Figura 17 – Fabricação dos corpos de prova	44
Figura 18 – Prensa hidráulica; (b) matriz tripla.....	45
Figura 19 – (a) Forno para sinterização; (b) Rampa de aquecimento	46
Figura 20 – Procedimento estabelecido pela NBR 10545-14.....	48
Figura 21 – Ensaio de Resistência flexão: (a) em 4 pontos.....	49
Figura 22 – Ensaio de choque térmico	51
Figura 23 – Distribuição do tamanho de partícula das matérias-primas	52
Figura 24 – Aspecto visual dos CPs com diferentes composições de resíduos.	54
Figura 25 – Revestimentos cerâmicos comerciais para paredes.....	55
Figura 26 – Formulações selecionadas.....	57
Figura 27 – Diagrama das matérias-primas antes da sinterização.....	58
Figura 28 – Diafratograma composição 10CCA10LETA sinterizada (0,5h).....	59
Figura 29 – Diafratograma composição 15CCA15LETA sinterizada (0,5h).....	60
Figura 30 – Diafratograma composição 20CCA20LETA sinterizada (0,5h).....	61
Figura 31 – Diafratograma composição 25CCA25LETA sinterizada (0,5h).....	61
Figura 32 – Diafratograma composição 30CCA30LETA sinterizada (0,5h).....	62

Figura 33 – Resultados AA e PA	64
Figura 34 – Resultado DMA	65
Figura 35 – Aspecto visual dos CPs após aplicação da tintura de iodo	67
Figura 36 – Aspecto visual dos CPs após aplicação do óleo de oliva.....	68
Figura 37 – Esquema do processo de formação de mancha em revestimento poroso.....	69
Figura 38 – Resultados médios da RF4P.....	70
Figura 39 – Relação entre a RF e a PA.....	70
Figura 40 – Ruptura dos CPs após ensaio de	72
Figura 41 – Progressão de fissura no ensaio de RCT	74
Figura 42 – Resultado do ensaio de choque térmico.....	74
Figura 43 – CPs fraturados após ensaio de choque térmico	76
Figura 44 – Diafratograma composição 100AC sinterizada (4h).....	77
Figura 45 – Diafratograma composição 100AC sinterizada (0,5h).....	78
Figura 46 – Diafratograma composição 10CCA10LETA sinterizada (4h).....	79
Figura 47 – Diafratograma composição 30CCA30LETA sinterizada (4h).....	79
Figura 48 – Comparação dos resultados de RF3P e RF4P	82
Figura 49 – Ilustração da aplicação de força no ensaio (a) RF4P e (b) RF3P.....	83
Figura 50 – Resultados dos CPs após o ensaio de RF4P.....	84
Figura 51 – Resultados dos CPs após o ensaio de RF3P.....	84
Figura 52 – CPs após ensaio de RCT	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da CCA encontrada na literatura.....	17
Tabela 2 – Faixa de estabilidade termodinâmica das fases polimórficas da sílica.....	19
Tabela 3 – Composição química de diversos lodos ETAs brasileiros.....	24
Tabela 4 – Classificação dos revestimentos quanto à absorção de água e conformação	29
Tabela 5 – Histórico de Pesquisas com Lodo ETA e CCA	34
Tabela 6 – Composição química do Lodo ETA calcinado.....	40
Tabela 7 – Composição química da CCA	41
Tabela 8 – Composição química da Argila Caulim.....	42
Tabela 9 – Estudo de dosagem dos resíduos empregados.	43
Tabela 10 – Faixa de porcentagens e características das cerâmicas selecionadas.....	44
Tabela 11 – Tamanho das partículas	52
Tabela 12 – Resultados ensaios físicos da análise preliminar	55
Tabela 13 – Resultados ensaios físicos.....	63
Tabela 14 – Resultados da RF4P.....	69
Tabela 15 – Resultados para o choque térmico	73
Tabela 16 – Resultados ensaios físicos etapa 3	80
Tabela 17 – Resistência média do ensaio RF4P	81
Tabela 18 – Resultado RF3P	82
Tabela 19 – Resultados para o choque térmico	85
Tabela 20 – Resumo dos resultados encontrados nas Etapas 2 e 3.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AA – Absorção por Água
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AC – Argila Caulim
- CA – Casca de Arroz
- CCA – Cinza da Casca de Arroz
- CPs – Corpos de Prova
- DA – Densidade aparente
- DRA – Densidade relativa aparente
- ETA – Estação de tratamento de água
- Lodo ETA – Lodo de estação de tratamento de Água
- NBR – Norma Brasileira
- PA – Porosidade aparente
- RC – Revestimento Cerâmico
- RC3P – Resistência à flexão em três pontos
- RC4P – Resistência à flexão em quatro pontos
- RCT – Resistência ao choque térmico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos.....	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 Justificativa da Pesquisa	12
1.3 Estrutura da Dissertação	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Economia Circular	15
2.2 Cinza da Casca de Arroz	16
2.3 Sistema sílica	19
2.4 Etapas do Tratamento de Água.....	21
2.5 Lodo de Estação de Tratamento de Água.....	23
2.5.1 Descarte e aproveitamento do Lodo ETA	25
2.6 Argila Caulim	26
2.7 Sistema sílica-alumina	27
2.8 Revestimentos Cerâmicos	28
2.8.1 Propriedades dos Revestimentos Cerâmicos	30
2.9 Estudos correlatos.....	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 Matérias-Primas.....	37
3.1.1 Lodo de Estação de Tratamento de Água.....	37
3.1.2 Cinza da Casca de Arroz	40
3.1.3 Argila Caulim	41
3.2 Caracterização das Matérias-Primas.....	42
3.2.1 Ensaio de granulometria	42
3.2.2 Ensaio de Difração de Raios – X (DRX).....	43
3.3 Fabricação dos Corpos De Provas (CPs).....	43
3.3.1 Modelagem dos Corpos de Prova.....	44
3.4 Ensaio Físicos	46
3.5 Ensaio Químico	47
3.6 Ensaio Mecânico	48
3.7 Ensaio Termomecânico	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5 CONCLUSÕES	90
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91

1 INTRODUÇÃO

As crises climáticas são agravadas pelo crescimento populacional, pelo aumento da demanda por energia e materiais, e pela ampliação da geração de resíduos (NATE, 2021). Diversas empresas têm alcançado resíduo zero em seu ciclo de produção, a partir do conceito de economia circular, que visa fechar ciclos de produtos e materiais operando dentro dos limites de proteção ambiental. Desta forma, se incentiva o desenvolvimento sustentável, desvinculando o crescimento econômico das consequências negativas do esgotamento de recursos e da degradação ambiental (Barboza *et al.*, 2019; Morseletto, 2020).

O Rio Grande do Sul se destaca como o principal produtor de arroz do Brasil, sendo o seu cultivo uma das maiores fontes econômicas do estado. O beneficiamento do arroz gera como resíduo a casca de arroz (CA). Devido ao seu alto poder calorífico (16720 kJ/kg) o resíduo é amplamente utilizado em usinas termoelétricas como fonte de energia térmica para geração de energia elétrica. O dióxido de carbono produzido na queima retorna para o ciclo de carbono da biosfera terrestre (LOPES *et al.*, 2017; DELLA *et al.*, 2005; NASCIMENTO *et al.*, 2015).

O processo de queima da CA gera como subproduto a cinza da casca de arroz (CCA) que, quando queimada em temperaturas controladas, apresenta alta porcentagem de sílica ($\geq 90\%$), tornando-a um resíduo valioso para o uso em aplicações industriais, com grande potencial para a redução de custos. Diversos estudos têm sido realizados sobre a utilização da CCA, principalmente, na área da construção civil, como concreto, argamassas e cerâmicos, (SIDDIKA *et al.*, 2021; ZAPARTE, 2020; KETOV, 2020), permitindo assim, o ciclo de produção do arroz com resíduo zero. Na lavoura a palha serve de adubo e cobertura do solo, a CA é queimada para a geração de energia e a CCA como fonte de sílica.

As estações de tratamento de água (ETA) geram o lodo ETA, um subproduto rico em óxido de alumínio, com alto potencial de reaproveitamento. Geralmente, é descartado sem tratamento prévio, em cursos d'água ou terrenos próximos às estações. Esta conduta causa prejuízos econômicos e ambientais (FREITAS *et al.*, 2010; MORSELLI *et al.*, 2022).

Para minimizar os impactos negativos, colaborar com a economia circular e o desenvolvimento sustentável, utilizou-se a CCA como fonte de sílica e o lodo ETA como fonte de alumina em massas cerâmicas a base de argila para fabricação de revestimentos cerâmicos. A proposta do trabalho consiste em investigar a utilização dos resíduos na fabricação de revestimento cerâmicos e a influência nos efeitos técnicos, econômicos e ambientais.

1.1 Objetivos

Neste tópico são apresentados os objetivos gerais e específicos que nortearam a pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar revestimentos cerâmicos com substituição parcial da argila caulim por CCA e lodo ETA, em proporções iguais, visando valorizar esses resíduos e reduzir sua destinação inadequada.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar a fração graúda de lodo ETA ($>400\mu\text{m}$) na formulação de revestimentos cerâmicos;
- Avaliar as propriedades físicas de absorção por água, porosidade aparente, densidade aparente e densidade relativa aparente;
- Determinar o módulo de resistência à flexão em 4 pontos;
- Comparar o desempenho das amostras na resistência à flexão em 3 e 4 pontos;
- Avaliar as propriedades termomecânicas por meio do ensaio de resistência ao choque térmico;
- Avaliar as propriedades químicas mediante ensaio de resistência ao manchamento;
- Avaliar a influência da variação de tempo (0,5h e 4h) nas propriedades físicas, mecânicas e termomecânicas de amostras sinterizadas a 1300°C ;
- Definir os parâmetros ótimos de processo em termos de composição química das amostras.

1.2 Justificativa da Pesquisa

A conscientização dos limites de espaço e de recursos naturais do planeta tem despertado a preocupação com a manutenção dos recursos às gerações futuras. Desta forma, as empresas passaram a buscar alternativas para seus resíduos, inserindo-os na economia em vez de descartá-los (JUNIOR; ROMANEL, 2013; IBF, 2025).

A Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul é a maior produtora de arroz do estado, em destaque, os municípios de Alegrete, Itaqui, São Borja, São Gabriel e Uruguaiana. A cidade de Alegrete conta com a empresa Sílica Verde do Arroz: SVA, produtora da sílica amorfa, após a

queima da casca de arroz em termoelétrica. Este subproduto colabora para fabricação de produtos com atributos ecologicamente corretos em consonância com questões mundiais de preservação do meio ambiente. Sendo assim, utilizar resíduos oriundos de termoelétricas da própria cidade e colaborar com as indústrias na destinação correta dos resíduos é um motivador para a pesquisa (SVA, 2025).

O rio Ibirapuitã, que atravessa a cidade de Alegrete, possui uma extensão aproximada de 259 km, dos quais cerca de 180 km estão dentro dos limites município. O rio abastece aproximadamente 40% da população alegretense e, para o tratamento de água, gera-se o lodo ETA, rico em óxido de alumínio. Geralmente, o resíduo é descartado no próprio corpo hídrico, prejudicando o meio ambiente, a fauna e a flora. Desse modo, para evitar a poluição ambiental, este material foi selecionado para ser utilizado na pesquisa.

Buscando se conectar com o contexto regional e trazer soluções para os desafios encontrados, utilizou-se os resíduos produzidos na própria cidade com intuito de minimizar os impactos ambientais. A CCA foi usada como fonte de sílica e lodo ETA como fonte de alumina para fabricar revestimento cerâmicos sustentáveis.

Estudos desenvolvidos por Azolim (2022), Cardoso (2022) e Cabral (2023) evidenciam o potencial do uso de CCA e do lodo ETA, como substitutos da argila caulim (AC) na produção de cerâmicos refratários. Os resultados obtidos nos ensaios físicos, mecânicos e termomecânico foram satisfatórios, comprovando a viabilidade técnica desses resíduos como matérias-primas alternativas.

O diferencial desta pesquisa é utilizar o lodo ETA com granulometria maior ($>400\mu\text{m}$) que a empregada por Azolim (2022), Cardoso (2022) e Cabral (2023), permitindo assim, o aproveitamento pleno do resíduo, e visando seu realce na peça cerâmica. Empregou-se a norma de placas cerâmicas (NBR 10545/2020), no intuito de atender as especificações técnicas e obter revestimento cerâmico sustentável com potencial de serem fabricados a nível industrial.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está organizado da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Introdução: apresenta a importância do tema, objetivos e justificativa da pesquisa.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: é apresentado os temas relevantes relacionados a pesquisa, envolvendo a economia circular, etapas de tratamento da água e geração do lodo ETA, ciclo da produção de arroz e revestimentos cerâmicos.

Capítulo 3 – Materiais e métodos: apresenta o detalhamento de como a pesquisa foi elaborada, desde as matérias-primas até a modo de fabricação e ensaios realizados.

Capítulo 4 – Resultados e discussão: são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados.

Capítulo 5 – Conclusões.

Capítulo 6 – Sugestões para trabalhos futuros.

O trabalho é finalizado com a apresentação das Referências Bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os conceitos de literatura assim como, as principais pesquisas na área. O objetivo é compreender a importância da economia circular e da utilização de resíduos para a fabricação de novos materiais, bem como, analisar o comportamento desses materiais em ensaios físicos, químicos, térmicos e mecânicos.

2.1 Economia Circular

A presença do modelo econômico linear (EL) de produção, baseado em extração, transformação, consumo e descarte, está associada a um problema ambiental devido ao elevado descarte de resíduos e, também, por desconsiderar que os recursos materiais e energéticos são finitos (Jorgensen, S., Pedersen, L.J.T., 2018; Meneley, A., 2018).

Aos poucos está sendo implementado na sociedade o conceito de economia circular (EC), definida como um modelo econômico voltado para o uso eficiente de recursos por meio da minimização de resíduos, redução de recursos primários e benefícios socioeconômicos. O modelo busca estabelecer ciclos fechados de produtos e materiais, operando dentro dos limites de proteção ambiental, com foco no desenvolvimento sustentável e desvinculando o crescimento econômico das consequências negativas do esgotamento de recursos e da degradação ambiental (Morseletto, 2020).

Como um modelo econômico inovador, a EC considera os resíduos como matéria-prima de outros processos, evitando o descarte incorreto e assim, quando não é possível o reaproveitamento dos resíduos, propõe recuperar o máximo de valor do que foi descartado, seja relacionado ao produto, componente ou material que os compõem (CNI, 2024).

A eliminação de desperdícios traz benefícios quantificáveis, como a redução dos custos diretos relacionado ao uso de matérias primas, além de diminuir a dependência de recursos, contribuindo para a sustentabilidade e a otimização de processos. Portanto, conceitos da economia circular devem ser adotados, incentivando a inovação e práticas sustentáveis no gerenciamento de resíduos (Sariatli, 2017; Nguyen *et al.*, 2022).

Neste sentido, existe uma crescente busca para reduzir as emissões de carbono e adotar fontes de energia renovável, menos impactantes ao meio ambiente, como a solar, eólica e biomassa. Esta última, representa cerca de 8,55% da matriz energética brasileira e, atualmente, o Brasil conta com aproximadamente 630 usinas que utilizam essa fonte, com uma capacidade instalada de 16,7 GW. Diferentemente dos combustíveis fósseis, a biomassa se renova a curto prazo (Saidur *et al.*, 2011; MME, 2023; Sayed *et al.*, 2021).

2.2 Cinza da Casca de Arroz

O arroz é um alimento básico importante para, aproximadamente, metade da população mundial. Segundo a Embrapa (2023) em 2022, a produção de arroz no Brasil foi de 10,7 milhões de toneladas, sendo o Rio Grande do Sul responsável por cerca de 70% da produção nacional. A casca de arroz (CA) é um resíduo agrícola abundante e volumoso, que corresponde a cerca de 20% do peso do grão e, por ser gerado em grande quantidade, contribui para um dos maiores problemas ambientais relacionados aos resíduos (Lopes *et al.*, 2017; Nascimento *et al.*, 2015).

A CA é de difícil descarte por métodos convencionais, pois apresenta lenta degradação e elevado teor de sílica, o que a torna inadequada como ração para animais e um resíduo ambientalmente problemático quando destinada a aterros sanitários. Em contrapartida, a conversão de CA em CCA, representa uma alternativa sustentável de descarte e uma fonte promissora de matéria-prima (Suomie *et al.*, 2025).

O processo de queima da CA resulta na CCA, rica em sílica e de coloração que varia de cinzenta a preta, dependendo do teor de impurezas inorgânicas e carbono presentes. O aumento da temperatura de queima diminui a quantidade de carbono, resultando em uma coloração mais clara (Della *et al.*, 2005; Tashima *et al.*, 2007).

A temperatura atingida durante a combustão determina o aparecimento da sílica em estado amorfo ou cristalino, influenciando diretamente na sua morfologia presente na CCA. Segundo Ferro *et al.* (2017), para obter sílica amorfa com alta reatividade, a queima deve ser realizada em condições controladas, em temperaturas entre 450 a 700°C. Quando queimada em temperaturas entre 800 a 1000°C, produz a cinza cristalina. A Tabela 1, mostra as principais composições químicas (em porcentagem em massa) de diversas CCA encontradas na literatura e suas respectivas composições.

De acordo com Kumar *et al.* (2012), a CCA é, geralmente, composta por 87 a 97% de sílica, sendo altamente porosa e leve. Devido à elevada presença desse componente em sua composição, a CCA torna-se um resíduo valioso para o uso em aplicações industriais, por apresentar baixo custo de produção e, dependendo de sua pureza, elevador valor. Além disso, a ampla disponibilidade e o baixo preço da CA em países produtores representam um benefício adicional para o aproveitamento desse material (TASHIMA *et al.*, 2012; KUMAR *et al.*, 2012).

Tabela 1 – Composição química da CCA encontrada na literatura.

Comp. Química	Resultados dos autores (%)							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) ¹	(7) ²
SiO ₂	91,89	92,99	83,41	83,53	81,1	92,77	84,91	90,58
Al ₂ O ₃	0,09	0,18	1,97	1,42	-	-	1,1	0,03
Fe ₂ O ₃	0,06	0,43	-	0,86	0,07	0,05	2,3	0,11
P ₂ O ₅	0,25	-	-	-	-	0,7	-	-
K ₂ O	1,5	0,72	2,54	0,79	1,71	1,88	0,45	0,92
CaO	0,52	1,03	-	1,79	0,59	0,67	2,3	0,25
MnO	0,25	-	-	-	0,36	0,38	0,05	0,03
MgO	0,33	0,35	-	0,36	1,02	-	0,97	0,23
NaO	-	-	-	0,96	-	-	-	-
SO ₃	0,06	0,1	-	0,45	-	0,09	0,27	0,03
Cl	0,01	-	-	-	0,08	0,27	0,15	0,02
PF	4,8	2,36	9,55	5,28	4,32	4,23	10,26	7,65

Fonte: (1) Ferro *et al.*, 2007; (2) Pereira *et al.*, 2015; (3) Bezerra *et al.*, 2011; (4) Tashima *et al.*, 2012; (5) Quevedo, 2020; (6) Azolim, 2022; (7) Kieling, 2020.

Segundo Ferro *et al.* (2007) a sílica amorfa é um material de fácil moagem e, quando moída, torna-se altamente reagente. Suas principais propriedades são a baixa condutividade térmica e a elevada resistência ao choque térmico, a torna um componente desejável na formulação de produtos cerâmicos, especialmente isolantes térmicos que serão submetidos a intensa ação do calor e variações bruscas de temperatura.

Pereira *et al.* (2015) utilizaram a CCA adicionada ao concreto nas porcentagens de 5% e 10% em massa. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral indicaram um aumento na resistência com adição de CCA, demonstrando seus benefícios para o desempenho do concreto. Os autores atribuíram esse resultado ao papel fundamental da CCA como material pozolânico.

Bezerra *et al.* (2011) utilizaram a CCA em argamassas de assentamento. Foram utilizados teores de 0%, 6%, 9%, 15%, 20% e 30% de CCA, como substituição parcial do cimento. Foram realizados ensaios físicos (densidade de massa e absorção de água) e mecânico (resistência à compressão simples). A CCA apresentou propriedades pozolânicas satisfatórias, resultando em propriedades físicas e mecânica superiores e os corpos de prova com sua incorporação apresentaram valores superiores aos de referência. Desse modo, o estudo apontou que a utilização da CCA é viável tanto tecnicamente quanto ecologicamente.

Tashima *et al.* (2012) estudaram a CCA obtida por combustão não controlada, investigando seu processo de produção e seu potencial como material pozolânico. A atividade foi determinada por meio de Análise Termogravimétrica (TGA), a qual evidenciou a ocorrência da reação pozolânica. As propriedades mecânicas foram estudadas em argamassas com substituições parciais de cimento por CCA nas proporções de 5%, 10% e 15%. Os resultados indicaram que a CCA apresenta elevada reatividade, demonstrando potencial para ser utilizada como fonte alternativa da sílica ativa.

Quevedo (2020) utilizou a CCA comercial oriunda do processo de queima controlada a 750°C. A autora estudou as propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias derivadas da CCA e alumina calcinada. Foram fabricados corpos de prova com 10% de CCA e 10%, 20% e 30% de alumina calcinada. A CCA aumentou a resistência à compressão, mas diminuiu a resistência à flexão. Concluiu-se que esses materiais cerâmicos podem ser usados como isolantes térmicos em fornos industriais.

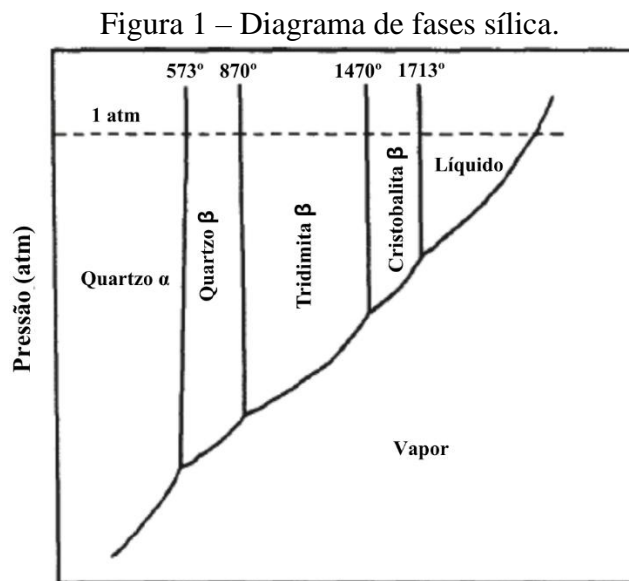
Azolim (2022) utilizou CCA comercial e analisou a influência do lodo ETA nas propriedades mecânicas (resistência à compressão e à flexão em três pontos) e termomecânicas (resistência ao choque térmico) de cerâmicas refratárias fabricadas com 15% de CCA e 5%, 10% e 15% de lodo ETA, na substituição parcial da argila caulim. Os resultados mostraram que as cerâmicas refratárias com 15% de CCA e 10% de lodo ETA apresentaram as melhores propriedades físicas, mecânicas e termomecânicas.

Kieling *et al.* (2020) analisaram dois processos de combustão, CCA¹ e CCA², por leito fluidizado e grelha móvel, respectivamente. A CCA¹ foi produzida em planta piloto semi-industrial, em temperaturas médias de 700°, enquanto a CCA² em uma temperatura de 900°C. Os resultados mostraram diferenças na microestrutura e cristalinidade da sílica, indicando que o controle de temperatura de queima é crucial para evitar a formação excessiva de sílica cristalina, que compromete a qualidade do subproduto.

Independente do processo de combustão empregado, a CCA apresenta elevado teor de SiO₂. Desta forma, sua utilização pode proporcionar benefícios técnicos, econômicos e sustentáveis, sendo amplamente aplicada em diferentes setores industriais, como na produção de polímeros, cimentos, argamassas, cerâmicos e materiais refratários, entre outros, atuando como fonte de sílica ativa (Foletto *et al.*, 2005; Kumar *et al.*, 2013).

2.3 Sistema sílica (SiO₂)

A sílica (SiO₂) é um dos constituintes mais abundantes da crosta terrestre e possui papel fundamental na formulação de materiais cerâmicos, tanto como fase vítrea quanto cristalina. As formas cristalinas mais amplamente reconhecidas da sílica são o quartzo e a cristobalita, enquanto a tridimita pode estar presente em menor proporção, dependendo da quantidade e natureza das impurezas presentes (GOMEZ, 2024; GUPTA *et al.*, 2022). A Tabela 2 apresenta as faixas de estabilidade das fases polimórficas.



Fonte: Petterle *et al.* (2018).

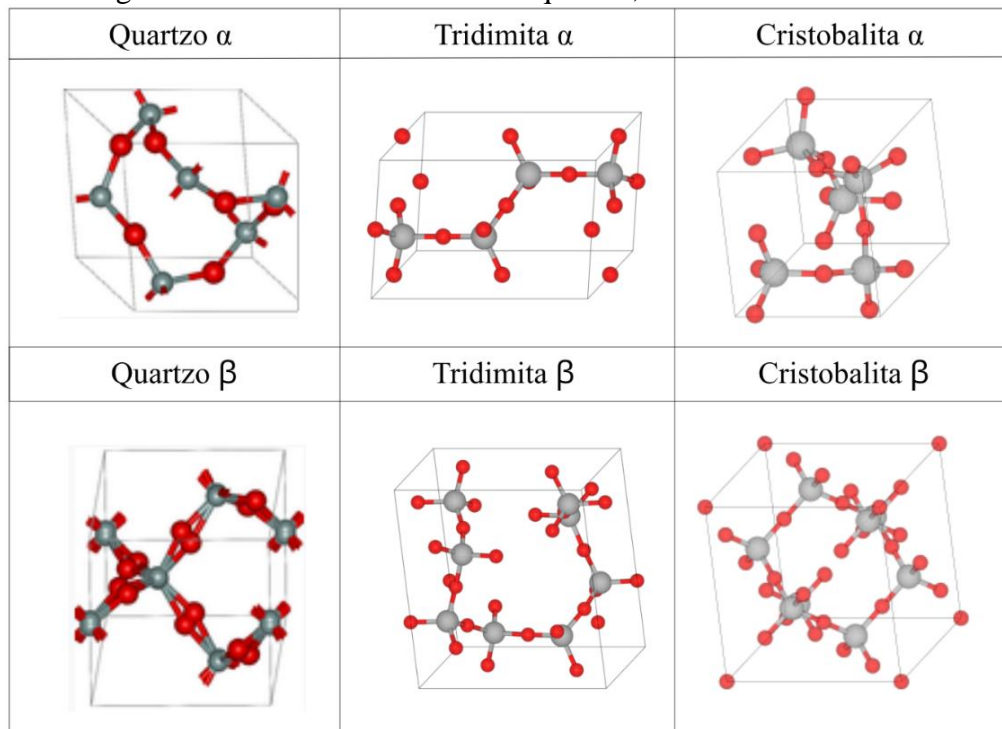
Tabela 2 – Faixa de estabilidade termodinâmica das fases polimórficas da sílica.

Fase Polimérica	Densidade (g/cm ³)	Faixa de estabilidade (°C)	Temperatura de inversão (°C)	Volume (%)
Quartzo	2,66	Temperatura ambiente - 870	$\alpha \leftrightarrow 573 \leftrightarrow \beta$	0,8
Tridimita	2,30	870 - 1470	$\alpha \leftrightarrow 117 \leftrightarrow \alpha' \leftrightarrow 163 \leftrightarrow \beta$	0,2
Cristobalita	2,33	1470 - 1723	$\alpha \leftrightarrow 200 - 275 \leftrightarrow \beta$	2,8

Fonte: De Aza *et al.* (2011).

Em cada uma dessas três fases existe uma forma de baixa (α) e uma de alta (β) temperatura. O processo de transformação que relaciona as fases de alta e baixa temperatura é denominado polimorfismo de deslocamento, o qual consiste somente na reorientação espacial das ligações químicas e das unidades tetraédricas (Figura 2) (GOMES *et al.*, 2018).

Figura 2 – Rede tridimensional do quartzo, tridimita e cristobalita.



Fonte: Assis (2020).

Em relação às fases mais reconhecidas, a sílica livre, na forma de quartzo α , é um mineral encontrado naturalmente nas matérias-primas utilizadas na fabricação de revestimentos cerâmicos. Devido ao seu elevado ponto de fusão, o quartzo contribui para a integridade estrutural das peças durante a queima, permanecendo praticamente inalterado. No entanto, ao ser aquecido a 573°C , o quartzo α sofre uma transformação de fase β , acompanhado por um aumento de volume das partículas (ZAUBERAS *et al.*, 2001; HULAN *et al.*, 2025).

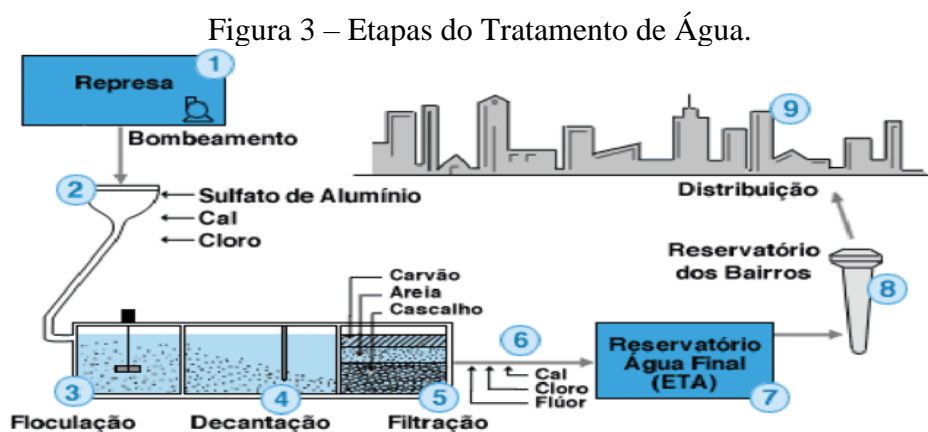
De acordo com Shmueli *et al.* (2025), a cristobalita β é estável em temperaturas acima de 270°C , mas ao ser resfriada, sofre uma transição para cristobalita α . Essa transformação é acompanhada por uma variação na densidade: de $2,21\text{ g/cm}^3$ (cristobalita beta, estrutura cúbica) para $2,33\text{ g/cm}^3$ (cristobalita alfa, estrutura tetragonal) (Figura 1). O resfriamento abaixo da temperatura de transição provoca uma significativa contração volumétrica, que pode gerar microfissuras nos limites dos grãos. Essas microfissuras tendem a se propagar pela fase vítrea de sílica amorfa, reduzindo a resistência mecânica e a resistência ao choque térmico do material.

