

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
ENGENHARIA CIVIL**

MÔNICA CARIANE DENIS CABRAL

**INFLUÊNCIA DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E DA
CINZA DA CASCA DE ARROZ PARA APRIMORAR AS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E TERMOMECÂNICAS DE MATERIAIS CERÂMICOS**

**Alegrete
2023**

MÔNICA CARIANE DENIS CABRAL

**INFLUÊNCIA DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E DA
CINZA DA CASCA DE ARROZ PARA APRIMORAR AS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E TERMOMECÂNICAS DE MATERIAIS CERÂMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Durlo Tier
Coorientadora: Prof. Ma. Camila Vargas Cardoso

**Alegrete
2023**

MONICA CARIANE DENIS CABRAL

INFLUÊNCIA DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E DA CINZA DA CASCA DE ARROZ PARA APRIMORAR AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TERMOMECÂNICAS DE MATERIAIS CERÂMICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 05 de julho de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. MARCO ANTONIO DURLO TIER - UNIPAMPA - Orientador

Ma. Enga. CAMILA VARGAS CARDOSO - Membro Externa - Coorientadora

Prof. Dr. WLADIMIR HERNANDEZ FLORES - UNIPAMPA

Profa. Dra. MARILIA FERREIRA TAMIOSSO - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CAMILA VARGAS CARDOSO, Usuário Externo**, em 15/07/2023, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARILIA FERREIRA TAMIOSSO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2023, às 22:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCO ANTONIO DURLO TIER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/07/2023, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **WLADIMIR HERNANDEZ FLORES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2023, às 20:09, 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 **1185533** e o código CRC **FB61ED1D**.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me manter forte e corajosa durante toda a trajetória da graduação.

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

Agradeço especialmente a minha mãe Adriane, por ser meu porto seguro e por sempre me incentivar a ir atrás dos meus sonhos. A avó Lisa, a “mãe com açúcar” que está sempre orando e torcendo por mim.

Ao meu namorado Eduardo, pelo incentivo, companheirismo e por estar ao meu lado nos momentos delicados. A vida é boa com você.

A minha amiga Rafaela, que me acompanha desde o ensino fundamental, que me apoia, aconselha e vibra com meus sonhos realizados.

A UNIPAMPA pela excelente estrutura para realização deste trabalho e, também, a todos os professores que tive a honra de ser aluna.

Ao meu orientador professor Dr. Marco Tier que levarei como exemplo de ser humano pela alegria e pelos momentos de descontração, que fizeram total diferença para realização deste trabalho. Obrigada por toda compreensão, paciência, dedicação e leveza ao me orientar.

Aos professores Ma. Camila Vargas Cardoso, Dra. Marília Ferreira Tamiosso e Dr. Wladimir Hernandez Flores, membros da banca.

Aos engenheiros Dieison e Marcelo e as técnicas Clarissa e Raquel por todo suporte e auxílio na utilização dos laboratórios.

As meus colegas e parceiros de pesquisa Andreza, Camila, Gabriele, Guilherme e Lissandro a ajuda de vocês foi essencial para a conclusão deste trabalho. Muito obrigada!

Aos meus colegas de graduação que tive a honra de compartilhar essa trajetória até aqui, em especial, Nicoli, Bruna, Marcelo e Julianne.

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

“Todos os seus sonhos podem se tornar realidade se você tiver a coragem de persegui-los”.

Walt Disney

RESUMO

A engenharia verde preconiza o uso de resíduos de um dado processo como matéria-prima para fabricação de novos produtos, de modo que esta atividade resulte em resíduo zero. Na produção do arroz, a palha resultante da colheita é utilizada na própria lavoura como adubo e cobertura do solo para evitar a exposição deste e promover o aumento da matéria orgânica. O processamento do arroz tem como resíduo principal a casca que tem sido utilizada como fonte de energia térmica para geração de energia elétrica. A queima da casca resulta na cinza da casca de arroz (CCA) que é rica em sílica quando a queima é feita em temperaturas controladas e, desta forma, pode ser usada como matéria-prima para fabricação de vidros, polímeros e cerâmicos, entre outros. De modo semelhante, as estações de tratamento de água (ETA) têm como resíduo principal o lodo ETA que normalmente é rico em alumínio devido aos produtos químicos utilizados no processo de purificação da água. Desta forma, a CCA e o lodo ETA, podem ser utilizados como fonte de sílica e alumínio, respectivamente, para fabricação de cerâmicos refratários sílico-aluminosos, sendo esta a proposta do presente trabalho. O objetivo principal do trabalho é aprimorar as propriedades mecânicas e termomecânicas de materiais cerâmicos refratários reduzindo os custos de produção e impactos ambientais de forma a contribuir com o desenvolvimento regional. Foram fabricados corpos de provas cerâmicos utilizando argila caulim com substituição de 10% de CCA e 5, 10 e 15% de lodo ETA em massa. Avaliaram-se as propriedades físicas (porosidade aparente, absorção de água e densidade de massa), as propriedades mecânicas (resistência à tração na flexão em três pontos e resistência à compressão), bem como, as propriedades termomecânicas (resistência ao choque térmico). Além disso, foram analisadas as microestruturas dos corpos de provas através do ensaio de análise microestrutural em microscópio eletrônico de varredura (MEV) e difração de raios X. O cerâmico refratário composto apenas por argila caulim apresentou o melhor resultado nos ensaios de resistência à tração. No ensaio de resistência à compressão a cerâmica refratária com adição de 10% de CCA apresentou redução de aproximadamente 40% em comparação a amostra com 100% AC. No ensaio de choque térmico as cerâmicas compostas com lodo ETA apresentaram melhora na resistência ao choque térmico em relação a composição 10 CCA.

Palavras-Chave: Lodo de estação de tratamento de água; Cinza da casca de arroz; Aproveitamento de resíduos.

ABSTRACT

Green engineering advocates the use of waste from a given process as raw material for the manufacture of new products, so that this activity results in zero waste. In rice production, the straw resulting from the harvest is used in the crop itself as fertilizer and soil cover to avoid soil exposure and promote an increase in organic matter. Rice processing has the husk as its main residue, which has been used as a source of thermal energy for the generation of electricity. Burning the husk results in rice husk ash (RCA), which is rich in silica when burned at controlled temperatures and, therefore, can be used as a raw material for the manufacture of glass, polymers and ceramics, among others. Similarly, water treatment plants (WTP) have WTP sludge as their main waste, which is usually rich in aluminum due to the chemicals used in the water purification process. In this way, RHA and ETA sludge can be used as a source of silica and aluminum, respectively, for the manufacture of silico-aluminous refractory ceramics, which is the purpose of this work. The main objective of this work is to improve the mechanical and thermomechanical properties of refractory ceramic materials, reducing production costs and environmental impacts in order to contribute to regional development. Ceramic specimens were manufactured using kaolin clay with 10% replacement of CCA and 5, 10 and 15% ETA sludge by mass. Physical properties (apparent porosity, water absorption and mass density), mechanical properties (tensile strength in three-point bending and compressive strength) were evaluated, as well as thermomechanical properties (resistance to thermal shock). In addition, the microstructures of the specimens were analyzed through the microstructural analysis test in SEM and X-ray diffraction. The refractory ceramic composed only of kaolin clay showed the best result in the tensile strength tests. In the compressive strength test, the refractory ceramics with the addition of 10% CCA showed a reduction of approximately 40% compared to the sample with 100% CA. In the thermal shock test, the ceramics composed with ETA sludge showed an improvement in resistance to thermal shock compared to the 10 CCA composition.

Keywords: Water treatment plant sludge; Rice husk ash; Use of waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo do tratamento de água	18
Figura 2 – Processo de decantação	19
Figura 3 – Diagrama de fases SiO ₂ - Al ₂ O ₃	24
Figura 4 – Organograma da Metodologia.....	32
Figura 5 – Argila Caulim.....	33
Figura 6 – Granulometria do Lodo ETA	34
Figura 7 – Desagregação do Lodo ETA	34
Figura 8 – (a) Lodo ETA seco em estufa (b) Lodo ETA calcinado	35
Figura 9 – Granulometria do material peneirado.....	35
Figura 10 – Cinza da Casca de Arroz	36
Figura 11 – Determinação do teor de umidade.....	37
Figura 12 – Amostras testes para determinação do teor de umidade	39
Figura 13 – Matérias-primas antes da mistura.....	39
Figura 14 – Prensa hidráulica uniaxial	40
Figura 15- CPs após conformação.....	40
Figura 16 – Forno para sinterização dos CPs	41
Figura 17 – Rampa de aquecimento para sinterização	42
Figura 18 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de DMA, PA e AA.	43
Figura 19 – Realização do ensaio de resistência à tração na flexão	44
Figura 20 – Equipamento para corte linear de precisão IsoMet 4000	45
Figura 21 – CPs com dimensões reduzidas para ensaio de resistência à compressão.....	45
Figura 22 – Teflon (a) e EVA (b) para redução do atrito do aplicador de carga com os CPs..	46
Figura 23 – Realização do ensaio de resistência à compressão.....	46
Figura 24 – Processo de realização do ensaio de choque térmico.....	47
Figura 25 – Secagem dos CPs ao ar livre após resfriamento.....	47
Figura 26 - Equipamento Edwards Scancoat Pirani 501	48
Figura 27 – Equipamento EVO MA10.....	49
Figura 28 – Dimensões das partículas das matérias-primas	51
Figura 29 – Difratoograma 100AC antes da sinterização.....	52
Figura 30 - Difratoograma 100AC sinterizado.....	52
Figura 31 - Difratoograma 10CCA antes da sinterização.....	53
Figura 32 - Difratoograma 10CCA sinterizado	53

Figura 33 - Difratoograma 10CCA5LETA antes da sinterização	54
Figura 34 - Difratoograma 10CCA5LETA sinterizado	54
Figura 35 - Difratoograma 10CCA 10LETA antes da sinterização	55
Figura 36 - Difratoograma 10CCA 10LETA sinterizado	55
Figura 37 - Difratoograma 10CCA 15LETA antes da sinterização	56
Figura 38 - Difratoograma 10CCA 15LETA sinterizado	56
Figura 39 – Resultados médios de RFTA	59
Figura 40 – Corpos de Prova após o ensaio de Resistência à flexão	60
Figura 41 – Resultados médios RCTA	61
Figura 42 – CPs após ensaio de resistência à compressão	62
Figura 43 - Relação da porosidade com as propriedades mecânicas	63
Figura 44 – Resultados do ensaio de Choque Térmico	65
Figura 45 – CPs após ensaio de Choque Térmico	66
Figura 46 - Micrografias 100 AC em MEV com magnitude de 500x	67
Figura 47 - Micrografias 10 CCA em MEV com magnitude de 500x e 1000x	68
Figura 48 - Micrografias 10 CCA 5LETA em MEV com magnitude de 500x e 1000x	69
Figura 49 - Micrografias 10CCA 10LETA em MEV com magnitude de 500x e 1000x	70
Figura 50 - Micrografias 10CCA 15LETA em MEV com magnitude de 500x e 1000x	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de arroz na América Latina (2013).....	21
Tabela 2 – Classificação das matérias-primas dos cerâmicos refratários.....	26
Tabela 3 – Histórico de pesquisas com utilização da CCA.....	28
Tabela 4 – Trabalhos recentes sobre uso de CCA ou Lodo ETA.....	29
Tabela 5 – Componentes químicos da Argila Caulim.....	33
Tabela 6 – Composição química do lodo calcinado.....	36
Tabela 7 – Composição química da CCA.....	37
Tabela 8 – Nomenclatura e descrição dos cerâmicos refratários.....	38
Tabela 9 – Resultado teor de umidade.....	50
Tabela 10 – Tamanho das partículas das matérias-primas.....	51
Tabela 11 – Resultados ensaios físicos.....	57
Tabela 12 – Resultados de RFTA.....	59
Tabela 13 – Resultados de RCTA.....	61
Tabela 14 – Resultados do ensaio de Choque Térmico.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC – Argila caulim

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

CA – Casca de Arroz

CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

CCA – Cinza da Casca de Arroz

CEMP – Comissão de Estudos de Matérias-Primas;

CPs – Corpos de Prova

DRX – Difração de Raios X;

ETA – Estação de Tratamento de Água;

g – grama

h – Hora

IBGE - Índice Brasileiro de Geografia e Estatística

J – Joule

k – quilo

LETA – Lodo de estação de tratamento de água

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura;

min – Minuto

NBR – Norma Brasileira

ONU – Organização das Nações Unidas

PF – Perda ao fogo

RCT – Resistência ao choque térmico

RCTA – Resistência à compressão à temperatura ambiente

RFTA – Resistência à tração na flexão em temperatura ambiente

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SiO_2 – Óxido de Silício

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Justificativa da Pesquisa.....	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Estação de Tratamento de Água.....	17
2.2 Lodo de Estação de Tratamento de Água	19
2.3 Composição química do lodo ETA	20
2.4 Casca de Arroz	21
2.5 Cinza da Casca de Arroz	22
2.6 Composição química da CCA.....	23
2.7 Sistema SiO ₂ - Al ₂ O ₃	23
2.8 Materiais cerâmicos	24
2.8.1 Materiais cerâmicos refratários	25
2.8.2 Cerâmicos refratários sílico-aluminosos.....	27
2.9 Estudos Correlatos	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 MATÉRIAS-PRIMAS	33
3.1.1 Argila Caulim.....	33
3.1.2 Lodo de Estação de Tratamento de Água	34
3.1.3 Cinza da Casca de Arroz.....	36
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	37
3.2.1 Determinação do Teor de Umidade	37
3.2.2 Ensaio de Granulometria.....	38
3.2.3 Ensaio de Difração de Raios X	38
3.3 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS (CPS)	38
3.3.1 Preparação e Mistura das Massas Cerâmicas.....	39
3.3.2 Conformação dos CPs.....	40
3.3.3 Secagem dos CPs	41
3.3.4 Sinterização	41
3.4 ENSAIOS FÍSICOS	42
3.4.1 Densidade de massa aparente	42
3.4.2 Porosidade aparente	43

3.4.3 Absorção por Água	43
3.5 ENSAIOS MECÂNICOS	44
3.5.1 Resistência à tração na flexão em três pontos.....	44
3.5.2 Resistência à compressão.....	45
3.6 ENSAIO TERMOMECÂNICO.....	47
3.6.1 Choque Térmico.....	47
3.7 ANÁLISE DA MORFOLOGIA	48
3.7.1 Análise morfológica	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	50
4.1.1 Teor de Umidade.....	50
4.1.2 Ensaio de granulometria.....	50
4.1.3 Difração de raios X	52
4.2 ENSAIOS FÍSICOS	57
4.2.1 Porosidade aparente, absorção por água e densidade de massa.....	57
4.3 ENSAIOS MECÂNICOS	58
4.3.1 Resistência à Tração na Flexão em Três Pontos	58
4.3.2 Resistência à compressão.....	61
4.4 ENSAIO TERMOMECÂNICO.....	64
4.4.1 Resistência ao Choque Térmico.....	64
4.5 ANÁLISE MORFOLÓGICA	67
4.5.1 Análise morfológica em MEV	67
5 CONCLUSÃO.....	73
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

De forma crescente, as indústrias têm buscado soluções para a utilização dos resíduos com intuito de preservar o meio ambiente, diminuir os custos de produção, melhorar as propriedades dos produtos fabricados e, desta forma, melhorar a visibilidade e a reputação da empresa perante a população. Sendo assim, nos últimos anos, houve um crescimento na quantidade de pesquisas que visam a utilização de resíduos industriais como solução de aproveitamento para a geração de produtos com alto valor agregado (ALENCAR *et al.*, 2020).

O cultivo de arroz é um dos principais pilares da economia do estado do Rio Grande do Sul e em razão da produção em grande escala, o volume de casca de arroz oriundo do beneficiamento é elevado. Em função de sua baixa densidade ocupa grandes áreas quando depositada e, devido a sua lenta biodegradação, permanece inalterada por longos períodos de tempo, sendo prejudicial ao meio ambiente (DELLA; KUHN; HOTZA, 2005).

Em função de seu elevado poder calorífico (16720 kJ/kg) (DELLA, 2001), a casca de arroz tem sido queimada em caldeiras para secagem do próprio cereal nas usinas de beneficiamento do grão e na geração de energia elétrica em termoelétricas. O processo gera como subproduto a cinza da casca de arroz (CCA) que, quando queimada em temperatura controlada apresenta alta porcentagem de sílica (>90%).

Diversos estudos têm sido realizados sobre a utilização da CCA, principalmente na área da construção civil. Pode ser usada como matéria-prima na fabricação de concreto, cimento, argamassas, vidros e cerâmicos, contribuindo para melhorar a resistência mecânica, viscosidade e tempo de endurecimento dos produtos. Ademais, a CCA também tem sido empregada na indústria da cerâmica (DELLA, 2001).

Outro resíduo com potencial para reutilização é o lodo de Estação de Tratamento de Água (lodo ETA), proveniente do tratamento da água em estações de tratamento de água. Esse resíduo geralmente é rico em óxido de alumínio devido aos produtos químicos utilizados no processo de coagulação/floculação. Comumente, o lodo ETA é descartado nos corpos hídricos, causando efeitos negativos ao meio ambiente.

Desse modo, utilizar a CCA como fonte de sílica e o lodo ETA como fonte de alumina para fabricar cerâmicas refratárias sílico-aluminosas é uma alternativa para reduzir os custos de produção e os impactos ambientais. Os resultados que serão obtidos neste trabalho através dos ensaios físicos, mecânicos e termomecânicos corroboram como base para análise da qualificação e potencialidade da fabricação destes materiais em grande escala.

A Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) é referência no estudo das aplicações da CCA. Sobrosa (2014), estudou materiais com base de argila e substituição de 5, 10 e 20% de CCA e, constatou que os cerâmicos tiveram aumento na resistência mecânica, mas redução termomecânica no ensaio de resistência ao choque térmico. Os resultados dos ensaios foram satisfatórios individualmente.

Com intuito de melhorar a resistência ao choque térmico, Stochero (2015), estudou sobre o desenvolvimento de cerâmica refratária com fibra de aço e CCA. A resistência ao choque térmico aumentou com a adição de 3 e 6% uso de fibras. Apesar de apresentar melhora nos resultados, a fibra de aço é um material de valor mais elevado, sendo contraditório ao uso e propósito da CCA que é um produto de baixo valor comercial.

Para conciliar os benefícios socioeconômicos e ambientais, Petterle (2018) foi um dos pioneiros na utilização da CCA e lodo ETA para fabricação de placas cerâmicas. A CCA e o lodo ETA inseridos na massa cerâmica a base de argila caulim, proveu placas cerâmicas com excelentes propriedades termomecânicas. Porém a adição de lodo ETA ocasionou na perda de resistência a compressão.

Observa-se que o principal desafio ao adicionar CCA e lodo ETA em massas cerâmicas a base de argila é obter resultados satisfatórios em todos os ensaios realizados. Sendo assim, a proposta do presente trabalho é identificar as porcentagens ideais para obter resultados eficientes de modo geral.

1.1 Justificativa da Pesquisa

A revolução industrial foi um marco para a sociedade, quando a população migrou do campo para a cidade em busca de empregos e de uma qualidade de vida melhor. Com o crescimento exponencial do meio urbano, aumentaram, também, os danos aos recursos hídricos à fauna e à flora. Atualmente, as empresas estão cada vez mais atentas em minimizar os impactos ambientais e reduzir de custos de produção, melhorando a relação com a sociedade e meio ambiente (GANZALA, 2018).

De acordo com a pesquisa realizada pela Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2022), 91% das empresas entrevistadas têm interesse em reduzir resíduos sólidos nas linhas de produção industrial. Outrossim, os pesquisadores estão progressivamente em busca de alternativas para a utilização de materiais oriundos de processos agroindustriais, como é o caso da CCA e o Lodo de Estação de Tratamento de Água (lodo ETA).

O Estado do Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz da América Latina, atividade que desempenha um importante papel econômico e social. Neste sentido, a região da fronteira

oeste possui destaque, em especial os municípios de São Borja, Itaqui, Uruguaiiana, Dom Pedrito, Alegrete e São Gabriel.

Termoelétricas que utilizam a casca de arroz como fonte de energia térmica para a geração de energia elétrica estão presentes na fronteira oeste. Alegrete, por exemplo, possui a usina da Cooperativa Agroindustrial de Alegrete Ltda (CAAL) e a usina da empresa Sílica Verde do Arroz vinculada ao grupo Pilecco Nobre.

A CCA subproduto da queima da casca, é um produto rico em sílica, enquanto o lodo ETA, subproduto derivado das estações de tratamento de água é rico em alumínio. Assim, essas matérias-primas de baixo custo, podem ser empregadas na fabricação de cerâmicos refratários silico-aluminosos.

Em vista disto, com o intuito de aproveitar resíduos agroindustriais e minimizar os impactos ambientais, o presente trabalho, pretende empregar a CCA e o lodo ETA como matérias-primas em substituição à argila caulim na fabricação de cerâmicos refratários. Almeja-se, assim, melhorar as propriedades mecânicas e termomecânicas dos materiais cerâmicos refratários, evitar o descarte de lodo ETA nos leitos dos rios e contribuir para o ciclo da produção do arroz com resíduo zero, conforme preconizado pela Engenharia Verde.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar os benefícios da substituição da matéria-prima natural (argila caulim) pelos resíduos oriundos da queima da casca de arroz e das estações de tratamento de água nos materiais cerâmicos refratários.

1.2.2 Objetivos específicos

- Fabricar cerâmicos refratários utilizando lodo ETA (5, 10 e 15 %) e a Cinza da Casca de Arroz (10 %) em substituição à Argila Caulim.
- Avaliar as propriedades físicas das amostras através dos ensaios de Porosidade Aparente, Absorção de Água e Densidade de Massa.
- Avaliar as propriedades mecânicas das amostras através do ensaio de Resistência à Compressão e Resistência à Tração na Flexão em Três Pontos.
- Avaliar as propriedades termomecânicas das amostras através do ensaio de Choque Térmico.
- Analisar a microestrutura das amostras através do ensaio de difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estação de Tratamento de Água

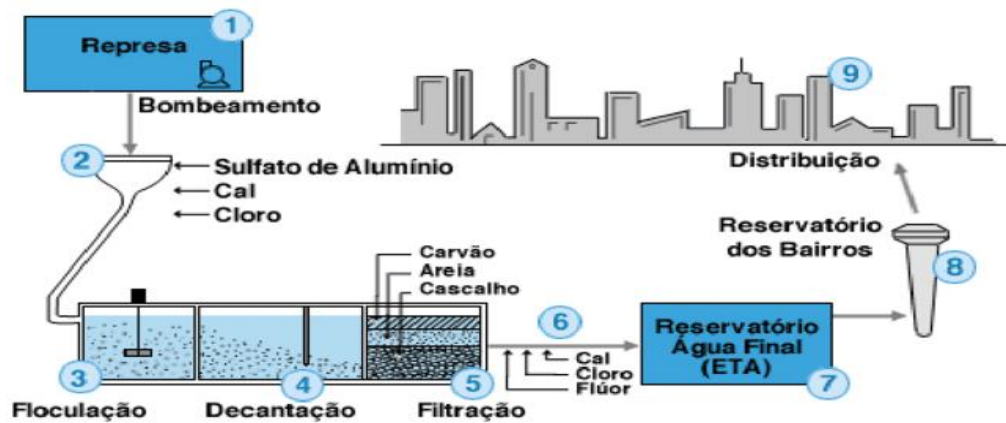
A água é de extrema importância para sobrevivência humana e, desde o ano de 2010, por meio da Resolução n° 64/292, é reconhecida como direito humano pela ONU. A água bruta (encontrada em rios, lagos, barragens e etc.) não é recomendada para consumo humano, pois há grande concentração de microrganismos, impurezas e compostos orgânicos que podem ser causadores de doenças. Aproximadamente 40% da população mundial não possui acesso à água potável (ONU, 2020). Portanto, para que a água atenda ao padrão de potabilidade, necessita ser submetida a processos químicos e físicos (BRASIL, 2011).

O controle e a vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade é estabelecido Anexo XX da Portaria de Consolidação n°5. Desse modo, com intuito de avaliar os riscos à saúde humana em relação à qualidade da água para o consumo, os responsáveis pelo controle de qualidade da água devem coletar no ponto de captação, amostras semestrais da água bruta para realizar a análise de acordo com os parâmetros exigidos nas legislações específicas (BRASIL, 2017).

Segundo a pesquisa nacional de saneamento básico do ano de 2017, realizada pelo o IBGE, no Brasil há 5548 municípios com rede de distribuição de água, sendo que o volume de água tratada por dia é de aproximadamente 43 milhões de m³ e o consumo diário de 26 milhões de m³, sendo todo o tratamento da água bruta realizado em Estações de Tratamento da Água (ETA). De modo a garantir as condições exigíveis na elaboração de ETAs necessita seguir os parâmetros da norma vigente NBR 12216 – Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público.

As ETAs são locais destinados ao tratamento e purificação da água bruta, tornando-a própria para consumo. A água, ao ser tratada, tem como objetivo atender aspectos higiênicos (remoção de bactérias, protozoários, vírus, entre outras impurezas), estéticos (correção da cor, sabor e odor) e econômicos (redução de corrosividade, ferro, manganês, cor e turbidez) (CAESB, 2022). Ainda, quando a fonte de abastecimento é proveniente de corpo hídrico superficial, para chegar ao abastecimento público, a água passa por diversos processos de tratamento, como exemplo, a pré-cloração, pré-alkalinização, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (SABESP, 2022). O esquema do processo do tratamento convencional de água é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Processo do tratamento de água



Fonte: SABESP (2022)

Geralmente, o primeiro processo realizado no tratamento da água, é o de pré-cloração, que resulta em inserir cloro à água para remover as impurezas, por exemplo, matérias orgânicas e metais. Na pré-alcalinização a cal ou a soda é incorporada na água para regularização do pH, afim de compatibilizar os valores com as demais etapas. A coagulação, é uma fase físico-química, onde o sulfato de alumínio, cloreto férrico ou outro tipo de coagulante, é adicionado à água em um processo de mistura rápida, permitindo a formação de coágulos (ROSCHID, 2016). Após a formação de coágulos, inicia uma nova fase denominada floculação.

No processo de floculação, ocorre a mistura lenta da água, onde os coágulos colidem-se uns aos outros, aglomerando-se em massas maiores e mais pesadas, denominando-os de flocos, para que possam sedimentar por gravidade. A decantação ou sedimentação, é a fase responsável pela separação das partículas sólidas do meio líquido, ou seja, a água percorre grandes tanques com uma velocidade lenta, onde os flocos formados na fase anterior agora com maior peso, depositam-se no fundo dos tanques decantadores. As partículas menores que não são retidas na sedimentação, deverão ser removidas na fase de filtração (RICHTER, 2007).

Os filtros são compostos de meios porosos, como exemplo, areia, seguido ou não de carvão, e pedregulho ou cascalho e tem como objetivo remover as impurezas restantes da água que passaram pelo processo anterior. Conforme a água passa pelos filtros, os flocos que ainda restam ficam retidos na camada superficial (ROSCHILD, 2016). A água, antes de ser distribuída a população, passa pela última fase denominado tratamento simplificado, ou seja, é adicionado cloro para a sua desinfecção, e o flúor. Conforme a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA), a fluoretação da água para consumo humano é eficaz, pois além de reduzir os casos de cárie dental em 50% e 65%, analisados em crianças desde o nascimento até aproximadamente dez anos, é uma medida preventiva, segura, econômica e adequada.

É imprescindível a importância do tratamento da água para a qualidade de vida populacional, visto que reduz a contaminação da água evitando a transmissão de doenças. Porém, durante seu ciclo, os tanques decantadores e os filtros acumulam uma grande quantidade de flocos provenientes da coagulação/floculação, sendo denominado lodo de Estação de Tratamento de Água (lodo ETA). Conseqüentemente, o resíduo gerado é prejudicial ao meio ambiente devido a adição de óxido de alumínio para o tratamento de água.

2.2 Lodo de Estação de Tratamento de Água

O processo de produção de água potável gera o resíduo lodo ETA, que é constituído de água, sólidos suspensos e dissolvidos, e dos compósitos químicos utilizados no tratamento, principalmente óxido de ferro e óxido de alumínio, coagulantes adicionados no processo de purificação da água. As principais fontes de lodo são oriundas do processo de decantação e da lavagem de filtros. Na decantação ocorre a remoção das partículas sólidas em suspensão e dissolvidas, ou seja, consiste na utilização da força gravitacional para depositar na base do reservatório os flocos com densidade superior à água (RICHTER; NETTO, 2007).

O procedimento utilizado para a remoção do lodo nos tanques de decantação pode ser de forma manual ou mecanizada. Nos decantadores convencionais, geralmente, a limpeza ocorre de forma manual, onde o decantador é esvaziado e, posteriormente, efetuada a lavagem do mesmo por jateamento de água sob pressão para remover o restante do lodo que permanece no fundo. Na maior parte dos casos, os locais de disposição dos resíduos são em curso d'água mais próximos à ETA. Os decantadores são limpos em intervalos de tempo de 30 à 120 dias, dependendo da qualidade da água bruta a ser tratada (PROSAB, 1999). A funcionalidade de um decantador pode ser observado na Figura 2, onde mostra o acúmulo do lodo ETA.

Figura 2 – Processo de decantação



Fonte: Roschild (2016).

Segundo a pesquisa realizada pelo IBGE (2017), dos 2665 municípios explorados, em 38,65% a destinação final do lodo das ETAs ocorre em corpos d'água, 15,53% em aterro sanitário, 8,93% terreno baldio, lixão e aterro, 3,15% em estação de tratamento de esgoto, 1,27% insumo para agricultura, 0,34% na construção civil, 6,04% em outras fontes e 26,07% não se aplica.

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004) o lodo ETA é considerado resíduo sólido e não deve ser descartado na natureza sem o devido tratamento, porém, no Brasil, a realidade é outra. O descarte incorreto do lodo ETA sem o tratamento prévio acarreta em diversos problemas ao meio ambiente, como exemplo, degradação da qualidade ambiental, aumento da turbidez e diminuição do oxigênio dissolvido na água e a presença de metais pesados (alumínio e ferro), responsáveis pelas alterações físico-químicas e biológicas na água. Além da toxicidade que pode originar doenças cardiovasculares e deficiências renais nos seres humanos (SOARES; ACHON; MEGDA, 2004).

O equilíbrio entre o meio ambiente, a sociedade e a economia são de extrema importância para que seja possível atender as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer as suas necessidades (NBR ISO 14001, 2015). Com intuito de reduzir os custos e os impactos ambientais, estudos para a aplicação do lodo ETA estão cada vez mais aprofundados, sendo que a construção civil possui a área mais contemplada na incorporação do lodo em materiais cerâmicos (PAIVA; MOREIRA; SOARES, 2016).

2.3 Composição química do lodo ETA

A composição do lodo ETA está diretamente ligada aos processos químicos utilizados para o tratamento da água bruta sendo que possui elevados teores de óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) (PETTERLE *et al.*, 2018). Pela visão mineralógica, é constituído de caulinita, mica, sílica e gibsita. O resíduo apresenta morfologia irregular das partículas e larga distribuição de tamanho de partículas entre 1 até 425 μm (OLIVEIRA; MACHADO; HOLANDA, 2004).

O lodo ETA por ser um material aluminossilicato (Al_2SiO_5) pode ser substituído em partes em produtos à base de argila, com intuito de minimizar e preservar a matéria-prima encontrada na natureza. Segundo Callister (2002), comercialmente, o sistema sílica-alumina é um sistema importante, visto que esses dois materiais são os principais constituintes de muitas cerâmicas refratárias.

2.4 Casca de Arroz

O arroz é de extrema importância econômica e social, visto que é cultivado e consumido em todos os continentes e também, é alimento básico para cerca de 2,5 bilhões de pessoas (EMBRAPA, 2021). Na América Latina, o Brasil se destaca no consumo de arroz, como observado na Tabela 1, sendo este grão parte da cultura alimentar e geralmente consumido diariamente na refeição principal.

Tabela 1 – Consumo de arroz na América Latina (2013)

País do Bloco	Consumo (toneladas)	Demanda por calorias (Kcal/per capita/dia)	Demanda por proteína (g/per capita/dia)
Argentina	545.064	90	1,81
Bolívia	431.835	286	5,65
Brasil	9.650.828	326	6,44
Chile	233.717	86	1,70
Colômbia	2.029.655	285	5,63
Equador	1.063.492	425	8,40
Paraguai	50.074	50	0,98
Peru	2.227.954	519	10,26
Uruguai	58.764	116	2,29
Venezuela	1.066.390	224	4,43

Fonte: EMBRAPA

De acordo com o boletim AgroExport, o Rio Grande do Sul é responsável por mais de 70% da produção nacional do cereal, sendo os municípios do sul e sudoeste os principais produtores, diante disso, em 2021 o estado produziu aproximadamente 8 milhões de toneladas de arroz (IBGE, 2021). O processo industrial do arroz gera alguns resíduos, dentre eles, a Casca do Arroz (CA) que é responsável por cerca de 20% do peso total do grão (MURARO; CAMELO; DENIS, 2018).

De acordo com Foletto *et al.*, (2005), a casca é a camada mais externa do grão e sua formação tem três principais componentes orgânicos: celulose, lignina e hemicelulose. A CA quando depositada ocupa grandes áreas devido ao seu elevado volume e baixa densidade. Além disso, a biodegradação ocorre lentamente, contribuindo negativamente para o meio ambiente (DELLA; KUHN; HOTZA, 2005). Tratando-se de um subproduto agroindustrial abundante, a busca por soluções para a aplicação desse resíduo é uma alternativa de extrema notabilidade.

Utilizar a CA como cobertura inerte de solo, é uma possibilidade viável, pois age como um condicionador físico do solo, promovendo melhores resultados em comparação a areia e

serragem (UFRGS, 2005). Além disso, a CA pode ser empregada no concreto, na substituição de agregados miúdos (JUNIOR, 2020).

No entanto, o maior potencial da CA é a geração de energia elétrica devido ao seu alto poder calorífico de cerca de 16,3 MJ/kg e pequeno impacto ambiental, pois todo CO₂ produzido na queima volta para o ciclo de carbono da biosfera, sendo uma alternativa atrativa tanto do ponto de vista econômico quanto tecnológico. (DINIZ, 2004; LOPES *et al.*, 2017).

Algumas empresas da área de alimentos possuem o sistema de geração de energia térmica e elétrica, em temperaturas estáveis, que permite a manutenção do estado amorfo da sílica contida na CA. Após a queima da CA para a geração de energia resta o resíduo denominado Cinza da Casca de Arroz (CCA).

2.5 Cinza da Casca de Arroz

A CCA corresponde cerca de 15% da massa da casca de arroz (GONÇALVEZ; BERGMANN, 2007). Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) a CCA é classificada como um resíduo não inerte (classe II A) e não perigoso, mas quando destinado a locais impróprios pode causar prejuízos ao meio ambiente.