2.4 Etapas do Tratamento de Água

Antes de chegar às residências, a água precisa passar por uma série de tratamentos físicos e químicos para se tornar segura para o consumo humano. A água bruta, em seu estado natural, pode conter alta concentração de microrganismos, como as bactérias, vírus, fungos e protozoários, podendo propagar diversas doenças. A Portaria GM/MS 888, de 24 de maio de 2021, estabelece diretrizes para a qualidade da água para consumo humano e o padrão de potabilidade, com base nos padrões da Organização Mundial da Saúde (OMS).

Quando a captação da água ocorre em poços, o processo de tratamento costuma ser mais simplificado; geralmente, consiste na adição de flúor, visando a prevenção de cáries dentárias, e de cloro, para eliminar microrganismos patogênicos e garantir a potabilidade da água (BRK, 2020). A água captada de mananciais superficiais requer um tratamento mais complexo para atender aos padrões de qualidade exigidos antes de ser distribuída.

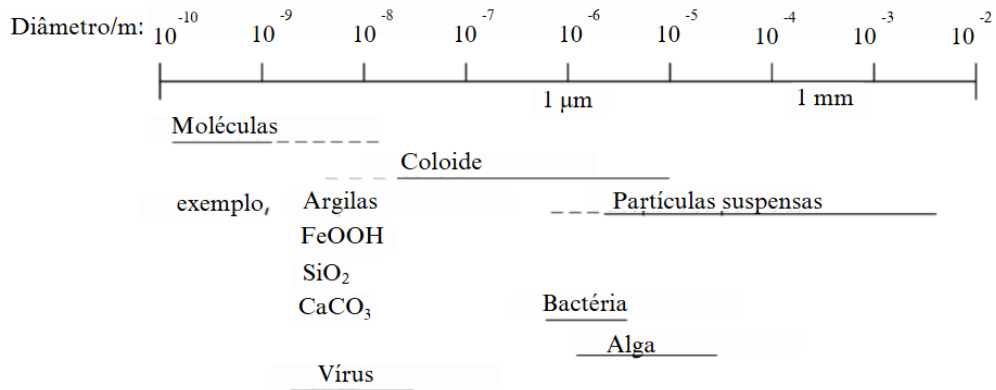
Devido às características da água no Brasil, a maior parte das estações de tratamento de água (ETAs) adota o processo convencional de tratamento que inclui a coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e distribuição (Ferreira; Marchetto, 2006; RAMIREZ *et al.*, 2018). A Figura 3 ilustra as diversas etapas do processo de tratamento, desde a captação em represa até a distribuição para o consumo.



Fonte: SABESP (2012).

O processo de coagulação é um estágio essencial, especialmente para remover impurezas finas em suspensão ou no estado coloidal (Figura 4). Para Prakash *et al.* (2014), a maioria dos sólidos suspensos na água possui carga negativa, repelindo-se quando se aproximam, permanecendo em suspensão ao invés de se aglomerarem. A coagulação tem como objetivo transformar as partículas pequenas em agregados maiores, que podem ser removidos por processos subsequentes, como a decantação e a filtração (FUNASA, 2014).

Figura 4 – Distribuição de tamanho das partículas transportadas pela água.



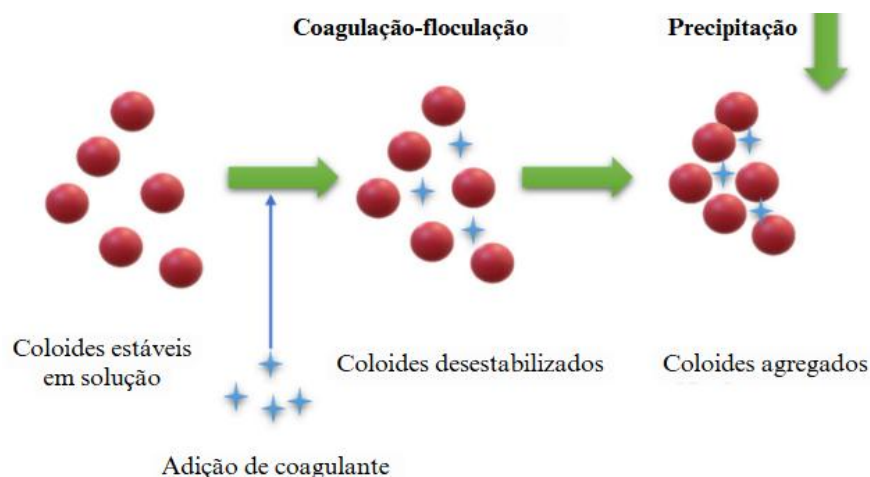
Fonte: Adaptado de Chang (2016).

Após a adição do coagulante, a água é direcionada para o tanque flocculador, onde passa pelo estágio de mistura suave e, devido a sua agitação, os flocos colidem, gerando partículas suspensas visíveis. A agitação lenta e por um longo período, é fundamental para que aumente a probabilidade de ocorrência de colisão entre as partículas, tornando-as maiores. Uma vez que os flocos atinjam seu tamanho ideal, a água passa para o processo de decantação (MRWA, 2020; BARTIKO D., JULIO M., 2015).

Os principais coagulantes e flocculantes utilizados no tratamento de águas são os sais inorgânicos, como o cloreto férrico (FeCl_3), o sulfato ferroso (FeSO_4), o policloreto de alumínio ($\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{3n-m}$) e o sulfato de alumínio (Al_2SO_4). Destaca-se este último como o coagulante mais empregado há mais de um século, devido à sua eficiência na remoção de partículas e matéria orgânica. (LIMA J., ABREU F., 2018; CORAL L. *et al.*, 2009).

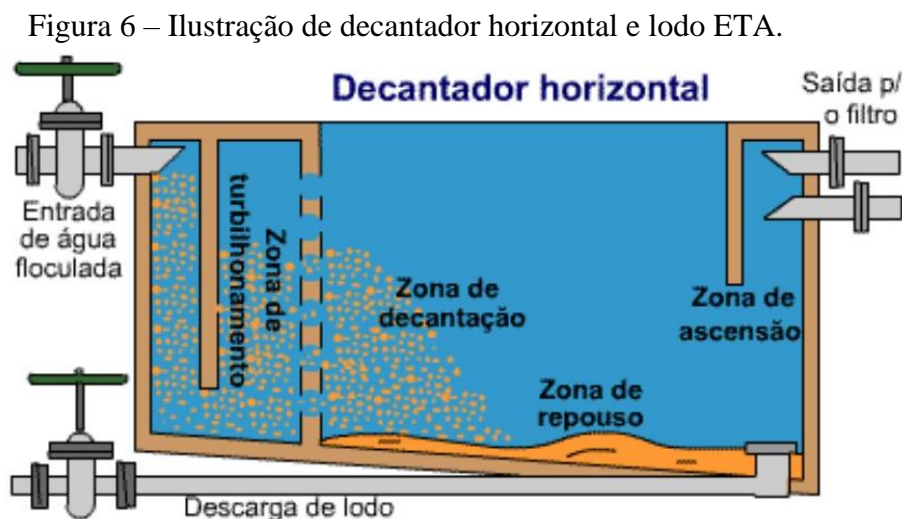
A Figura 5 ilustra o mecanismo de ação dos coagulantes. Após a sua adição, formam-se flocos que se aglomeram e, com o aumento da densidade, depositam-se no fundo do reservatório devido à força da gravidade (BRATBY, 2016).

Figura 5 – Esquema da ação do coagulante.



Fonte: Adaptado de Jorge *et al.* (2022).

Na etapa de decantação, ocorre a separação das partículas suspensas que são mais pesadas que a água, como areia, argila, siltes, matéria orgânica, sólidos e flocos oriundos da coagulação química (VITORINO *et al.*, 2009; METCALF & EDDY, 2014). Estes acumulam-se na base do decantador e a água superficial segue para a filtragem (Figura 6).



Fonte: Roschild (2016).

Na etapa de filtragem, os flocos menores que não decantaram na etapa de decantação, ficam retidos em camadas filtrantes, tornando a água completamente limpa. A lavagem dos filtros produz a maior quantidade de resíduos em termos volumétricos (Lustosa *et al.*, 2017). Após a filtragem, ocorre a desinfecção com a adição de cloro para eliminação de microorganismos patogênicos, a fluoretação para prevenção de cáries dentárias e, por fim, o bombeamento da água para as redes e reservatórios (CORSAN, 2025).

2.5 Lodo de Estação de Tratamento de Água (lodo ETA)

Os resíduos de decantadores apresentam sólidos totais entre 1000 a 40000 mg/l (0,1 a 4%) e a água de lavagem de filtros possui uma concentração de 40 a 1000 mg/l (0,004 a 0,1%) (Richter, 2001). As características físico-químicas do lodo podem variar de acordo com o período do ano. Em meses em que a precipitação pluviométrica é maior, há piora na qualidade da água dos mananciais podendo ser necessário o aumento da dosagem do coagulante (Rodrigues; Carneiro, 2023; Taboni *et al.*, 2019).

Outro fator que afeta a qualidade e quantidade de lodo ETA são as características do local onde a água é captada. O substrato geológico, relevo, tipo de solo, floresta, matérias orgânicas, minerais e o tipo de coagulante adicionado durante o tratamento interferem no

resíduo final (RAMIREZ, 2015). A Tabela 3 apresenta, com base em diversas pesquisas realizadas por autores brasileiros, as principais composições químicas do lodo calcinado (em porcentagem de massa) analisado por ensaio de Fluorêscencia de Raios X (FRX).

Tabela 3 – Composição química de diversos lodos ETAs brasileiros.

Compos. Química	Resultados dos autores (%)						
	(1)	(2)	(3)	(4)*	(5)	(6)	(7)
SiO ₂	41,12	14,49	28,11	27,3	24,9	4,87	30,92
Al ₂ O ₃	38,31	20,19	14,17	24,2	28,7	29,6	41,07
Fe ₂ O ₃	16,34	6,23	25,87	17,5	10,4	12,3	19,82
P ₂ O ₅	0,64	0,53	0,307	0,3	0,52	0,45	2,77
K ₂ O	0,89	0,14	0,39	0,1	0,84	<0,1	0,94
CaO	0,25	0,13	0,19	0,2	0,32	0,49	0,83
TiO ₂	1,16	0,39	0,945	2,35	0,11	0,17	0,49
MnO ₂	0,28	0,19	0,615	0,1	0,53	0,32	0,27
MgO	-	-	0,08	0,1	-	<0,10	0,15
Na ₂ O	-	-	<0,02	0,1	-	<10	-
SO ₃	-	-	-	0,4	-	-	0,42
Cl	-	-	-	0,1	0,03	-	0,15
V ₂ O ₅	-	-	-	0,1	-	-	-
ZrO ₂	-	-	-	0,1	-	-	0,03
ZnO	-	-	-	-	-	-	0,18
Eu ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	0,11

Fonte: (1) Vitorino *et al.*, 2009; (2) Vieira *et al.*, 2008; (3) Muchimbane, 2016; (4) Ramirez *et al.*, 2018; (5) Santos, 2018; (6) Roque *et al.*, 2021; (7) Cardoso, 2022.

Conforme a Tabela 3, o dióxido de silício/sílica (SiO₂), óxido de alumínio (alumina-Al₂O₃) e óxido férrico/hematita (Fe₂O₃), são os principais constituintes do lodo ETA brasileiro. Este não apresenta uma composição regular, estando relacionadas às características da fonte de água utilizada, métodos de operação do sistema, dosagens químicas e frequência de limpeza dos decantadores e filtros (RAMIREZ, 2018). Assim, o uso de lodo ETA pode resultar em diferentes propriedades dos materiais produzidos, sendo necessário realizar a sua caracterização para avaliar as propriedades do resíduo.

2.5.1 Descarte e aproveitamento do Lodo ETA

De acordo com Caniani (2013), a produção mundial de lodo ETA excede 10.000 toneladas/dia, sendo classificado, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), como resíduo sólido Classe II A – não perigoso e não inerte. Apesar disso, deve receber um destino adequado exigido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

Nas estações de tratamento de água (ETAs), o resíduo é, geralmente, descartado em cursos d'água ou terrenos próximos as estações, sem tratamento prévio. Essa conduta é adotada por ser o método de menor custo. O lançamento do lodo na mesma fonte de captação de água devolve os materiais removidos anteriormente, causando o assoreamento dos corpos hídricos, piorando a qualidade da água. Além disso, aumentam a concentração de metais, principalmente, o alumínio e ferro, que podem causar impactos à vida aquática (Morselli *et al.*, 2022; Roque *et al.*, 2021; Sobrinho *et al.*, 2019).

O uso prolongado e extensivo de alumínio tem gerado preocupações devido ao acúmulo no ambiente e à contaminação do solo. Por ser um metal de acesso frequente aos seres humanos, a exposição é, atualmente, um dos riscos ambientais mais estudados. Estudos revelam uma estreita relação entre o número de casos de pessoas com a doença de Alzheimer e o alumínio (Freitas *et al.*, 2021; Romero *et al.*, 2007; Crapper, 1986; Colomina; Peris-Sampedro, 2017).

Inúmeras pesquisas buscam soluções para o destino adequado do lodo ETA, principalmente, em aplicações no ramo da construção civil. Pozzobon *et al.* (2010), analisaram a aplicação de lodo ETA para a produção de cerâmica artística. Os pesquisadores substituíram a argila por lodo in natura (LIN) e por lodo seco moído (LSM), em porcentagens de 12% e 15%. As peças foram moldadas e sinterizadas à 1100°C por 7h.

Concluiu-se que o LIN resulta em peças sinterizadas defeituosas, sendo o LSM, a opção com melhor desempenho. No ensaio de lixiviação, identificou-se que o lodo ETA pode ser aproveitado para elaboração de peças decorativas, mas não deve ser utilizado para a fabricação de utensílios que entram em contato com bebidas e alimentos.

Azolim (2022) estudou a influência do lodo ETA nas propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias fabricadas com CCA. Foi substituída a argila caulim pela CCA em teor de 15% e a incorporação de lodo ETA em teores em massa de 5%, 10% e 15%. A cerâmica com 10% de lodo ETA e 15% CCA apresentou o melhor desempenho em relação as propriedades mecânicas e termomecânicas.

Silva e Maciel (2019) avaliaram o uso de lodo ETA como carga em blocos cerâmicos, incorporando 5, 10, 15, 20 e 25% de lodo na massa argilosa, que foi, posteriormente, moldada e sinterizada a 900°C por 3h. Verificou-se que os CPs com a adição de até 15% de lodo apresentam resultados satisfatórios, podendo ser usados para fabricação de tijolos maciços.

Tafarel *et al.* (2016) avaliou as propriedades do concreto com a incorporação de lodo ETA. Foram confeccionados CPs de concreto com teores de 5% e 10% de lodo em substituição à areia, concluindo-se que o concreto com substituição de 5% de agregado miúdo por lodo pode ser utilizado com finalidade não estrutural.

2.6 Argila Caulim

Segundo Callister (2018), as argilas são compostas por alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), contendo água quimicamente ligada, apresentando uma vasta gama de características físicas, composições químicas e estruturas. Durante a queima, pode ser produzida uma peça cerâmica densa e resistente, sem que ocorra a fusão completa, mantendo o formato desejado.

O termo caulim refere-se ao produto obtido do beneficiamento das rochas caulínicas, compostas majoritariamente pelo mineral caulinita. Trata-se de mineral de granulometria fina, composto predominantemente por argila, com baixo teor de ferro, e caracterizada por uma coloração próxima da branca. A argila caulim (AC) é utilizada em diversos setores industriais em todo mundo, destacando-se o de papel, que consome 45% do total, 31% na cerâmica (porcelana, cerâmica branca e materiais refratários) e 24% divididos entre tintas, borrachas, plásticos e outros (Luz *et al.*, 2008; Panda *et al.*, 2010; Martíres, 2008).

A AC é formada por um grupo de silicatos hidratados de alumínio, principalmente caulina e haloisita. Possui composição química teórica de 39,50% de Al_2O_3 , 46,54% de SiO_2 e 13,96% de H_2O , podendo sofrer pequenas variações. Contém outros minerais sob forma de impurezas como o quartzo, grãos de feldspato, óxidos de ferro e titânio, que afetam as propriedades de coloração, viscosidade e abrasividade (Martíres, 2008).

O caulim é uma fonte de óxido de alumínio, durante a fase de vitrificação da peça, regulando a reação de equilíbrio. Durante a queima a temperaturas superiores a 1000°C, o caulim tende a converter-se para mulita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), formando uma fase vítrea que, devido à sua estrutura, serve como esqueleto para os produtos resultantes. Essa transformação contribui significativamente para o aumento da resistência mecânica e para a redução da deformação pirolástica ao longo do processo de queima (Luz *et al.*, 2008).

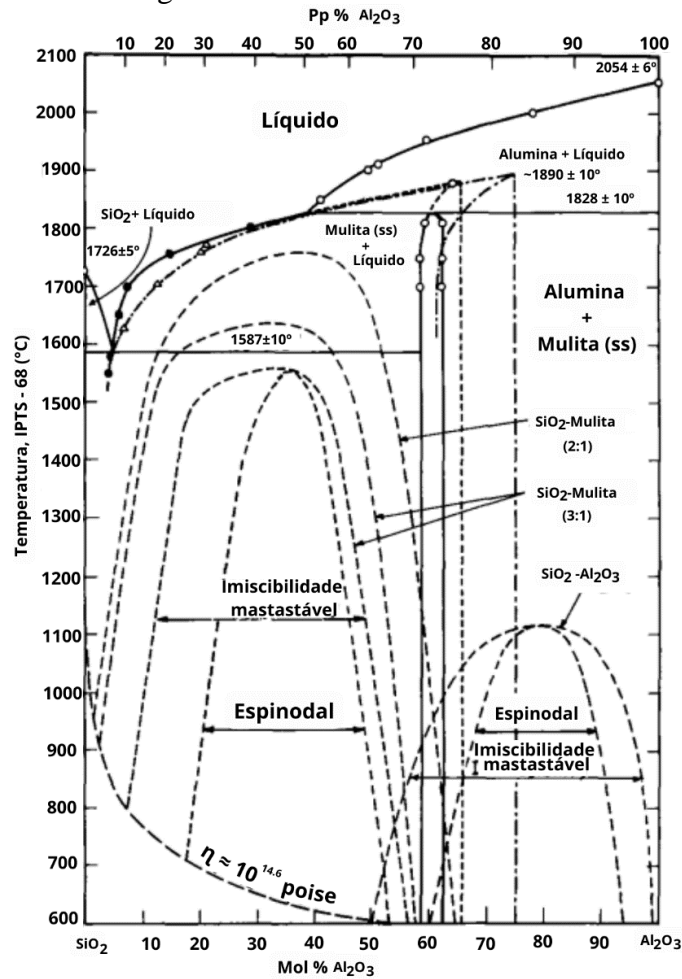
2.7 Sistema sílica-alumina

Os materiais utilizados nesta pesquisa são classificados no sistema sílica-alumina, devido a presença de sílica (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3), que não são mutuamente solúveis entre si, o que explica a ausência de soluções sólidas terminais em ambas as extremidades do diagrama de fases, como apresentado na Figura 7. Segundo Petterle (2018), em temperaturas mais altas podem ocorrer formações de fases vítreas ou cristalinas. A reação entre a sílica livre e a alumina resulta na formação de mulita, enquanto a ausência dessa reação favorece a cristalização da cristobalita.

Durante aquecimento para sinterização, ocorre a eliminação completa de água entre 100 a 350°C. Nas temperaturas de 350 a 650°C ocorre a combustão completa de materiais orgânicos e a dissociação de sulfatos e, entre 700 a 800°C, a sílica e a alumina reagem com elementos fusíveis, resultando na formação de sílico-aluminatos complexos (SILVEIRA, 2022). A partir de 1000°C, os sílicos-aluminatos começam a se fundir, formando uma fase vítrea que engloba as partículas menos fusíveis que resulta em elevada dureza.

A mulita é uma fase cristalina sílico-aluminosa com propriedades de interesse para a indústria cerâmica, além da grande disponibilidade de matérias-primas. Possui baixa densidade e coeficiente de expansão térmica, elevada resistência mecânica e ao choque térmico (MENEZES *et al.*, 2008; MAGLIANO *et al.*, 2010). Observa-se na Figura 7 que a mulita é um composto intermediário que aparece em um estreito campo de fases e se funde em torno de 1890°C. Em temperaturas acima de 1500°C os picos de cristobalita se dissipam completamente, elevando-se os picos de mulita (Magliano *et al.*, 2010).

Figura 7 – Sistema sílica-alumina.



Fonte: Adaptado de Risbud (1977).

2.8 Revestimentos Cerâmicos

Os materiais cerâmicos são inorgânicos, formados por uma mistura de elementos metálicos e não metálicos, cujas propriedades dependem da natureza de suas ligações. Devido a sua composição química adaptável, baseada em ligações iônicas e covalentes fortes, em proporções variadas, são considerados materiais versáteis, com ampla diversidade de aplicações e propriedades (Kordani, 2023).

Segundo Andrade *et. al* (2005), diversos minerais e rochas compõem os insumos utilizados na indústria cerâmica, como os argilosos, os não argilosos e os especiais. Os cerâmicos são fabricados a partir de argilominerais, vidrados e óxidos metálicos, que após misturados e moldados, são queimados em fornos sob altas temperaturas. São classificados conforme a moldagem, o acabamento superficial e cor (Campante, 2008).

De acordo com a NBR 13006:2020, a placa cerâmica é um elemento empregado para revestir pisos e paredes. Comercialmente, recebe a denominação de revestimentos cerâmicos. Seu objetivo é proteger os elementos de vedação de um prédio, auxiliando em funções como isolamento térmico e acústico, segurança contra ao fogo e na estanqueidade de água e gases. São diretamente relacionados à estética da construção, pois possibilitam a regularização das superfícies, proporcionando o acabamento final.

Os revestimentos destinados a paredes apresentam maior porosidade, boa estabilidade dimensional e facilidade de instalação. Já os utilizados em pisos exigem maior resistência mecânica, menor porosidade e baixa absorção de água, devido às solicitações mecânicas e ao contato direto com agentes abrasivos (Siqueira, 2017). Para que essas características sejam asseguradas, o processo de fabricação do revestimento exige etapas fundamentais, como a conformação, quando a peça é formada por extrusão (pasta) ou prensagem (pó) à temperatura ambiente e, posteriormente, seca e queimada à temperatura suficiente para desenvolver as propriedades requeridas.

A Tabela 4 classifica os revestimentos cerâmicos em relação ao método de fabricação. O material extrudado (A) é conformado no estado plástico, na forma de uma pasta, moldado em uma coluna contínua e cortado em dimensões especificadas. Os materiais prensados (B) são formados a partir de uma mistura de substâncias finas em pó, geralmente com baixo teor de umidade e compactadas a alta pressão (NBR 13006, ABNT 2020).

Tabela 4 – Classificação dos revestimentos quanto à absorção de água e conformação.

Absorção de Água AA (%)	Métodos de fabricação	
	Extrudado (A)	Prensado (B)
$AA \leq 0,5$	AIa	BIa
$0,5 < AA \leq 3$	AIIa	BIb
$3 < AA \leq 6$		BIIa
$6 < AA \leq 10$	AIIb	BIIb
$AA > 10$	AIII	BIII

Fonte: Adaptado da NBR 13006 (2020).

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM), durante a etapa de secagem após a conformação, a umidade presente nas amostras deve ser eliminada de forma lenta e gradual, em temperaturas entre 50°C e 150°C, para evitar a geração de tensões internas que podem ocasionar defeitos nas peças.

O processo de queima ocorre após a etapa de secagem e representa uma das fases mais importantes na fabricação de materiais cerâmicos. Nesse estágio ocorrem diversas transformações na massa cerâmica, como o desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea, perda de massa e a sinterização, que promove a união dos grãos. A queima é, portanto, responsável por grande parte das características finais do produto, influenciando diretamente na resistência mecânica, nas propriedades físicas e na facilidade de limpeza, entre outras propriedades (Siqueira, 2017).

Os revestimentos cerâmicos podem ser classificados como esmaltados ou não esmaltados. Os esmaltados recebem uma camada superficial de material vítreo, que após a queima, forma uma superfície vitrificada com o objetivo aprimorar a estética, tornar o produto impermeável e melhorar a resistência mecânica (ABCERAM, 2020). Nos casos em que a absorção de água do material for superior à 10%, é recomendada aplicação do esmalte.

2.8.1 Propriedades dos Revestimentos Cerâmicos

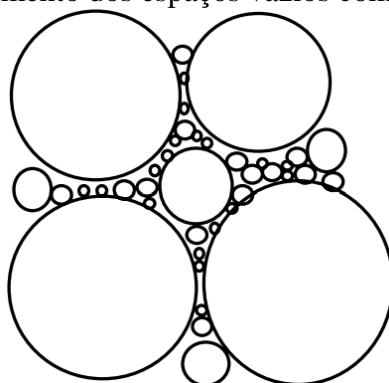
A fratura frágil é comum nos cerâmicos, devido à limitada ductilidade, associada à baixa capacidade de deformação. Em relação ao choque térmico, o resfriamento rápido tende a ser mais prejudicial do que o aquecimento brusco, pois gera tensões de tração na superfície do material, que são críticas devido à baixa resistência a tração (Callister, 2018).

De acordo com a Tabela 4 da NBR 13006 (ABNT, 2020), a absorção de água é uma das principais características dos revestimento cerâmicos, por estar diretamente ligada à porosidade do material. Essa propriedade depende das matérias-primas utilizadas, do processo de fabricação e dos parâmetros de queima, como a temperatura e tempo. Níveis elevados de absorção comprometem o desempenho mecânico, a resistência química e a capacidade do revestimento de suportar impactos.

Durante a prensagem, a compactação é maximizada e a fração de espaços vazios é minimizada por meio da combinação adequada de partículas maiores e mais finas. Uma das funções da água é atuar como lubrificante entre as partículas pulverizadas, facilitando seu deslocamento durante a compactação da massa cerâmica (Callister, 2018).

A distribuição granulométrica das partículas exerce influência significativa sobre o desempenho dos revestimentos, uma vez que as partículas menores preenchem os espaços entre as maiores, favorecendo o empacotamento dos grãos (Callister, 2018) (Figura 8).

Figura 8 – Preenchimento dos espaços vazios com partículas menores.



Fonte: Lengler (2006).

A porosidade pode ser classificada como aberta, quando os poros se comunicam entre si, ou fechada, quando os vazios são isolados uns dos outros. Os poros reduzem a área da seção transversal onde a carga é aplicada e atuam como concentradores de tensões. Existe uma relação direta entre a resistência à flexão e a porosidade, de modo que elas se comportam de forma inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a porosidade, menor é a resistência mecânica do material cerâmico (Callister, 2018; Costa, 2022).

Por outro lado, os poros podem conferir propriedades específicas como isolamento térmico, capacidade de filtração por captura de impurezas e, também, redução de massa, tornando o material mais leve (Costa, 2022).

Estudos realizados por Lu *et al.* (2014) e Cardoso (2022), mostram que a resistência ao choque térmico tende a aumentar com o acréscimo da porosidade. Segundo Vanderperre *et al.* (2004), as trincas ao invés de atravessarem diretamente os poros, tendem a contorná-los. Como a taxa de crescimento da trinca é uniforme em toda sua borda ativa, ela acaba se curvando ao contornar os poros. Esse desvio eleva a energia exigida para a propagação, retardando o crescimento da trinca e aumentando o número de ciclos até a falha.

2.9 Estudos correlatos

Ressalta-se que diversos trabalhos utilizados como referência para esta pesquisa foram elaborados na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), principalmente, por autores do Programa de Pós Graduação em Engenharia (PPEng). A instituição se destaca pelos estudos na reutilização de resíduos, como a incorporação da CCA e do lodo ETA, como os trabalhos realizados por Stochero *et al.* (2014), Petterle (2018), Quevedo (2020), Cardoso (2022) e Azolim (2022).

Zanelli *et al.* (2021) estudaram a reciclagem de resíduos em revestimentos cerâmicos, destacando, do ponto de vista da economia circular, a sua utilização é tecnologicamente viável, especialmente para aqueles com elevada compatibilidade química e mineralógica em relação as matérias-primas que substituem. Essa condição favorece a incorporação de resíduos em escala industrial, considerando que a produção mundial de revestimentos cerâmicos consome cerca de 250 milhões de toneladas de matérias-primas por ano. Sendo assim, torna-se um setor estratégico para o avanço de práticas sustentáveis.

Nguyen *et al.* (2022) analisou a reutilização benéfica do lodo ETA no contexto da economia circular. Foi constatado que esse material possui grande potencial como matéria-prima em diversas aplicações na indústria da construção na fabricação de produtos cerâmicos, tijolos, cimentos, agregados leves e concreto.

Vitorino *et al.* (2009) investigou o uso de resíduos provenientes de ETA das fases de desarenação, decantação e filtração em cerâmica argilosa. Foram incorporados 3%, 5%, 7% e 10% em peso de resíduos. Os resultados mostraram que os resíduos do decantador e do filtro possuem composição química e mineralógica semelhantes, formados por minerais argilosos, hidróxidos de alumínio e de ferro, mica e quartzo. Os resíduos oriundos das diferentes etapas, apresentam potencialidade para utilização em cerâmica vermelha.

Sobrosa (2014) desenvolveu materiais cerâmicos refratários com adição de CCA, substituindo a AC em 5%, 10% e 20%. Observou-se que, conforme aumentou a substituição da AC por CCA, houve melhor empacotamento da mistura granular e, conseqüentemente, melhora nas propriedades mecânicas das amostras, porém, o material tornou-se mais frágil, com menor resistência ao choque térmico. Entre as composições testadas, a substituição com 10% apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e resistência ao choque térmico, sendo considerada a mais vantajosa para produção de cerâmicos refratários.

Nunes (2014) verificou que a substituição parcial da argila caulim por 10% e 20% de cinza da casca de arroz, com adição de 1% de fibras de aço, melhorou as propriedades mecânicas e térmicas de cerâmicas refratárias, enquanto teores de 30% aumentaram a retração linear e reduziram o desempenho mecânico, tornando inviável seu uso em maiores proporções.

Monteiro *et al.* (2008) incorporaram lodo ETA (0–10% em massa) em cerâmica vermelha e observaram aumento da absorção de água e redução de resistência mecânica, atribuídos ao incremento da porosidade causado pela elevada perda de massa na queima.

Chiang *et al.* (2009) investigaram a produção de tijolos leves utilizando lodo ETA como principal matéria-prima e a incorporação de diferentes teores de CCA (até 20% em peso). As amostras foram sinterizadas e caracterizadas, verificando-se que a incorporação de CCA aumentou significativamente a porosidade e reduziu a densidades dos tijolos.

Stochero *et al.* (2014) analisaram o aproveitamento da sílica residual da queima da casca do arroz e do lodo ETA para fabricação de cerâmicas. Foi verificado que a substituição de 20% da AC por CCA proporcionou melhor desempenho mecânico das cerâmicas. A adição de lodo de ETA aumentou a porosidade e reduziu a resistência, sendo os teores mais elevados (20–30%) inadequados para aplicações estruturais, mas potencialmente úteis para isolamento térmico. Assim, as melhores composições combinam 20% de CCA com até 10% de lodo, equilibrando resistência mecânica e aproveitamento de resíduos.

Petterle (2018) avaliou placas cerâmicas compostas por AC, CCA e lodo ETA, obtendo excelentes propriedades termomecânicas. A composição com 72% AC, 18% CCA e 10% lodo ETA apresentou a menor condutividade térmica (0,2574 W/mK) e a maior resistência à compressão (189,97 MPa). Aplicadas como revestimento de parede, mostraram boa durabilidade e ausência de fissuras, evidenciando potencial para uso em fachadas.

Quevedo (2020) investigou a influência da substituição parcial da AC por 10% de CCA e alumina calcinada (AL) (10%, 20% e 30%) nas propriedades físicas, mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias. Entre as composições analisadas, a amostra contendo 10% de CCA e 20% de alumina apresentou o melhor desempenho nos ensaios realizados.

Cardoso (2022) avaliou as propriedades mecânicas e termomecânicas de compósitos cerâmicos refratários utilizando CCA e lodo ETA. Foram testadas composições com 10% de CCA e 5%, 10% e 15% de lodo ETA. A amostra com 10% CCA e 10% lodo ETA apresentou o melhor desempenho mecânico e termomecânico. O lodo ETA contribui positivamente para maior resistência ao choque térmico, e a formação de fases como mulita e cristobalita confirmou a viabilidade desses resíduos como precursores cerâmicos.

Um breve histórico de algumas pesquisas focadas na utilização da CCA e do lodo ETA é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Histórico de Pesquisas com Lodo ETA e CCA.

Ano	Autor	Pesquisa(s)
2006	Hoppen <i>et al.</i>	Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental
2007	Ferro <i>et al.</i>	Uso da cinza da casca de arroz como carga em matrizes de Poliamida 6 e Poliamida 6.6
2008	Vieira <i>et al.</i>	Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com lodo de ETA
2009	Vitorino <i>et al.</i>	Caracterização e incorporação de resíduos provenientes de Estação de Tratamento de Água em cerâmica argilosa
2010	Medeiros <i>et al.</i>	Incorporação de cinza de lenha, lodo ETA e cinza da casca de arroz em massa cerâmica: utilização da técnica de planejamento
2011	Pereira <i>et al.</i>	Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento
2012	Tashima <i>et al.</i>	CCA altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica
2014	Stochero <i>et al.</i>	Aproveitamento da sílica residual da queima da casca do arroz e do lodo da estação de tratamento de água para fabricação de cerâmicas
2014	Hengen	Caracterização de cinza de lodo de ETA para uso no concreto - (resistência à compressão axial)
2015	Bezera <i>et al.</i>	Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza da casca de arroz
2016	Geraldo	Aglomerante álcali-ativado contendo lodo de ETA e CCA
2016	Stein	Características de pastas de cimento portland com adição de cinza de lodo ETA
2016	Ramchandra	Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant
2018	Petterle	Avaliação do desempenho térmico da placa do sistema de vedação vertical externo usando placas cerâmicas contendo lodo ETA e CCA
2019	Barbosa <i>et al.</i>	Rice husk and water treatment plant sludge incorporated into soil-cement brick
2019	Hagemann <i>et al.</i>	Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation
2020	Quevedo	Estudo das propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias derivadas da cinza da casca de arroz e alumina calcinada
2020	Kieling <i>et al.</i>	Influência do processo de combustão nas características das CCA
2020	Ruviaro <i>et al.</i>	Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar
2020	Santos	Caracterização e estudo da incorporação do lodo de ETA em argamassas
2022	Cardoso	Avaliação das propriedades mecânicas e termomecânicas em compósitos cerâmicos refratários utilizando CCA e lodo de ETA
2022	Azolim	Influência do Lodo ETA nas propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias fabricadas com CCA
2022	Nguyen <i>et al.</i>	Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy
2023	Rodrigues <i>et al.</i>	Lodo de ETA como alternativa à argila na indústria cerâmica: Avaliação da qualidade e desafios

Fonte: Autoria própria

As propriedades funcionais dos materiais cerâmicos são determinadas tanto pela composição química quanto pela microestrutura. Esta última depende das condições de preparação, como moldagem e sinterização e, também, da distribuição do tamanho das partículas do pó inicial (Telegin, 2021). Conforme observado nos estudos apresentados, a incorporação de CCA e de lodo ETA tendem aumentar a porosidade do material, devido a presença de partículas leves e a queima de componentes orgânicos.

A presença de poros na microestrutura pode comprometer as propriedades mecânicas, pois cria regiões de concentração de tensão que favorecem a nucleação de trincas, aumentando o risco de fratura ao atingir o fator de intensidade de tensão crítico da peça. Por outro lado, os microporos presentes no material também podem apresentar efeitos benéficos, reduzindo a energia necessária para propagação de trincas e aumentando a resistência ao choque térmico (Davidge, 2010; Oliveira *et al.* 2022).

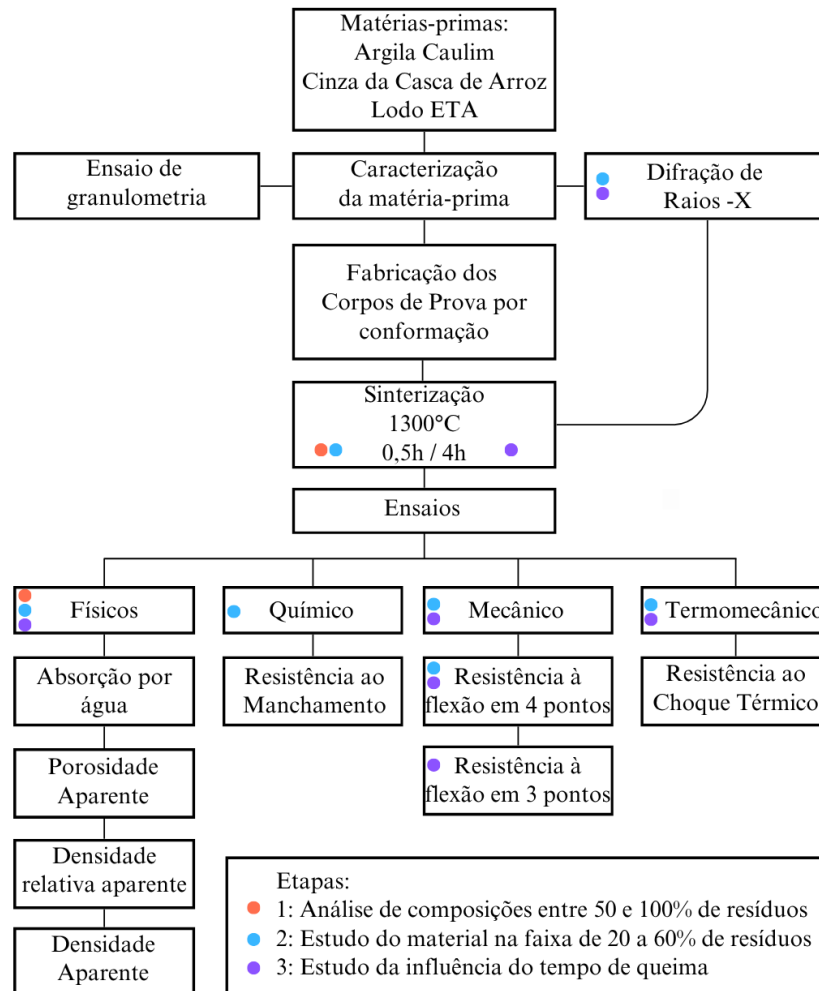
De acordo com estudos correlatos, constatou-se que a adição de resíduos oriundos de processos agroindustriais e do tratamento da água agregam valores socioeconômico e ambientais. Assim, utilizar a CCA como fonte de sílica e o lodo ETA como fonte de alumínio para revestimentos cerâmicos são um estímulo para a sustentabilidade e para economia circular, podendo incentivar, principalmente, as empresas responsáveis pelo tratamento de água a tratar o resíduo como um subproduto, evitando o descarte incorreto.

Utilizar o lodo ETA com granulometria ($>400\mu\text{m}$) permite destacar o resíduo na produção de revestimento cerâmico, aproximando da estética de produtos comerciais. Outro ponto relevante é a aplicação da norma atualizada de placas cerâmicas (NBR 10545/2020, substituta da NBR 13.818/1997) para investigar a influência dos resíduos na peça. Desse modo, a proposta desse trabalho consiste em desenvolver revestimentos cerâmicos sustentáveis, incentivando a adoção desses resíduos como subprodutos com potencial para aplicação industrial, buscando o equilíbrio entre o desempenho técnico e estético próximo a de produtos comerciais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve a metodologia adotada na pesquisa. Os corpos de prova (CPs) foram produzidos substituindo a Argila Caulim (AC) por Cinza da Casca de Arroz (CCA) e pelo Lodo de Estação de Tratamento de Água (lodo ETA), em diferentes porcentagens de massa. A Figura 9 ilustra os métodos empregados para o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 9 – Fluxograma da Pesquisa.



Fonte: Autoria própria

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas. Na primeira, moldaram-se CPs em uma faixa mais ampla de composições de 50 a 100% de resíduos. Com base na absorção de água (NBR 10545-3) e no aspecto estético em relação a cerâmicos comerciais, foram selecionadas algumas formulações para continuidade da pesquisa na etapa 2 (20 a 60% de resíduos), onde foram realizados ensaios físicos, químico, mecânico e termomecânico. Na terceira etapa, duas composições com resíduos selecionadas na etapa 2 e uma apenas com AC foram avaliadas quanto ao efeito do tempo de sinterização nas propriedades do material.

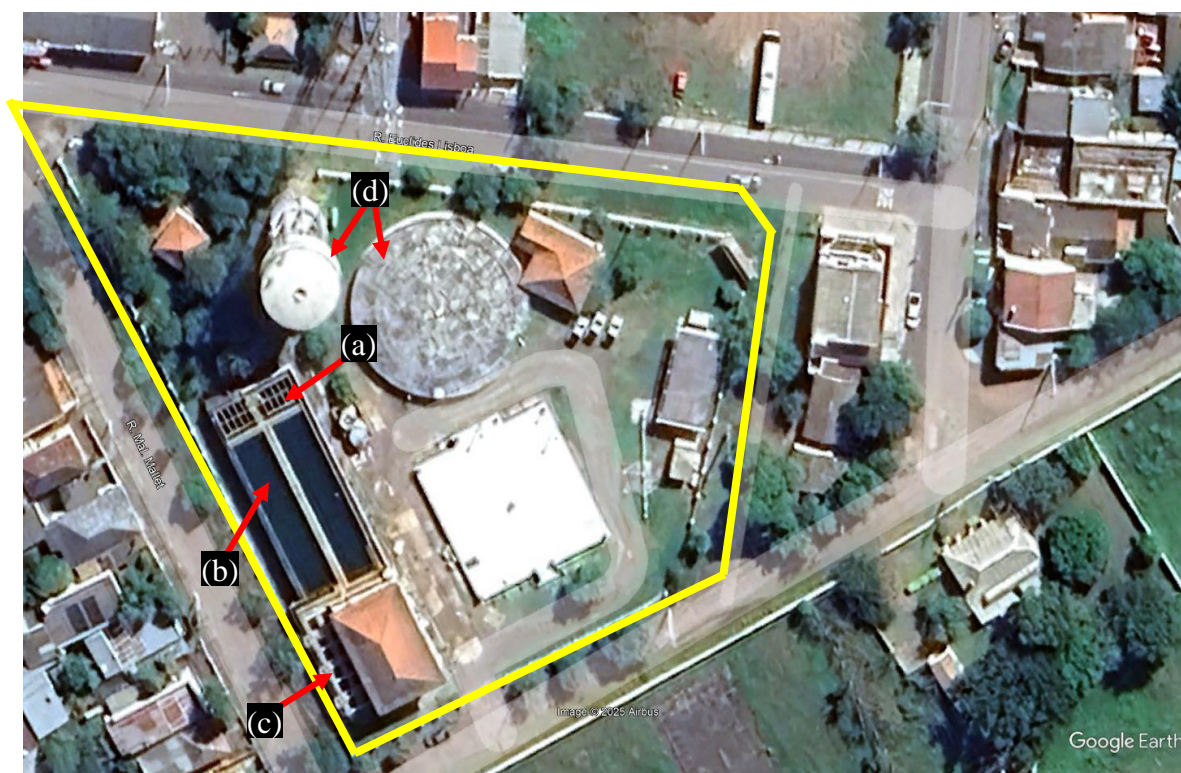
3.1 Matérias-Primas

Neste tópico são apresentadas as matérias-primas utilizadas na pesquisa. O lodo ETA teve sua granulometria reduzida manualmente, de modo a atender aos requisitos laboratoriais de uniformidade e uma distribuição granulometria adequada. Já a CCA e a AC foram utilizadas com a granulometria original fornecida pelas indústrias.

3.1.1 Lodo de Estação de Tratamento de Água

O lodo ETA foi coletado da ETA da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) do município de Alegrete – RS. A estação é composta por dois decantadores, dois tanques de floculação, seis tanques de filtragem e dois reservatórios para armazenamento da água tratada (Figura 10).

Figura 10 – (a) Floculadores; (b) decantadores; (c) filtros e (d) reservatórios.



Fonte: Google Earth (2025).

O lodo utilizado na pesquisa foi retirado diretamente do decantador após o esvaziamento para a limpeza. Após a coleta, foi colocado em formas para que a umidade fosse removida naturalmente pelo ar durante 3 dias (Figura 11).

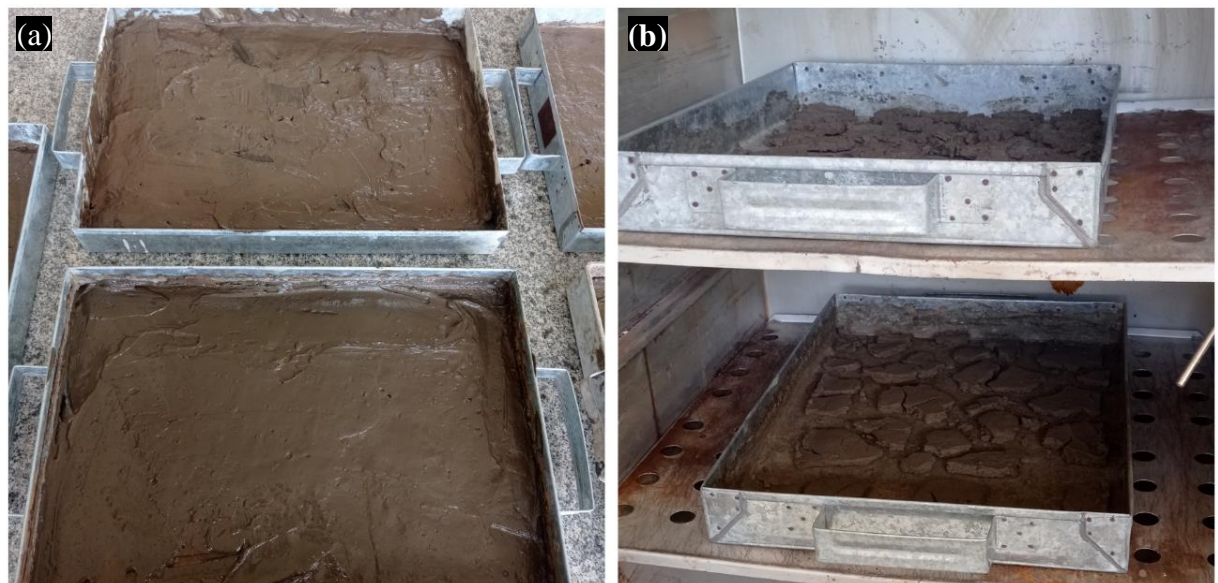
Figura 11 – (a) Limpeza do Decantador; (b) Armazenamento e secagem do lodo ETA.



Fonte: A autoria própria.

Posteriormente, a matéria-prima foi seca em estufa a 105°C por 48h para a remoção completa da umidade (Figura 12). O lodo apresentava umidade de 89,2% e, possivelmente, devido a presença do sulfato de alumínio, durante a secagem completa do material, as partículas se aglomeram formando torrões com estrutura grosseira e resistente, assemelhando-se a pedregulho.

Figura 12 – Lodo seco (a) ao ar; (b) na estufa.



Fonte: A autoria própria.

O processo de destorroamento foi realizado de forma manual com almofariz e pilão. Após a conclusão desse processo, o lodo foi calcinado a 1000°C por 3h para aumentar suas propriedades pozolônicas (Figura 13). Considerando a variabilidade da composição química do lodo, que pode influenciar na remoção da matéria orgânica e a ativação pozolônica, a literatura indica que temperatura entre 700°C a 800°C por 2h podem ser suficientes em alguns casos (Agra, 2022; Hagemann *et al.*, 2019). Contudo, para garantir a completa estabilização e uniformidade do material, optou-se por temperatura mais elevada.

Figura 13 – Lodo (a) seco; (b) destorroadado; (c) antes da calcinação; (d) calcinado.



Fonte: Autoria própria.

Após o processo de calcinação, o lodo ETA foi peneirado nas peneiras com aberturas 1,20mm a 425 μm . Todo material passante da 1,20mm e retido na 425 μm foi utilizado para a preparação dos CPs. O lodo (Figura 14), proporciona pontos pigmentados nas amostras, possibilitando aos CPs características semelhantes aos revestimentos cerâmicos disponíveis no mercado, valorizando o resíduo.

Figura 14 – Lodo ETA.



Fonte: Autoria própria

Para análise da composição química do lodo ETA calcinado, realizou-se o ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX), utilizando o espectrômetro de bancada Epsilon 1 marca PANalytical. Os resultados obtidos na Tabela 6, mostram que os principais componentes encontrados na amostra foram SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , os mesmos encontrados em análises realizadas pelos pesquisadores brasileiros, conforme mencionado no item 2.5.

Tabela 6 – Composição química do Lodo ETA calcinado.

Composição	Resultado (%)
Química	Lodo ETA Calcinado
SiO_2	46,29
Al_2O_3	31,88
Fe_2O_3	17,55
P_2O_5	0,82
K_2O	0,9
CaO	1,1
TiO_2	1,24
MnO_2	0,18
Outros	<0,1

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Cinza da Casca de Arroz

A CCA foi doada pela empresa Sílica Verde do Arroz, do grupo Pilecco Nobre - Alegrete – RS. O material é oriundo da queima controlada que proporciona a extração da cinza com estrutura predominante de sílica amorfa e densidade de $2,03 \text{ g/cm}^3$.

A aparência da CCA e sua composição química estão apresentados na Figura 15 e na Tabela 7, respectivamente. Devido ao carbono residual, a CCA apresenta a coloração escura. De acordo com a Tabela 7, o principal constituinte da CCA é o SiO_2 (>92%), indicativo da elevada concentração de sílica amorfa (85-95%) (Hossain *et al.*, 2018).

Figura 15 – Cinza da Casca de Arroz.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Composição química da CCA por FRX.

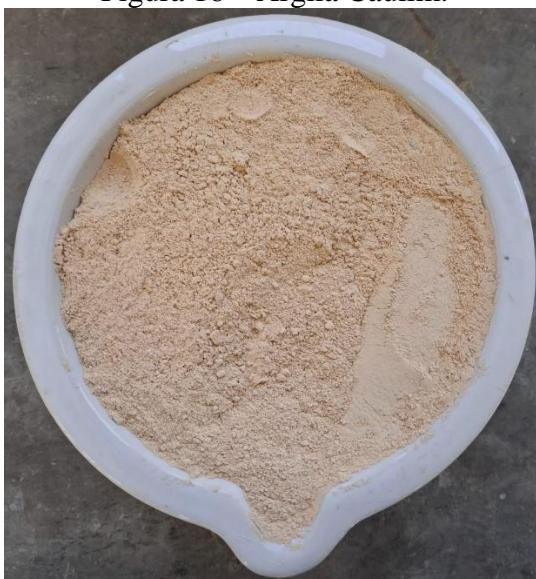
Composição	Resultado (%)
Química	Cinza da Casca de Arroz
SiO_2	92,77
K_2O	1,88
P_2O_5	0,704
CaO	0,673
MnO_2	0,38
Cl	0,275
SO_3	0,091
Fe_2O_3	0,055
Eu_2O_3	0,036

Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Argila Caulim

A argila caulim (AC), Figura 16, foi doada pela empresa Helager Indústria e Comércio de Abrasivos, com sede em Louveira – SP. De acordo com dados fornecidos pela empresa, apresentava densidade de $2,73 \text{ g/cm}^3$. Este material foi escolhido devido à coloração clara, o baixo custo, à alta refratariedade e o potencial para o aumento da resistência mecânica (LUZ *et al.*, 2008). A Tabela 8 mostra a composição química obtida por ensaio FRX.

Figura 16 – Argila Caulim.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Composição química da Argila Caulim.

Composição	Resultado (%)
Química	Argila Caulim
SiO ₂	60,11
Al ₂ O ₃	27,17
Fe ₂ O ₃	2,25
K ₂ O	1,69
P ₂ O ₅	0,462
TiO ₂	0,295
Cl	0,19
CaO	0,1
BaO	0,04
ZrO ₂	0,02
MnO ₂	0,01

Fonte: Autoria própria.

3.2 Caracterização das Matérias-Primas

Para caracterização das matérias-primas foram realizados os ensaios de granulometria e difração de raios – X (DRX).

3.2.1 Ensaio de granulometria

A granulometria das matérias primas foi analisada por meio de analisador de tamanho de partículas por dispersão a laser, modelo Malvem Mastersizer 2000, localizado no Laboratório de Nanobiotecnologia da UNIPAMPA – Campus Uruguaiiana. A técnica possui resolução na ordem de 0,01 µm, enquanto o método por peneiramento na ordem de 1µm.

3.2.2 Ensaio de Difração de Raios – X (DRX)

O ensaio de DRX foi realizado com Difratorômetro Rigaku, Miniflex 300, com radiação de $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda=0,154051 \text{ \AA}$) e fonte de energia com 30 kV e 10 mA, no laboratório de Engenharia Química da UFSM. A identificação das fases foi realizada através do software X-pert Highscore e banco de dados ICSD.

3.3 Fabricação dos Corpos De Provas (CPs)

Os estudos realizados por Azolim (2022), Cardoso (2022) e Cabral (2023) nortearam esta pesquisa. Os autores aplicaram as mesmas matérias-primas para fabricação de cerâmicos refratários. As amostras com porcentagem de resíduos entre 20% (10% CCA e 10% lodo ETA) e 25% (10% CCA e 15% lodo ETA) apresentaram resultados satisfatórios em relação aos ensaios físicos, mecânicos e termomecânico. No presente trabalho buscou-se aumentar a quantidade de resíduos e utilizar lodo ETA com granulometria graúda ($>400\mu\text{m}$).

O estudo foi realizado em três etapas. Na primeira, foram produzidos CPs com composições variadas, com teores de resíduos entre 50 e 100% em massa (Tabela 9), com objetivo de identificar a quantidade máxima de resíduo a ser utilizada. Para a continuidade da pesquisa, algumas composições foram selecionadas, com base nos resultados da absorção de água, conforme a NBR 10545-3 e, na avaliação estética dos CPs.

Tabela 9 – Estudo de dosagem dos resíduos empregados.

Revestimento Cerâmico			
Nomenclatura	AC	CCA	Lodo ETA
30CCA20LETA*	50	30	20
20CCA30LETA*	50	20	30
30CCA30LETA*	40	30	30
30CCA20LETA	50	30	20
20CCA30LETA	50	20	30
50LETA	50	0	50
50CCA50LETA	0	50	50
30CCA30LETA	40	30	30
35CCA35LETA	30	35	35
40CCA40LETA	20	40	40
10CCA50LETA	40	10	50
20CCA50LETA	30	20	50
20CCA40LETA	40	20	40

*LETA granulometria fina; LETA = Lodo ETA

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados preliminares, estabeleceu-se uma nova faixa de trabalho, com percentuais de resíduos variando entre 20% e 60% (Tabela 10), a fim de assegurar a obtenção de material classificado como revestimento cerâmico não esmaltado (porosidade $\leq 10\%$).

Tabela 10 – Faixa de porcentagens e características das cerâmicas selecionadas.

Revestimento Cerâmico			
Nomenclatura	AC	CCA	Lodo ETA
10CCA10LETA	80	10	10
15CCA15LETA	70	15	15
20CCA20LETA	60	20	20
25CCA25LETA	50	25	25
30CCA30LETA	40	30	30

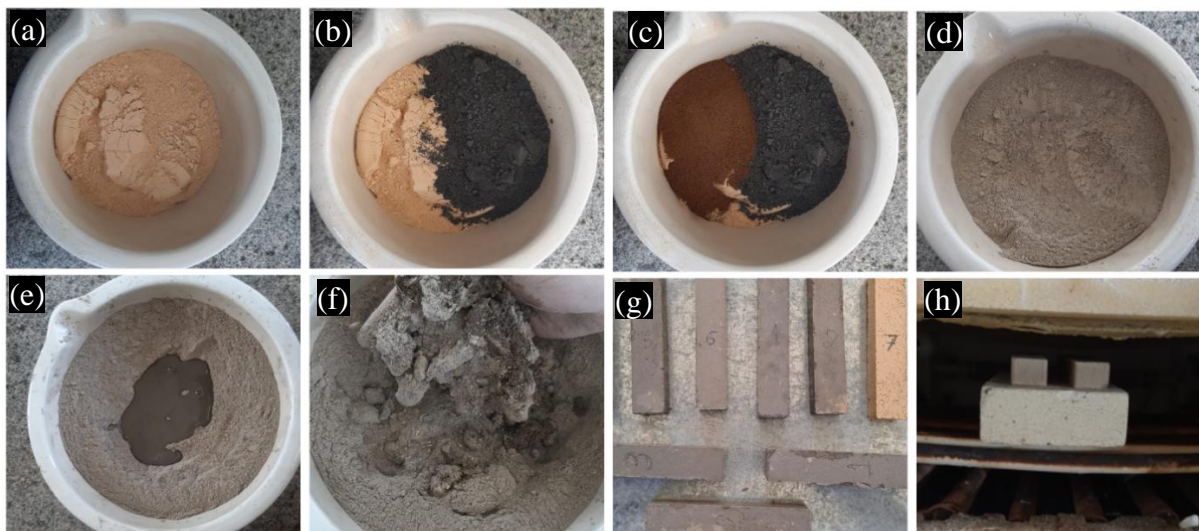
Fonte: Autoria própria

Na terceira etapa, para analisar a influência do tempo de sinterização, foram selecionadas três composições: 10CCA10LETA (menor teor de resíduo), 30CCA30LETA (maior teor de resíduo) e 100AC (apenas argila caulim).

3.3.1 Modelagem dos Corpos de Prova

Após a escolha das dosagens a serem produzidas, iniciou-se o processo de fabricação dos CPs. A massa dos materiais foram aferidas individualmente, considerando a porcentagem relativa a massa de cada um. A Figura 17 ilustra os processos para obtenção das amostras, onde: (a) inserção da AC no recipiente; (b) AC + CCA; (c) AC + CCA + Lodo ETA; (d) mistura dos materiais a seco; (e) adição 5% de água na mistura; (f) início da homogeneização do material seco com a água durante 20 minutos (g) conformação dos CPs e (h) sinterização.

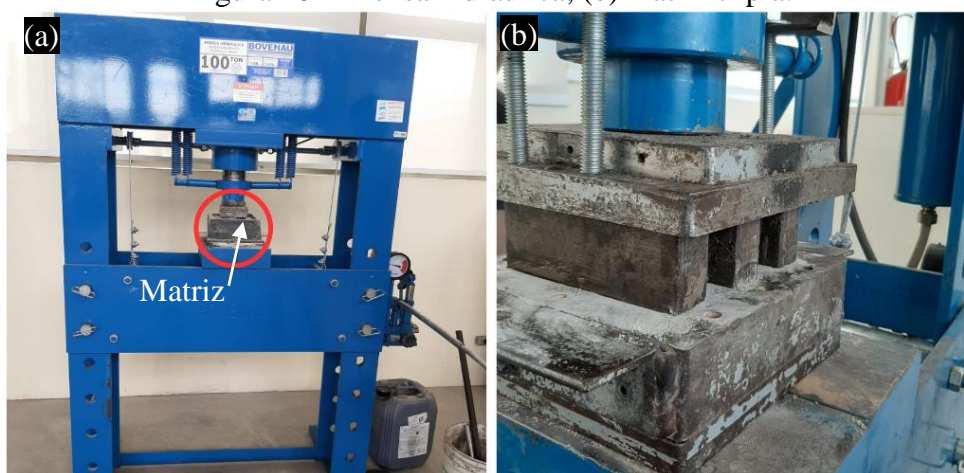
Figura 17 – Fabricação dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

A conformação dos CPs foi realizada por moldagem em prensa hidráulica, modelo P-100200 da marca Bonevau (Figura 18), com capacidade de carga de 100 toneladas, localizada no laboratório de engenharia civil da UNIPAMPA – Campus Alegrete. Utilizou-se uma matriz tripla com encaixe macho e fêmea, com dimensões de 150 x 30 x 20 mm, e pressão de compactação de 42,5 MPa. A cada operação de prensagem, foram fabricados três CPs. O processo de conformação foi conduzido de forma aleatória.

Figura 18 – Prensa hidráulica; (b) matriz tripla.

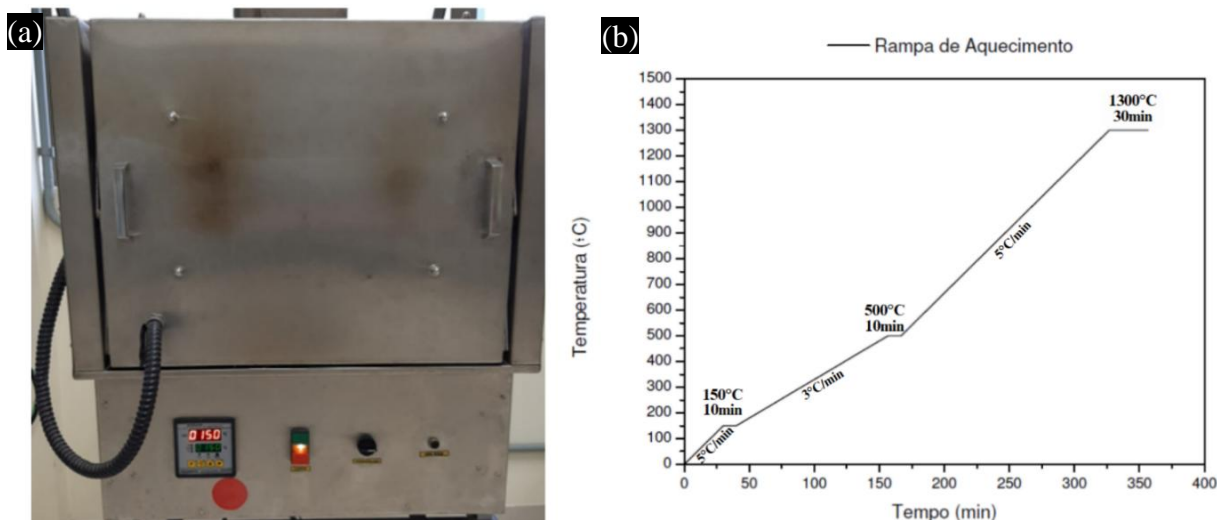


Fonte: Autoria própria.