As pesquisas para utilização de resíduos estão deixando de ser uma alternativa para tornar-se uma necessidade devido as consequências das atividades humanas e industriais. A CCA possui elevada concentração de sílica (>92%), mostrando-se um subproduto valorizado (FOLETTTO *et al.*, 2005). Atualmente, há diversos estudos sobre a aplicabilidade da CCA em ramos industriais, como exemplo, construção civil, eletrônica, cerâmica, indústria química, fabricação de células fotovoltaicas, entre outros (FOLETTTO *et al.*, 2005).

Contudo, para a CCA manter suas características ideais para aplicação, há necessidade de controle de queima da CA, pois o processo de combustão interfere diretamente nas características química, física e microestruturais das cinzas (KIELING *et al.*, 2010). A queima controlada ocorre em temperaturas máximas de 1000°C, sendo que ao atingir temperaturas entre 450 a 700°C resulta em sílicas no estado amorfo, ou seja, suas propriedades são baixa condutividade térmica e elevada resistência ao choque térmico (FERRO; SILVA, 2007).

A empresa que realiza a queima controlada da CA pode se encaixar no programa fundado no Brasil no ano de 1970, denominado Resíduo Zero, o conceito é inspirado nos ciclos naturais de vida, eficientes e sustentáveis, em que tudo é transformado em outros recursos, sem desperdícios e sobras. Por exemplo, a empresa Pilecco Nobre que além de ser autossuficiente, exportar energia limpa com certificação e emissão de créditos de carbono, também, produz sílica de CA com estabilidade e qualidade para aplicação na construção civil.

2.6 Composição química da CCA

Como visto no capítulo 2.5, a composição química da CCA apresenta elevada concentração de sílica (óxido de silício – SiO_2). O silício está presente em 27,7% da crosta terrestre, sendo um dos elementos mais abundantes da natureza, perdendo apenas para o oxigênio (PEIXOTO, 2001).

A sílica tem grande aplicabilidade como matéria prima devido as suas características típicas, como exemplo, alta refratariedade, resistência a ataques químicos e choque térmico, resistência mecânica e baixa condutividade térmica (FONSECA, 1999).

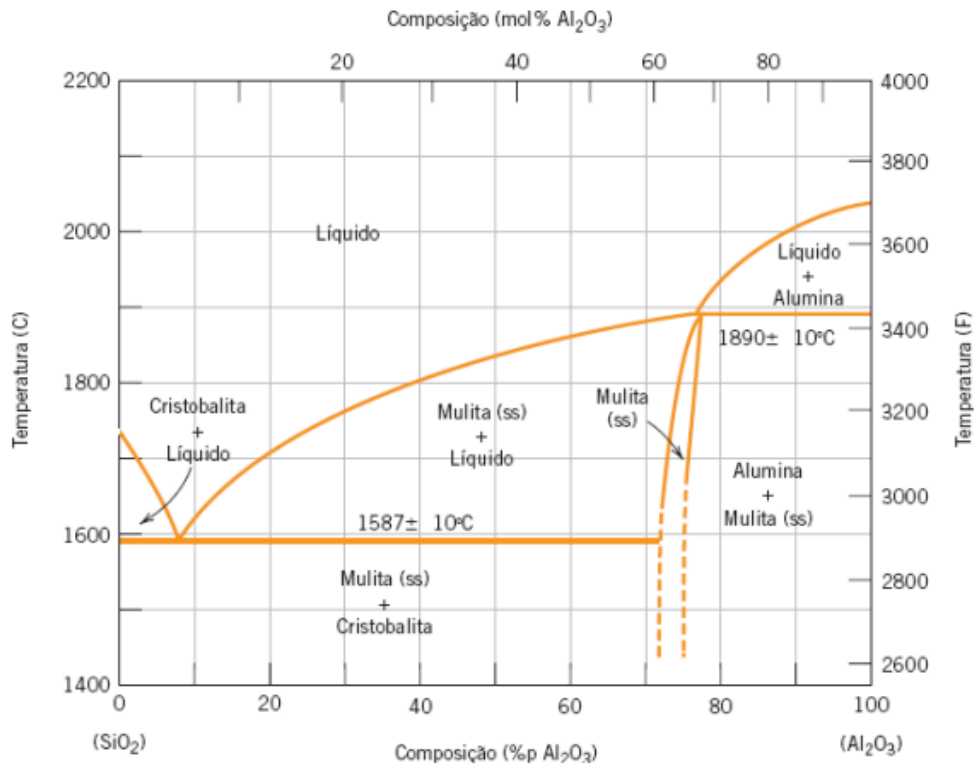
De acordo com Della *et al.* (2006), na indústria cerâmica, a sílica é principalmente utilizada como matéria prima para fabricação de vidros, refratários, tubos cerâmicos, isolantes térmicos e abrasivos e na indústria da construção civil para fabricação de cimentos, argamassas e concretos.

2.7 Sistema SiO_2 - Al_2O_3

Supracitado no tópico 2.3, comercialmente o sistema sílica-alumina é importante, visto que estes dois materiais constituem grande parte dos cerâmicos refratários. O sistema SiO_2 - Al_2O_3 pode ser observado na Figura 3. Segundo Callister (2018), a sílica e a alumina não são mutualmente solúveis entre si, o que explica a ausência de soluções sólidas terminais em ambas as extremidades do diagrama de fases.

A cristobalita é a forma polimórfica da sílica que é estável em temperaturas elevadas. Segundo Quevedo (2020), por volta da temperatura de 1200°C ocorre à formação da cristobalita, devido à cristalização da sílica. A cristobalização é um fenômeno comum ao se tentar obter mulita a partir de fontes de alumina e sílica amorfa (MAGLIANO, M.V.M; PANDOLFELLI, V.C., 2010).

De acordo com Magliano e Pandolfelli (2010), em temperaturas superiores a 1500°C os picos de cristobalita dissipam completamente e os picos de mulita elevam sua intensidade. Pode ser observado na Figura 3, que a mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) é um composto intermediário que aparece em um estreito campo de fases e se funde a 1890°C de maneira incongruente.

Figura 3 – Diagrama de fases SiO₂ - Al₂O₃

Fonte: Callister (2018).

Para Medeiros *et al.* (2016), a mulita tem se qualificado como uma das fases mais importantes para as cerâmicas refratárias da atualidade devido as propriedades notáveis, como exemplo, alto ponto de fusão, elevado módulo de ruptura, boa resistência ao choque térmico, a erosão e ao ataque químico e, também, ao baixo coeficiente de expansão térmica.

2.8 Materiais cerâmicos

A cerâmica – do grego “kéramos” significa “matéria queimada” – é um material de imensa resistência que necessita da alta temperatura para seu endurecimento. Há vestígios que a cerâmica está presente na vida do homem desde a pré-história, devido à necessidade da população em utilizar vasilhas para armazenamento de água e alimentos. Atualmente, os objetos cerâmicos são encontrados frequentemente em escavações arqueológicas (BRITO, 2011).

Hoje em dia, uma nova geração de materiais foi desenvolvida, e o termo cerâmica tem um significado mais amplo devido as suas propriedades únicas e são aplicados em diversas áreas, como exemplo, indústrias de componentes eletrônicos, computadores, comunicação, aeroespacial e uma gama de outras indústrias que dependem do uso desses materiais (CALLISTER, 2018).

A argila é uma das matérias-primas mais utilizadas para a produção dos diversos produtos cerâmicos devido a sua plasticidade, boa resistência mecânica após a queima, técnicas simples de processamento e a grande disponibilidade de material (JUNIOR, 1999). Para Callister (2018), os materiais cerâmicos são compostos formados entre elementos metálicos e não metálicos, possuindo ligações interatômicas predominantemente iônicas, mas com alguma natureza covalente.

Os materiais cerâmicos podem ser classificados como cristalinos, não-cristalinos ou a combinação de ambos. Devido ao arranjo atômico e das ligações químicas presentes, os materiais cerâmicos apresentam elevada resistência mecânica, alta fragilidade e dureza, grande resistência ao calor e, principalmente, são isolantes térmicos e elétricos (BOEIRA, 2007).

2.8.1 Materiais cerâmicos refratários

As cerâmicas refratárias são os materiais que têm como características a resistência a elevadas temperaturas sem sofrer fundição ou decomposição, e a capacidade em permanecer inertes e não reativos quando expostos a ambientes severos (CALLISTER, 2018). Os refratários são de extrema importância para a fabricação de outros materiais, podendo ser aplicados na fabricação de ferro, aço, metais não ferrosos, ligas, fundições, indústrias petroquímicas, indústrias de cimentos, geração de energia, entre outros. (OLIVEIRA; RODRIGUES; PEREIRA, 2018).

O desempenho dos materiais refratários depende das características das composições presentes e, também, do processo de fabricação. Os cerâmicos refratários são produzidos a partir da argila caulim, matéria-prima que promove a alta refratariedade. A argila caulim é constituída de 36,50% de Al_2O_3 , 46,54% de SiO_2 e 13,96% de H_2O . Durante a queima da cerâmica em temperaturas superiores a $1000^\circ C$, o caulim converte-se em mulita, formando uma fase vítrea que contribui para o aumento da resistência mecânica (DA LUZ, *et al.*, 2008).

Para Schuller, Bianchi e Aguiar (2018), os principais fatores que prejudicam a resistência mecânica dos corpos cerâmicos são as trincas e a porosidade indesejada. Tanto as trincas quanto a porosidade são formados a partir da diferença entre o coeficiente de dilatação entre as partículas de fases cristalinas com a matriz e presença de material orgânico na massa cerâmica durante a queima.

A porosidade é uma variável microestrutural que necessita de controle para a produção de um material refratário. Com a redução da porosidade, aumentam a resistência mecânica, a capacidade de suportar carga e a resistência ao ataque por materiais corrosivos, porém, as

características da resistência ao choque térmico e de isolamento térmico são diminuídas (CALLISTER, 2018).

Segundo a NBR 10237 (ABNT, 2014), os materiais cerâmicos refratários podem ser classificados sob diversos aspectos, como exemplo, conformados quando o elemento cerâmico apresenta forma definida ou, os não conformados, quando é utilizado em argamassas e concretos densos e isolantes. Ademais, outra classificação é em relação à natureza química e mineralógica dos constituintes, sendo, ácidos, básicos, neutros ou especiais, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação das matérias-primas dos cerâmicos refratários

Classe quanto à natureza química e mineralógica dos constituintes	
Grupo	Classe
Ácidos	Silicosos ou de sílica
	Silicoaluminosos ou de sílica-alumina
Básicos	Magnesianos ou de magnésia
	Magnesiano-cromíticos ou de magnésia-cromita
	Cromomagnesianos ou de cromita-magnésia
	Dolomíticos ou de dolomita
Neutros	De magnésia-carbono
	Aluminosos ou alumina
	De magnésia-carbono
	De alumina-carbeto-carbono ou de silício carbono
	Aluminosos cromíticos ou de alumina-cromita
	Cromíticos ou de cromita
	De carbono
Grafíticos ou de grafita	
Especiais	De carbeto de silício
	De cordierita
	De mulita

Fonte: NBR 10237 (ABNT, 2017).

O foco principal deste trabalho são o grupo dos refratários ácidos. Segundo Sobrosa (2014), os refratários ácidos são cerâmicos constituídos de SiO_2 e Al_2O_3 , e resistem a temperaturas elevadas (cerca de 1700°C), são resistentes à escórias ricas em sílicas, porém, reagem e resistem pouco às escórias básicas. Esse grupo pode ser subdividido em silicosos e sílico-aluminosos.

2.8.2 Cerâmicos refratários sílico-aluminosos

Os cerâmicos refratários sílico-aluminosos são constituídos de argilas refratárias de alta pureza, contendo geralmente entre 25% a 45% de alumina, característica que aumenta a refratariedade do material (CALIARI, 2018). Segundo Newell (2010), esse material possui também entre 50% e 70% de sílica, e a presença de menos de 5% do total do material de CaO, Fe₂O₃, MgO e TiO₂, sendo considerados impurezas, principalmente o óxido de ferro (Fe₂O₃). Estes materiais são utilizados devido aos seus benefícios econômicos quando comparados a outros refratários especiais.

O diagrama de fases da Figura 3, mostra duas das principais fases mineralógicas do sistema SiO₂ - Al₂O₃, porém, entre a fase cristobalita e mulita, existe a fase quartzo. Nas condições ambientes, a sílica ocorre na forma de quartzo- α , sem alterar os valores de pressão, mas acima de 573°C torna-se instável e se transforma em outra fase denominada quartzo- β . Este mineral resiste a temperatura de 870°C e, posterior a esta, modifica-se para tridimita, que é estável até 1470°C. Ultrapassando esta temperatura, a tridimita converte-se em cristobalita (VICTORIA, 2018).

Na ocorrência de mudança de fases de quartzo- α para quartzo- β acontece o aumento de volume, sendo prejudicial para o material, pois provoca o aumento de tensões internas, podendo ocasionar trincas na peça (ZAUBERAS; RIELLA, 2001).

2.9 Estudos Correlatos

Na década de 70 foi reconhecido o primeiro estudo sobre a aplicabilidade da CCA em concretos. Desde então, as pesquisas sobre o assunto vêm comprovando a viabilidade de sua aplicação em diversas áreas, sobretudo, na construção civil. A adição da CCA em concretos e argamassas ocorre em razão de ser uma matéria-prima de baixo custo, abundante e de origem renovável (PEREIRA *et al.*, 2021). A Tabela 3 mostra um histórico da utilização da CCA.

É importante ressaltar que diversos trabalhos utilizados como referência para esta pesquisa foram elaborados na Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, principalmente, realizados por autores do programa de pós graduação em engenharia (PPEng). A instituição vem se destacando pelos estudos de cerâmicas refratárias utilizando substituição de CCA e, também, agregando a outras substituições, como exemplo, alumina calcinada, microfibras de wollastonita, fibras de aço e lodo ETA (NUNES, 2017; SANTOS, 2017; SOBROSA *et al.*, 2017; STOCHERO *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2018; PETTERLE *et al.*, 2018; CENCI *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020; QUEVEDO *et al.*, 2021; CARDOSO, 2022; AZOLIM, 2022).

Tabela 3 – Histórico de pesquisas com utilização da CCA

Ano	Autor	Pesquisa(s)
1973	METHA	Primeira Patente no Assunto
1978	METHA E PIRTZ	Substituição de Cimento Portland por CCA em concretos
1979	PRAKASH	Utilização de CCA em produtos de alvenaria e fundações
1981	COOK	Estudo da fluência e retração de concretos com a adição de CCA
1986	JAMES E RAO	Morfologia e características químicas e físicas da CCA
1994	METHA	Patente relativa a produtos altamente duráveis com o emprego de 5 a 30% de CCA substituindo o cimento
1995	ISAIA	Efeito de misturas binárias e ternárias de Pozolanas em Concreto de Alto Desempenho
1997	DONDI <i>et al.</i>	Reciclagem de resíduos industriais e urbanos na produção de tijolos – Uma Revisão
2001	PAYA <i>et al.</i>	Determinação da sílica amorfa na CCA por método analítico
2001	RÊGO	Viabilidade Técnica da utilização da CCA como adição mineral ao cimento
2003	AKSEL	O efeito da mulita nas propriedades mecânicas e choque térmico comportamento de materiais refratários alumina-mulita
2003	PRUDENCIO <i>et al.</i>	Revisão sobre CCA e processos para obtenção de sílica da CA
2004	SILVA	Conceito de Maturidade em concretos com adição da CCA
2005	FOLETTO <i>et al.</i>	Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz
2006	TASHIMA	CCA altamente reativa: método de produção, caracterização e comportamento em matrizes de cimento Portland
2007	ANDREOLA	Valorização da CA como matéria prima na indústria cerâmica
2008	HOPPE	Carbonatação em concreto com CCA sem moagem
2008	MENEZES <i>et al.</i>	Obtenção de mulita porosa a partir da sílica da casca de arroz e do acetato de alumínio
2009	SILVA	Contribuição para utilização de CCA na construção civil
2009	GONÇALVES <i>et al.</i>	Síntese e caracterização de mulita utilizando sílica obtida da casca de arroz
2010	REGAILO <i>et al.</i>	Estudo do efeito da influência do tamanho de partículas de alumina adicionadas em porceladas triaxiais
2011	BEZERRA <i>et al.</i>	Aplicação da CCA em argamassas de assentamento
2014	SOBROSA	Desenvolvimento de Cerâmicos Refratários com CCA
2015	GOMES <i>et al.</i>	Concreto de cimento Portland tipo III e sílica da casca de arroz (SCA)
2015	WOLFF <i>et al.</i>	Aproveitamento do lodo da estação de tratamento água em cerâmica estrutural
2017	STOCHERO <i>et al.</i>	Desenvolvimento de cerâmicas refratárias com CCA e fibras de aço
2017	NUNES	Desenvolvimento de cerâmicas refratárias com CCA, flocos cerâmicos e fibras de aço
2017	EWAIS <i>et al.</i>	Tijolos refratários isolantes de lodo de tratamento de água e cinza de casca de arroz
2018	CAMARGO <i>et al.</i>	Revisão: influência dos processos de queima na composição da CCA visando produção de sílica
2018	PETTERLE <i>et al.</i>	Fabricação de placas cerâmicas contendo lodo de ETA e CCA
2018	HOSSAIN <i>et al.</i>	Casca de arroz/cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica em cerâmica: uma revisão
2019	ZHU <i>et al.</i>	Influência da CCA nas propriedades impermeabilizantes do geopolímero de cinzas volantes ultrafinas

Fonte: Quevedo (2020).