As composições foram divididas em cinco grupos de (I a V), conforme a proporção crescente de resíduos nas composições. Cada grupo foi composto por 12 repetições, numeradas de 1 a 12, para garantir a identificação e controle dos ensaios. Posteriormente, foram secos em estufa nas temperaturas de 45°C, 65°C, 85°C e 105°C por 24h em cada patamar, com intuito de remover a umidade lentamente e, desse modo, evitar tensões internas. A sinterização foi realizada no laboratório de Engenharia Mecânica da UNIPAMPA – Campus Alegrete no forno Inti, modelo FQR 1300/3 com limite superior de aquecimento de 1350°C (Figura 19-a).

Utilizou-se uma rampa de aquecimento em três patamares: o primeiro com taxa de aquecimento de 5°C/min até 150°C, seguido de permanência por 10 minutos para eliminação da umidade superficial; o segundo com taxa de aquecimento de 3°C/min até 500°C, com permanência de 10 minutos para remoção dos gases originários pela combustão e reações químicas do material; e o terceiro, com taxa de aquecimento de 5°C/min até 1300°C, onde permaneceu por 30 minutos (Figura 19-b). Para a etapa 3 seguiu-se a mesma rampa de queima, mas com permanência de 4h a 1300°C. Os CPs foram colocados sobre uma base de tijolos refratários resistente à altas temperaturas (Figura 17-h). O resfriamento das amostras ocorreu de forma natural e lenta no interior do forno desligado.

Figura 19 – (a) Forno para sinterização; (b) Rampa de aquecimento.



Fonte: Autoria própria.

Após a fabricação dos CPs, realizaram-se ensaios físicos, químico, mecânico e termomecânico nos revestimentos cerâmicos selecionados na primeira etapa. Para os CPs da terceira etapa, foram conduzidos ensaios físicos, mecânicos e termomecânico.

3.4 Ensaios Físicos

Para determinar as propriedades físicas, foram realizados ensaios de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA), densidade relativa aparente (DRA) e densidade aparente (DA), de acordo com as equações 1 a 4, respectivamente, conforme NBR ISO 13006 (ABNT, 2020) e regidos pela NBR ISO 10545-3 (ABNT, 2020). Utilizou-se uma estufa para secagem das amostras, um dessecador, uma bomba a vácuo, um béquer, uma balança com precisão de 0,01 g e uma balança hidrostática.

(a) Absorção de água (AA)

A absorção de água (%), é a relação do líquido absorvido pelo CPs pela massa seca e calculada pela Equação (1).

$$AA = 100 \times \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \quad \text{Eq. (1)}$$

(b) Porosidade aparente (PA)

A porosidade aparente (%), é a relação entre o volume de poros abertos dos CPs e o seu volume exterior, calculado pela Equação (2).

$$PA = 100 \times \frac{(m_2 - m_1)}{(m_2 - m_3)} \quad \text{Eq. (2)}$$

(c) Densidade relativa aparente (DRA)

A densidade relativa aparente está associada a porção impermeável do corpo de prova, ou seja, considera apenas a parte que não absorve água. A DRA é calculada pela Equação (3).

$$DRA = \frac{m_1}{(m_1 - m_3)} \quad \text{Eq. (3)}$$

(d) Densidade aparente (DA)

A densidade aparente (g/cm³) é o quociente da massa seca pelo seu volume exterior, incluindo os poros. A DA é calculada pela Equação (4).

$$DA = \frac{m_1}{V} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

m_1 = massa do corpo de prova seco (g);

m_2 = massa do corpo de prova saturado (g).

m_3 = massa do corpo de prova suspenso (g).

$V = (m_2 - m_3) =$ volume externo (cm³).

3.5 Ensaio Químico

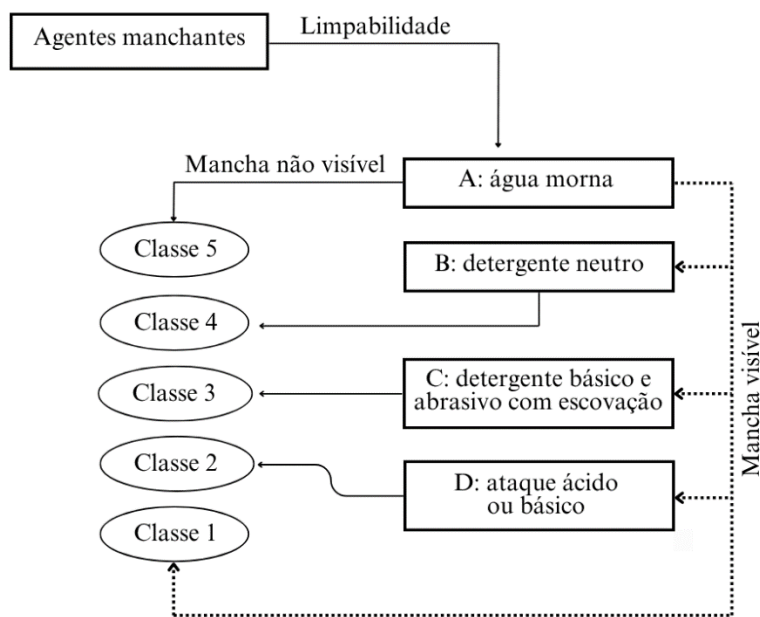
O ensaio de resistência ao manchamento foi realizado conforme a NBR 10545-13 (ABNT, 2020). Para cada composição, foram ensaiados dois CPs, que ficaram expostos a agentes manchantes como a tintura de iodo e óleo de oliva, além de produtos domésticos (vinho tinto e extrato de tomate), estes últimos não exigidos pela norma, mas incluídos para simular condições reais de uso doméstico.

A classificação dos revestimentos cerâmicos é determinada pela alteração na aparência da superfície, como surgimento de manchas ou descoloração. O ensaio é realizado em quatro procedimentos sequenciais (A a D), que simulam diferentes níveis de agressividade de limpeza (Figura 20). O desempenho do revestimento é então classificado em cinco classes (1 a 5), sendo:

- Classe 5: mancha removida com facilidade;
- Classe 1: mancha não removida, mesmo após procedimentos mais severos.

Portanto, quanto maior a classe, melhor é a resistência do revestimento.

Figura 20 – Procedimento estabelecido pela NBR 10545-14.



Fonte: Adaptado de Dondi (2008).

3.6 Ensaios Mecânicos

Foram realizados ensaios mecânicos de resistência à flexão em quatro pontos (RF4P) nas amostras das etapas dois e três, e ensaio de resistência à flexão em três pontos (RF3P) nas amostras da terceira etapa. As medições foram realizadas em equipamento da marca Shimadzu, com capacidade de 5 kN e velocidade de 0,15 mm/minuto.

(a) Resistência à flexão em quatro pontos

Determinou-se a carga de ruptura e o módulo de RF4P para avaliar as propriedades mecânicas dos revestimentos cerâmicos (Figura 21-a). Nesse ensaio, a distância entre os apoios e pontos de aplicação da carga é a mesma. Para garantir maior confiabilidade dos resultados, foram ensaiadas cinco amostras (etapa 2) e quatro amostras (etapa 3) de cada composição de revestimento cerâmico.

Neste ensaio, o CP é posto sob duas barras de apoio e, na parte superior, são aplicados dois apoios cilíndricos que pressionam o material na velocidade desejada até a ruptura. A barra vertical é utilizada para travar os apoios cilíndricos impedindo sua movimentação no momento de aplicação da carga. A superfície superior da amostra sofre compressão, enquanto a base sofre flexão. A ruptura do CP ocorre quando é atingida a capacidade máxima da carga suportada. A resistência à flexão foi calculada pela Equação (6) (ASTM C1161, 2013).

$$RF_4 = \frac{3FL}{4bd^2} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

RF_4 = Resistência à flexão em quatro pontos (MPa);

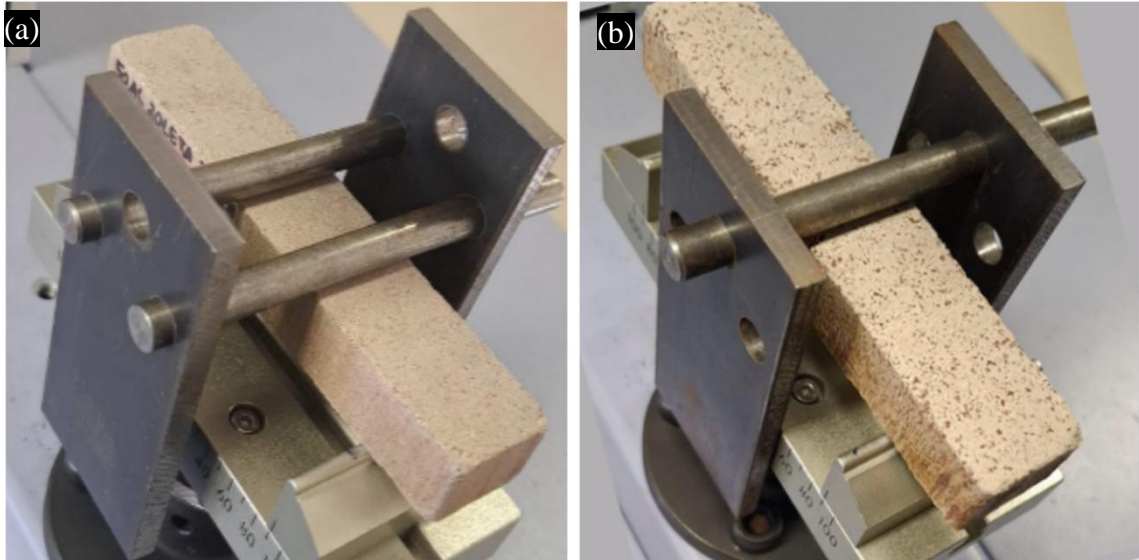
F = carga de ruptura (N);

L = distância entre as barras de apoio (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

d = altura do corpo de prova (mm).

Figura 21 – Ensaio de Resistência flexão: (a) em 4 pontos; (b) 3 pontos.



Fonte: Autoria própria.

(b) Resistência à flexão em três pontos

Para realização do ensaio de RF3P (Figura 21-b) seguiu-se as orientações da NBR ISO 10545-4 (ABNT, 2020). Neste ensaio, o CP fica biapoado enquanto a carga é aplicada no centro. A superfície superior sofre compressão, enquanto a superfície inferior sofre tração. A ruptura do CP ocorre quando é atingida a máxima capacidade de carga. A resistência à tração na flexão foi calculada pela Equação (7).

$$RF_3 = \frac{3FL}{2bd^2} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

RF_3 = Resistência à flexão em três pontos (MPa);

3.7 Ensaio Termomecânico

Foi realizado o ensaio de resistência ao choque térmico para avaliar as propriedades termomecânicas dos revestimentos cerâmicos. Para este ensaio, observou-se que a temperatura de 145°C recomendada pela norma NBR ISO 10545-9 (ABNT, 2020) não impõe severidade significativas aos CPs. Por isso, optou-se por adotar uma temperatura mais elevada, de 500°C, conforme a metodologia proposta por Quevedo (2020), para aplicar um choque térmico mais severo durante o ensaio.

Os CPs foram aquecidos em forno mufla até a temperatura de 500°C, quando permaneceram por 30 minutos e, na sequência, submersos no tanque com água à temperatura ambiente sendo mergulhados na vertical. O agitador é ativado previamente de forma a manter a uniformidade da temperatura da água durante o resfriamento e evitar a formação de vapor (Figura 22). Para realização do ensaio, utilizaram-se 5 CPs (etapa 2) e 4 CPs (etapa 3) para cada composição.

Após resfriamento por 5 minutos, os CPs foram secos ao ar por 10 minutos e, depois levados ao forno para um novo ciclo, os quais foram repetidos até a ocorrência da ruptura. Calculou-se a resistência ao choque térmico pelas equações (7) e (8). Sendo RCT 1 a relação entre o número de ciclos em que ocorreu a primeira trinca (A) e o número de ciclos para a ruptura (B). No RCT 2 é calculado o número de ciclos para o aparecimento da primeira trinca pelo dobro do ciclo em que ocorreu a ruptura do material (Quevedo, 2020).

$$RCT\ 1 = \left(\frac{A}{B} \right) \quad \text{Eq. (7)}$$

$$RCT\ 2 = \frac{(A)}{(B*2)} \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

RCT = Resistência ao choque térmico;

A = Número de ciclos para o aparecimento da primeira trinca;

B = Número de ciclos para a ruptura total da amostra.

Figura 22 – Ensaio de choque térmico.



Fonte: Autoria própria.

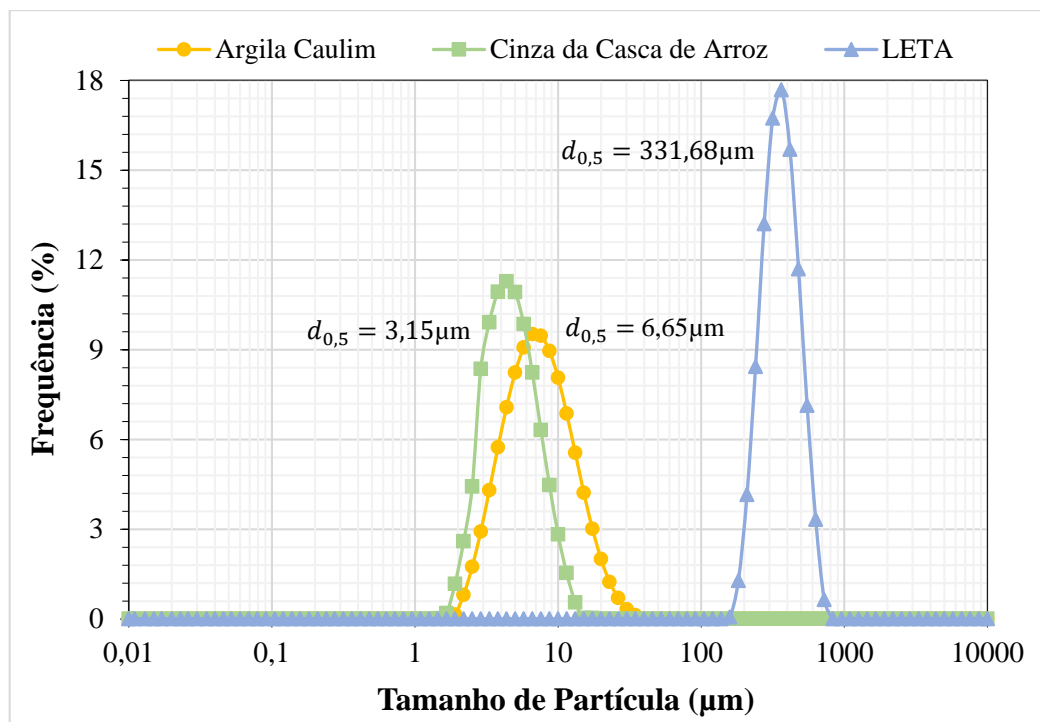
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são analisados e discutidos os resultados obtidos na caracterização das matérias-primas e dos corpos de provas (CPs), por meio de ensaios físicos, químicos, mecânicos e termomecânicos, conforme as etapas experimentais realizadas.

4.1 Granulometria

A Figura 23 apresenta as curvas da distribuição do tamanho de partículas para a argila caulim (AC), cinza da casca de arroz (CCA) e lodo ETA (LETA) e seus respectivos diâmetros médios ($d_{0,5}$). A Tabela 11 complementa essas informações, apresentando os diâmetros mínimos ($d_{0,1}$) e máximos ($d_{0,9}$).

Figura 23 – Distribuição do tamanho de partícula das matérias-primas.



Fonte: Autoria própria

Tabela 11 – Tamanho das partículas (μm).

Diâmetros	Matérias-Primas		
	AC	CCA	Lodo ETA
$d_{0,1}$	3,310	2,166	227,090
$d_{0,5}$	6,652	3,155	331,680
$d_{0,9}$	13,826	6,377	486,560

Fonte: Autoria própria

A NBR 6502:2022 apresenta denominações específicas para as faixas de tamanho dos grãos e seus respectivos limites. Com base nesses critérios, as granulometrias da AC e da CCA são classificadas como silte, uma vez que ambas possuem partículas com diâmetros superior a 0,002mm e inferior a 0,06mm. Por outro lado, o lodo ETA é enquadrado como areia média, com partículas na faixa de 0,2mm a 0,6mm.

Observa-se que em relação a granulometria média dos materiais, as partículas do lodo ETA são aproximadamente 50 vezes maiores que a AC e cerca de 105 vezes maiores que as da CCA. Devido a essa diferença significativa no tamanho das partículas, adotou-se o termo granulometria graúda para o lodo ETA (com partículas $>400\mu\text{m}$) e granulometria fina para os materiais com partículas menores que esse limite.

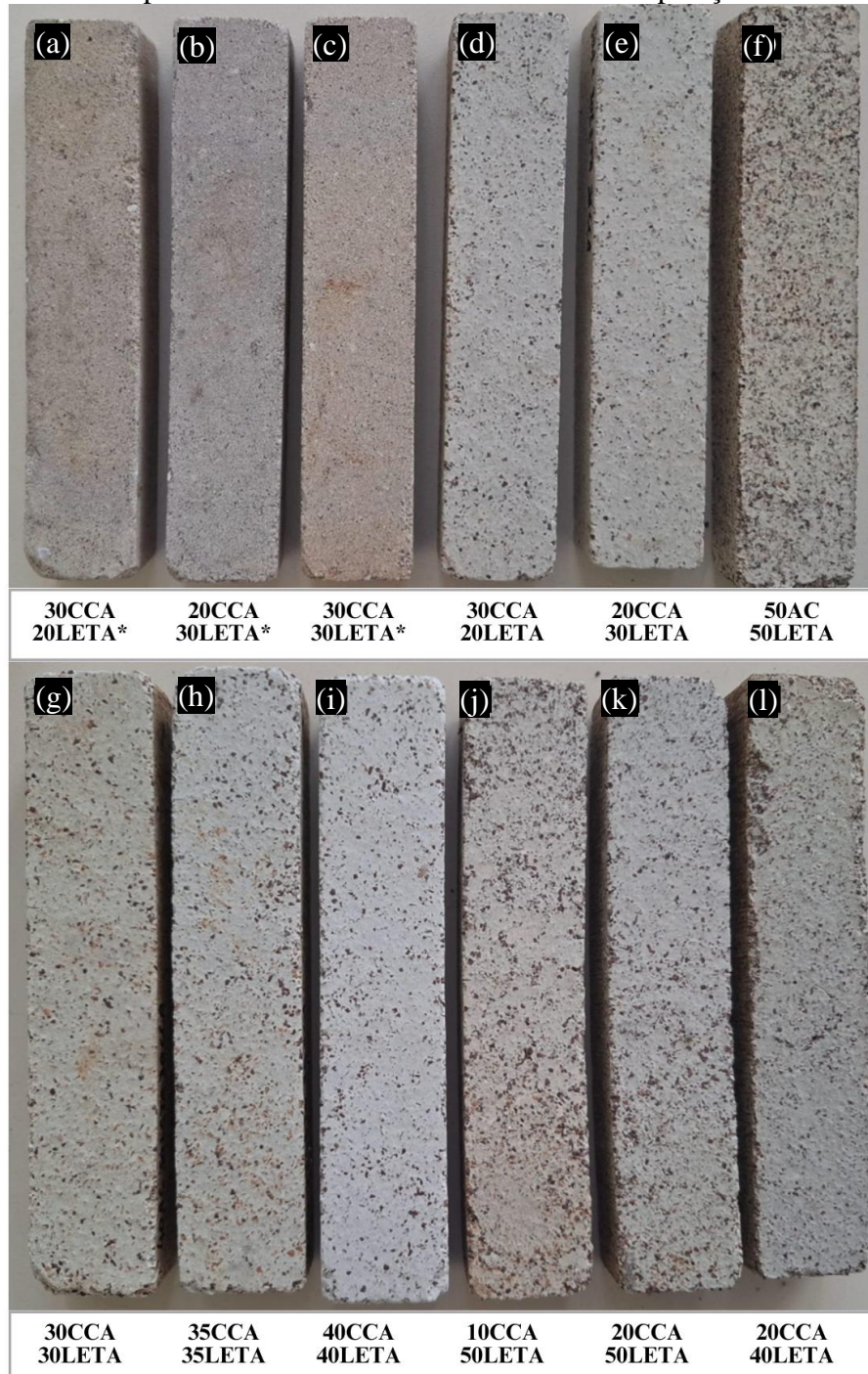
A granulometria graúda foi adotada com intuito de destacar o resíduo de ETA nos CPs em relação as outras matérias-primas e, paralelamente, evitar o descarte de frações do material. Diferentemente de trabalhos prévios, como os de Azolim (2022), Cardoso (2022) e Cabral (2023), que utilizaram lodo com granulometria inferior a $400\mu\text{m}$, em forma de pó, buscando manter a compatibilidade com a granulometria das demais matérias-primas, neste estudo optou-se por preservar uma fração mais graúda do material, de modo a explorar seu potencial de aplicação em condições menos processadas.

A combinação de diferentes tamanhos de granulometria podem apresentar vantagens em relação ao fator de empacotamento, de modo que os vazios deixados pelas partículas maiores sejam preenchidos por partículas menores e, desse modo, resultando em uma estrutura mais densa e compacta (Oliveira *et al.*, 2018).

4.2 Etapa 1: Análise da Estética e Propriedades Físicas dos CPs

Nesta fase, foram ensaiados um CP de cada composição para balizar a seleção das composições mais adequadas a serem investigadas de forma mais detalhada, baseado em parâmetros físicos: absorção de água (AA), porosidade aparente (PA), densidade relativa aparente (DRA), densidade aparente (DA), assim como em aspectos estéticos. Os resultados referente à estética dos materiais são apresentados na Figura 24 em comparação a revestimentos cerâmicos comerciais da Figura 25.

Figura 24 – Aspecto visual dos CPs com diferentes composições de resíduos.



*Lodo de granulometria fina
Fonte: Autoria própria.

As amostras (a) e (d), (b) e (e) e (c) e (g) possuem a mesma composição, mas granulometrias distintas de lodo ETA. Observa-se que CPs fabricados com lodo ETA de granulometria graúda apresentam maior contraste em comparação aqueles com lodo de granulometria fina que resultaram em coloração mais uniforme.

Figura 25 – Revestimentos cerâmicos comerciais para paredes.



Fonte: Pasinato (2025).

Observou-se que a estética do material pode ser influenciada não apenas pela granulometria do resíduo empregado, mas também, pela variação do teor de lodo incorporado. Esse efeito é semelhante ao encontrado em amostras comerciais, as quais apresentam grãos evidentes em sua composição, contribuindo para um aspecto visual característico. Os resultados dos ensaios físicos estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados ensaios físicos da análise preliminar.

	Composições	AA (%)	PA (%)	DRA (g/cm ³)	DA (g/cm ³)
a	30CCA20LETA*	10,18	19,08	2,32	1,88
b	20CCA30LETA*	9,91	18,86	2,35	1,90
c	30CCA30LETA*	9,86	17,99	2,22	1,82
d	30CCA20LETA	8,43	15,98	2,25	1,89
e	20CCA30LETA	7,59	14,98	2,32	1,97
f	50LETA	11,87	21,85	2,35	1,84
g	30CCA30LETA	9,70	17,74	2,22	1,83
h	35CCA35LETA	11,57	20,29	2,20	1,75
i	40CCA40LETA	14,40	23,90	2,18	1,66
j	10CCA50LETA	10,11	18,96	2,31	1,88
k	20CCA50LETA	10,98	20,09	2,29	1,83
l	20CCA40LETA	10,93	20,28	2,33	1,86

*Lodo de granulometria fina.

Fonte: Autoria própria.

As amostras com lodo ETA de granulometria fina* resultaram em uma AA e PA maiores e densidades semelhantes, em relação a granulometria graúda. Este resultado pode ser devido ao melhor fator de empacotamento dos grãos, pois os vazios maiores são preenchidos por partículas menores (CARDOSO, 2009).

Na amostra (f), não houve utilização da CCA, resultando em uma AA de 11,87%, o maior valor entre todas as composições. Na amostra (j), com adição de 10% de CCA em substituição à AC, observou-se uma redução nos valores de AA e PA. Por outro lado, a incorporação de lodo ETA aumentou tanto a AA quanto a PA, comportamento também observado por Azolim (2022).

É importante mencionar que foi fabricado um CP com a composição 50% CCA e 50% lodo ETA. No entanto, o material apresentou elevada fragilidade, rompendo ao ser manipulado, antes mesmo da realização dos ensaios físicos. Essa fragilidade é atribuída à ausência da AC, material responsável por contribuir significativamente para o ganho de resistência mecânica das formulações, devido ao ganho de coesão (LUZ *et al.*, 2008).

As composições com adição de resíduos em proporções acima de 60% apresentaram AA com valores superiores a 10%, sendo enquadrados pela NBR ISO 13006:2020 como revestimentos cerâmicos grupo BIII: placas esmaltadas. Dessa forma, essas composições foram descartadas das etapas subsequentes, com objetivo de manter os cerâmicos dentro da faixa correspondente a placas não esmaltadas, prensadas a seco, que exigem AA inferior a 10%.

4.3 Etapa 2: Análise das propriedades físicas, química, mecânica, termomecânica e cristalográficas para as composições entre 20 e 60% de resíduos

Para a continuidade da pesquisa, utilizou-se CCA e lodo ETA em partes iguais. A porcentagem mínima de resíduos (20%) foi definida com base nas pesquisas por Azolim (2022), Cardoso (2022) e Cabral (2023), enquanto a porcentagem máxima (60%) foi estabelecida a partir da análise preliminar dos ensaios físicos da primeira etapa.

Essa escolha teve como objetivo avaliar o comportamento dos materiais de forma equilibrada, evitando que a predominância de um deles influenciasse significativamente nos resultados. Os CPs com as novas composições são mostrados na Figura 26, e foram submetidas a ensaios físicos, mecânico, químico e termomecânico.

Figura 26 – Formulações selecionadas.



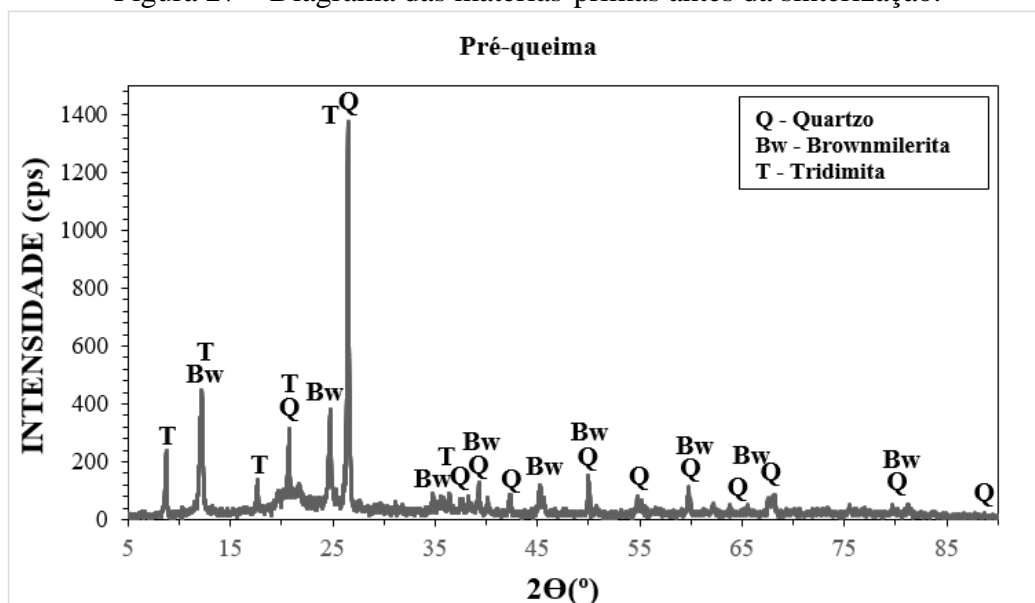
Fonte: Autoria própria.

4.3.1 Difração de Raios-X

A análise por difração de raios-X (DRX) foi realizada nas matérias-primas misturadas, antes da queima, e nas amostras sinterizadas a 1300°C por 0,5h.

A Figura 27 apresenta o diagrama das matérias-primas antes da sinterização, mostrando picos para as fases: Quartzo (SiO_2), código de referência (CR): 01-083-0539; Brownmillerita $\text{FeAlO}_3(\text{CaO})_2$, CR: 01-074-1346 e Tridimita (SiO_2), CR: 01-071-0261. Os compostos encontrados nas matérias-primas, convergem com os elementos encontrados na análise de fluorescência de raios X (FRX), como: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e CaO . Os picos de Quartzo e Tridimita evidenciam a elevada proporção de SiO_2 nas matérias-primas.

Figura 27 – Diagrama das matérias-primas antes da sinterização.



Fonte: Aatoria própria

Como apresentado no item 2.2, a sílica amorfa é obtida em temperaturas de queima da casca de arroz acima de 400°C e abaixo de 800°C. Entre 800°C e 1000°C é formada sílica cristalina na forma de Quartzo, podendo também ocorrer a Cristobalita. Em alguns casos, a fase Tridimita pode se formar, dependendo do teor de impurezas presente na CCA (GUPTA *et al.*, 2022), em especial cálcio e ferro.

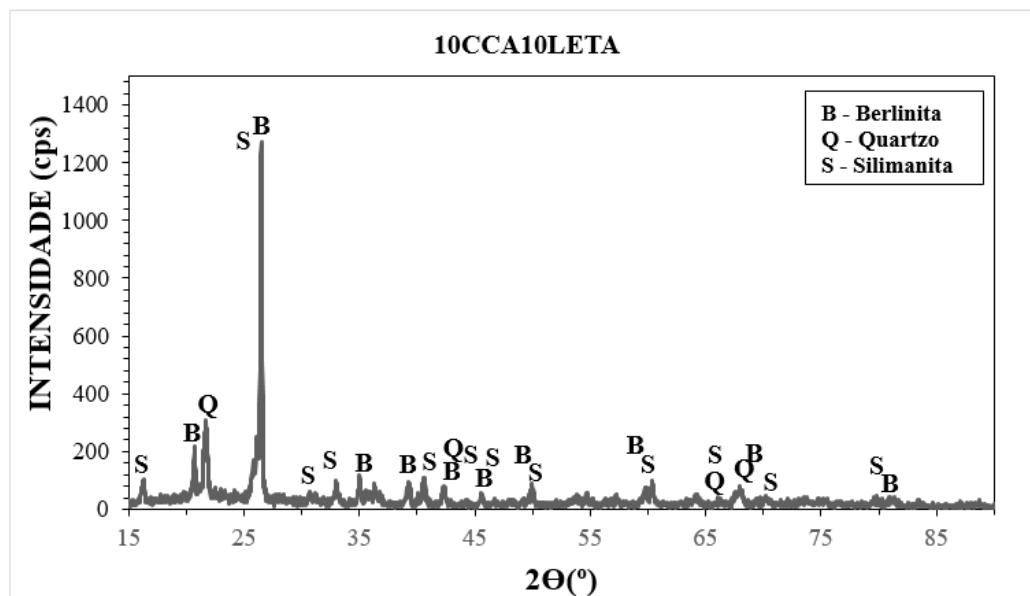
No estudo realizado por Gilabert *et al.* (2025), observou-se que acima da temperatura de 1250 °C, não há aumento na formação de Tridimita. Nessa temperatura, a viscosidade do sistema deixa de favorecer a cristalização dessa fase, uma vez que o material tende à fusão, resultando no enfraquecimento e alargamento dos picos.

Acredita-se que a calcinação do lodo ETA a 1000°C por 3h, resultou no surgimento da Brownmillerita. Essa fase, em geral, ocorre na faixa de 1100 °C a 1200 °C, a partir da reação entre óxidos de cálcio, ferro e alumínio. No entanto, em temperaturas superiores a 1250-1300 °C, a Brownmillerita torna-se instável, reagindo com outras fases presentes (SANCHEKO, S.; KORSHUNOV, A., 2024).

Na análise dos picos, o alúmen de potássio ($\text{Al}_3\text{KO}_{11}\text{Si}_3$, CR: 00-046-0741), foi considerado como uma possível fase a ser formada. Contudo, a literatura indica que este composto se decompõe em temperaturas inferiores a 1300 °C (FRAGOSO, 2024). Portanto, à hipótese de sua presença na amostra final foi descartada e qualquer pico correspondente foi tratado como um falso positivo.

Na composição 10CCA10LETA, (Figura 28), verificou-se a diminuição da intensidade dos picos de quartzo, acompanhada pelo surgimento de novos picos correspondente a Berlinita (AlPO_4), CR: 01-071-1042 e Silimanita (Al_2SiO_5), CR: 01-083-1566.

Figura 28 – Difratograma composição 10CCA10LETA sinterizada (0,5h).



Fonte: Autoria própria

O Quartzo e a Berlinita apresentam estruturas cristalinas semelhantes (ZAWRAH *et al.*, 2024). A identificação da fase Berlinita na análise de DRX indica relevância do fósforo na composição do material. De acordo com Liu *et al.* (2019), a presença dessa fase pode contribuir para o estabelecimento de fortes ligações entre partículas cerâmicas, além de potencialmente melhorar a resistência a corrosão do revestimento.

Le-pig *et al.* (2012), observaram que em geopolímeros, a quantidade de cristais de Quartzo e Berlinita atingiu o máximo em torno de 1000°C. Quando a temperatura foi elevada para 1150°C, verificou-se a transformação das fases de Quartzo e Berlinita em Cristobalita e em outros polimorfos de alumínio.

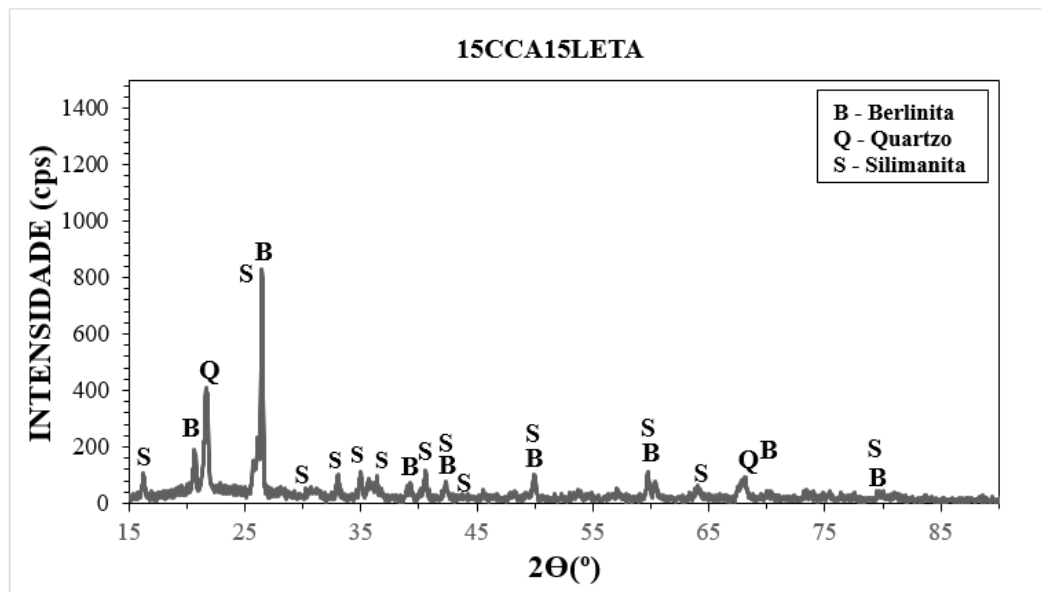
De acordo com Omari *et al.* (2024), à medida que a temperatura aumenta, a Berlinita sofre transformações estruturais que estão relacionadas as suas propriedades de expansão térmica. Com o aquecimento, a rede cristalina se expande devido as vibrações térmicas dos átomos presentes na estrutura, o que provoca alterações nas distâncias entre íons de alumínio e fosfato, além de modificar os ângulos entre os tetraedros. Essas mudanças estruturais podem influenciar diretamente as propriedades físicas do material.

Devido a estrutura cristalina da Berlinita apresentar modificações em função da temperatura, seu comportamento anisotrópico também pode apresentar alterações e impactar suas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas (OMARI *et al.*, 2024).

A Silimanita é um mineral rico em alumina, o que a torna altamente valorizada em aplicações industriais de alta temperatura. A utilização da Silimanita contribui para a manutenção da resistência mecânica e para o aumento da estabilidade térmica e química. Quando submetida ao processo de calcinação, a Silimanita se transforma em Mulita, um silicato de alumínio que contribui para elevada resistência a flexão e a compressão em materiais cerâmicos expostos a temperaturas extremas (LASSETTER, 2024).

O acréscimo de 5% de cada resíduo, CCA e lodo ETA (15CCA15LETA), resultou na redução da intensidade dos picos de Berlinita e Silimanita em $2\theta = 26^\circ$ (Figura 29), enquanto se observou o aumento da intensidade do pico de Quartzo em $2\theta = 22^\circ$, quando comparado a amostra 10CCA10LETA.

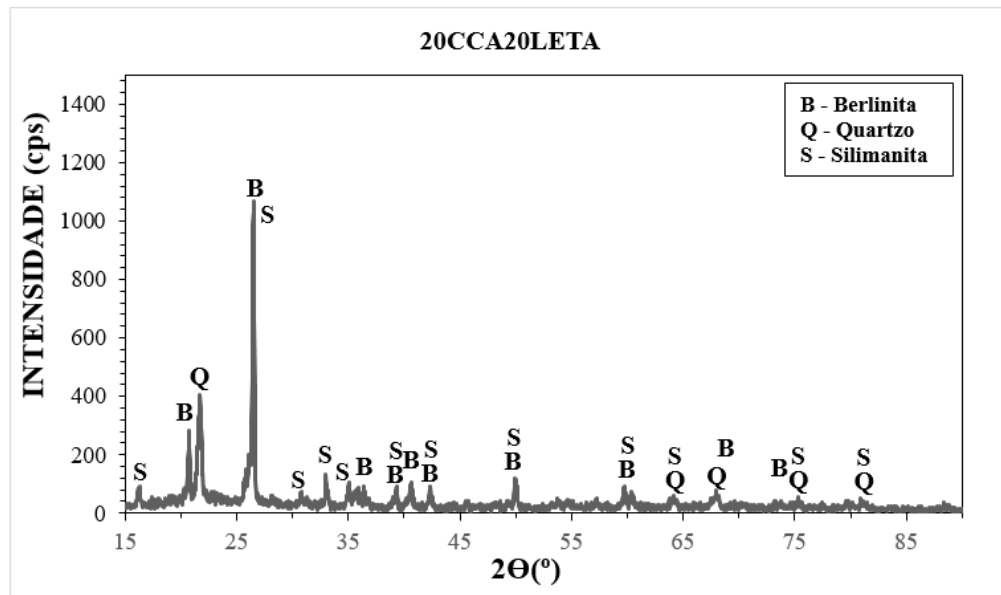
Figura 29 – Diafratograma composição 15CCA15LETA sinterizada (0,5h).



Fonte: Autoria própria

Na composição 20CCA20LETA (Figura 30), observou-se um aumento na intensidade de picos correspondente a Berlinita e a Silimanita em $2\theta = 26^\circ$, assim como do Quartzo em $2\theta = 22^\circ$ e novos picos em $2\theta = 64^\circ$ à $2\theta = 77^\circ$, em comparação com a amostra 15CCA15LETA. Nota-se, ainda, a predominância da fase de Berlinita nessa composição.

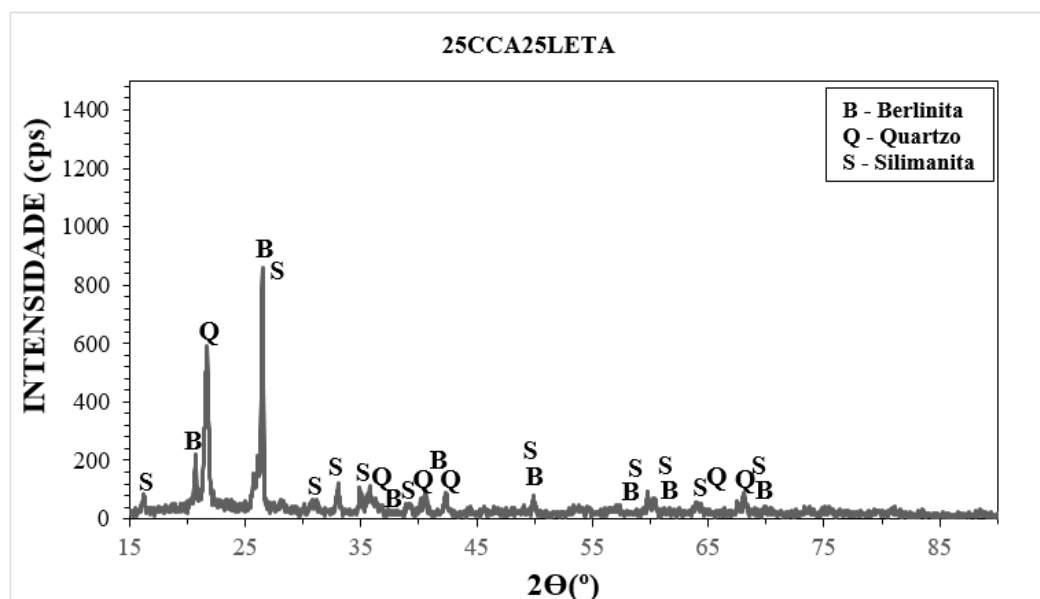
Figura 30 – Diafratograma composição 20CCA20LETA sinterizada (0,5h).



Fonte: Aatoria própria

Na composição 25CCA25LETA (Figura 31), observou-se que a intensidade dos picos de Berlinita e Silimanita em $2\theta = 27^{\circ}$ foi semelhante a registrada na composição 15CCA15LETA. Além disso, verificou-se um aumento na intensidade do pico de Quartzo em $2\theta = 22^{\circ}$. Notou-se, ainda, a ausência de picos para valores de 2θ superiores a 70° , indicando que determinadas fases presentes nas outras composições não se formaram ou estão abaixo do limite de detecção do DRX.

Figura 31 – Diafratograma composição 25CCA25LETA sinterizada (0,5h).

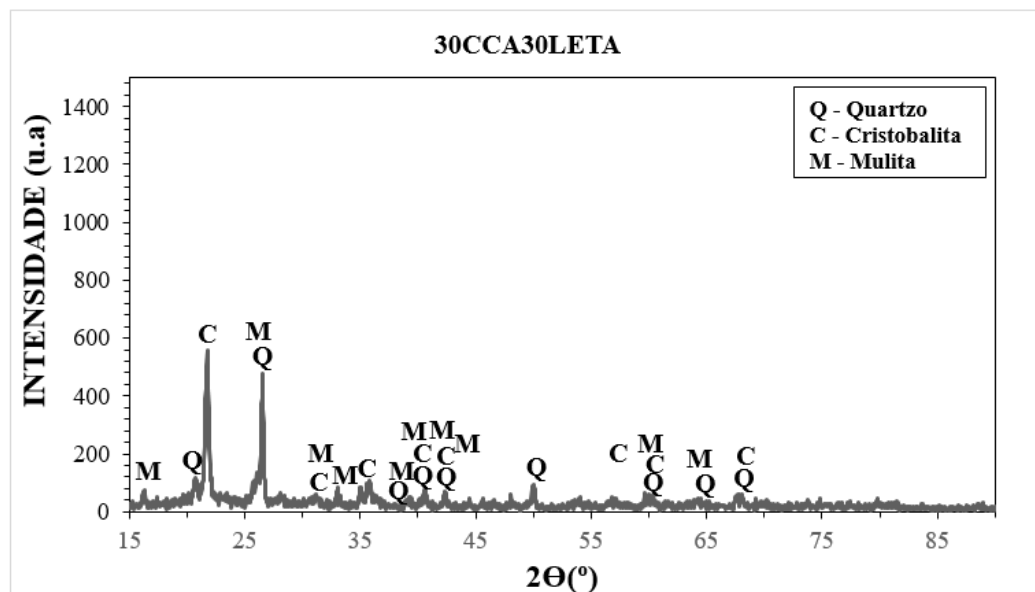


Fonte: Aatoria própria

Na composição 30CCA30LETA (Figura 32), observou-se o aparecimento de picos de Mulita ($\text{Al}_2(\text{Al}_{2,8}\text{Si}_{1,2})\text{O}_{9,6}$), CR: 01-082-1237, resultantes da transformação da Silimanita. Além disso, foram identificadas fases de Cristobalita (SiO_2), CR: 01-076-0939. A formação de novas fases pode estar associada ao aumento da porcentagem de resíduos incorporados a composição. A maior intensidade de picos ocorreu em $2\theta = 22^\circ$ (Cristobalita), enquanto em $2\theta = 27^\circ$ a intensidade de picos foi menor, em comparação com as demais composições, e indicando a substituição da fase Berlinita pela Mulita.

De acordo com Lima *et al.* (2022), a Mulita possui propriedades notáveis, incluindo a elevada estabilidade térmica, baixa expansão, condutividade térmica reduzida e resistência ao choque térmico, características que conferem grande relevância tecnológica e múltiplas possibilidades de aplicação nos diversos setores da engenharia.

Figura 32 – Diafratograma composição 30CCA30LETA sinterizada (0,5h).



Fonte: Autoria própria

Segundo Ribeiro *et al.* (2025), a formação e a estabilidade da Mulita são fortemente influenciadas pela temperatura de sinterização, exercendo impacto direto no desempenho mecânico e térmico de materiais cerâmicos refratários. Com o aumento da temperatura de sinterização, ocorre a transformação progressiva de fases como a Silimanita em Mulita, o que eleva a rigidez e a estabilidade térmica do material.

A Cristobalita é formada após a queima da sílica em temperaturas acima de 1100°C, condição que promove sua cristalização. Materiais com quantidades significativas dessa fase tendem a desenvolver microfissuras e a apresentar redução da resistência mecânica, efeito atribuído a contração volumétrica que ocorre quando a Cristobalita β (cúbica) se transforma em Cristobalita α (tetragonal) durante o resfriamento (THIEME *et al.*, 2025; ZHENG *et al.*, 2021). No presente trabalho, foi detectada predominantemente a fase α .

Segundo Kaczmarczyk *et al.* (2024), as diferenças nas propriedades mecânicas de materiais com composições químicas semelhantes estão provavelmente associadas a variação em suas microestruturas. Fatores como a orientação cristalina, a distribuição e o tamanho dos grãos, a proporção entre matriz vítrea e a fase cristalina, bem como, o grau de homogeneidade, exercem influência direta sobre a resistência dos materiais.

4.3.2 Ensaios Físicos

Para os ensaios físicos, foram preparados 12 CPs para cada composição, com o objetivo de aumentar a robustez estatística dos resultados e permitir uma análise mais confiável do comportamento do material (Tabela 13), totalizando 60 CPs analisados.

Tabela 13 – Resultados ensaios físicos.

Composições	Média							
	AA (%)	Coef. De Variação (%)	PA (%)	Coef. De Variação (%)	DRA	Coef. De Variação (%)	DMA (g/cm ³)	Coef. De Variação (%)
10CCA10LETA	5,21 (±0,34)	6,545	11,07 (±0,65)	5,884	2,39 (±0,01)	0,486	2,12 (±0,02)	0,765
15CCA15LETA	5,69 (±0,31)	5,423	11,75 (±0,60)	5,139	2,34 (±0,01)	0,446	2,06 (±0,01)	0,309
20CCA20LETA	6,43 (±0,46)	7,212	12,90 (±0,90)	6,992	2,3 (±0,02)	0,920	2,01 (±0,01)	0,426
25CCA25LETA	7,45 (±0,41)	5,472	14,49 (±0,75)	5,145	2,27 (±0,02)	0,750	1,94 (±0,01)	0,566
30CCA30LETA	9,01 (±0,37)	4,124	16,87 (±0,65)	3,835	2,23 (±0,03)	1,131	1,87 (±0,02)	1,016

Fonte: Autoria própria.

Comparando os CPs 30CCA30LETA com a amostra preliminar da Tabela 12, observa-se que os valores médios situam-se dentro da faixa de confiança de 95% (± 2 desvios-padrão).

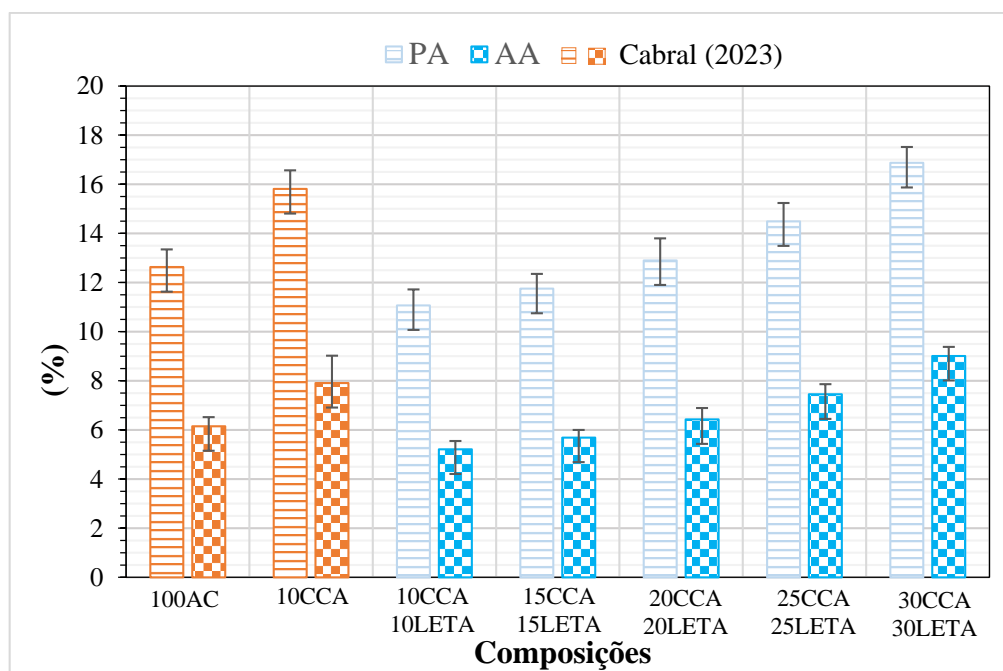
Cabral (2023) analisou CPs fabricados nas mesmas condições de queima e observou que a amostra composta exclusivamente por argila caulim (100AC) e a com substituição de 10% da AC por CCA (10CCA), apresentaram valores de AA de 6,15% e 7,91%, respectivamente. Em relação à PA, a amostra 100AC registrou 12,63%, enquanto a 10CCA apresentou 15,81%.

Em comparação com o presente estudo, observou-se que as amostras contendo até 30% de resíduo apresentaram valores de AA e PA inferiores aos da amostra 100AC. Além disso, as amostras com até 50% de resíduo também demonstraram valores de AA e PA menores quando comparadas à amostra contendo 10CCA (Figura 33). Esse resultado está de acordo com Kazmi *et al.* (2016), que observaram aumento da porosidade ao adicionar CCA na fabricação de tijolos, efeito atribuído a decomposição da matéria orgânica e ao elevado teor de sílica presente na CA, fatores que favorecem a formação de poros na CCA.

A adição de lodo ETA contribuiu para o desempenho positivo em relação aos CPs compostos apenas por AC e CCA, possivelmente devido a um melhor fator de empacotamento das partículas.

Com o aumento da substituição da AC por proporções iguais de CCA e lodo ETA, os valores de AA aumentaram progressivamente, passando de 5,21% na composição 10CCA10LETA para 9,01% na composição 30CCA30LETA. Observou-se também um acréscimo de 34,4% na PA entre as duas composições.

Figura 33 – Resultados AA e PA.

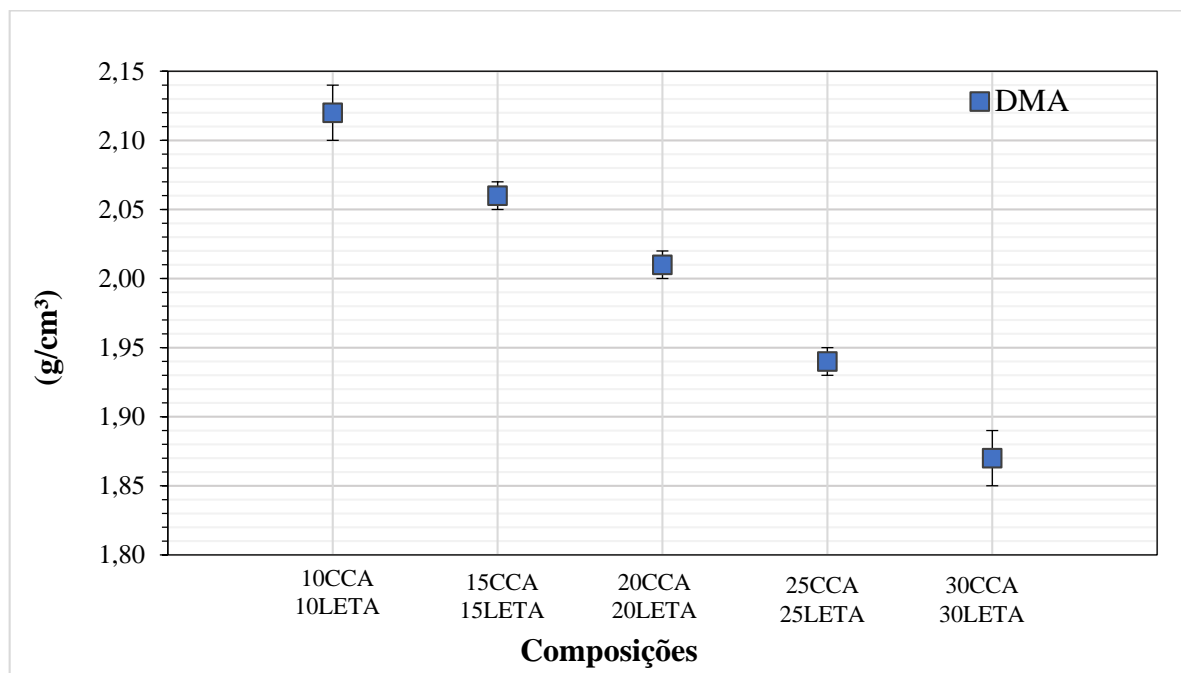


Fonte: Autoria própria

De acordo com Faria (2015) e Siqueira (2017), a PA está relacionada a quantidade de poros formados durante a queima das peças cerâmicas. Essa condição pode influenciar diretamente as propriedades finais dos CPs, uma vez que materiais mais porosos e menos densos tendem a apresentar desempenho mecânico inferior (CALLISTER, 2018).

Em relação a densidade, o gráfico da Figura 34 ilustra os resultados da DMA. A medida que a AA e PA aumentaram, a DMA diminuiu, devido ao maior volume/quantidade de poros, demonstrando o comportamento inversamente proporcional entre essas propriedades. No contexto de aplicação na construção civil, especialmente em revestimentos cerâmicos para paredes em áreas não úmidas, essa característica é desejável, pois materiais mais leves e porosos proporcionam melhor desempenho no isolamento térmico e absorção sonora (CHEN *et al.*, 2021).

Figura 34 – Resultado DMA.



Fonte: Autoria própria.

A DRA considera apenas a fração da amostra que não absorve água, apresentando uma redução progressiva de 2,39 g/cm³ nos CPs 10CCA10LETA, com maior teor de AC, para 2,23 g/cm³ na composição com maior teor de resíduos. Essa densidade está associada à fração sólida efetiva do material, desconsiderando os poros abertos. A diminuição dos valores de DRA indica menor compactação dos grãos e aumento do volume associado a defeitos internos ou poros fechados, evidenciando a influência da incorporação de resíduos na densificação e na microestrutura do material.

De acordo com Chen *et al.* (2021), as cerâmicas porosas apresentam um grande potencial para aplicação, devido a sua baixa densidade, elevada tenacidade, alta resistência ao choque térmico, eficiente capacidade de isolamento térmico, características que não são encontradas em cerâmicas densas.

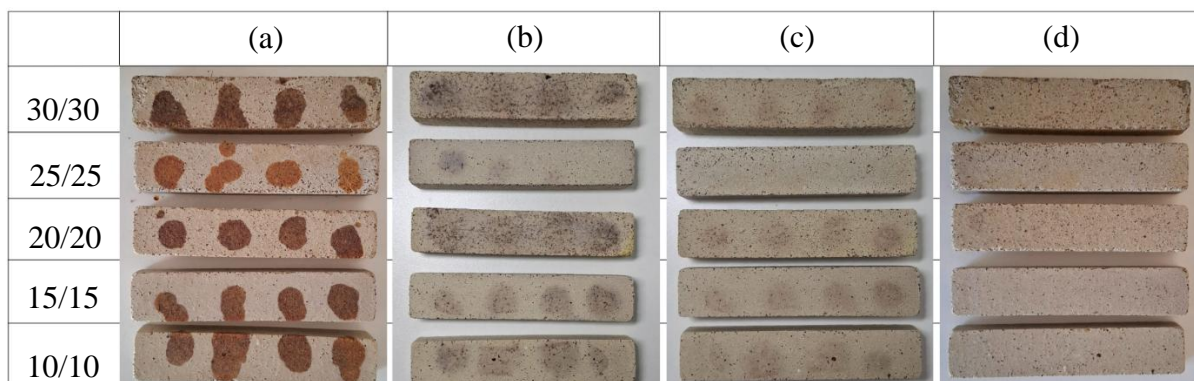
4.3.3 Resistência ao Manchamento

Inicialmente, foram aplicados como agentes manchantes a tintura de iodo (Figura 35) e óleo de oliva (Figura 36). Posteriormente, foram aplicados vinho tinto e extrato de tomate, nas amostras submetidas a tintura de iodo. Todos os agentes permaneceram em contato com a superfície por 24h antes do início do processo de limpeza. As imagens foram registradas imediatamente após cada etapa, permitindo a visualização do processo.

Na Figura 35-a observa-se o aspecto após a aplicação da tintura de iodo, com coloração intensa e bem definida nas áreas de contato. Após 24h de exposição (Figura 35-b), nota-se a penetração parcial do corante, resultando em manchas mais espalhadas. Observa-se que a tintura da amostra 25CCA25LETA foi quase toda absorvida nesse intervalo de tempo. Este resultado pode estar associado a microestrutura do material, em função do tamanho e da quantidade de poros presentes.

A Figura 35-c mostra a etapa inicial de limpeza, na qual os CPs foram submetidos a água quente corrente por 5 minutos, evidenciando a redução significativa da intensidade das manchas. Por fim, na Figura 35-d, após secagem em estufa a 105°C por 2h e limpeza final com detergente neutro, as superfícies apresentaram remoção completa do agente manchante, compatível com a classificação 4 de resistência ao manchamento, indicando boa limpabilidade para esse tipo de produto.

Figura 35 – Aspecto visual dos CPs após aplicação da tintura de iodo.



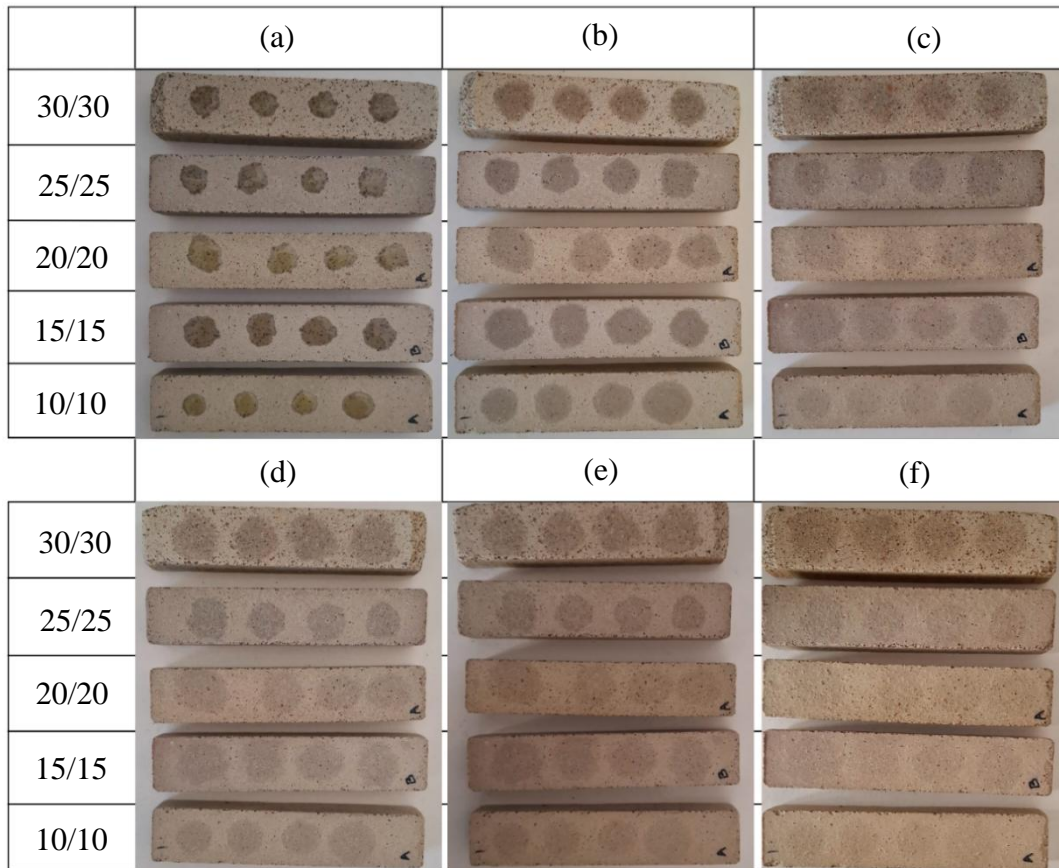
Fonte: Autoria própria

Após a completa remoção da tintura de iodo, os CPs foram submetidos a secagem em estufa a 105°C por 2h. Em seguida, aplicou-se o agente manchante vinho tinto, seguindo os processos estabelecidos. O mesmo procedimento foi repetido para o agente manchante extrato de tomate. Em ambos os casos, a remoção foi integral após os 5 minutos de exposição a água quente corrente, resultando na classificação de desempenho classe 5, de fácil limpabilidade.