Além disso, a CCA apresenta resultados satisfatórios na incorporação de materiais cerâmicos refratários, ajudando na melhoria das propriedades mecânicas e termomecânicas. Sobrosa (2014), constatou que materiais cerâmicos com substituição de 10% de argila por CCA, apresentam melhor resistência mecânica e durabilidade sem diminuir a resistência ao choque térmico, fator de extrema importância aos cerâmicos refratários devido a elevadas temperaturas em que são expostos.

Devido a sua composição, os materiais cerâmicos refratários também podem ser substituídos parcialmente pelo lodo de estação de tratamento de água (lodo ETA), resíduo que agrega nas propriedades mecânicas e termomecânicas das cerâmicas. Petterle (2018), produziu placas cerâmicas a base de argila caulim (AC) com substituição por diferentes porcentagens de CCA e lodo ETA (100% AC; 80% AC e 20% CCA; 72% AC e 18% CCA; 64% AC e 16% CCA; 56% AC e 14% CCA; e 50% CCA e 50% lodo ETA). Constatou-se que a composição de 72% AC, 18% CCA e 10% LETA (AR20/10), atendeu o melhor conceito de sustentabilidade e reaproveitamento de resíduos. Também, a adição de CCA e de lodo ETA forneceram placas cerâmicas com excelentes propriedades termomecânicas. A Tabela 4 apresenta o estudo correlato sobre a CCA ou lodo ETA.

Tabela 4 – Trabalhos recentes sobre uso de CCA ou Lodo ETA.

Ano	Autor	Pesquisa(s)
2020	Quevedo	Estudo das propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias derivadas da cinza da casca de arroz e alumina calcinada
2020	Junior	Estudo das propriedades mecânicas do concreto com substituição parcial do agregado miúdo pela casca de arroz in natura
2020	Nieswald <i>et al</i>	Desenvolvimento de materiais cerâmicos refratários empregando sílica residual da casca de arroz
2020	Mendonça <i>et al</i>	Compósitos cerâmicos de argila refratária, sílica da casca de arroz e fibras: avaliação das propriedades
2020	Ruviaro <i>et al</i>	Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar
2020	Da Silva <i>et al</i>	Estudo comparativo de custos entre o tijolo de solo-cimento, tijolo de solo-cimento com incorporação de lodo de estação de tratamento de água e o tijolo cerâmico
2022	De Paulo <i>et al</i>	Reciclagem de materiais refratários em massas básicas e suas contribuições para um futuro sustentável
2022	Oliveira <i>et al</i>	Influência da granulometria do agregado na resistência ao choque térmico de refratário de alta alumina
2022	Silveira	Efeito da temperatura e do tempo de sinterização nas propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias fabricadas com cinza da casca de arroz
2022	Cardoso	Avaliação das propriedades mecânicas e termomecânicas em compósitos cerâmicos refratários utilizando cinza da casca de arroz e lodo de estação de tratamento de água
2022	Azolim	Influência do Lodo de estação de tratamento de água nas propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias fabricadas com cinza da casca de arroz

Fonte: Autoria Própria

Quevedo (2020) desenvolveu pesquisa sobre a influência da incorporação, em substituição à argila caulim, por cinza da casca de arroz (10%) e alumina calcinada (10, 20 e 30%), nas propriedades físicas, mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias. A amostra com 10% de CCA e 20% de AL foi a cerâmica refratária que apresentou o desempenho mais satisfatório nos ensaios em que foi submetida.

Junior (2020), estudou as propriedades mecânicas do concreto com substituição parcial do agregado miúdo pela casca de arroz (CA) 5 e 10% *in natura*. A CA ficou fora dos limites desejáveis na maior parte da curva granulométrica para utilização como agregado miúdo no concreto. Ainda assim, apesar da CA ser um material não normatizado, a formulação com 5% de sua substituição apresentou os melhores resultados, além da não ocorrência da segregação entre os agregados.

Mendonça *et al.* (2020), avaliaram as propriedades dos compósitos cerâmicos de argila refratária, sílica da casca de arroz (10, 20 e 30%) e fibras (1%). Ao aumentar o teor de sílica, os valores de densidade também aumentam, enquanto o contrário acontece com a porosidade. A adição de fibras acarreta na redução da resistência mecânica, porém, a ductilidade aumenta. A resistência ao choque térmico diminuiu com a adição de sílica, mas otimizou com o acréscimo de fibras. Em geral, corpos de provas com 20% de sílica de casca de arroz e 1% de fibra de aço apresentaram as melhores propriedades mecânicas e termomecânicas.

Ruviaro *et al.* (2020), realizaram o estudo sobre a incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar (MCS). Utilizou-se o percentual de 10 e 25% de lodo em substituição ao cimento. Conclui-se, que o lodo de ETA calcinado apresenta grande potencial para utilização como MCS e pode ser incorporado em pastas e argamassas de cimento Portland sem comprometer o desempenho mecânico de tais matrizes cimentícias.

Da Silva *et al.* (2020) estudaram o comparativo de custos entre o tijolo de solo-cimento, tijolo de solo-cimento com incorporação de lodo de estação de tratamento de água e o tijolo cerâmico. Constatou-se que o tijolo solo-cimento-lodo apresentou um menor valor de custo para este projeto, chegando a uma economia de 0,32% em relação ao tijolo solo-cimento e de 37,13 % em relação ao tijolo cerâmico.

Oliveira *et al.* (2022), verificou a influência da granulometria do agregado na resistência ao choque térmico de refratário de alta alumina. Concluiu-se que o refratário contendo agregado de mulita com tamanho médio de 4,0 μm apresentou resistência mecânica e energia de fratura menor que o refratário confeccionado com agregado fino, com tamanho médio de 1,0 μm , devido essencialmente a maior porosidade e sua distribuição na microestrutura.

Silveira (2022), analisou o efeito da temperatura e do tempo de sinterização nas propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias fabricadas com cinza da casca de arroz. Uma das conclusões foi que o aumento da temperatura de sinterização resulta em uma redução na porosidade dos corpos de prova para todas as temperaturas investigadas.

Cardoso (2022), avaliou as propriedades mecânicas e termomecânicas em compósitos cerâmicos refratários a base de argila caulim utilizando substituições de cinza da casca de arroz (10%) e lodo de estação de tratamento de água (5, 10 e 15%). As composições com 10% CCA e 10% lodo ETA, 10% CCA e 15% lodo ETA obtiveram a melhor relação entre o desempenho mecânico dos refratários e a utilização de resíduos em substituição à argila.

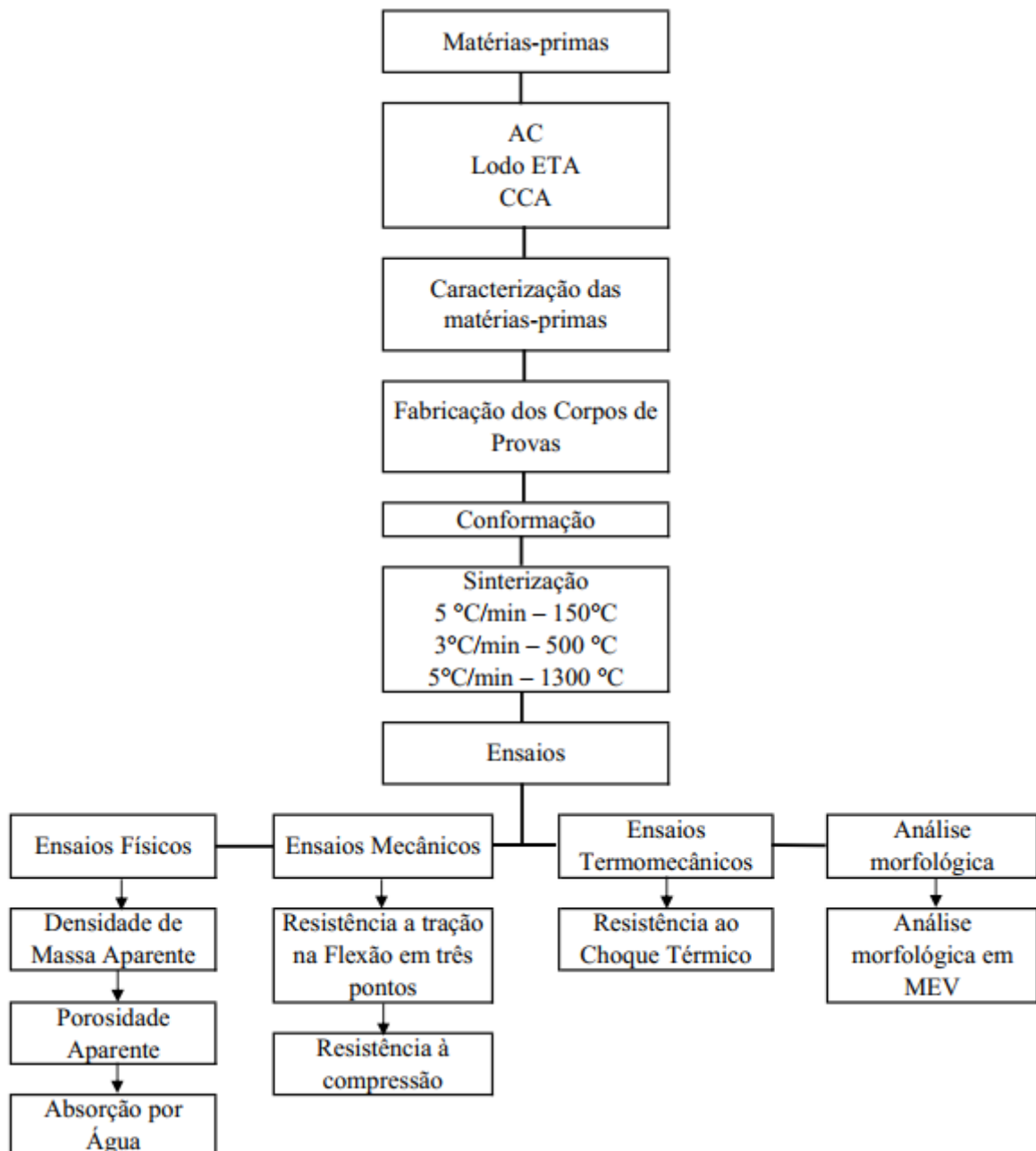
Azolim (2022) estudou sobre a influência do lodo de estação de tratamento de água (5, 10 e 15%) e cinza da casca de arroz (15%) nas propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias fabricadas a base de argila caulim. De modo geral, a cerâmica 15% CCA e 10% lodo ETA, foi a formulação que resultou no melhor desempenho em relação as propriedades físicas, mecânicas e termomecânicas.

Sendo assim, com base nos estudos supracitados, bem como, outras pesquisas, concluiu-se que a adição de materiais oriundos de outros processos agroindustriais é de extrema importância, pois agrega valor socioeconômico e ambiental. A utilização da CCA como fonte de sílica e do lodo ETA como fonte de alumínio para materiais cerâmicos são satisfatórios. Contudo, os estudos de cerâmicos refratários utilizando resíduos ainda é um grande desafio, visto que os resultados normalmente são adequados de maneira isolada, como exemplo, melhorando os resultados do choque térmico, mas diminuindo a resistência mecânica. Sendo assim, a proposta deste trabalho foi a de aprimorar os resultados dos ensaios físicos, mecânicos e termomecânicos em conjunto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia que foi desenvolvida para realização da pesquisa, como mostrado na Figura 4. Os corpos de provas (CPs) estudados foram produzidos a partir da substituição da Argila Caulim (AC) pelo Lodo de Estação de Tratamento de Água (Lodo ETA) nas porcentagens de 5, 10 e 15% e pela Cinza da Casca de Arroz (CCA) em 10% de massa.

Figura 4 – Organograma da Metodologia



Fonte: Autoria Própria

3.1 MATÉRIAS-PRIMAS

Neste tópico serão descritos os materiais utilizados na pesquisa, bem como, os ensaios realizados para caracterização das matérias-primas. A Cinza da Casca de Arroz (CCA) e a Argila Caulim (AC), por serem matérias-primas comerciais, utilizou-se a granulometria original (como recebido), porém, o lodo de estação de tratamento de água (lodo ETA) teve sua granulometria alterada para atender os requisitos da pesquisa.

3.1.1 Argila Caulim

A AC (Figura 5) foi o material base para pesquisa e doada pela empresa Helager Indústria e Comércio Abrasivos Ltda, localizada na cidade de Louveira – São Paulo. Segundo dados da empresa, a AC possui densidade de $2,73 \text{ g/cm}^3$ e 7,75% de perda ao fogo. Além disso, os principais componentes químicos são o SiO_2 e o Al_2O_3 , apresentados na Tabela 5. Utilizou-se esta matéria-prima devido à alta refratariedade do caulim e, também, pela contribuição no aumento da resistência mecânica e redução da deformação pirolástica durante o processo de queima (LUZ *et al.*, 2008).

Figura 5 – Argila Caulim



Fonte: Autoria Própria

Tabela 5 – Componentes químicos da Argila Caulim

Composição da Argila Caulim	
Elemento	% em Massa
SiO_2	56,36
Al_2O_3	27,17
FeO_2	2,84
CaO	<0,01
Na_2O	<0,01

Fonte: Autoria Própria

3.1.2 Lodo de Estação de Tratamento de Água

O lodo ETA foi cedido pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) da cidade de Caçapava do Sul – RS. De acordo com Santos (2018), o lodo vindo da ETA desta cidade é rico em óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , como resultado do processo de decantação e filtração utilizados. O material foi mantido em local fechado e protegido da umidade para que fatores externos não prejudicasse os resultados da pesquisa. Observou-se que grande parte do lodo ETA apresentava granulometria grosseira como observado na Figura 6.

Figura 6 – Granulometria do Lodo ETA



Fonte: Autoria Própria

Com intuito de deixá-lo com granulometria menor, o lodo foi cominuído manualmente com almofariz e pilão, mostrado na Figura 7. Após este processo, o material desagregado foi calcinado a 1000°C por 3h, de acordo com Paixão *et al.* (2018) esta temperatura tem o propósito de aumentar a resistência a flexão na fabricação dos Corpos de Provas (CPs).

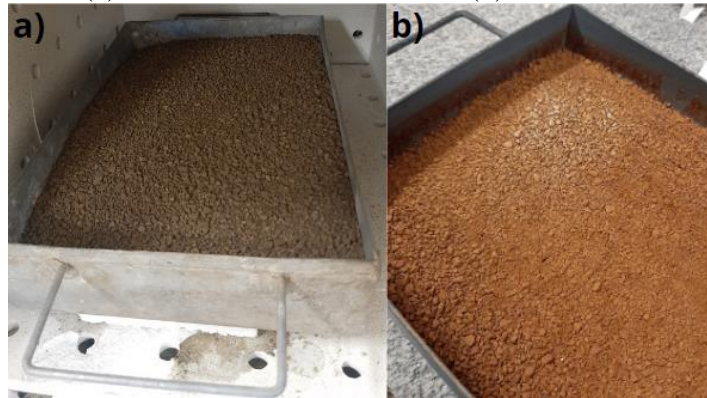
Figura 7 – Desagregação do Lodo ETA



Fonte: Autoria Própria

O lodo ETA antes da calcinação (Figura 8-a) apresentava coloração marrom escura devido à presença de matéria orgânica e, após a queima a cor avermelhada (Figura 8-b) indicando a eliminação da matéria orgânica e a presença de ferro em sua composição (SANTOS, 2018). O lodo foi pesado antes e após o processo de queima e constatado que houve redução de 35,43 % do peso.

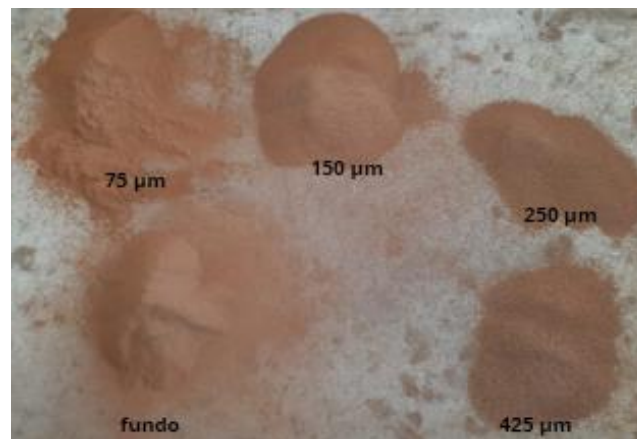
Figura 8 – (a) Lodo ETA seco em estufa (b) Lodo ETA calcinado



Fonte: Autorial Própria

Após o processo de calcinação, o lodo foi peneirado e utilizou-se nesta pesquisa todo material retido na peneira de 425 μm e passante nas peneiras com abertura inferior a esta, como mostra a Figura 9. O intuito de utilizar peneiras com abertura superiores a granulometria da AC foi devido ao lodo ETA reduzir a quantidade de material após a queima, bem como, utilizar a maior quantidade possível de material.

Figura 9 – Granulometria do material peneirado



Fonte: Autorial Própria

A fim de verificar os componentes químicos do lodo ETA que foi utilizado na pesquisa, realizou-se o ensaio de fluorescência de raios X (FRX) no Instituto Tecnológico da Unisinos, utilizando o espectrômetro de bancada Epsilon 1 marca PANalytical. Os resultados mostrados na Tabela 6 destacam que os principais componentes encontrados são Al_2O_3 e SiO_2 , os mesmos presentes na AC.

Tabela 6 – Composição química do lodo calcinado
Composição do lodo calcinado

Elemento		% em massa
Óxido de alumínio	(Al ₂ O ₃)	41,075
Óxido de silício	(SiO ₂)	30,918
Óxido de ferro (III)	(Fe ₂ O ₃)	19,827
Pentóxido de fósforo	(P ₂ O ₅)	2,774
Óxido de potássio	(K ₂ O)	0,939
Óxido de cálcio	(CaO)	0,833
Dióxido de titânio	(TiO ₂)	0,487
Óxido sulfúrico	(SO ₃)	0,418
Dióxido de manganês	(MnO)	0,275
Óxido de zinco	(ZnO)	0,183
Cloro	(Cl)	0,151
Óxido de magnésio	(MgO)	0,149
Óxido de európio (III)	(Eu ₂ O ₃)	0,109
Óxido de bário	(BaO)	0,059
Dióxido de zircônio	(ZrO ₂)	0,032
Outros		≤ 0,015

Fonte: Aatoria Própria

3.1.3 Cinza da Casca de Arroz

A CCA (Figura 10), foi disponibilizada pela empresa Sílica Verde do Arroz Ltda., do grupo Pilecco Nobre, localizada na cidade de Alegrete – RS. O material é proveniente da queima controlada, ou seja, tem como resultado a sílica amorfa. Segundo os dados da empresa, a CCA tem 2,03 g/cm³ de densidade. Ademais, para obter a composição química do material, a sílica foi submetida ao ensaio (FRX) no mesmo local e equipamento citado no item 3.1.2. O resultado do ensaio pode ser observado na Tabela 7.

Figura 10 – Cinza da Casca de Arroz



Fonte: Aatoria Própria

Tabela 7 – Composição química da CCA

Composição da Cinza da casca de Arroz		
Elemento		% em massa
Óxido de silício	(SiO ₂)	92,777
Óxido de potássio	(K ₂ O)	1,888
Pentóxido de fósforo	(P ₂ O ₅)	0,704
Óxido de cálcio	(CaO)	0,673
Dióxido de manganês	(MnO)	0,38
Cloro	(Cl)	0,275
Óxido sulfúrico	(SO ₃)	0,091
Óxido de ferro (III)	(Fe ₂ O ₃)	0,055
Óxido de európio (III)	(Eu ₂ O ₃)	0,036

Fonte: Autoria Própria

Os resultados mostram que a CCA apresenta elevada concentração de óxido de silício (>92%) como a estudada por Foletto *et al.* (2005), o que a torna um resíduo valorizado. Além disso, materiais a base de sílica propiciam incremento às propriedades mecânicas dos materiais, tendo em vista a melhoria na capacidade de suportar cargas a altas temperaturas (CALLISTER, 2002).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As matérias primas foram caracterizadas a partir da determinação do teor de umidade, ensaios de granulometria e difração de raios X antes e após sinterização.

3.2.1 Determinação do Teor de Umidade

A quantidade de água influência diretamente no comportamento dos materiais de granulometria fina, podendo modificar suas propriedades. Portanto, primeiramente, determinou-se o teor de umidade de cada matéria prima com base na NBR 6457 (ABNT, 2016). A CCA (Figura 11-a), o lodo ETA (Figura 11-b) e a AC (Figura 11-c) tiveram suas amostras triplicadas e as massas pesadas antes e após permanência na estufa a 105°C por 24h.

Figura 11 – Determinação do teor de umidade



Fonte: Autoria Própria

3.2.2 Ensaio de Granulometria

Os ensaios de granulometria da AC, CCA e do lodo ETA foram realizados no Laboratório de Nanobiotecnologia da Unipampa – Campus Uruguaiana, no equipamento analisador de tamanho de partículas de dispersão a laser, modelo Mastersizer 2000, marca Malvem. Comparando com o método tradicional por peneiramento, a técnica a laser apresenta melhores resultados para os materiais de granulometria fina, visto que, apresenta leituras na ordem de 0,01 μm e o método tradicional na ordem de 1 μm .

3.2.3 Ensaio de Difração de Raios X

O ensaio de difração de raios X (DRX), foi realizado no laboratório de física da Unipampa – Campus Bagé, no equipamento Difrátômetro θ -20, Rigaku, modelo Ultima IV. Este método foi utilizado para a análise estrutural das matérias-primas e dos CPs antes e após a sinterização. O software X-pert Highscore e o banco de dados ICSD serão utilizados para identificação das fases de cada material.

3.3 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS (CPS)

Neste tópico serão apresentados os métodos utilizado para fabricação dos corpos de provas, bem como, os ensaios realizados para validação e conclusão da pesquisa. Realizou-se cinco combinações de cerâmicos refratários que estão apresentadas na Tabela 8 de acordo com suas respectivas nomenclaturas e descrições. Como visto no item 2.9, Sobrosa (2014), constatou que 10% de CCA é a porcentagem satisfatória para obter resultados com melhores propriedades mecânicas e termomecânicas e, portanto, esta metodologia foi utilizada neste trabalho.

Tabela 8 – Nomenclatura e descrição dos cerâmicos refratários

Nomenclatura	Cerâmico Refratário
100 AC	100% Argila Caulim
10 CCA	90% Argila Caulim e 10% Cinza da Casca de Arroz
10 CCA 5 LETA	85% Argila Caulim e 10% Cinza da Casca de Arroz 5% Lodo ETA
10 CCA 10 LETA	80% Argila Caulim e 10% Cinza da Casca de Arroz 10% Lodo ETA
10 CCA 15 LETA	75% Argila Caulim e 10% Cinza da Casca de Arroz 15% Lodo ETA

Fonte: Autoria Própria

3.3.1 Preparação e Mistura das Massas Cerâmicas

Os materiais utilizados foram secos em estufa a 105°C por 24h para que a umidade de cada um não influenciasse na moldagem dos CPs. Primeiramente, determinou-se o teor de umidade ótima de conformação das misturas utilizando amostras testes de 100 AC e, concluiu-se que o teor ótimo de 5% apresentava o melhor aspecto visual, sem arestas quebradiças (pouca umidade) e ausência de água superficial (excesso de umidade), como mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Amostras testes para determinação do teor de umidade



Fonte: Autorial Própria

Com o teor de umidade definido, as matérias-primas para cada porcentagem foram inseridas em um recipiente (Figura 13) para realização da mistura. Os materiais foram misturados secos e posteriormente adicionado água. Os grãos que se uniram com a adição de água foram desagregados manualmente por aproximadamente 5 minutos até a completa homogeneização. Após este processo, a massa cerâmica estava pronta para a etapa de conformação dos CPs.

Figura 13 – Matérias-primas antes da mistura

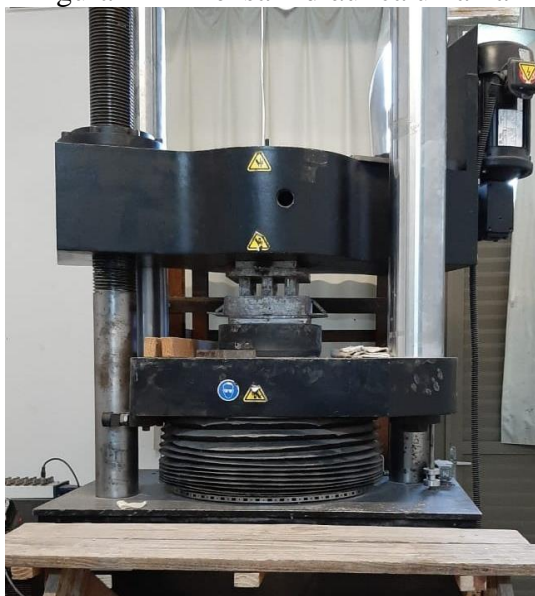


Fonte: Autorial Própria

3.3.2 Conformação dos CPs

A moldagem dos CPs foi realizada pelo equipamento de prensa hidráulica uniaxial, modelo HVL 5545, da marca Instron (Figura 14) com capacidade de carga de 1500 kN, localizada no laboratório de Engenharia Civil da Unipampa – Campus Alegrete.

Figura 14 – Prensa hidráulica uniaxial



Fonte: Autoria Própria

Utilizou-se uma matriz tripla com encaixe macho e fêmea com dimensões de 150 x 30 x 20 mm para a moldagem. Foram moldadas 9 amostras para cada composição, totalizando 45 CPs. A força de compactação foi determinada a partir do estudo realizado por Quevedo (2020) onde constatou que a pressão de compactação de 42,5 MPa, com velocidade de 2mm/min resulta em amostras com melhores propriedades termomecânicas. A Figura 15 mostra os CPs após o processo de conformação.

Figura 15- CPs após conformação



Fonte: Autoria Própria

3.3.3 Secagem dos CPs

Após o processo de conformação, os CPs foram identificados e secos de maneira artificial e gradual em estufa, nas temperaturas de 45 °C, 65 °C, 85 °C e 105 °C por 24h em cada patamar, com objetivo de remover a umidade lentamente e não causar tensões internas (QUEVEDO, 2020). Posteriormente a este processo, iniciou-se a etapa de sinterização.

3.3.4 Sinterização

O processo de sinterização dos CPs ocorreu no laboratório de Engenharia Mecânica da Unipampa – Campus Alegrete, no forno Inti, modelo FQR 1300/3 (Figura 16) que possui capacidade de aquecimento até 1350°C. Devido a capacidade do forno e tempo de permanência necessário, foram queimados 8 CPs por dia em um ciclo de aproximadamente 6h. Os demais CPs permaneceram em estufa para que fatores externos não prejudicassem o resultado da queima.

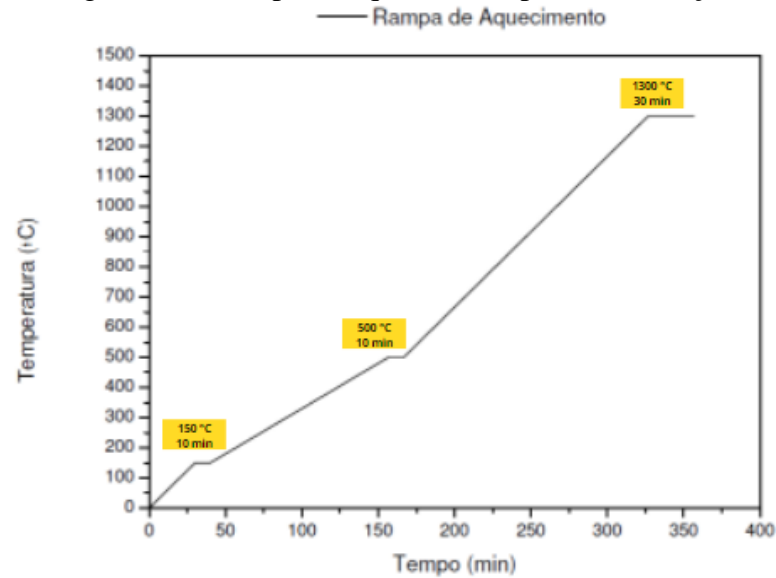
Figura 16 – Forno para sinterização dos CPs



Fonte: Autoria Própria

Para a sinterização utilizou-se uma rampa de aquecimento (Figura 17) em três patamares, sendo que a primeira rampa ocorreu a 150°C com uma taxa de aquecimento de 5°C/min por 10 minutos, a segunda a 500°C com taxa de aquecimento de 3°C/min por 10 minutos e o último, a com uma taxa de aquecimento igual a inicial até a temperatura de 1300°C, onde permaneceu por meia hora. Após o desligamento do forno, ocorreu o resfriamento das cerâmicas de forma natural e lenta.

Figura 17 – Rampa de aquecimento para sinterização



Fonte: Adaptado de Sobrosa (2014).

De acordo com Nunes (2014), no processo de sinterização ocorre alterações nos materiais cerâmicos, como exemplo, perda de massa, formação da fase vítrea, soldagem dos grãos em relação ao elevado aquecimento e desenvolvimento de novas fases cristalinas.

3.4 ENSAIOS FÍSICOS

Neste tópico são descritos os ensaios físicos de densidade de massa aparente, porosidade aparente e absorção de água em que os CPs foram submetidos. Os ensaios serão regidos pela NBR 16661 (ABNT, 2017).

3.4.1 Densidade de massa aparente (DMA)

A densidade de massa aparente é definida pelo resultado da divisão entre a massa seca do corpo de prova pelo o volume aparente, sendo calculada pelas Equações (1) e (2).

$$Va = \left(\frac{Mu - Mi}{Meliq} \right) \quad Eq. (1)$$

$$DMA = \frac{Ms}{Va} * 100 \quad Eq. (2)$$

Onde:

DMA = Densidade de massa aparente (g/cm^3);

Ms = Massa seca do CP (g);

Va = Volume aparente (cm^3);

Mu = Massa saturada do CP (g);

Mi = Massa imersa do CP (g);

$Meliq$ = Massa específica do líquido saturante (g/cm^3).

3.4.2 Porosidade aparente (PA)

A porosidade aparente é o resultado entre o volume de poros em relação ao seu volume total e calculada pela Equação (3).

$$PA = \frac{(Mu - Ms)}{(Meliq * va)} * 100 \quad Eq. (3)$$

Onde:

PA = Porosidade aparente (%);
 Mu = Massa do corpo de prova saturado (g);
 Ms = Massa do corpo de prova seco (g);
 $Meliq$ = Massa específica da água (g/cm³);
 Va = Volume aparente (cm³).

3.4.3 Absorção por Água (AA)

A absorção por água é o resultado do líquido absorvido pelo corpo de prova após a sinterização pela massa seca do CP e calculada pela Equação (4).

$$AA = \frac{(Mu - Ms)}{(Ms)} * 100 \quad Eq. (4)$$

Onde:

AA = Absorção pelo líquido (%);
 Mu = Massa do corpo de prova saturado (g);
 Ms = Massa do corpo de prova seco (g).

Os ensaios físicos de densidade de massa aparente (DMA), porosidade aparente (PA) e absorção por água (AA) foram realizados no equipamento da Figura 18, para os quais utilizou-se uma estufa para a secagem das amostras, um dessecador, uma bomba de vácuo, um béquer, uma balança de precisão de 0,01g e uma balança hidrostática.

Figura 18 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de DMA, PA e AA.



Fonte: Autoria própria.

3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Foram realizados ensaios de resistência a tração na flexão em três pontos e de resistência à compressão para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos refratários. A seguir são descritas as etapas de execução dos ensaios e as equações utilizadas.

3.5.1 Resistência à tração na flexão em três pontos (RFTA)

O ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos foi realizado em equipamento da marca Shimadzu (Figura 19), com capacidade de 5kN e a velocidade utilizada foi de 0,15 mm/minuto. Para este ensaio foi utilizado três CPs por composição.

Figura 19 – Realização do ensaio de resistência à tração na flexão no equipamento Shimadzu



Fonte: Autoria Própria

Para realização do ensaio seguiu-se as orientações da NBR ISO 5014 (ABNT, 2012). Neste ensaio, o CP fica biapoiado 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 (5).

$$RFTA = \frac{3FL}{2ab^2} \quad Eq. (5)$$

Onde:

$RFTA$ = Resistência a tração na flexão em três pontos (MPa);

F = Força no momento da ruptura (N);

L = Distância entre os apoios (mm);

a = Largura do corpo de prova (mm);

b = Altura do corpo de prova (mm).

3.5.2 Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, foi necessário cortar os CPs com auxílio do equipamento para corte linear de precisão IsoMet 4000 (Figura 20), localizado no laboratório de Engenharia Mecânica da Unipampa – Campus Alegrete. Sendo assim, a partir de 01 CP por composição, foram obtidas 04 amostras com geometria reduzida de dimensões 29 x 25 x 18 mm (Figura 21).

Figura 20 – Equipamento para corte linear de precisão IsoMet 4000



Fonte: Autoria Própria

Figura 21 – CPs com dimensões reduzidas para ensaio de resistência à compressão

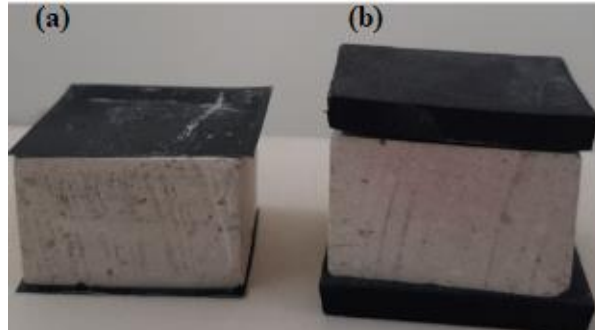


Fonte: Autoria Própria

Antes da realização do ensaio os CPs foram lixados com lixa grão 1.200 para regularizar possíveis imperfeições nas superfícies, principalmente, na área de aplicação de carga. Para a execução do ensaio, utilizou-se dois tipos de placas protetoras, visando reduzir o atrito do aplicador da carga com a superfície do corpo cerâmico e comparar a influência do objeto de proteção no resultado do ensaio, principalmente, no desvio padrão. Assim, os dois tipos de placas de proteção utilizados foram: (a) placas protetoras compostas por tecido de fibra e vidro

PTFE (Figura 22-a) com espessura 0,2 mm e (b) placas de proteção compostas por etileno acetato de vinila (EVA) com 4 mm de espessura (Figura 22-b).

Figura 22 – Teflon (a) e EVA (b) para redução do atrito do aplicador de carga com os CPs



Fonte: Autoria Própria

O ensaio de resistência à compressão, foi realizado no laboratório da Engenharia Civil da Unipampa – Campus Alegrete, no equipamento da marca Emic, com capacidade máxima de 300 kN (Figura 23), com velocidade de deslocamento de 0,2mm/min. Seguiu as orientações da NBR 10059-2 (ABNT, 2014).