O ensaio de manchamento com óleo de oliva, mostrou, após 24 horas, (Figura 36-b) a mancha apresentou-se levemente menos evidente do que em relação a observada na Figura 36a, possivelmente devido a infiltração do óleo nos poros do material. A Figura 36c é referente à amostra após 5 minutos de exposição a água quente corrente, onde a mancha permaneceu visível. Diferentemente do comportamento observado com a tintura de iodo, o óleo de oliva exigiu a etapa de limpeza com detergente básico (classe 3) e posteriormente ataque básico (classe 2) para redução da mancha (Figura 36-e e Figura 36-f, respectivamente).

Embora os processos aplicados tenham minimizado a aparência superficial da mancha, não foram capazes de eliminá-la completamente. Dessa forma, o desempenho para o óleo de oliva foi classificado como classe 1, caracterizada pela difícil limpabilidade. Resultado semelhante foi encontrado por Menegazzo *et al.* (2006) para revestimentos de porcelanato polido (produto não esmaltado), que também apresentaram manchas persistentes para o óleo de oliva após a limpeza. Para esse mesmo material, os autores classificaram a resistência ao manchamento em relação a tintura de iodo como classe 5.

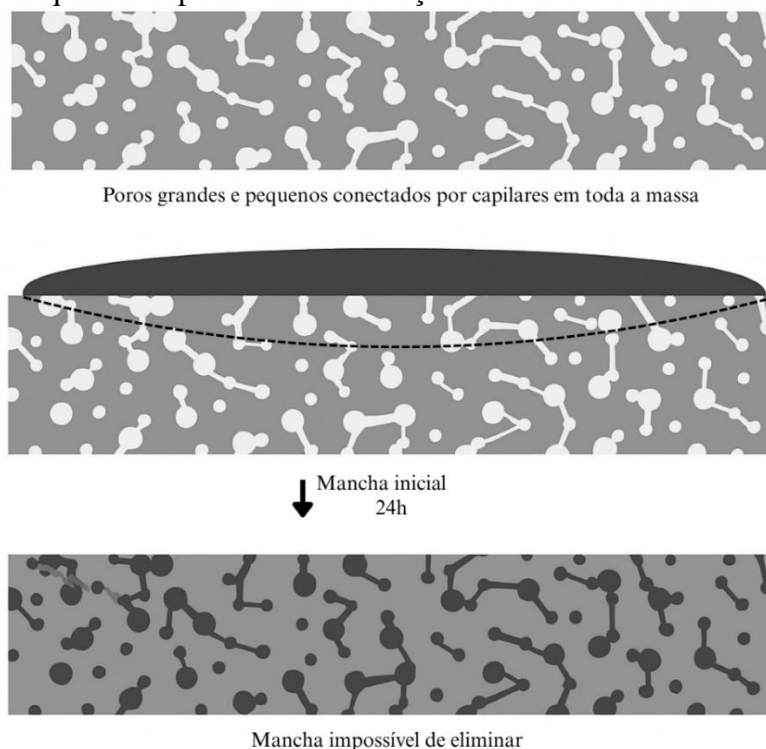
Figura 36 – Aspecto visual dos CPs após aplicação do óleo de oliva.



Fonte: Autoria própria

Na última etapa (Figura 36-f), observa-se que a composição com maior porcentagem de resíduo e, conseqüentemente, mais porosa, foi aquela em que a mancha se tornou mais evidente. De acordo com Ramirez (2012) nos revestimentos porosos, o agente manchante não ocupa apenas os poros em comunicação direta com o exterior, mas também penetra através dos capilares, atingindo uma profundidade variável conforme o tempo de exposição e a fluidez do próprio agente (Figura 37). Nesse contexto, o óleo de oliva pode ter penetrado, preenchido e saturado os poros, dificultando sua remoção do interior do CP, devido a sua elevada viscosidade, o que resulta na persistência da mancha.

Figura 37 – Esquema do processo de formação de mancha em revestimento poroso.



Fonte: Adaptado de Ramirez (2012).

4.3.4 Resistência à flexão em quatro pontos

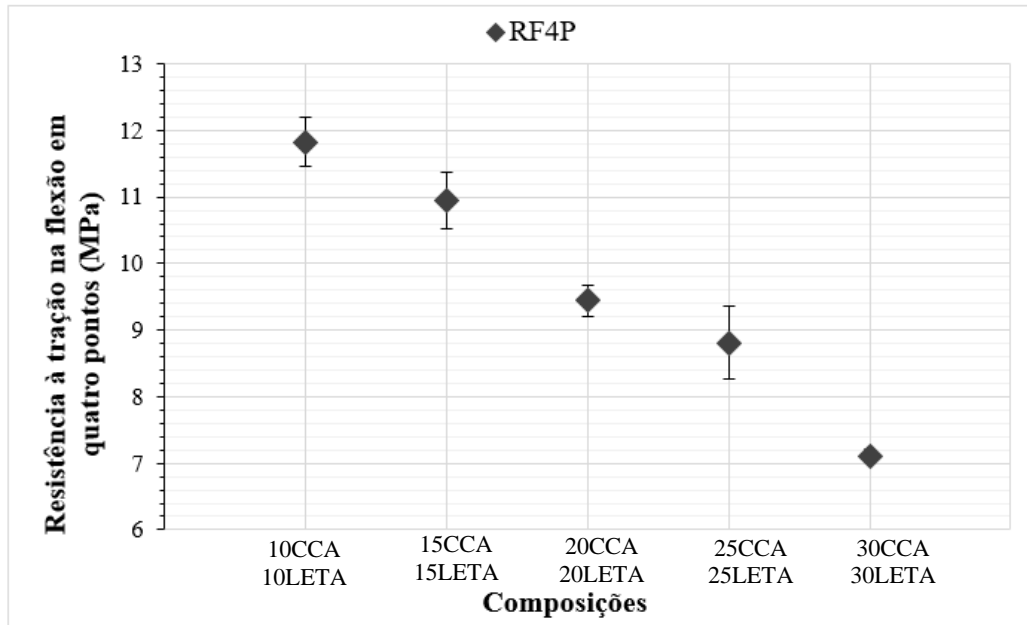
Foram ensaiados cinco CPs para cada composição. A Tabela 14 apresenta a força média máxima de ruptura e a média das resistências à flexão em quatro pontos (RF4P), bem como, o desvio padrão e o coeficiente de variação. A Figura 38 apresenta os resultados de forma gráfica.

Tabela 14 – Resultados da RF4P.

Composições	Médias		Coef. de Variação (%)
	F _{máx} (N)	RF4P (MPa)	
10CCA10LETA	1746,353	11,819 (±0,368)	3,116
15CCA15LETA	1772,027	10,944 (±0,422)	3,853
20CCA20LETA	1662,783	9,44 (±0,225)	2,387
25CCA25LETA	1601,403	8,812 (±0,540)	6,124
30CCA30LETA	1405,277	7,113 (±0,099)	1,388

Fonte: Autoria própria

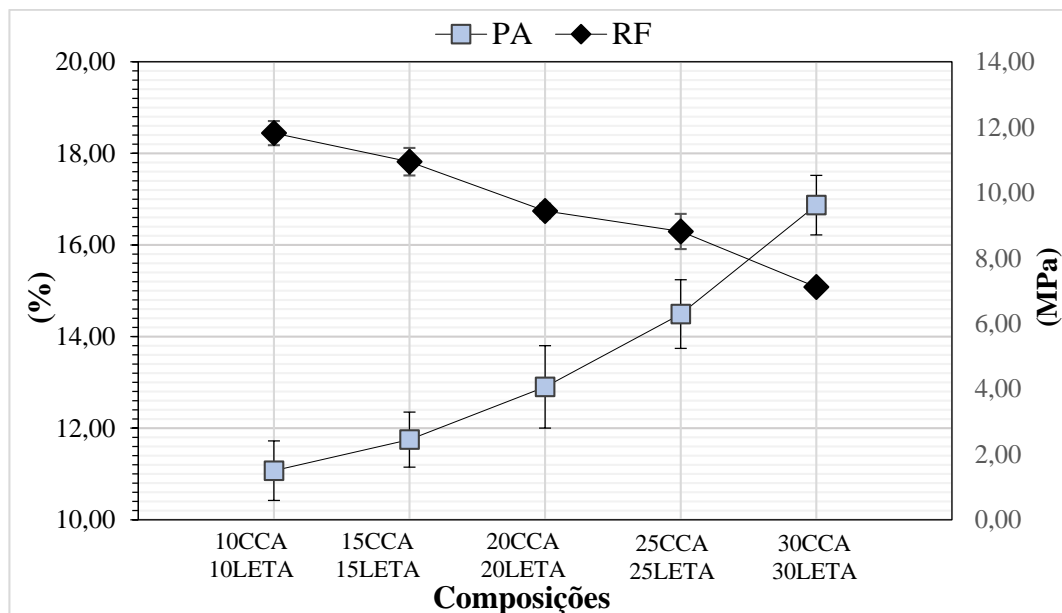
Figura 38 – Resultados médios da RF4P.



Fonte: Autoria própria

É possível verificar que a amostra 10CCA10LETA apresentou a maior resistência à flexão (11,82MPa), enquanto a amostra 30CCA30LETA a menor (7,11MPa). Esse comportamento está diretamente relacionado a porosidade (Figura 39), pois materiais mais porosos e menos densos tendem a apresentar desempenho mecânico inferior, conforme descrito por Cardoso (2022).

Figura 39 – Relação entre a RF e a PA.



Fonte: Autoria própria

Apesar da amostra 10CCA10LETA apresentar a maior resistência média à flexão entre as composições avaliadas, a força máxima média foi observada na amostra 15CCA15LETA.

A norma ABNT NBR 10545-4 estabelece, para revestimentos cerâmicos com porosidade aparente entre 6 e 10%, espessura superior a 7,5 mm e resistência mínima de 15 MPa, um valor mínimo de 600 N para a força aplicada no ensaio de carga de ruptura. Com base nesse critério, todas as amostras testadas atenderam ao requisito de força aplicada. No entanto, os resultados do módulo de resistência a flexão ficaram abaixo do exigido pela norma.

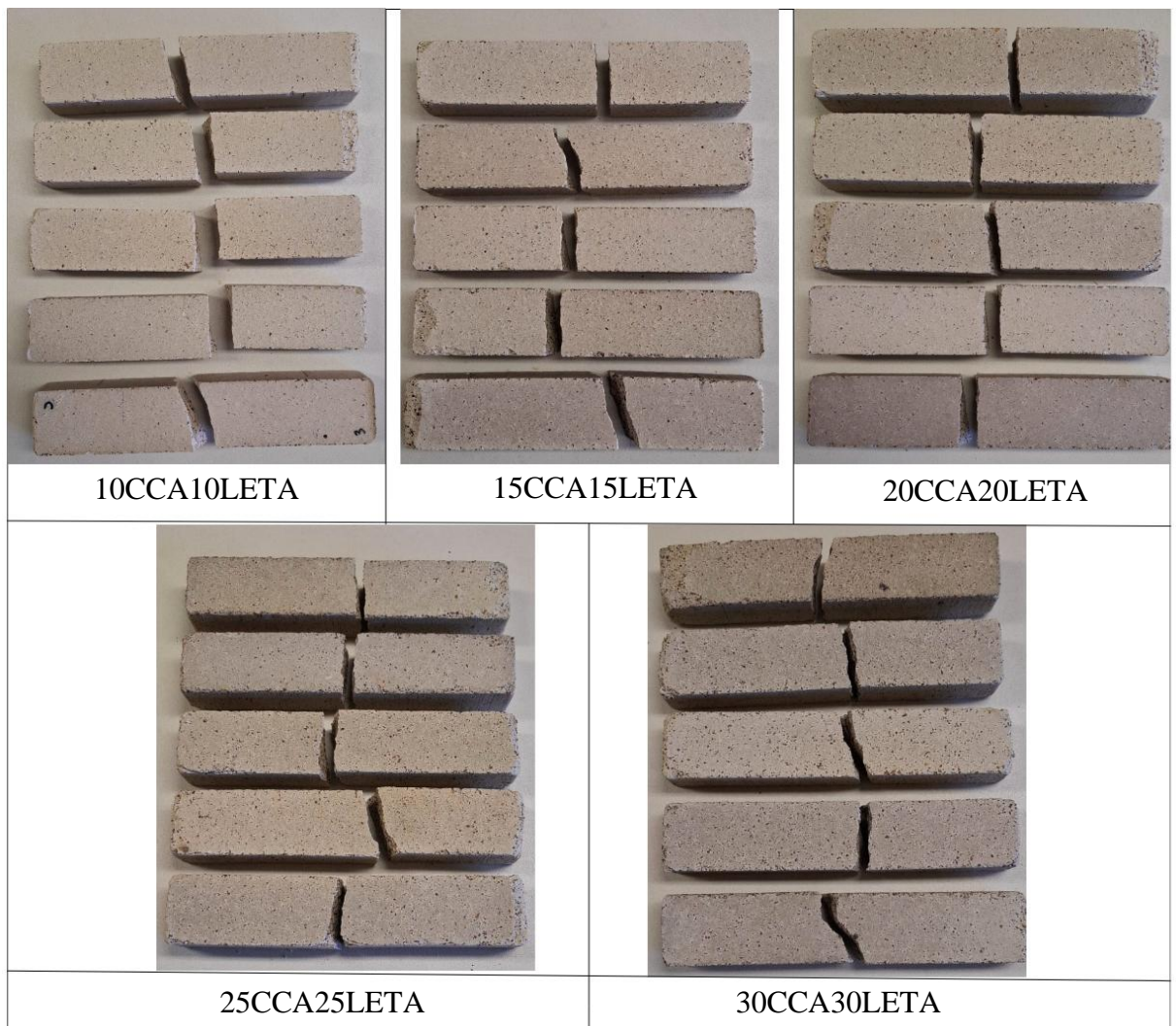
A norma vigente especifica a determinação da resistência à flexão em três pontos (RF3P), enquanto, nesta pesquisa, adotou-se o ensaio em quatro pontos (RF4P). Este último é considerado mais adequado para materiais cerâmicos, pois o momento fletor permanece constante ao longo de uma região maior da amostra, tornando o ensaio mais sensível à detecção de falhas críticas e ocasionais. Dessa forma, o RF4P tende a representar de maneira mais fiel o comportamento estrutural do material quando submetido a carregamentos mecânicos.

Segundo Morrell (2007), uma consequência da comparação entre os dois métodos de ensaios é que RF3P, geralmente, tende a apresentar valores de resistência superiores em relação aos obtidos pelo RF4P. Essa diferença metodológica ajuda a explicar os resultados obtidos por Cabral (2023) que, ao realizar o ensaio de RF3P na amostra com 10CCA10LETA obteve uma força máxima de 1104 N e resultado da resistência de 15,38 MPa, enquanto no presente trabalho, utilizando o método RF4P para a mesma composição, a força máxima foi de 1746,35 N e o valor da resistência foi de 11,82 MPa.

A Figura 40 apresenta os modos de fratura observados nas diferentes composições. As rupturas ocorreram, em grande maioria, na região central entre os dois aplicadores de carga superiores, onde o momento fletor atinge seu valor máximo. Como esperado para materiais cerâmicos, os CPs não exibiram deformação plásticas e romperam de forma abrupta e frágil.

Observa-se ainda que o caminho de propagação da trinca, em sua maioria, ocorreu de forma retilínea inclinada. As composições com maior teor de resíduos (25CCA25LETA e 30CCA30LETA), na superfície de ruptura apresentou maior irregularidade, possivelmente associada a maior porosidade e heterogeneidade microestrutural.

Figura 40 – Ruptura dos CPs após ensaio de RF4P.



Fonte: Autoria própria.

4.3.5 Resistência ao Choque Térmico

Foram ensaiadas cinco amostras de cada composição no ensaio de resistência ao choque térmico (RCT) devido ao desvio padrão, apenas três foram consideradas no cálculo. Os CPs foram selecionados aleatoriamente e divididos em dois grupos para facilitar o manuseio durante os processos do ensaio. A Tabela 15 mostra os resultados da RCT.

Tabela 15 – Resultados para o choque térmico.

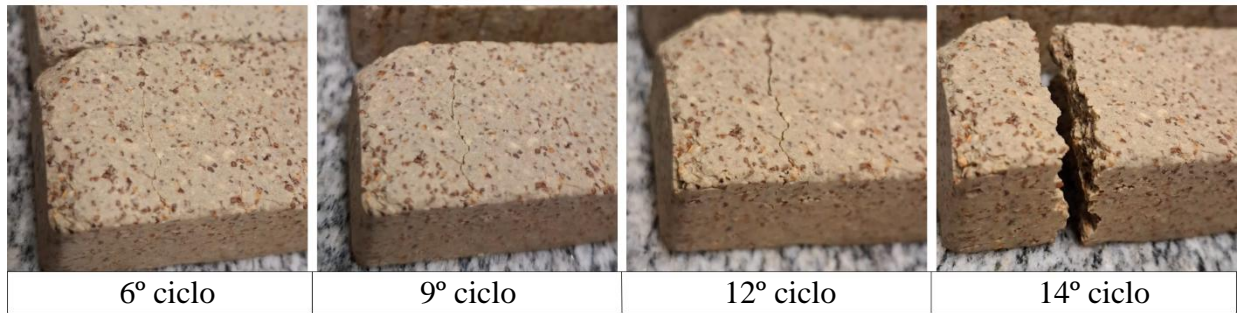
Composições	CP	Ciclo da primeira trinca (A)	Ciclo da Fratura (B)	RCT 1 (A/B)	RCT 2 (A)/(B ²)
10CCA10LETA	4	2	28	0,07	0,003
	5	3	27	0,11	0,004
	9	2	26	0,08	0,003
Média		2,3	27	0,09	0,003
15CCA15LETA	4	3	14	0,21	0,015
	6	2	25	0,08	0,003
	7	3	19	0,16	0,008
Média		2,6	19,33	0,15	0,009
20CCA20LETA	6	1	22	0,05	0,002
	7	2	18	0,11	0,006
	11	2	13	0,15	0,012
Média		1,6	17,66	0,10	0,01
25CCA25LETA	1	3	23	0,13	0,006
	7	1	21	0,05	0,002
	12	2	22	0,09	0,004
Média		2	22	0,09	0,004
30CCA30LETA	7	1	22	0,05	0,002
	9	2	28	0,07	0,003
	12	3	19	0,16	0,008
Média		2	23	0,09	0,004

Fonte: Autoria própria

Observou-se que a primeira trinca surgiu entre o primeiro ao terceiro ciclo nas composições cerâmicas analisadas. O ciclo de fratura, por sua vez, apresentou variações entre os CPs de uma mesma composição. A RCT é avaliada pela razão entre o ciclo de início da primeira trinca e o ciclo de fratura. Dessa forma, quanto menor for o valor de RCT1, maior será a sobrevida do material cerâmico frente aos choques térmicos.

Na Figura 41, observa-se o surgimento e a propagação gradual de fissuras superficiais no CP da composição 30CCA30LETA a partir do 6º ciclo. Nos 9º e 12º ciclos, as trincas se tornaram mais evidentes e contínuas, indicando o comprometimento estrutural do material. No 14º ciclo ocorreu a ruptura completa. Nota-se ainda que a fissura não apresenta trajetória retilínea, possivelmente seguindo a distribuição dos poros. Este CP apresentou a menor sobrevida entre os da composição.

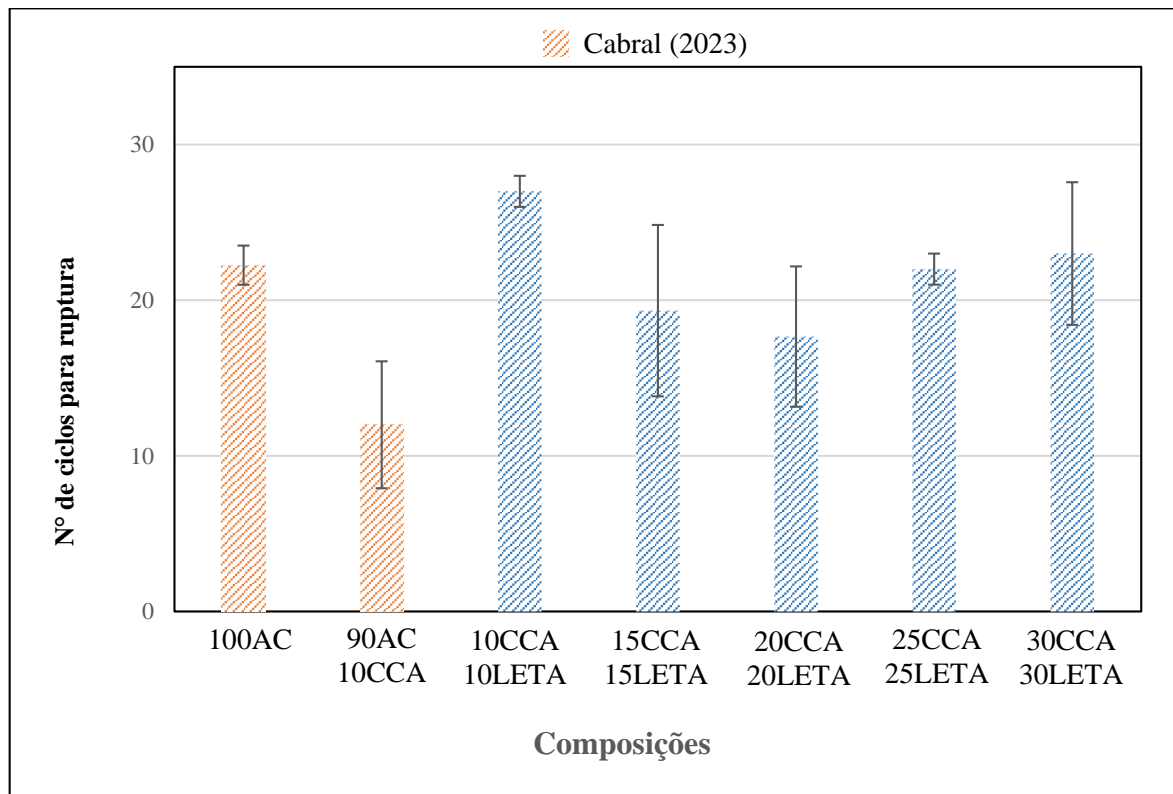
Figura 41 – Progressão de fissura no ensaio de RCT.



Fonte: Aatoria própria

A Figura 42 apresenta os resultados da RCT obtidos na presente pesquisa, bem como os resultados do estudo de Cabral (2023).

Figura 42 – Resultado do ensaio de choque térmico.



Fonte: Aatoria própria

Segundo Cabral (2023), as amostras 100AC e 10CCA apresentaram médias de ciclos até a ruptura de 22,25 e 12, respectivamente. Quando comparadas aos resultados da presente pesquisa, observa-se que as amostras 10CCA10LETA e 30CCA30LETA apresentaram RCT superior à da amostra 100AC. Além disso, todas as composições contendo lodo ETA demonstraram desempenho superior a amostra 10CCA, indicando que a adição desse resíduo contribui significativamente para a melhoria da RCT.

Cabral (2023) também avaliou a composição 10CCA10LETA com granulometria fina de lodo, obtendo uma média de 13,5 ciclos para ruptura na RCT. No presente trabalho, a mesma composição, porém com a granulometria graúda do lodo suportou o dobro de ciclos (27). Dessa forma, a granulometria mais grossa do lodo pode ter contribuído positivamente para o desempenho na RCT.

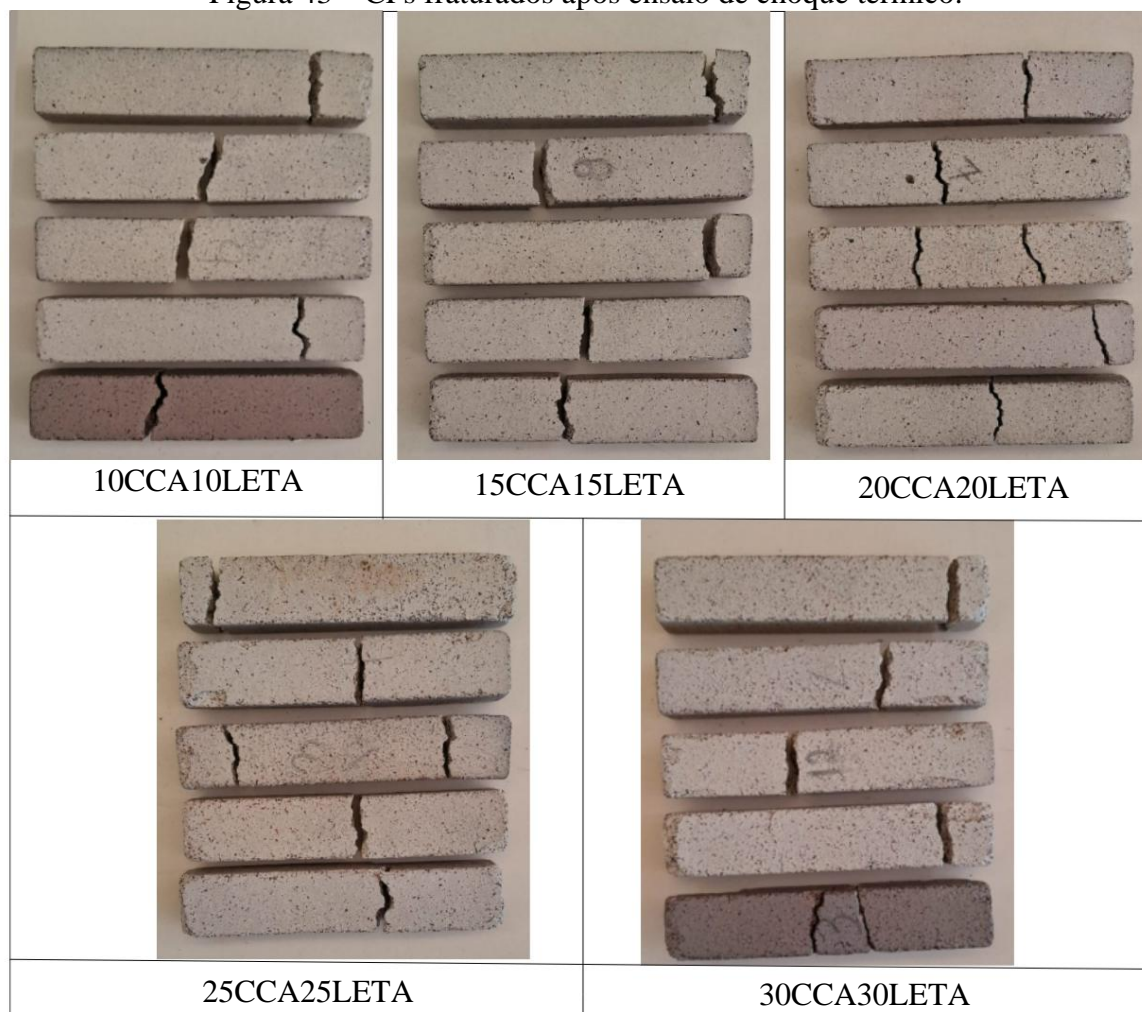
A composição 10CCA10LETA apresentou o melhor desempenho na RCT. Esse resultado pode ser explicado pelos ensaios físicos, pois a menor incorporação de resíduos resultou na maior densidade média aparente, indicando uma matriz mais compacta e com menor volume de poros, o que favorece a resistência a variações bruscas de temperatura, reduzindo a formação de trincas.

Por outro lado, a composição com maior teor de resíduos (30CCA30LETA), apresentou uma recuperação significativa na resistência ao choque térmico, fato diretamente relacionado aos elevados valores de porosidade aparente. De acordo com Jin *et al.* (2016), além da porosidade, as micro características dos poros também tenham impacto significativo na RCT.

A amostra 20CCA20LETA apresentou o pior desempenho térmico e elevado grau de variabilidade física, o que indica baixa uniformidade estrutural. Os altos coeficientes de variação obtidos nos ensaios de absorção por água (7,21%) e porosidade aparente (6,99%), sugerem uma distribuição irregular das partículas na matriz cerâmica. Essa heterogeneidade compromete a coesão interna do material, favorecendo a formação de zonas de fragilidade e, conseqüentemente, a ruptura precoce durante o ensaio de RCT.

A Figura 43 apresenta os resultados dos CPs submetidos ao ensaio de choque térmico. Observa-se que, na maioria dos casos, as trincas formadas possuem um padrão zigue-zague, evidenciando trajetórias irregulares. De acordo com a revisão bibliográfica, esse tipo de fratura está associada a uma maior energia total de ruptura, uma vez que as trincas percorrem caminhos mais longos devido ao contorno dos poros (LU *et al.*, 2014; VANDERPERRE *et al.*, 2004).

Figura 43 – CPs fraturados após ensaio de choque térmico.



Fonte: Autoria própria

Verificou-se que as amostras a partir de 20CCA20LETA romperam em mais de um ponto do CP, indicando falha simultânea ao longo da amostra. O mesmo comportamento foi observado por Quevedo (2020), em que as amostras também apresentaram ruptura em dois locais ao mesmo tempo.