A resistência à compressão foi calculada pela Equação (5).

$$RCTA = \left(\frac{F_{m\acute{a}x}}{A_0} \right) \quad Eq. (5)$$

Onde:

$RCTA$ = Resistência à compressão em temperatura ambiente (MPa);

F = Carga máxima registrada (N);

A = Área inicial da seção transversal do CP (mm²).

Figura 23 – Realização do ensaio de resistência à compressão no equipamento EMIC



Fonte: Autoria Própria

3.6 ENSAIO TERMOMECÂNICO

Realizou-se ensaio de choque térmico para avaliar as propriedades termomecânicas dos materiais cerâmicos refratários. A seguir estão os passos dos ensaios e as equações que foram utilizadas.

3.6.1 Choque Térmico

Para a realização deste ensaio seguiu as orientações da NBR 13202 (ABNT, 2015) e a metodologia utilizada por Quevedo (2018), onde foi constatado que a temperatura de 1200°C, sugerida pela norma, é muito severa para os cerâmicos refratários, adotando-se a temperatura de 500°C para aquecimento.

Os CPs foram aquecidos no forno até a temperatura de 500°C (Figura 24-a) por 30 minutos e, posteriormente, colocados no tanque com água à temperatura ambiente (Figura 24-b) com ativação da turbina com intuito de agitar a água (Figura 24-c) para resfriamento dos materiais cerâmicos durante 5 minutos. Foram utilizados 4 CPs de cada composição para realização do ensaio.

Figura 24 – Processo de realização do ensaio de choque térmico



Fonte: Autoria Própria

A Figura 25, mostra os CPs após resfriamento, onde permaneceram ao ar livre por 10 minutos e, depois levados ao forno para um novo ciclo, os quais foram repetidos até a ocorrência da ruptura do CP.

Figura 25 – Secagem dos CPs ao ar livre após resfriamento



Fonte: Autoria Própria

Calculou-se a resistência ao choque térmico pelas equações (6) e (7). 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.

$$RCT 1 = \left(\frac{A}{B} \right) \quad Eq. (6)$$

$$RCT 2 = \frac{(A)}{(B*2)} \quad Eq. (7)$$

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.

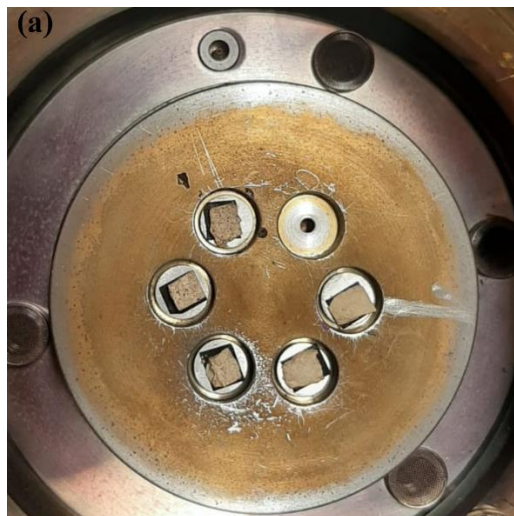
3.7 ANÁLISE DA MORFOLOGIA

Foi realizado o ensaio de análise morfológica em MEV para a maior compreensão dos resultados da pesquisa.

3.7.1 Análise morfológica em MEV

O ensaio no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), foi realizado no laboratório de Microscopia Eletrônica da Unipampa - Campus Alegrete, após o ensaio de resistência à compressão. Devido às dimensões dos suportes dos equipamentos, foram utilizadas uma amostra de (9x6) mm de cada composição (Figura 26-a). Primeiramente, foi realizado o banho de ouro nos CPs no equipamento Edwards Scancoat Pirani 501 (Figura 26-b) em virtude de gerar contraste e facilitar a leitura das micrografias.

Figura 26 - Equipamento Edwards Scancoat Pirani 501

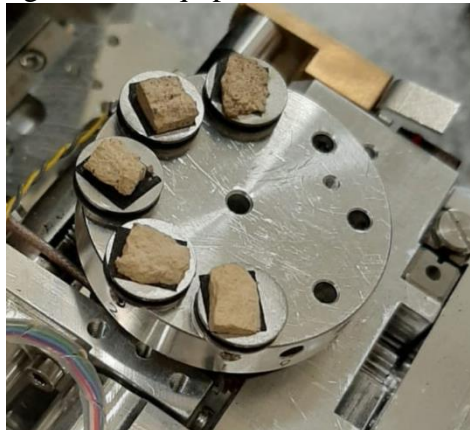




Fonte: Autoria Própria

Ainda, após este processo os CPs foram posicionados e inseridos no equipamento EVO MA10 da marca Zeiss, para a leitura das amostras e verificação da presença de porosidade na microestrutura do material, como mostra a Figura 27.

Figura 27 – Equipamento EVO MA10



Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios que foram realizados nos corpos de provas (CPs) compostos por argila caulim (AC), cinza da casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de água (lodo ETA): caracterização das matérias-primas, ensaios físicos, ensaios mecânicos, ensaio termomecânico e análise da microestrutura.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Os resultados das amostras referentes ao teor de umidade, granulometria e difração de raios X apresentados a seguir.

4.1.1 Teor de Umidade

A Tabela 9 mostra os resultados do teor de umidade das matérias-primas. Observa-se que o lodo ETA apresentou umidade elevada esperada, visto que o material utilizado na pesquisa foi recolhido em unidade de desaguamento a céu aberto. Devido a queima, a CCA apresentou teor de umidade praticamente nulo e a AC baixa umidade residual.

Tabela 9 – Resultado teor de umidade

	Lodo ETA			CCA			AC		
<i>Nº da cápsula</i>	100	54	43	143	41	8	228	173	162
<i>Massa da cápsula (g)</i>	18,5	18,1	20,4	14,2	20,8	16,9	15,5	15,3	13,8
<i>Cápsula + solo úmido</i>	48,5	48,1	50,4	44,2	50,8	46,9	45,5	45,3	43,8
<i>Cápsula + solo seco (g)</i>	38,7	38,4	40,6	44,1	50,6	46,7	44,2	44,1	42,5
<i>Massa da água (g)</i>	9,8	9,7	9,8	0,1	0,2	0,2	1,3	1,2	1,3
<i>Massa do solo seco (g)</i>	20,2	20,3	20,2	29,9	29,8	29,8	28,7	28,8	28,7
<i>Teor de umidade (%)</i>	48,51	47,78	48,51	0,33	0,67	0,67	4,53	4,17	4,53
<i>Umidade média (%)</i>	48,27			0,56			4,41		

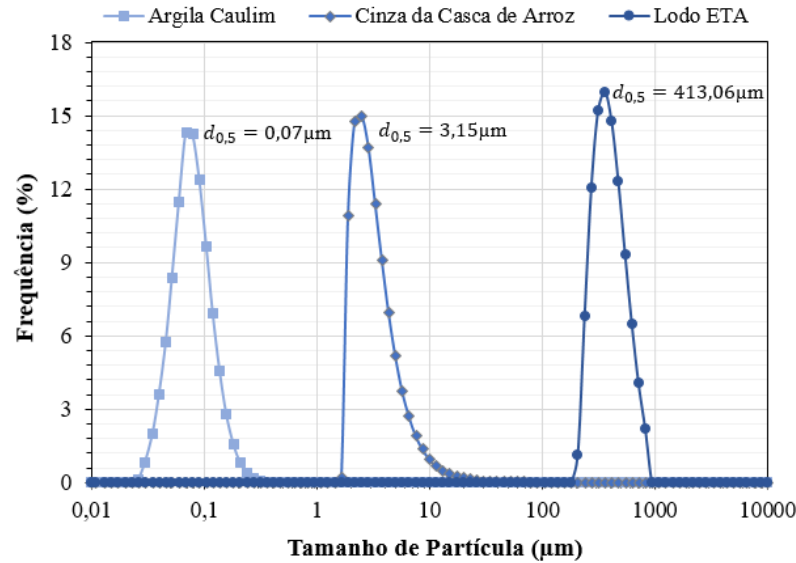
Fonte: Autoria Própria

4.1.2 Ensaio de granulometria

Na Figura 28 é possível observar a distribuição do tamanho das partículas e os diâmetros médios ($d_{0,5}$) dos materiais utilizados. Também, a Tabela 10 apresenta os tamanhos dos diâmetros mínimos ($d_{0,1}$) e diâmetros máximos ($d_{0,9}$).

A argila caulim apresentou diâmetro mínimo de $0,044\mu\text{m}$ e máximo de $0,121\mu\text{m}$. De acordo com ABNT, a AC é classificada como argila, pois possui diâmetros que variam até $2\mu\text{m}$. A CCA pode ser classificada como silte, de modo que seu diâmetro variou de $2\mu\text{m}$ a $60\mu\text{m}$.

Figura 28 – Dimensões das partículas das matérias-primas



Fonte: Autoria Própria

Tabela 10 – Tamanho das partículas das matérias-primas

Tamanho de Partículas (µm)	Matérias-Primas		
	AC	CCA	LETA
d10	0,044	2,166	283,362
d50	0,072	3,155	413,061
d90	0,121	6,377	663,260

Fonte: Autoria Própria

O lodo ETA apresentou diâmetro mínimo de 283,362µm e médio de 413,0361µm, podendo ser classificado como areia média, de acordo com os limites de 200 µm a 600 µm estabelecidos pela norma, porém, o diâmetro máximo é classificado como areia grossa, variando de 600µm a 2000µm. Desse modo, a alternância da granulometria do lodo ETA era esperada, pois utilizou-se todo o material passante na peneira 600 µm, com intuito de aproveitar a maior quantidade possível de resíduo.

Percebe-se que o lodo ETA apresentou granulometria 100% maior que a CCA, essa variação pode ser benéfica para o fator de empacotamento. De acordo com Conceição (2011), a sequência de preenchimento dos vazios existentes entre a distribuição granulométrica da amostra determina o aumento ou diminuição da densidade do fator de empacotamento. Sendo assim, podem ser obtidos empacotamentos com menor porosidade se os vazios existenciais forem preenchidos por partículas menores.

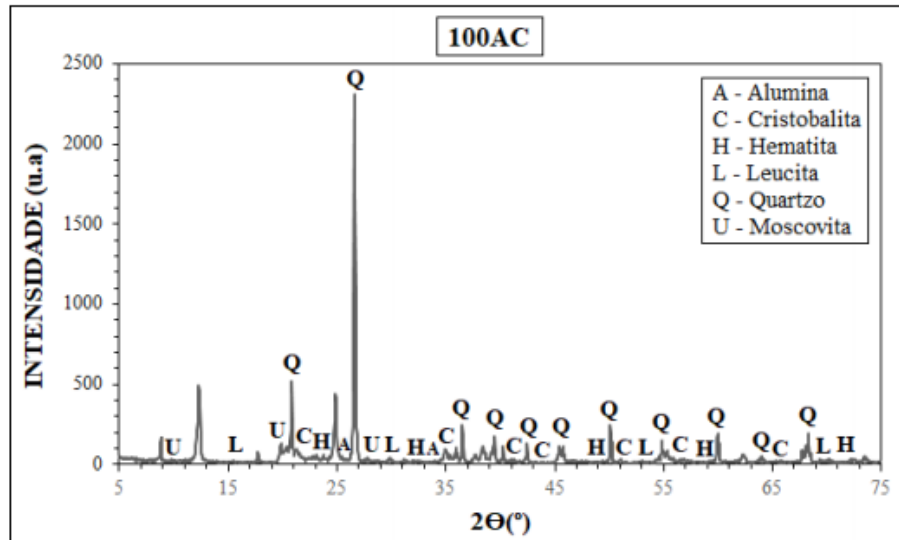
Por outro lado, se forem introduzidas partículas que sejam maiores que os vazios existentes, aumentará a tendência do surgimento de novos vazios pelo deslocamento das partículas maiores que suas posições originais, elevando a porosidade e diminuindo a eficácia do fator de empacotamento (CONCEIÇÃO, 2011).

4.1.3 Difração de raios X

A análise dos difratogramas ocorreu antes e após sinterização a 1300°, com intuito de verificar as transformações das fases dos cerâmicos refratários. Utilizou-se os gráficos da DRX antes da sinterização de Cardoso (2022), devido os materiais e a porcentagem das amostras serem iguais em ambas pesquisas. Desse modo, devido ao ensaio de DRX ser realizado em outra cidade, reduziu-se os custos para análise de um mesmo material e, também, otimizou-se o tempo da pesquisa.

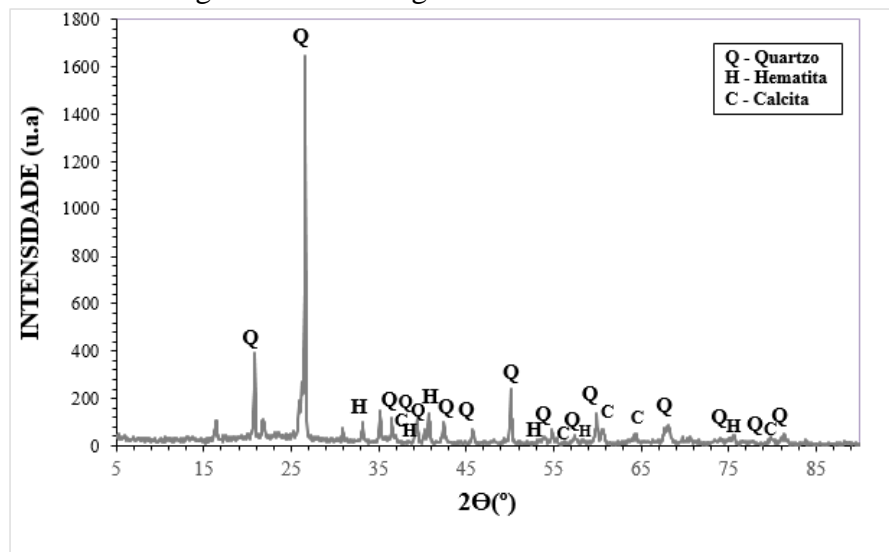
Para a melhor análise dos gráficos, as figuras de número ímpar (Figura 29 à Figura 38) representam o difratograma antes da sinterização e as figuras de número par após o processo de sinterização.

Figura 29 – Difratograma 100AC antes da sinterização



Fonte: Cardoso (2022)

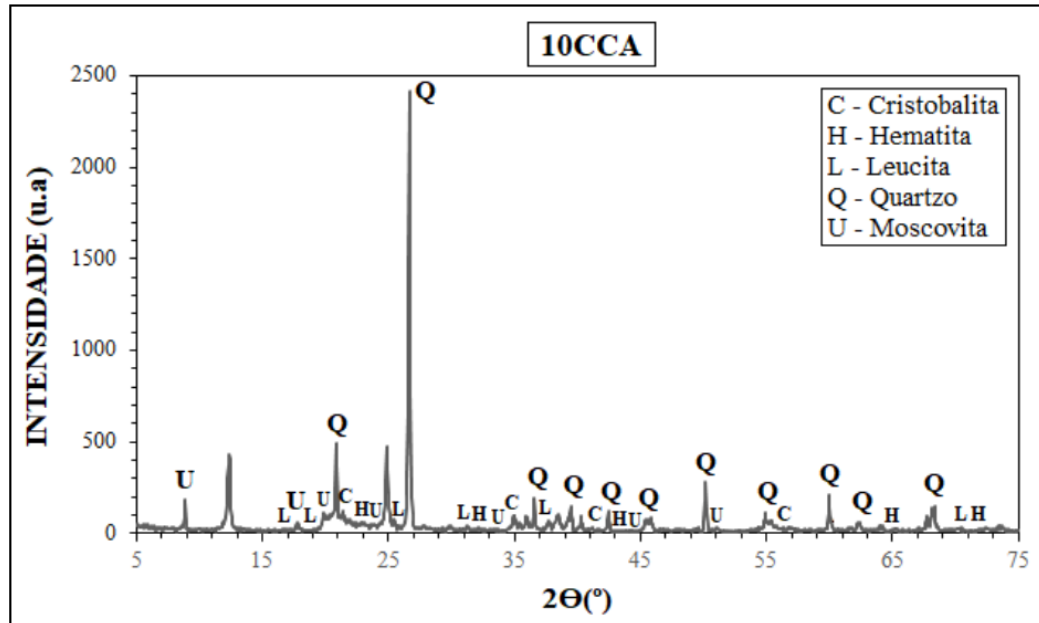
Figura 30 - Difratograma 100AC sinterizado



Fonte: Autoria Própria

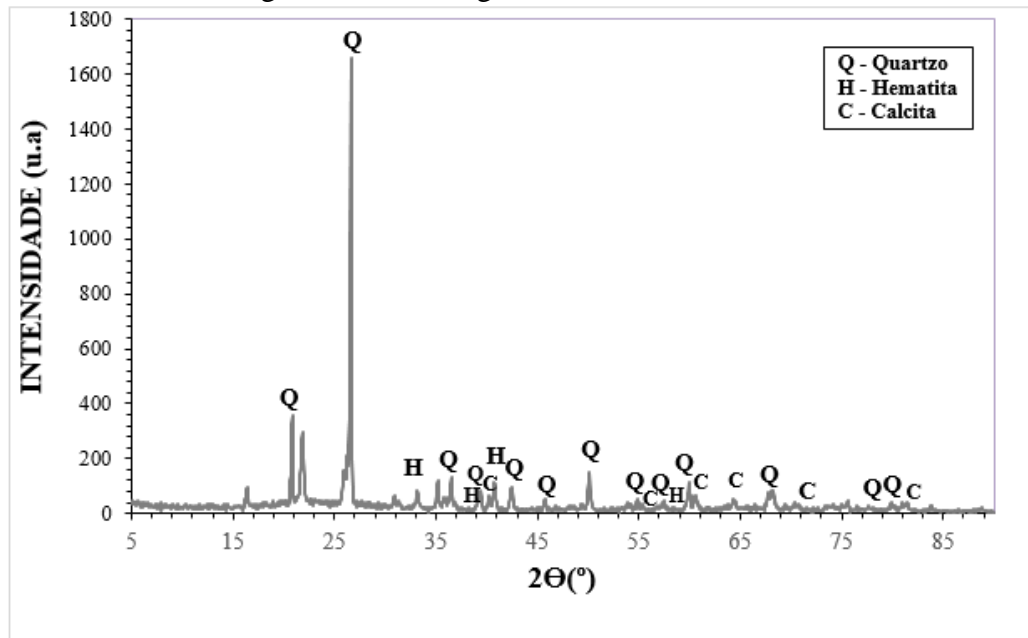
Comparando a Figura 29 e Figura 30, observa-se que após sinterização, manteve-se as fases de quartzo e hematita e, também, foi identificado calcita. É possível observar que houve queda na intensidade dos picos de quartzo.

Figura 31 - Difratoograma 10CCA antes da sinterização



Fonte: Cardoso (2022)

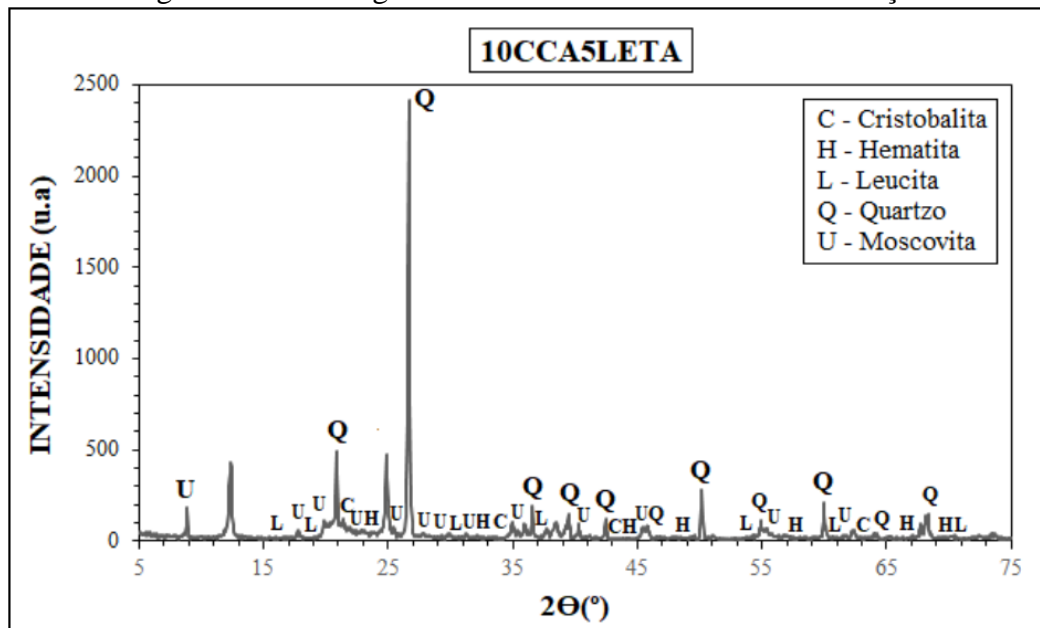
Figura 32 - Difratoograma 10CCA sinterizado



Fonte: Autoria Própria

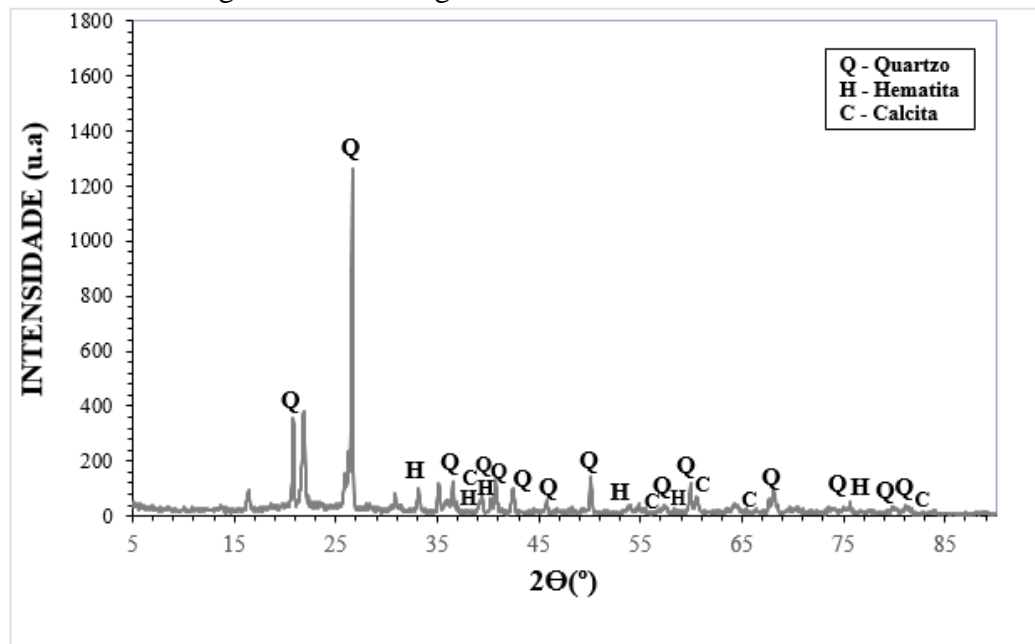
Na Figura 31 e Figura 32 é possível perceber que a adição de 10% de CCA manteve o comportamento das fases similar as amostras de 100AC.

Figura 33 - Difratoograma 10CCA5LETA antes da sinterização



Fonte: Cardoso (2022)

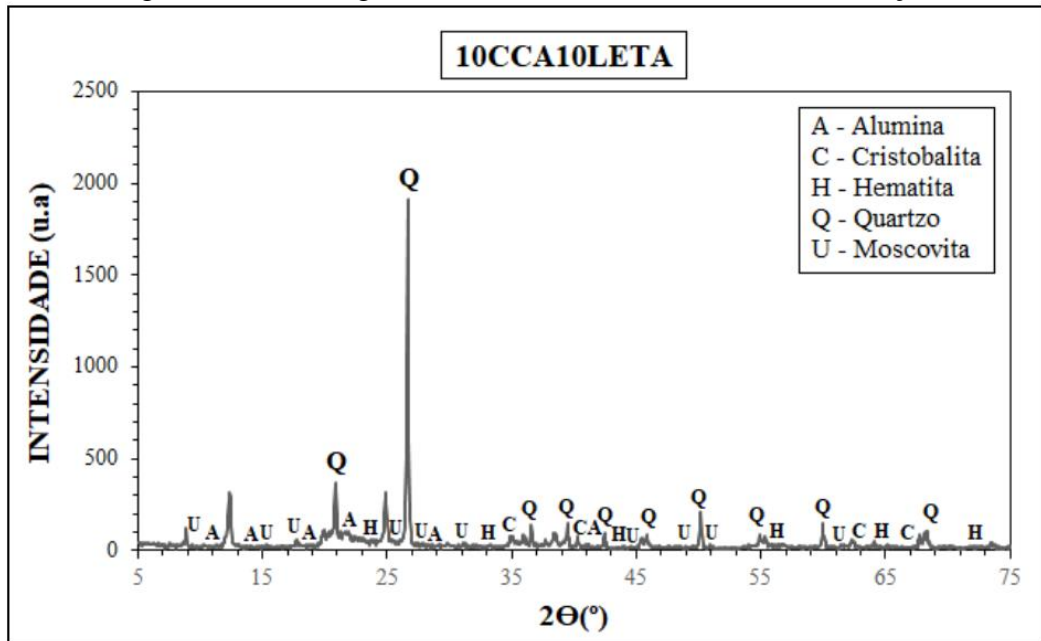
Figura 34 - Difratoograma 10CCA5LETA sinterizado



Fonte: Autoria Própria

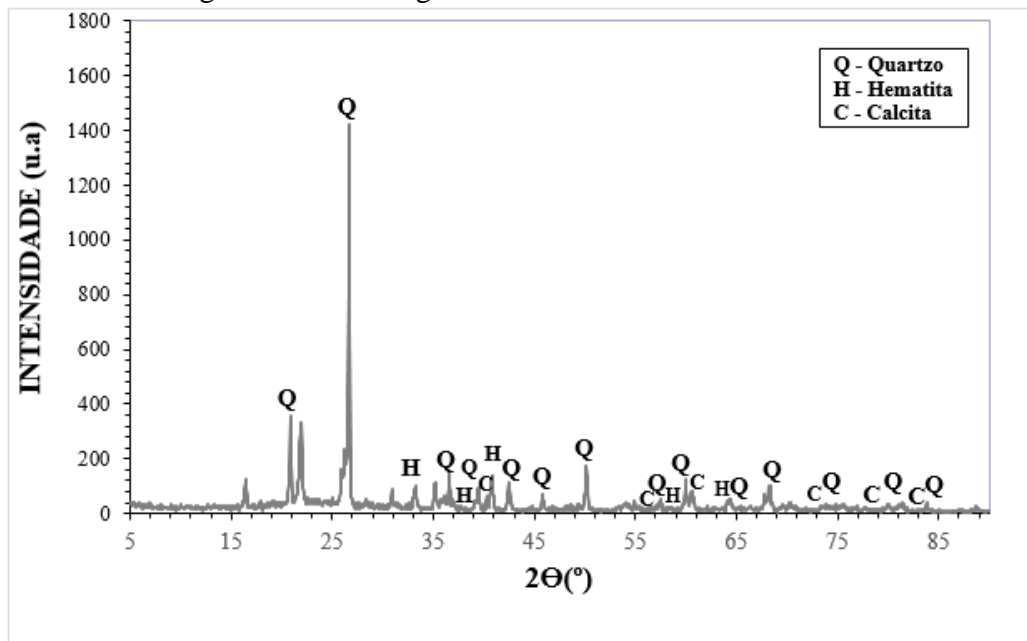
Com adição de 5% de lodo ETA manteve-se as mesmas fases encontradas nas amostras anteriores, porém, houve uma redução no pico de quartzo.

Figura 35 - Difratoograma 10CCA 10LETA antes da sinterização



Fonte: Cardoso (2022)

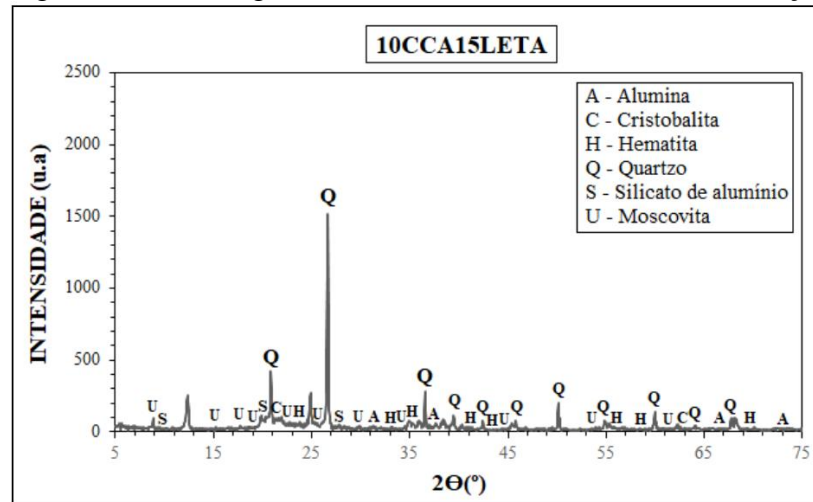
Figura 36 - Difratoograma 10CCA 10LETA sinterizado



Fonte: Autoria Própria

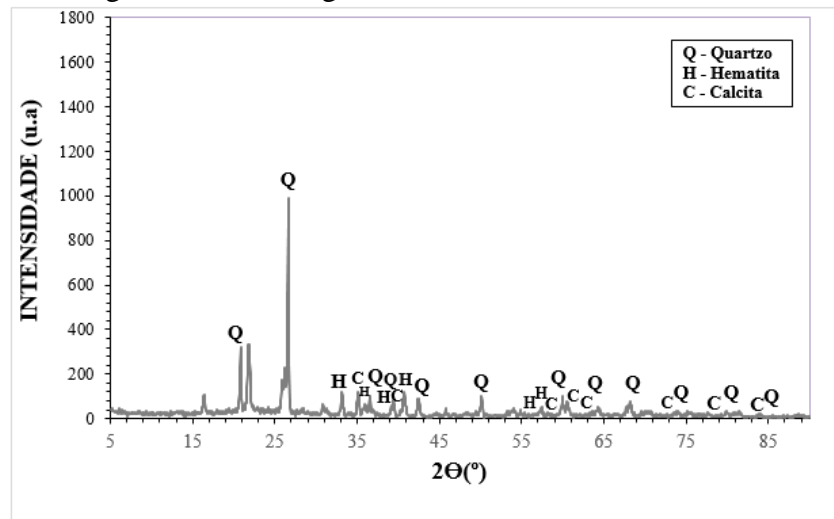
Com o acréscimo do lodo ETA em 10%, houve um aumento na intensidade do pico de quartzo à $2\theta=27^\circ$.

Figura 37 - Difratoograma 10CCA15LETA antes da sinterização



Fonte: Cardoso (2022)

Figura 38 - Difratoograma 10CCA15LETA sinterizado



Fonte: Autoria Própria

Na adição de 15% de lodo ETA houve o decréscimo na intensidade dos picos de quartzo. Conforme analisado por Cardoso (2022), a presença de quartzo em todas as formulações demonstra que a temperatura ou o tempo de permanência para a sinterização não promoveram total transformação dessa fase.

A presença de picos de hematita (Fe_2O_3), pode ser explicado pela presença de óxido de ferro tanto na argila caulim (2,25%), quanto no lodo ETA (19,83%). A ausência de fases de mulita e cristobalita nas composições pode ser explicada pela temperatura de queima utilizada na pesquisa. De acordo com a Figura 3 para atingir os picos de mulita e cristobalita é necessária uma temperatura mínima de 1400°C . Desse modo, a formação de mulita em temperaturas mais baixas ocorre apenas em pequenas quantidades e com a formação conjunta de cristobalita. (MAGLIANO; PANDOLFELLI, 2010).

4.2 ENSAIOS FÍSICOS

Os resultados das amostras referentes à porosidade aparente (PA), absorção por água (AA) e densidade de massa (DMA) são apresentados a seguir.

4.2.1 Porosidade aparente, absorção por água e densidade de massa

De acordo com a NBR 16661 (ABNT, 2017) foi utilizado um CP de cada composição. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos. Observa-se que a amostra 100 AC apresentou a menor PA, bem como, a menor AA e, por consequência a maior DMA.

Tabela 11 – Resultados ensaios físicos

Cerâmica	DMA (g/cm³)	PA (%)	AA (%)
100 AC	2,10	12,93	6,15
10 CCA	2,00	15,81	7,91
10 CCA 5 LETA	2,00	14,36	7,18
10 CCA 10 LETA	1,98	15,46	7,80
10 CCA 15 LETA	1,98	15,25	7,71

Fonte: Autoria Própria

A composição 10CCA foi a que se mostrou mais porosa e, também, a que absorveu mais água. A temperatura de queima tem grande influência na densidade, pois a elevação da temperatura reduz a quantidade de substâncias voláteis, aumentando assim, a porosidade interna da cinza. Salienta-se ainda que a maior perda de massa ocorre entre 300°C e 600°C, em torno de 20,5% devido à eliminação de água de constituição, materiais voláteis e combustão de carbono (DELLA *et al.*, 2001).

Na composição 10CCA 5LETA a porosidade aparente diminuiu, mas a DMA manteve-se constante em comparação a amostra 10CCA. Desse modo, essa melhora pode ser explicada devido a menor quantidade de lodo presente na mistura, facilitando assim, o melhor fator de empacotamento entre os materiais.

Comparando a amostra 100 AC, verificou-se que as composições com adição de lodo ETA diminuíram a densidade de massa, porém aumentaram tanto a porosidade quanto a absorção por água. Este resultado em relação às propriedades físicas também foi encontrado no estudo realizado por Buselatto *et al.* (2018) sobre a incorporação de lodo ETA como agregado miúdo em concretos.

Para Silva, Segadães e Devezas (2004), quanto mais distinta da forma de uma esfera uma partícula se encontra, menor é a eficiência do fator de empacotamento. Sendo assim, à

medida que a concentração de partículas irregulares aumenta, ocorre a diminuição da densidade devido a falha na estrutura de empacotamento, resultando em maior índice de vazios e, por consequência, maior porosidade.

O lodo ETA é composto de matérias orgânicas e minerais porosos resultando em um material mais leve, explicando o fato do aumento da porcentagem de lodo, reduzir a densidade de massa. Paralelamente, no processo de calcinação toda matéria orgânica do lodo ETA é eliminada devido à alta temperatura utilizada, desse modo, presumivelmente, o grão que antes eram preenchido por matéria orgânica passou a ter vazios (COSTA; SILVA; LYRA, 2021).

O método de compactação das amostras também pode influenciar na porosidade dos cerâmicos, pois ao serem prensados úmidos podem comprimir os gases em seu interior, fazendo com que estes expandam de volume no processo de queima. Também, os poros podem ser gerados devido à formação de gases das reações químicas ocorridas durante a exposição a elevadas temperaturas de sinterização (NUNES, 2014).