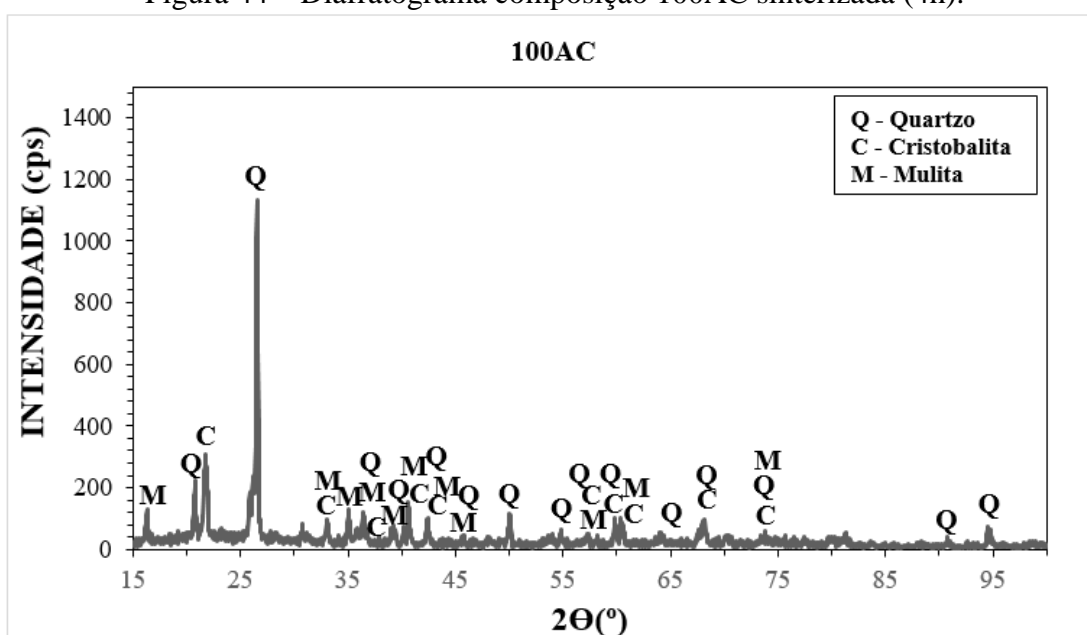
4.4 Etapa 3: Estudo da Influência do tempo de Queima nas Propriedades Físicas, Mecânica e Termomecânica

Para compreender a influência do tempo de queima (1300° por 4h) nas propriedades do material, foram realizados a análise DRX, ensaios físicos (absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, densidade relativa aparente), mecânicos (resistência a flexão em três e quatro pontos) e termomecânicos (resistência ao choque térmico) nas amostras com 100AC, 10CCA10LETA e 30CCA30LETA.

4.4.1 Difração de Raios-X

A Figura 44 apresenta o diagrama da amostra 100AC após a sinterização, mostrando picos para as fases: Quartzo (SiO_2), código de referência (CR): 00-005-0490; Mulita ($\text{Al}_2(\text{Al}_{2,8}\text{Si}_{1,2})\text{O}_{9,6}$), CR: 01-079-1450 e Cristobalita (SiO_2), CR: 01-077-1317. Os compostos encontrados na amostra, convergem com os elementos encontrados na análise de fluorescência de raios X (FRX) da Tabela 8, como: SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Os picos de Quartzo e Cristobalita evidenciam a elevada proporção de SiO_2 na composição.

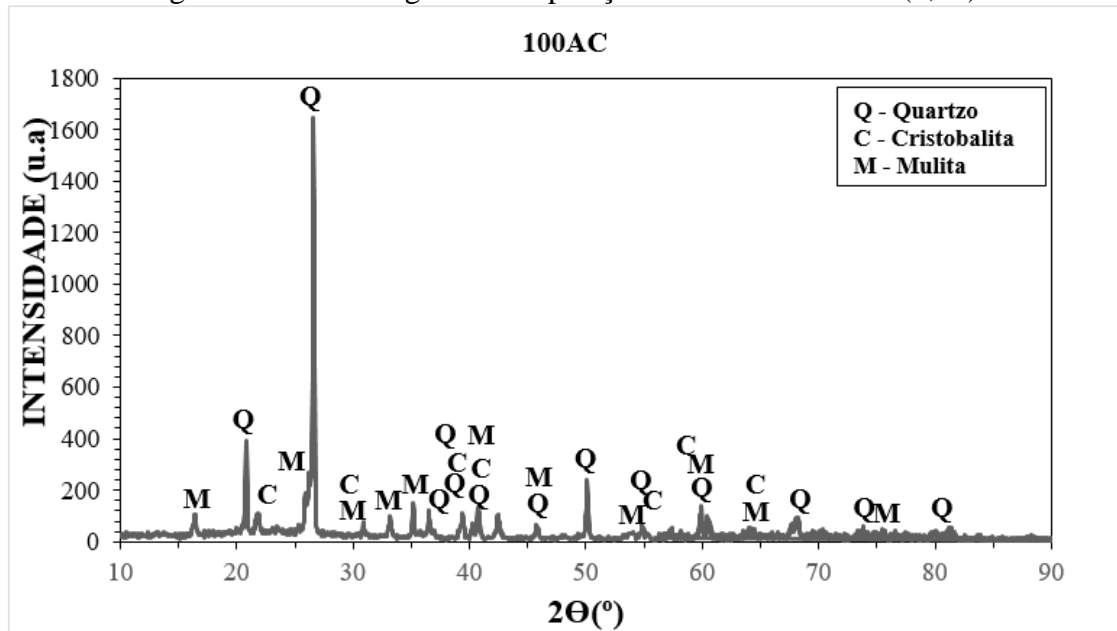
Figura 44 – Difratograma composição 100AC sinterizada (4h).



Fonte: Autoria própria

Ao comparar os difratogramas da composição 100 AC sinterizada por 0,5h (Figura 45) e 4h, observa-se a presença das mesmas fases cristalinas: Quartzo, Cristobalita e Mulita. Entretanto, a amostra sinterizada por 4h apresentou redução na intensidade dos picos de Quartzo e leve aumento nos picos de Mulita e Cristobalita, indicando a reação de formação dessas fases a partir da sílica e da alumina.

Figura 45 – Diafratograma composição 100AC sinterizada (0,5h).



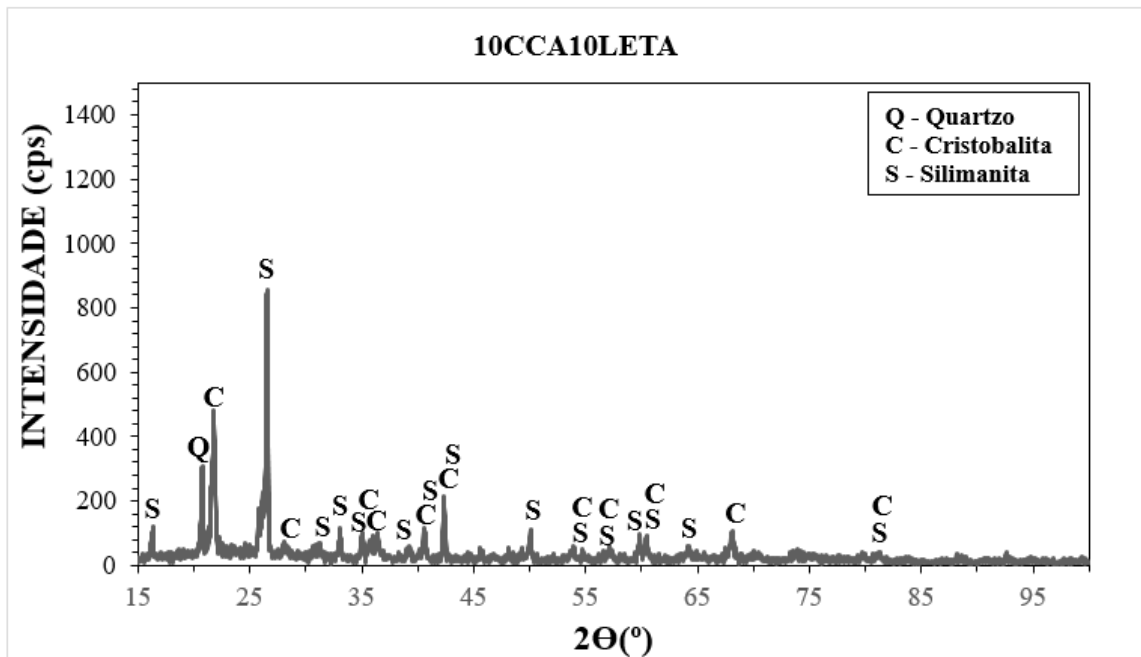
Fonte: Cabral (2023).

Observa-se que os picos de Cristobalita para a composição 100AC foram menos intensos em comparação com as demais formulações. Esse desempenho pode ser explicado pelo estudo realizado por Liang *et al.* (2017), onde verificou-se que a adição de alumina favorece a cristalização da sílica presente na cinza, resultando em um aumento na formação de cristobalita.

A medida que foi incorporado 20% de resíduo (10CCA10LETA) observou-se a redução na intensidade dos picos de Quartzo, a não identificação da fase de Mulita e surgimento de Silimanita (Al_2SiO_5), CR: 01-083-1566, conforme o diafratograma da Figura 46.

Em relação a mesma composição sinterizada por 0,5h, o aumento do tempo de queima não influenciou na transformação ou no desaparecimento das fases de Quartzo e Silimanita, mas favoreceu a formação de Cristobalita, enquanto a fase Berlinita deixou de ser identificada. Esse comportamento indica que, para esta composição, o maior tempo de queima não foi suficiente para promover a transformação da Silimanita em Mulita.

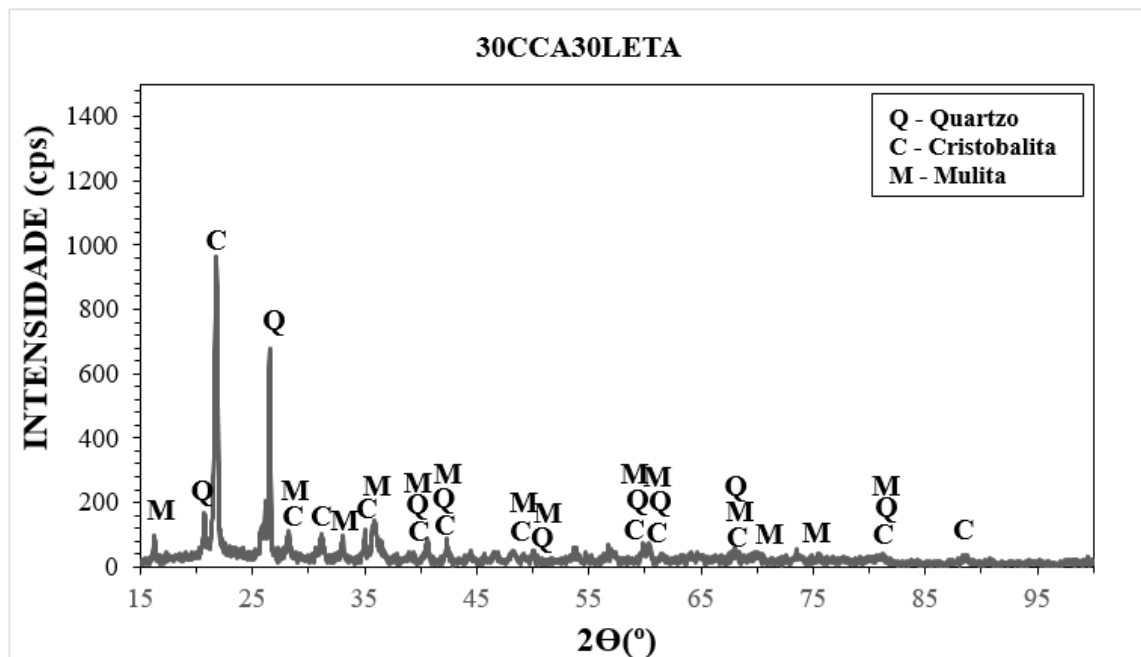
Figura 46 – Diafratograma composição 10CCA10LETA sinterizada (4h).



Fonte: Autoria própria

A composição 30CCA30LETA (Figura 47) apresentou as mesmas fases identificadas na amostra sinterizada por 0,5h, porém com maior intensidade de picos de Cristobalita e Mulita, observando-se picos até aproximadamente $2\theta = 90^\circ$. A Cristobalita identificada nas três composições corresponde a fase α , tetragonal.

Figura 47 – Diafratograma composição 30CCA30LETA sinterizada (4h).



Fonte: Autoria própria

4.4.2 Propriedades Físicas

Nesta etapa foram preparados 12 CPs para cada composição (Tabela 16), totalizando 36 CPs analisados.

Tabela 16 – Resultados ensaios físicos etapa 3 (4h).

Composições	Média							
	AA (%)	Coef. De Variação	PA (%)	Coef. De Variação	DRA	Coef. De Variação	DMA (g/cm ³)	Coef. De Variação
100AC	3,52 (±0,18)	4,470	7,98 (±0,32)	4,034	2,46 (±0,01)	0,141	2,27 (±0,01)	0,461
10CCA10LETA	5,51 (±0,21)	3,860	11,56 (±0,42)	3,656	2,37 (±0,02)	0,657	2,10 (±0,01)	0,606
30CCA30LETA	9,14 (±0,31)	3,348	16,91 (±0,51)	3,018	2,23 (±0,02)	0,814	1,85 (±0,01)	0,776

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que, à medida que os resíduos foram incorporados às composições, ocorreram elevações nos valores de absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA). Conseqüentemente, as densidades diminuíram, indicando a formação de um material mais leve, em razão da presença de vazios internos.

A amostra 100AC apresentou uma redução de 43% na AA em comparação aos resultados obtidos por Cabral (2023). Esse comportamento pode estar relacionado ao tamanho das partículas da AC, que favorece as transformações de fases durante a sinterização e promove o preenchimento dos vazios existentes. Desse modo, acredita-se que o maior tempo de queima contribuiu para a diminuição dos vazios internos, resultando em uma estrutura mais densa.

De acordo com Ribeiro *et al.* (2025), a PA e a DMA são parâmetros chaves para avaliar o grau de sinterização e a integridade microestrutural, com implicações diretas no desempenho mecânico e na resistência ao choque térmico. O aumento da temperatura de sinterização tende a aumentar a densificação da matriz, embora a redução da porosidade possa ser limitada pela presença de poros isolados. Observou-se esse efeito na amostra 100AC, onde a DMA aumentou de 2,10 g/cm³ (Cabral, 2023) para 2,27 g/cm³ com o prolongamento do tempo de queima.

Em comparação com as amostras sinterizadas a 1300°C por 0,5h, as amostras 10CCA10LETA e 30CCA30LETA não apresentaram alterações significativas nos resultados dos ensaios físicos. No entanto, observou-se uma redução nos coeficientes de variação, o que pode indicar que o maior tempo de queima contribuiu para uma sinterização mais homogênea.

4.4.3 Ensaios Mecânicos

Neste tópico são discutidos os resultados referentes aos ensaios de resistência à flexão em quatro pontos (RF4P) e em três pontos (RF3P). Em cada ensaio, foram avaliadas quatro amostras por composição.

A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos no ensaio RF4P. Observa-se que, à medida que aumentou a incorporação de resíduos, a resistência do material foi reduzida, passando de 16,96 MPa para a amostra 100AC para 6,64MPa na amostra 30CCA30LETA. Isso representa uma diminuição de aproximadamente 61% na resistência à flexão. Essa tendência de queda também foi observada nas amostras sinterizadas por 30 minutos.

Tabela 17 – Resistência média do ensaio RF4P.

Composições	Médias		Coef. de Variação (%)
	Fmáx (N)	RF4P (MPa)	
100AC	2179,233	16,963 (±1,324)	7,802
10CCA10LETA	1994,525	13,088 (±0,464)	3,542
30CCA30LETA	1345,900	6,639 (±0,779)	11,735

Fonte: Autoria própria.

Em comparação com as amostras sinterizadas a 1300°C por 0,5h, observou-se um aumento de aproximadamente 10% na RF4P da amostra 10CCA10LETA, mesmo com a AA praticamente inalterada. Esse resultado pode estar associado a mudança de fases, principalmente, ao aumento da intensidade dos picos de silimanita. Essa fase é desejável na fabricação de materiais cerâmicos por apresentar baixo coeficiente de expansão térmica, elevada resistência à quebra e a baixa condutividade elétrica, características que favorecem a formação de um material mais rígido (LEME *et al.*, 2017)

Em contrapartida, a amostra 30CCA30LETA apresentou uma redução de aproximadamente 7%. Esse comportamento pode estar relacionado ao maior tempo de sinterização, que favoreceu a formação da cristobalita α (tetragonal), fase conhecida por promover tensões internas devido a sua transformação polimórfica, resultando na redução da resistência mecânica do material, devido a geração de trincas internas.

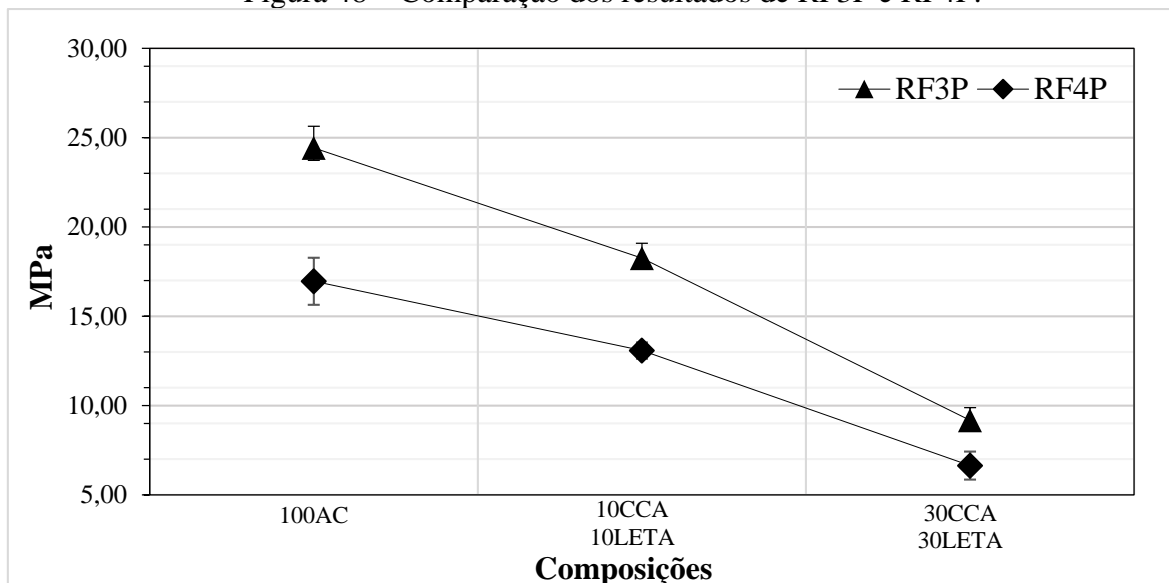
Na Tabela 18 são apresentados os resultados referentes ao ensaio RF3P. Observa-se que, enquanto no ensaio RF4P apenas a amostra 100AC atingiu a resistência mínima exigida pela norma, na RF3P a amostra com 10CCA10LETA também apresentou valores superiores a 15 MPa. A Figura 48 ilustra a comparação entre os resultados obtidos pelos dois métodos.

Tabela 18 – Resultado RF3P.

Composições	Médias		Coef. de Variação (%)
	F _{máx} (N)	RF3P (MPa)	
100AC	1642,867	24,432 (±1,21)	4,784
10CCA10LETA	1406,425	18,253 (±0,837)	4,584
30CCA30LETA	953,368	9,185 (±0,694)	7,553

Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – Comparação dos resultados de RF3P e RF4P.

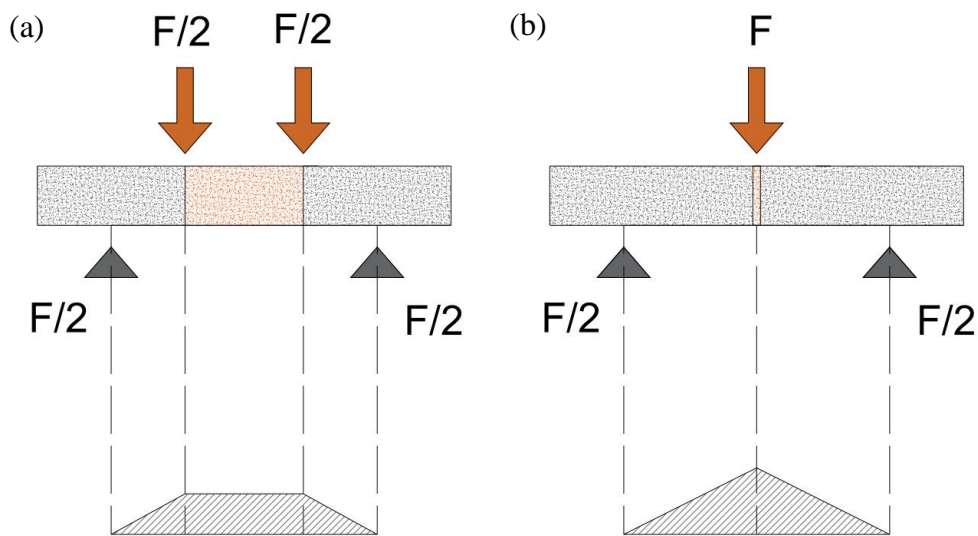


Fonte: Autoria própria

É possível observar que a força necessária para a ruptura no ensaio de RF4P é superior à observada na RF3P. Isso ocorre porque, no ensaio em três pontos, há uma região de elevada força cortante próxima ao ponto de aplicação da carga, o que pode favorecer falhas por cisalhamento ou iniciar trincas localizadas. Já no ensaio em quatro pontos, a região central é submetida a momento fletor constante e força cortante nula, de modo que a ruptura ocorre predominantemente por flexão pura. Essa condição reduz a influência de falhas localizadas e exige maior carga para que a fratura seja iniciada (Figura 49).

Entretanto, a resistência à flexão obtida no ensaio de RF3P é aproximadamente 40% superior à obtida no RF4P para todas as composições. Essa diferença está relacionada ao comportamento típico de materiais cerâmicos, que são frágeis e tendem a falhar a partir de defeitos superficiais. No ensaio em quatro pontos, a região de momento fletor constante é maior, aumentando a probabilidade de que a fratura se inicie em algum defeito presente nessa área. Assim, o RF4P fornece um valor mais representativo da resistência à flexão pura, enquanto o RF3P tende a superestimar a resistência devido à menor extensão da região crítica.

Figura 49 – Ilustração da aplicação de força no ensaio (a) RF4P e (b) RF3P.



Fonte: Autoria própria

No estudo realizado por Cabral (2023), a RF3P da amostra 100AC sinterizada a 1300°C por 0,5h foi de 16,30 MPa, enquanto para a o tempo de sinterização de 4h o valor aumentou para 24,43 MPa, representando um acréscimo de 44%. De acordo com Silveira (2022), o aumento do tempo de queima favorece a redução da porosidade, resultando em maior RF3P e resistência a compressão, o que pode estar relacionado a maior densificação do material e ao fechamento dos poros interconectados.

Observa-se que a ruptura dos CPs no ensaio RF4P (

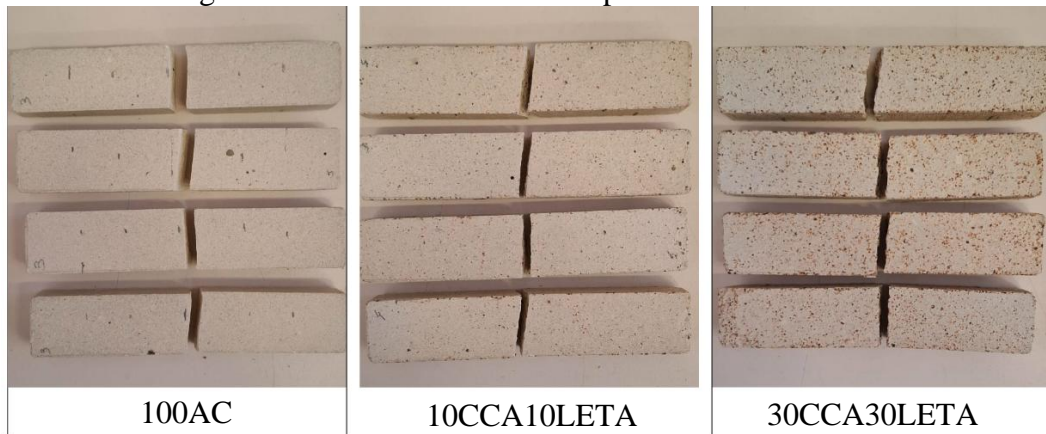
Figura 50) ocorreu entre os dois apoios, apresentando uma fratura retilínea inclinada. Por outro lado, nos ensaios RF3P (Figura 51), a ruptura ocorreu no ponto central, coincidindo com a aplicação da carga.

Figura 50 – Resultados dos CPs após o ensaio de RF4P.



Fonte: Autoria própria

Figura 51 – Resultados dos CPs após o ensaio de RF3P.



Fonte: Autoria própria

4.4.4 Ensaio Termomecânico

Foram ensaiadas quatro amostras de cada composição no ensaio de RCT. A Tabela 19 mostra os resultados da RCT e a Figura 52 os CPs após ensaio.

Tabela 19 – Resultados para o choque térmico.

Cerâmicas	CP	Ciclo da primeira trinca (A)	Ciclo da Fratura (B)	RCT 1 (A/B)	RCT 2 (A)/(B²)
100AC	2	1	2	0,50	0,250
	5	1	2	0,50	0,250
	6	2	9	0,22	0,025
	12	1	2	0,50	0,250
Média		1,25	3,75	0,43	0,194
10CCA10LETA	3	2	14	0,14	0,010
	5	3	17	0,18	0,010
	7	2	16	0,13	0,008
	8	1	1	1,00	1,000
Média		2	12	0,36	0,257
30CCA30LETA	3	1	2	0,50	0,250
	5	1	2	0,50	0,250
	6	1	2	0,50	0,250
	11	2	16	0,13	0,008
Média		1,25	5,5	0,41	0,189

Fonte: Autoria própria

Observa-se que a formação da primeira trinca ocorreu, principalmente, entre o primeiro e segundo ciclo para todas as amostras. A amostra 100AC apresentou uma sobrevida média de 3,75 ciclos, enquanto para a mesma composição sinterizada por apenas 0,5h (Cabral, 2023) exibiu um ciclo médio de fratura de 22,25.

Para as composições 10CCA10LETA e 30CCA30LETA apresentaram o mesmo comportamento de redução de desempenho quando sinterizadas por 4h, com ciclos médios de fratura de 12 e 5,5, respectivamente. Em contrapartida, as amostras sinterizadas por apenas 0,5h alcançaram ciclos médios significativamente superior de 27 e 23,3, respectivamente.

As amostras sinterizadas a 1300°C por 4h apresentaram mais rigidez e resistência, porém mostraram-se mais frágeis sob ciclos térmicos repetidos, devido a menor capacidade de absorver tensões internas. Em contraste, as amostras sinterizadas por apenas 0,5h, sofreram menos degradação durante o ensaio de RCT, exibindo maior tenacidade e durabilidade sob condições de fadiga térmica.

Figura 52 – CPs após ensaio de RCT.



Fonte: Autoria própria

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou o potencial de utilização do lodo de estação de tratamento de água (lodo ETA), como fonte de alumina e a cinza da casca de arroz (CCA), como fonte de sílica, como matérias-primas alternativas para a produção de revestimentos cerâmicos. Em relação aos trabalhos prévios Azolim (2022), Cardoso (2022) e Cabral (2023), o uso de lodo ETA em conjunto com a CCA se mostrou benéfico em relação as propriedades mecânicas e termomecânicas.

Essa abordagem representa uma alternativa sustentável para a valorização e destinação adequada de resíduos industriais, contribuindo para a redução dos impactos ambientais, redução de custos de fabricação do material e aumento de suas propriedades mecânicas e termomecânicas. A Tabela 20 apresenta um resumo das principais propriedades das amostras sinterizadas por 30 minutos e 4 horas.

Tabela 20 – Resumo dos resultados encontrados nas Etapas 2 e 3.

Etapa 2: Sinterização por 30 minutos	Físicos				Choque Térmico	DRX	Mecânico				Químico			
	AA (%)	PA (%)	DRA (g/cm ³)	DMA (g/cm ³)			Ciclos	Fases	RF3P		RF4P		Resist. Manchamento	
					Força (N)	MPa			Força (N)	MPa	Tintura Iodo	Óleo de oliva		
10CCA10LETA	5,21	11,07	2,39	2,12	27	Berlinita, Quartzo, Silimanita	1746,35	11,82					Classe 1	Classe 5
15CCA15LETA	5,69	11,75	2,34	2,06	19,8	Berlinita, Quartzo, Silimanita	1772,02	10,94					Classe 1	Classe 5
20CCA20LETA	6,43	12,9	2,3	2,01	17,4	Berlinita, Quartzo, Silimanita	1662,78	9,44					Classe 1	Classe 5
25CCA25LETA	7,45	14,49	2,27	1,94	21,6	Berlinita, Quartzo, Silimanita	1601,4	8,81					Classe 1	Classe 5
30CCA30LETA	9,01	16,87	2,23	1,87	23,2	Quartzo, Cristobalita, Mulita	1405,27	7,11					Classe 1	Classe 5
Etapa 3: Sinterização por 4 horas														
100AC	3,52	7,98	2,46	2,27	3,75	Quartzo, Cristobalita, Mulita	1642,87	24,43	2179,23	16,96				
10CCA10LETA	5,51	11,56	2,37	2,1	12	Quartzo, Cristobalita, Silimanita	1406,42	18,25	1994,52	13,08				
30CCA30LETA	9,14	16,91	2,23	1,85	5,5	Quartzo, Cristobalita, Mulita	953,37	9,18	1345,9	6,64				

Fonte: Autoria própria

A variação na proporção dos resíduos e na granulometria do lodo ETA empregado influenciou significativamente na estética (aparência superficial) e as propriedades físicas dos corpos de prova (CPs). Além disso, o lodo graúdo resultou em porosidade inferior ao lodo de granulometria mais fina, indicando um melhor fator de empacotamento.

O ensaio de resistência ao manchamento permite avaliar o desempenho do corpo de prova em situação que simulam o cotidiano, evidenciando que a porosidade exerce influência direta sobre a aplicabilidade de revestimentos porosos e não esmaltados. Dessa forma, tais revestimentos tornam-se inadequados para ambientes propensos ao acúmulo de sujeira, como áreas úmidas.

As propriedades dos materiais podem ser ajustadas em função do tamanho das partículas das matérias-primas e do tempo de sinterização. De modo geral, menores tempos de queima favorecem a obtenção de materiais com maior resistência ao choque térmico, enquanto tempos mais prolongados promovem uma maior densificação, resultando no incremento da resistência à flexão.

Verificou-se que a porosidade do material exerce influência significativa sobre o desempenho dos CPs no ensaio de resistência ao choque térmico, uma vez que a propagação de trincas tende a ser interrompida ao encontrar poros. No entanto, a quantidade de poros por si só não é suficiente para indicar maior resistência ao choque térmico, visto que o tamanho e a distribuição desses poros também exercem papel relevante. Assim, materiais contendo numerosos poros de pequenas dimensões podem permitir a propagação mais rápida das trincas, enquanto aqueles com menor quantidade de poros, mas com maior dimensão, podem apresentar comportamento distinto.

O ensaio de resistência a flexão em três pontos (RF3P) apresentou valores de resistência superiores aos obtidos no ensaio de quatro pontos (RF4P). No entanto, o ensaio de RF4P mostra-se mais adequado para a caracterização de materiais cerâmicos, por avaliar uma área maior do CP e, conseqüentemente, detectar uma área mais representativo de falhas. Além disso, o presente trabalho possibilitou identificar uma diferença de aproximadamente 40% entre os resultados obtidos nos ensaios de RF3P e RF4P, informação que não foi encontrada na literatura consultada.

As fases formadas durante a sinterização, bem como, o tempo de queima, apresentaram influência significativa na resistência mecânica e termomecânica dos materiais. Como exemplo, a amostra 100AC sinterizada por 0,5h e 4h apresentou aumento na resistência à flexão, passando de 16,30 MPa para 24,43 MPa, acompanhado de uma redução na intensidade dos picos de cristobalita.

Em contrapartida, a amostra 30CCA30LETA apresentou comportamento inverso, com menor resistência à flexão na amostra queimada por 0,5h e aumento na intensidade dos picos de cristobalita após 4h de sinterização. Esse resultado pode estar associado a transformação polimórfica da cristobalita, que gera tensões internas com potencial de formar microtrincas no material devido ao aumento de volume da transformação da cristobalita β para α , comprometendo suas propriedades mecânicas e termomecânicas (Shmueli, 2025).

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho investigou a influência da incorporação da cinza da casca de arroz (CCA) e de lodo de estação de tratamento de água (lodo ETA) em substituição a argila caulim (AC), na fabricação de revestimentos cerâmicos, avaliando suas propriedades físicas, química, mecânicas e termomecânica. O estudo teve como objetivo desenvolver revestimentos cerâmicos mais sustentáveis, utilizando a CCA como fonte de sílica e o lodo ETA, de granulometria graúda, como fonte de alumina. Com base nos resultados obtidos, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- A incorporação dos resíduos em conjunto com a AC demonstrou potencial significativo na fabricação de revestimento cerâmicos;
- A variação do tamanho das partículas do lodo ETA mostrou influência direta sobre a estética do produto final, alterando características como coloração e textura superficial;
- À medida que são adicionados a CCA e o lodo ETA, a absorção de água e porosidade aparente aumentam e as densidades diminuem, favorecendo a fabricação de um material mais leve;
- O ensaio de resistência a flexão em três pontos (RF3P) apresentou valores de resistência aproximadamente 40% superiores aos obtidos no ensaio de resistência a flexão em quatro pontos (RF4P);
- Na temperatura de 1300°C, a resistência a flexão apresenta melhora com o aumento do tempo de queima de 0,5h para 4h;
- As amostras sinterizadas por tempo mais curto (0,5h) apresentaram maior resistência ao choque térmico, em comparação aquelas submetidas a um tempo de sinterização mais prolongado (4h), fato associado com a porosidade e picos menores de cristobalita;
- A resistência à flexão é inversamente proporcional à porosidade aparente;
- A amostra fabricada com 60% de resíduos (30CCA30LETA) apresentou o pior desempenho mecânico, fato associado com o aumento dos picos de cristobalita;
- A amostra com 20% de resíduos (10CCA10LETA), foi a amostra que obteve o melhor desempenho em todos os ensaios realizados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na análise dos resultados obtidos nesta pesquisa, apresentam-se as seguintes sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Aumentar a proporção de resíduos utilizados para a fabricação de revestimentos cerâmicos esmaltados.
- Medir o tamanho dos poros e compreender a influência nas propriedades físicas, mecânicas e termomecânicas;
- Avaliar a viabilidade de empregar a própria cinza da casca de arroz como camada de esmalte, reforçando o aspecto de sustentabilidade no processo.
- Investigar a aplicação desses materiais em outros segmentos, como, por exemplo, na fabricação de sumidouros residenciais, considerando sua elevada porosidade.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 10545-3:2020 – Placas cerâmicas - Parte 3: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente.

AGRA, Tiago Manoel da Silva. Avaliação da pozolanicidade da cinza do lodo proveniente de estação de tratamento de água (ETA). 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.

ALI, K. A.; AHMAD, M. I.; YUSUP, Y. **Issues, Impacts, and Mitigations of Carbon Dioxide Emissions in the Building Sector**. *Sustainability*, v. 12, n. 18, p. 7427, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12187427>. Acesso em: 25 set. 2024.

ALTIMARI, F.; ANDREOLA, F.; BENASSI, P. P.; LANCELLOTTI, I.; BARBIERI, L. Pumice and lapillus scraps: New national environmental-friendly chance for the production of ceramic tiles. **Ceramics International**, Italy, v. 49, n. 23, p. 38743–38753, 2023.

AZOLIM, G. E. Influência do lodo de estação de tratamento de água nas propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias fabricadas com cinza da casca de arroz. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Universidade Federal do Pampa. Alegrete, Rio Grande do Sul, 2022.

BARTIKO, D.; JULIO, M.D. Construction and use of coagulation diagrams as a tool for continuous monitoring of flocculation in water supply. **Revista Ambiente e Água**, v. 10, n. 1, p. 73-89, jan./mar. 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/ScdmFbTv4RZb3KrbC3YDzRf/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 16 jan. 2025.

BEZERRA, I. M. T.; SOUZA, J.; CARVALHO, J. B. Q.; NEVES, G. A. A. Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 6, p. 639-645, 2011. Campina Grande –PB.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. *Atlas de Abastecimento de Água*. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/arquivos/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2013/atlasFolder.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2024.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Mudanças climáticas e recursos hídricos. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/panorama-das-aguas/mudancas-climaticas-recursos-hidricos#:~:text=O%20ciclo%20da%20%C3%A1gua%20est%C3%A1,de%20recursos%20h%C3%ADricos%20para%20todos>. Acesso em: 30 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 24 de maio de 2021. Estabelece os padrões de qualidade para a água destinada ao consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_24_05_2021_rep.html. Acesso em: 28 nov. 2024.

BRATBY, John. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. Londres: IWA Publishing, 2016.

CANIANI D, MASI S, MANCINI IM, TRULLI E. Innovative reuse of drinking water sludge in geoenvironmental applications. *Waste Manag.* 2013;1461-8. doi: 10.1016/j.wasman.2013.02.007

CARDOSO, C. V. Avaliação das propriedades mecânicas e termomecânicas em compósitos cerâmicos refratários utilizando cinza de casca de arroz e lodo de estação de tratamento de água. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, 2022.

CARDOSO, F. A. Método de Formulação de Argamassas de Revestimento Baseado em Distribuição Granulométrica e Comportamento Reológico. 158p. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo.

CHANG, Q. *Colloid and Interface Chemistry for Water Quality Control*. Academic Press, 2016.

CHIANG, K.; CHIU, H.; CHUANG, S. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husk. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v. 171, n. 1-3, p. 76–82, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409008772>. Acesso em: 03 ago. 2025.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. Economia circular na prática: guia de implementação segundo a série ABNT NBR ISO 59000 / Confederação Nacional da Indústria, Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro, Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. – Brasília : CNI, 2024. 50 p. : il.

COLOMINA, Maria Teresa; PERIS-SAMPEDRO, Fiona. *Aluminum and Alzheimer's Disease*. In: *Neurotoxicity of Metals*. 2017. v. 18. ISBN 978-3-319-60188-5.

CORSAN. Tratamento de água. Disponível em: <https://www.corsan.com.br/tratamentodeagua#:~:text=%2D%20Filtra%C3%A7%C3%A3o%20reten%C3%A7%C3%A3o%20dos%20flocos%20menores,redes%20e%20reservat%C3%B3rios%20de%20distribui%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 20 jan. 2025.

CRAPPER McLACHLAN, D. R. Aluminum and Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging*, v. 7, n. 6, p. 525-532, 1986. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0197-4580\(86\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0197-4580(86)90043-9). Acesso em: 27 jan. 2025.

DAVIDGE, R. W., *Mechanical behavior of ceramics* New York: Cambridge, 2010.

DELLA, V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de resíduos agroindustriais: cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica. **Revista Cerâmica Industrial**, p. 22-25, 2005.

EMBRAPA. Estatística de produção. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pre-producao/socioeconomia/estatistica-de-producao>. Acesso em: 4 mar. 2025.

FARIA, K. C. P. Formulação e caracterização de revestimento poroso utilizando resíduo de vidro plano e resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. 2015. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, Laboratório de Materiais Avançados, Campos dos Goytacazes, 2015.

FERREIRA, F. S. S.; MARCHETTO, M. Otimização multi-objetivo de estações de tratamento de águas de abastecimento: remoção de turbidez, carbono orgânico total e gosto e odor. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 1, p. 7-15, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/K3FrvhkjZT6qZLmR9dsPYph/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 30 nov. 2024.

FERREIRA, T. C. Impactos e desafios da construção civil brasileira para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Dissertação de Mestrado. 181 pg. Ribeirão Preto, 2018.

FERRO, W. P.; SILVA, L. G. A.; WIEBECK, H. Uso da cinza da casca de arroz como carga em matrizes de poliamida 6 e poliamida 6.6. *Polímeros*, vol.17, n.3, p. 240 -243, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/bypL7DZJcxwZbZZ9fGjtrmw/>. Acesso em: 05 mar. 2025.

FRAGOSO, C. L. R. Processamento químico e caracterização de um concentrado de glauconita visando à produção seletiva de sulfato de potássio. Rio de Janeiro, 2014. 128p. **Dissertação de Mestrado** - Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (Funasa). Manual de cloração de água em pequenas comunidades. Disponível em: https://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manualdecloracaodeaguaempequenascomunidades.pdf. Acesso em: 22 nov. 2024.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (Funasa). *Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETA's*. Universidade de São Paulo, 2021. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4321633/mod_resource/content/1/Manual%20cont_quali_agua_tecnicos_trab_emetas.pdf. Acesso em: 30 nov. 2024.

GILABERT, J.; DÍAZ-CANALES, E. M.; ZUMAQUERO, E.; GAZULLA, M. A. F.; BLASCO, E.; GÓMEZ-TENA, M. Development of tridymite structure studied through crystal growth by X-ray diffraction: Influence of synthesis parameters. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 64, n. 1, p. 45-56, 2025.

GOMEZ-T., M. P.; GILABERT, J.; ZUMAQUERO, E.; DIAZ-CANALES, E. M.; ARRUFAT, S.; DOMINGUEZ, R. Reactivity of crystalline silica in processing ceramic tiles. In: QUALICER 2024 – World Congress on Ceramic Tile Quality, Castellón (España), 2024. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica (ITC), Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE), 2024.

GUPTA, A.; PANDEY, V.; YADAV, M. K.; MOHANTA, K.; MAJHI, M. R. A comparative study on physio-mechanical properties of silica compacts fabricated using rice husk ash derived amorphous and crystalline silica. **Ceramics International**, v. 48, n. 23, p. 35750–35758, 1 Dec. 2022. DOI:10.1016/j.ceramint.2022.07.098.

HAGEMANN, S. E.; GASTALDINI, A. L. G.; COCCO, M.; JAHN, S. L.; TERRA, L. M. Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, v. 214, p. 916–926, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.324. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.324>.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E. M.; ANDREÓLI, C. V. Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir o impacto ambiental. *Química Nova*, Campinas, v. 29, n. 1, p. 79-84, 2006. doi:10.1590/S0100-40422006000100016

HOSSAIN, S. K. S.; MATHUR, Lakshya; ROY, P. K. Rice Husk/Rice Husk Ash as an Alternative Source of Silica in Ceramics: A Review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, v. 6, n. 4, p. 299–313, 2018. DOI: 10.1080/21870764.2018.1539210.

HULAN, T.; KNAPEK, M.; KUSNIR, J.; STUBNA, I.; LUKAC, F.; CSAKI, S. The effect of quartz content and particle size on microcracking and Young's modulus of illite-based ceramics. **Ceramics International**, v. 51, n. 25 A, 2025, p. 43915-43923.

IBF. INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS. Leis ambientais. Disponível em: <https://www.ibflorestas.org.br/conteudo/leis-ambientais>. Acesso em: 30 mar. 2025.

- JIN, X.; DONG, L.; XU, H.; LIU, L.; LI, Ni.; ZHANG, X.; HAN, J. Effects of porosity and pore size on mechanical and thermal properties as well as thermal shock fracture resistance of porous ZrB₂-SiC ceramics. **Ceramics International**, v. 42, n. 7, p. 9051-9057, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.02.164>
- JORGE, N.; SANTOS, C.; TEIXEIRA, A. R.; MARCHÃO, L.; TAVARES, P. B.; LUCAS, M. S.; PERES, J. A. Treatment of agro-industrial wastewaters by coagulation-flocculation-decantation and advanced oxidation processes—A literature review. **Engineering Proceedings**, [s.l.], v. 19, n. 1, p. 33, 2022. DOI: 10.3390/ECP2022-12665.
- JORGENSEN, S., PEDERSEN, L.J.T., 2018. The Circular Rather than the Linear Economy. In: RESTART Sustainable Business Model Innovation. Palgrave Studies in Sustainable Business In Association with Future Earth. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91971-3_8
- JUNIOR, J. V. B.; ROMANEL, C. Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras. *Brazilian Journal of Urban Management*. V.5, n. 2, p. 27-37, 2013.
- KACZMARCZYK, K.; NEMECEK, J.; PARTYKA, J.; WOJTECZKO, A. Nanomechanical properties of ceramic materials from the SiO₂-Al₂O₃-(Na₂O)-K₂O-MgO system with an addition of SrO. **Ceramics International**, v. 50, n. 17, p. 30306-30315, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.05.328>.
- KAZMI, S. M. S.; MUNIR, M. J.; SIDDIQUE, R.; AHMED, W.; TADOUS, M. Re. Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 29-41, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.088>.
- KETOV *et al.* Recycling of rice husks ash for the preparation of resistant, lightweight and environment-friendly fired bricks. **Construction and Building Materials**, v. 302, p. 124-385, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124385>. Acesso em: 21 abr. 2025.
- KIELING, A. G., BREHM, F. A., KULAKOWSKI, M. P., & MORAES, C. A. M. (2020). Influence of the combustion process in the rice husk ash characterization. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 3(3), 2106-2116. <https://doi.org/10.34188/bjaerv3n3-122>
- KUMAR, S.; SANGWAN, P.; DHANKHAR, R.; MOR, V.; BIDRA, S. Utilization of Rice Husk and Their Ash: A Review. *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences*, v. 1, n. 5, p. 126-129, 2013.

- LASSETTER, W. L. Kyanite, Andalusite and Sillimanite. **Mining Engineering**, v. 74, n. 7, p. 58-59, 2022.
- LEME, T. G. Livro de referência de Minerais Comuns e Economicamente Relevantes: NESOSSILICATOS. Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert”. 2017. Disponível em: <https://museuhe.com.br/site/wp-content/uploads/2018/02/Museu-HESILLIMANITA.pdf>. Acesso em: 03 novembro de 2025.
- LIANG, J. J.; LIN, Q. H.; ZHANG, X.; JIN, T.; ZHOU, Y. Z.; SUN, X. F.; CHOI, B. G.; KIM, I. S.; DO, J. H.; JO, C. Y. Effects of alumina on cristobalite crystallization and properties of silica-based ceramic cores. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 33, p. 204–209, 2017.
- LIMA, J. R. N.; ABREU, F.O.M.S. **Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Floculantes para Tratamento de Águas: Uma Revisão sobre Benefícios e Potencialidades**. *Revista Virtual de Química*, v. 10, n. 3, p. 709-735, 2018. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/v10n3a20.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2024.
- LIMA, L. K. S.; SILVA, K. R.; MENEZES, R. R.; SANTANA, L. N. L.; LIRA, H. L. Microstructural characteristics, properties, synthesis and applications of mullite: a review. **Cerâmica**, v. 68, p. 126–142, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132022683853184>
- LIU, Y.; BIAN, D.; ZHAO, Y.; WANG, Y. Influence of curing temperature on corrosion protection property of chemically bonded phosphate ceramic coatings with nano-titanium dioxide reinforcement. **Ceramics International**, v. 45, n. 2, p. 1595-1604, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.033>.
- LOPES, E. R. *et al.* Caracterização elementar da casca de arroz e suas cinzas por MIP OES após decomposição ácida com sistema de refluxo. **Química Nova**, v. 40, n. 9, p. 1009-1017, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170119>.
- LOPES, H.M.T.; PEÇANHA, A.C.C.; CASTRO. Considerações sobre a eficiência de misturas de concreto de cimento Portland com base no conceito de empacotamento de partículas. **Revista Matéria**, v. 25, n. 1, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200001.0874.
- LU, X. *et al.* Porosity and oxide layer dependence of thermal shock behavior of porous silicon nitride ceramics. *Journal of Materials Science and Technology*, v. 30, n. 12, p. 1217–1222, 2014.
- LUSTOSA, J.B.; BRACARENSE, D.C.; CASTRO, F.M.S.; QUEIROZ, S.G.B.; SILVA, G.G. Tratamento e aproveitamento de água de lavagem de filtro em estação de tratamento de água. *Revista DAE*, São Paulo, v. 206, n. 2, p. 44- 61, 2017. <https://doi.org/10.4322/dae.2016.027>

- LUTTRELL, William E. Aluminum sulfate. *Journal of Chemical Health & Safety*, v. 22, n. 6, p. 33-35, 2015. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1016/j.jchas.2015.10.012> . Acesso em: 15 jan. 2025.
- LUZ, A. B.; CAMPOS, A. R.; CARVALHO, E. A.; BERTOLINO, L. C.; SCORZELLI, R. B.. Argila - caulim. IN: *Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações*. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 259-294.
- MAGLIANO, M.V.M., PANDOLFELLI, V.C., Multitização em refratários utilizando diferentes fontes precursoras – revisão, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/yZzRsQvQb9SRspqFGXsVjYk/?format=pdf&lang=pt>. Acesso: 12, mar de 2025.
- MENEGAZZO, A. P. M. *et al.* Resistências ao ataque químico e ao manchamento: comparação dos procedimentos e resultados dos ensaios das normas ISO e ASTM. *Cerâmica Industrial*, Centro de Inovação Tecnológica em Cerâmica – CITEC/CCB, Santa Gertrudes, SP, Brasil, 2006.
- MENELEY, Anne. Consumerism. *Annual Review of Anthropology*, v. 47, p. 117-132, 2018. DOI: 10.1146/annurev-anthro-102116-041518.
- METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.
- MME. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Biomassa: resíduos que são transformados em energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/biomassa-residuos-que-sao-transformados-em-energia>. Acesso em: 4 mar. 2025.
- MORRELL, R. Flexural strength testing of ceramics and hardmetals. *Measurement Good Practice Guide No. 7*. Centre for Materials Measurement and Technology, National Physical Laboratory, 2007.
- MORSELETTO, P. Targets for a circular economy. *Resources, Conservation & Recycling*. Institute for Environmental Studies (IVM), Faculty of Earth and Life Sciences, VU University Amsterdam, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>.
- MORSELLI, L. B. G. A.; CARMO, L. A. G.; QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R. Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. *Scientia Plena*, v. 18, n. 5, 2022. Disponível em: <http://www.scientiaplena.org.br>. Acesso em: 22 jan. 2025.
- MRWA. MINNESOTA RURAL WATER ASSOCIATION. **Water Works Manual: Chapter 12** - Coagulation. Disponível em: <https://www.mrwa.com/WaterWorksMnl/Chapter%2012%20Coagulation.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2025.

- NASCIMENTO, G. C.; *et al.* Caracterização físico-química da cinza de casca de arroz oriunda do processo termelétrico do sul de Santa Catarina - Brasil. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, n. 4, p. 634-640, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/2179460X15262>.
- NATE, S. *et al.* The impact of energy consumption on the three pillars of sustainable development. *Energies*, v. 14, n. 5, p. 1372, 2021.
- NGUYEN, Minh Duc; THOMAS, Michael; SURAPANENI, Aravind; MOON, Ellen M.; MILNE, Nicholas A. Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. *Environmental Technology & Innovation*, v. 28, p. 01-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102651>. Acesso em: 4 mar. 2025.
- NUNES, A. S. Análise experimental do comportamento de materiais cerâmicos refratários reforçados com fibras de aço e sílica da casca de arroz. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, 2014.
- OLIVEIRA, O. C.; MACIEL, G. F.; CASTRO, A. L.; BARBOSA, M. P.; CAMPOS, R. S. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Revista Matéria**, v. 23, n. 1, e-11962, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0298>
- OMARI, S. Al; AFANEH, F.; ELSAD, R. A.; RAMMAH, Y. S.; KHATTARI, Z. Y. Indirect effect of elevated temperature on radiation shielding competence through modulations of crystals' intrinsic tetrahedral parameters: A case study of berlinite, SiO₂-type AlPO₄. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 215, p. 111377, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111377>.
- PANDA, A. K.; MISHRA, B.G.; MISHRA, D.K.; SINGH, R.K. Effect of sulphuric acid treatment on the physico-chemical characteristics of kaolin clay. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 363, n. 1-3, p. 98-104, 2010.
- PEREIRA, A. M.; SILVA, C. Ad. R.; QUEIROZ, D. C. A.; MORAES, M. J. B.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza da casca de arroz. *Revista Matéria*. Departamento de Engenharia Civil, FEIS-UNESP, Ilha Solteira, SP, 2015.
- PETTERLE, A. R. Avaliação do desempenho térmico da placa do sistema de vedação vertical externo usando placas cerâmicas contendo lodo de eta e cinza de casca de arroz. 92p. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2018.

- POZZOBON, J. C.; MARAN, M. A.; LUCAS, J. F. R.; DÍAZ MORA, N. Aplicação de lodo de estação de tratamento de água para a produção de cerâmica artística. Anais do 54º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Foz do Iguaçu, PR, 2010. p. 2339-2350. Acesso em: 29 jan. 2025.
- PRAKASH, N. B.; SOCKAN, V.; JAYAKARAN, P. Waste water treatment by coagulation and flocculation. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology, v. 3, n. 2, p. 479-484, 2014. ISSN 2319-5967.
- QUEVEDO, J. C. Estudo das propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias derivadas da cinza da casca de arroz e alumina calcinada. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, Rio Grande do Sul, 2020.
- RAMÍREZ Y., J. R. Resistencia a las manchas de revestimientos cerámicos. 2012. Trabalho de Graduação (Tecnólogo em Cerâmica) – Universidad del Azuay, Facultad de Ciencia y Tecnología, Cuenca, Ecuador, 2012.
- RAMIREZ, K.G.; POSSAN, E.; BITTENCOURT, P.R.S.; CARNEIRO, C.; COLOMBO, M. (2018). *Physico-chemical characterization of centrifuged sludge from the Tamanduá water treatment plant* (Foz do Iguaçu, PR). **Matéria**, 23, n° 3.
- RAMIREZ, K. G.; POSSAN, E.; BITTENCOURT, P. R. S.; CARNEIRO, C.; COLOMBO, M. Physico-chemical characterization of centrifuged sludge from the Tamanduá water treatment plant (Foz do Iguaçu, PR). **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, e-12187, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0521>. Acesso em: 30 nov. 2024.
- RIBEIRO, G. C.; SILVEIRA, M. S.; SANTOS, L. G.; RESENDE, W. S.; RIBEIRO, S. Evaluation of thermal shock damage resistance of an aluminous refractory castable. **Ceramics International**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.08.023>.
- RIBEIRO, G. C.; SILVEIRA, M. S.; SANTOS, L. G.; RESENDE, W. S.; RIBEIRO, S. Evaluation of thermal shock damage resistance of an aluminous refractory castable. **Ceramics International**, v. 51, n. 26, p. 47667–47674, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.08.023> .
- RISBUD, S. H.; PASK, J. A. Calculated thermodynamic data and metastable immiscibility in the system SiO₂-Al₂O₃. **Materials and Molecular Research Division**, Lawrence Berkeley Laboratory and Department of Materials Science and Mineral Engineering, University of California, Berkeley, California, 1977.
- ROMERO, C.; SOLÓRZANO, R.; ABREU, O.; BRIZUELA, L.; PÉREZ, Z. Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua. **Revista Ingeniería UC**, v. 14, n. 3, p. 16-23, 2007.

- ROQUE, A.; MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Caracterização mineralógica, química e geotécnica do lodo da Estação de Tratamento de Água Taiapuêba. *Geotecnia*, v. 151, p. 33-52. 2021.
- SAIDUR, R.; SOLANGI, K.; RAHIM, N.; ISLAM, M. Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 5, p. 2423–2430, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.02.024
- SAMCHENKO, S. V.; KORSHUNOV, A. V. Formation of calcium aluminoferrites in the ternary CaO–Al₂O₃–Fe₂O₃ system during solid-phase reactions. **Construction and Building Materials**, v. 455, p. 139117, 2024.
- SANTOS, F. P. Caracterização e estudo da incorporação do lodo de ETA em argamassa. Orientador: Luis Enrique Gomez Armas. 2018. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2018.
- SARIATLI, Furkan. *Linear economy versus circular economy: a comparative and analyzer study for optimization of economy for sustainability*. Szent István University, Gödöllő, Hungary, 2017.
- SAYED, E. T.; WILBERFORCE, T.; ELSAID, K.; RABAIA, M. K. H.; ABDELKAREEM, M. A.; CHAE, K.; OLABI, A. G. A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. *Science of the Total Environment*, v. 766, p. 144505, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144505
- SHMUELI, Z.; POLISHCHUK, I.; KATSMAN, A.; POKROY, B. Controlling cristobalite formation in fused silica via particle size and treatment atmosphere adjustment during ceramic processing. **Ceramics International**, 2025.
- SIDDIKA, A. *et al.* Performance of sustainable green concrete incorporated with fly ash, rice husk ash, and stone dust. **Acta Polytechnica**, Prague, v. 61, n. 1, p. 279–291, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0279>. Acesso em: 21 abr. 2025.
- SILCCA Nobre. Silcca Nobre SBI – Sílica Amorfa da Casca de Arroz. Disponível em: <https://silcca.com.br/>. Acesso em: 9 fev. 2025.
- SILVA, E. L. G.; MACIEL, A. P. Uso de resíduos sólidos de estação de tratamento de água como carga em blocos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 4, p. 29-36, 2019. DOI: 10.4322/cerind.2019.021.
- SILVEIRA, G. R. Da. Efeito da temperatura e do tempo de sinterização nas propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias fabricadas com cinza da casca de arroz. Orientador: Marco Antônio Durlo Tier. 2022. 62p. - Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia de mecânica, Alegrete, 2022.

- SIQUEIRA, F. B. Desenvolvimento de revestimento cerâmico poroso utilizando resíduo grits. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, 2017.
- SOBROSA, F. Z. Desenvolvimento de materiais cerâmicos refratários com adição da sílica residual proveniente da queima da casca de arroz. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, 2014.
- STOCHERO, N.; PETTERLE, A.; MARANGON, E.; TIER, M. Aproveitamento da sílica residual da queima da casca do arroz e do lodo da estação de tratamento de água para fabricação de cerâmicas. *Revista Sodebras*, Curitiba, v. 10, n. 111, p. 19–22. XXXII International Sodebras Congress, Curitiba, 2014.
- SUOMIE, R. W.; MISHRA, B. P.; DAS, S. Performance of rice husk ash (RHA) and recycled coarse aggregate (RCA) for sustainable concrete: A review. *Next Materials*, v. 8, 2025.
- SVA. SILICA VERDE DO ARROZ. Renovando conceitos, preservando o meio ambiente. Disponível em: <https://silcca.com.br/index.html#home>. Acesso em: 30 mar. 2025.
- TABONI JUNIOR, L. R.; MARTINS, D. C. C.; SCANDELAI, A. P. J.; COSTA JUNIOR, V. Estimativa de geração final de lodo em uma estação de tratamento de água: estudo de caso na ETA de Maringá. In: **2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, 2019, Foz do Iguaçu, PR.
- TAFAREL, N. F.; MACIOSKI, G.; QUERNE DE CARVALHO, K.; NAGALLI, A.; FREITAS, D. C. de; PASSIG, F. H. Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. **Revista Matéria**, v. 21, n. 4, p. 974-986, 2016. DOI: 10.1590/S1517-707620160004.0090.
- TASHIMA, M. M.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; PAYÁ BERNABEU, J.; SOUSA, L. C.; MELGES, J. L. P. Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica, 2012.
- TELEGIN, S. V.; KIRILLOVA, N. I.; MODIN, I. A.; SULEIMANOV, E. V. Effect of particle size distribution on functional properties of Ce_{0.9}Y_{0.1}O_{2-d} ceramics. **Ceramics International**, v. 47, n. 12, p. 17316–17321, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.043>.
- THIEME, K.; ORTMANN, L.; THIEME, C. Microstructural insights into the stabilization of β-cristobalite. **Ceramics International**, v. 51, n. 21, p. 33800-33810, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.05.114>.

VANDERPERRE, L. J.; INAGAKI, Y.; CLEGG, W. J. Thermal shock of porous silicon nitride with preferentially aligned grains. Department of Materials, University of Cambridge, United Kingdom; Synergy Ceramics Laboratory, Nagoya, Japan, 2003.

VILARINHO, I. S.; FILIPPI, E.; SEABRA, M. P. Development of eco-ceramic wall tiles with bio-CaCO₃ from eggshells waste. **Open Ceramics**, v. 9, p. 100220, 2022.

VITORINO, J. P. D.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Caracterização e incorporação de resíduos provenientes de Estação de Tratamento de Água em cerâmica argilosa. *Cerâmica* 55, 385-392 (UENF). 2009.

ZANELLI, C.; CONTE, S.; MOLINARI, C.; SOLDATI, R.; DONDI, M. Waste recycling in ceramic tiles: a technological outlook. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 168, p. 105289, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105289>

ZAPARTE, T. A. Análise global da influência da finura da cinza de casca de arroz como substituição parcial ao cimento Portland nas propriedades da argamassa de revestimento. 2020. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pato Branco, 2020.

ZAUBERAS, R. T.; RIELLA, H. G. Defeitos de Queima Causados pelo Quartzo em Monoporosas. **Cerâmica Industrial**, vol. 6, n.2, p.40 - 45, 2001. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876570b7f8c9d6e028b4644/pdf/ci-6-2-5876570b7f8c9d6e028b4644.pdf>.

ZAWRAH, M. F.; ATA, M. B. H.; ABDELRAHMAN, H. S. Effect of acid concentration and curing conditions on microstructure, mechanical and electrical properties of phosphate geopolymers. **Next Materials**, v. 9, p. 100990, 2025. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nextmat.2025.100990>.

ZHENG, W.; CHEN, X.; LIU, C.; REN, S.; ZHANG, L. Effects of micro-sized mullite on cristobalite crystallization and properties of silica-based ceramic cores. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, Hoboken, v. 18, n. 3, p. 1200-1211, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijac.13769>.