De acordo com Nakagawa (1998), os poros podem ser do tipo aberto, quando têm conexão com a superfície, ou tipo fechado, quando estão isolados no interior do material, ou ainda, a combinação de ambos. Sendo assim, os vazios presentes na estrutura afetam a resistência mecânica visto que as fraturas se iniciam, geralmente, em falhas estruturais superficiais (COTTA; RODRIGUES, 2014).

Conforme mostrado na Figura 9, utilizou-se grãos com granulometria variada de lodo ETA. Essa descontinuidade da granulometria (irregular) combinado com as partículas mais finas de AC e CCA, podem ter formado grumos que aprisionariam a água adicionada na mistura dos materiais, resultando, posteriormente, em vazios de diâmetros maiores, podendo ou não ser intercomunicados (MEERT; HASTENPFLUG; ANDRADE, 2021).

4.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Realizou-se ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos (RFTA) e ensaio de resistência à compressão (RCTA) para avaliar as propriedades mecânicas dos cerâmicos refratários. Os resultados obtidos são referentes à média de três CPs por composição.

4.3.1 Resistência à Tração na Flexão em Três Pontos

Os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos são apresentados na Tabela 12, bem como, na Figura 39.

Tabela 12 – Resultados de RFTA

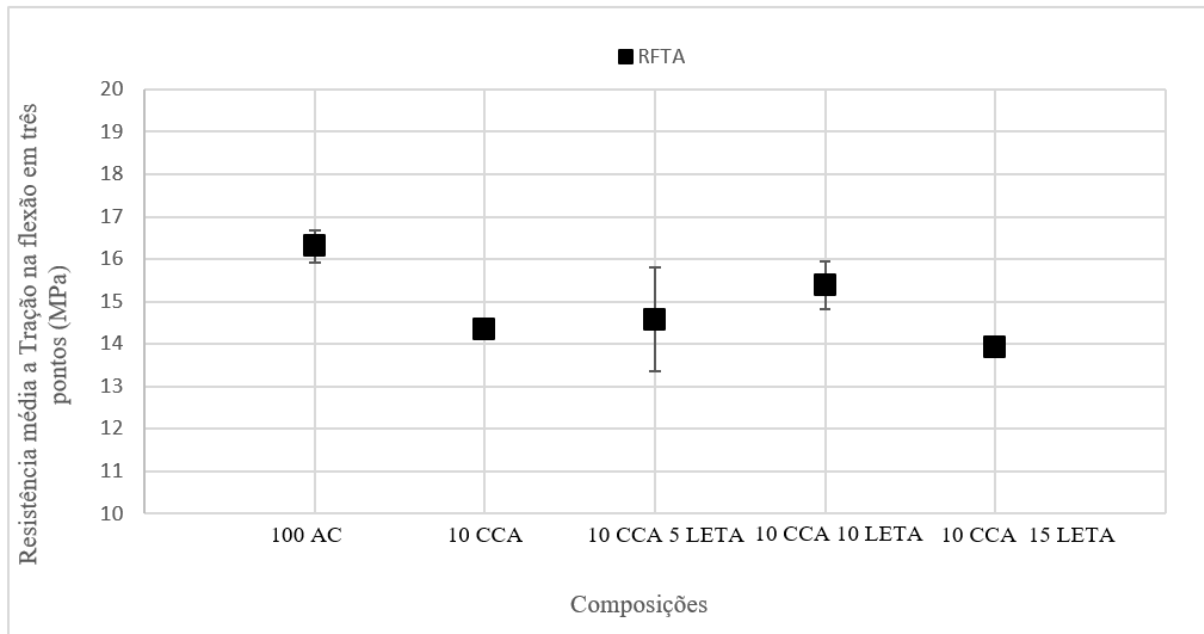
Composições	Médias		Desvio Padrão	Coef. De Variação (%)
	F _{máx} (N)	RFTA (MPa)		
100 AC	1074,49	16,30	0,38	2,34
10 CCA	1026,23	14,35	0,14	0,99
10 CCA 5 LETA	1059,86	14,58	1,23	8,49
10 CCA 10 LETA	1104,00	15,38	0,56	3,68
10 CCA 15 LETA	1051,21	13,92	0,19	1,37

Fonte: Autoria Própria

A composição 100 AC foi a que apresentou a melhor resistência à flexão. Este fato pode ser explicado pela cerâmica ter sido fabricada com uma única matéria-prima de granulometria fina, com menor porosidade após o processo de conformação. Ademais, a cerâmica 10CCA 15 LETA apresentou o desempenho mais baixo, o que pode estar relacionado com a maior quantidade de grãos de granulometria mais grossa ocasionada pela adição de lodo ETA.

De acordo com Callister (2018), qualquer porosidade residual influenciará negativamente tanto sobre propriedades elásticas quanto sobre a resistência mecânica. Na resistência a flexão a porosidade tem efeito negativo porque os poros reduzem a área da seção transversal através da qual uma carga é aplicada e, também, eles atuam como concentradores de tensões.

Figura 39 – Resultados médios de RFTA



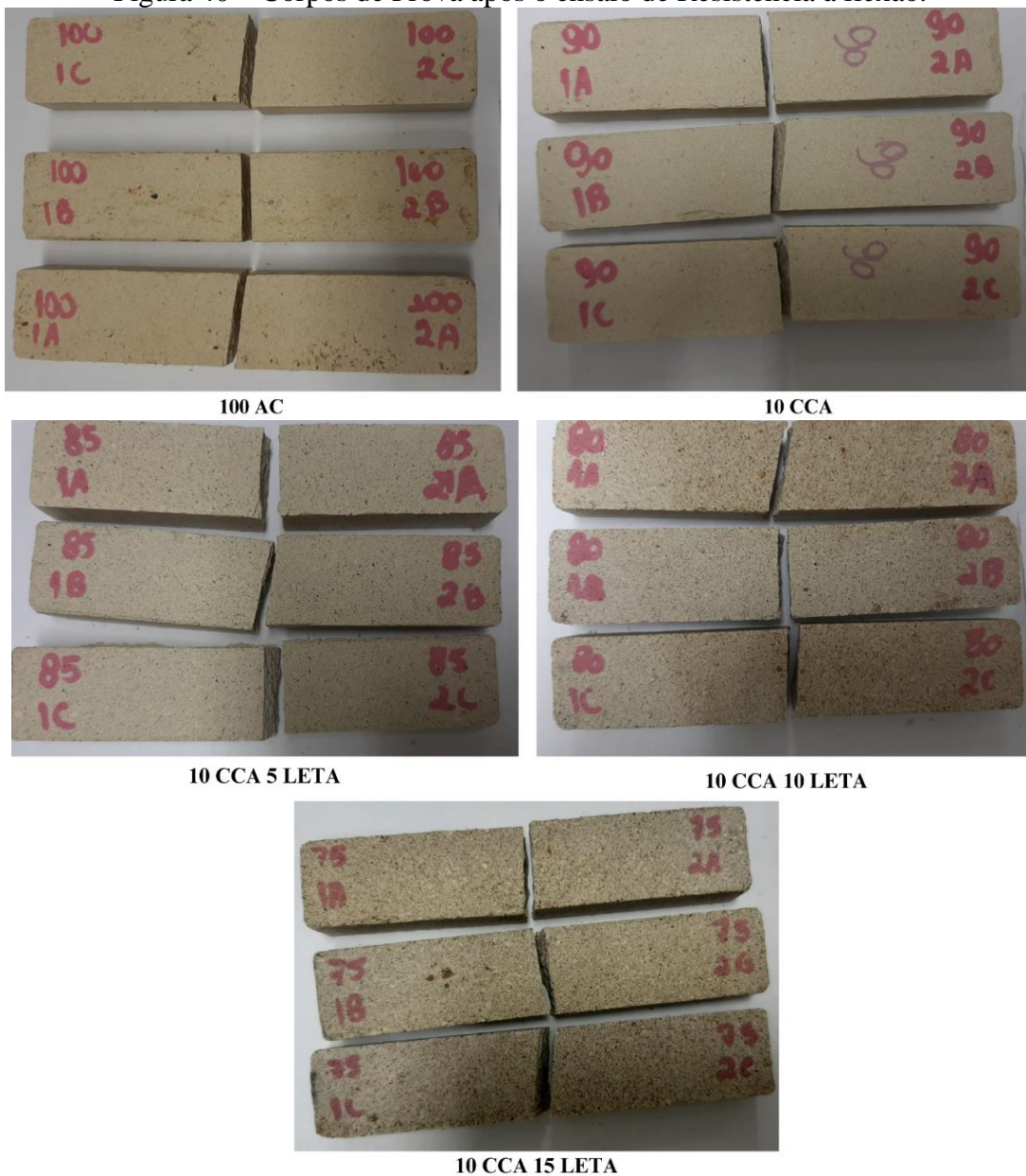
Fonte: Autoria Própria

Em comparação com a amostra referência 100AC, a cerâmica 10CCA 10LETA apresentou o melhor resultado na resistência à tração na flexão dentre as composições utilizando

substituições por resíduos sustentáveis. Em contrapartida, apenas com a substituição de 10% CCA ocorreu uma diminuição de 12% da resistência. O desvio padrão das amostras 10CCA 15LETA e 10CCA, foram praticamente nulos em comparação a cerâmica 10CCA 5LETA.

As composições avaliadas encontram-se dentro do limite aceitável para aplicações como refratários. Segundo Cunha-Duncan *et al.* (2003), a faixa de resistência à flexão para refratários em temperatura ambiente é entre 10 MPa a 40 MPa. A Figura 40 mostra o resultado dos CPs após o ensaio. Percebe-se que a ruptura dos materiais cerâmicos aconteceu no centro da peça onde o momento fletor é máximo.

Figura 40 – Corpos de Prova após o ensaio de Resistência à flexão.



Fonte: Autoria Própria

4.3.2 Resistência à compressão

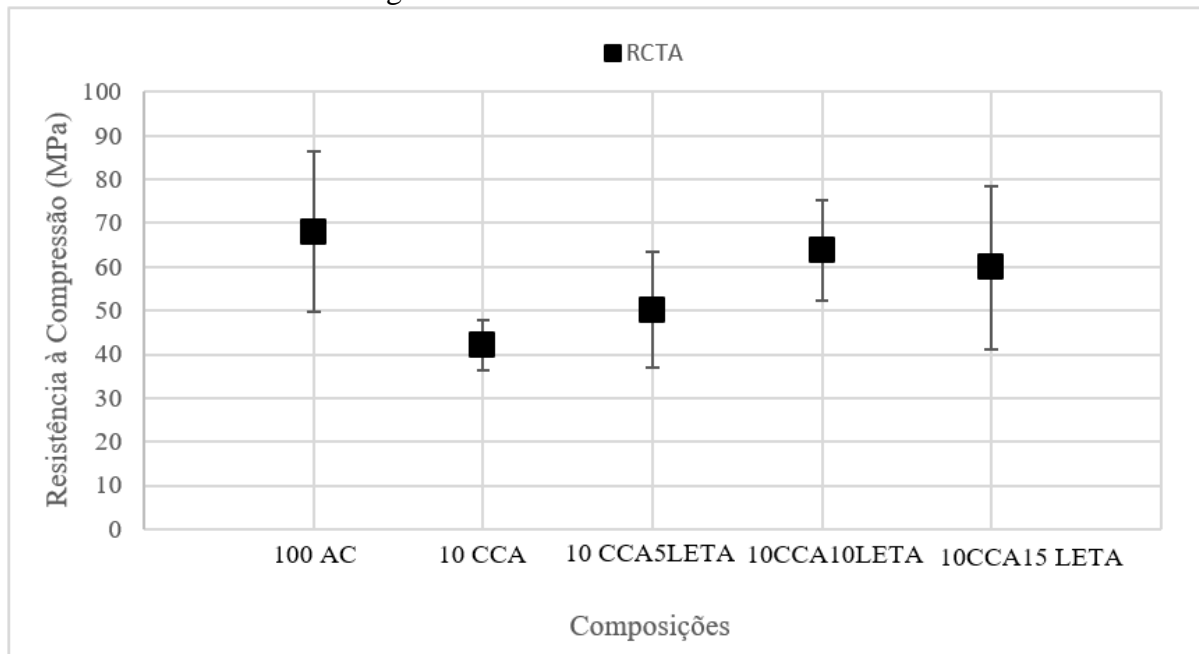
Os resultados do ensaio de resistência à compressão são apresentados na Tabela 13 e na Figura 41.

Tabela 13 – Resultados de RCTA

Composições	Médias		Desvio Padrão	Coef. De Variação (%)
	F _{máx} (N)	RCTA (MPa)		
100 AC	51600,00	70,37	18,39	26,13
10 CCA	31600,00	43,20	5,51	13,45
10 CCA 5 LETA	34250,00	47,06	13,37	28,41
10 CCA 10 LETA	49500,00	67,49	11,44	16,95
10 CCA 15 LETA	40600,00	56,41	18,65	33,07

Fonte: Autoria Própria

Figura 41 – Resultados médios RCTA



Fonte: Autoria Própria.

Pode-se observar que a amostra referência 100AC apresentou a maior resistência (70,37 MPa), seguido da amostra 10CCA 10LETA com valor de RCTA de 67,49 MPa. A cerâmica refratária com adição de 10% de CCA apresentou redução de aproximadamente 40% em comparação à referência, porém, o menor desvio padrão. Conforme mencionado no item 4.2.1, a porosidade afeta diretamente a resistência mecânica dos cerâmicos refratários.

A adição de lodo ETA apresentou acréscimo no resultado da resistência a compressão. No estudo realizado por Santos (2018), levantou-se a hipótese de que o aumento da resistência a compressão pode ser derivado do lodo calcinado adquirir características de material pozolânico.

O rompimento do CP ocorre através de uma seção transversal de um material, em direção perpendicular à carga aplicada. A propagação da trinca nas cerâmicas pode ser através dos grãos (transgranular) ou ao longo do contorno dos grãos (intergranular) (CALLISTER, 2018). A Figura 42 mostra os CPs de 100 AC após o ensaio de resistência à compressão.

Figura 42 – CPs após ensaio de resistência à compressão

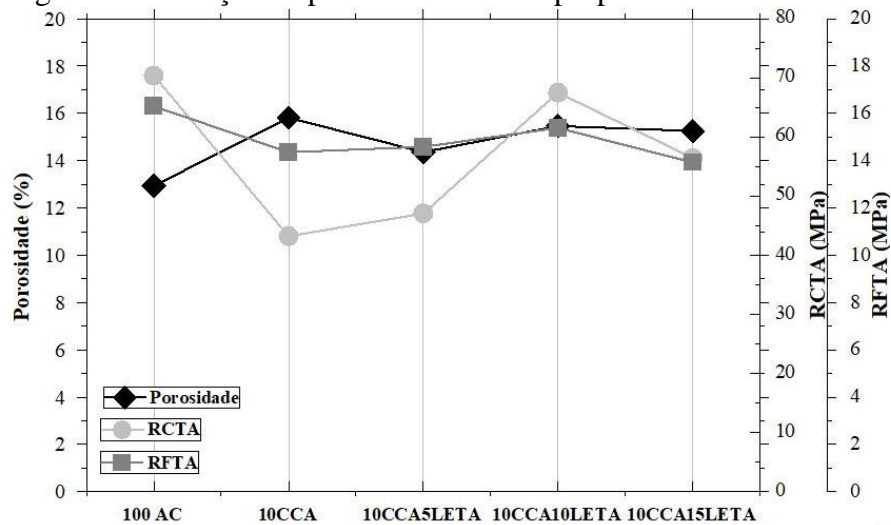


Fonte: Autoria Própria

Ademais, neste ensaio, foi possível comparar e avaliar dois materiais distintos utilizados como placas de proteção dos CPs. Desse modo, utilizou-se a placa de proteção (a) composta por tecido de fibra de vidro PTFE (teflon) e a placa de proteção (b) composta por etileno acetato de vinila (EVA). A placa (b) de 4mm de espessura apresentou uma diminuição de 12% no desvio padrão em comparação a placa (a) de 0,2mm de espessura. Além da melhoria do desvio padrão, o objeto protetor (b) é facilmente encontrado em comércios locais e economicamente mais viável que a placa de proteção (a).

A Figura 43 mostra a relação da propriedade física (porosidade) com as propriedades mecânicas de compressão e a tração na flexão em três pontos. A amostra 100AC foi a que apresentou o melhor desempenho mecânico, bem como, a menor porosidade. Em contra partida, a amostra 10CCA apresentou porosidade superior e redução na resistência à compressão na tração na flexão em três pontos de 38,6% e 12%, respectivamente.

Figura 43 - Relação da porosidade com as propriedades mecânicas



Fonte: Autoria Própria

Desse modo, levando em consideração a substituição de AC por resíduos sustentáveis, a amostra 10CCA10LETA foi a que apresentou o melhor desempenho em comparação com a 100AC nas três propriedades analisadas. Ainda, através da adição de lodo ETA obteve-se aumento considerável nas propriedades mecânicas.

As composições 10CCA e 10CCA10LETA apresentaram porosidade similar, mas a resistência a compressão com adição de lodo ETA aumentou drasticamente, mostrando que apesar da porosidade, há influência de fatores internos que colaboram para o ganho da resistência mecânica. Supracitado no item 4.1.3, o lodo ETA calcinado pode apresentar características pozolânicas.

Cardoso (2022), constatou que houve decréscimo nas propriedades mecânicas ao substituir AC por 10% de CCA. A amostra teve diminuição de aproximadamente 45% na RCTA e 22% na RFTA. Ainda, a porosidade aparente para esta composição foi de 16,45%.

Azolim (2022), estudou a substituição de AC por 15% de CCA e verificou a redução de 63,4% na RCTA e 23,40% na RFTA. Desse modo, a porosidade aparente encontrada foi de 16,20%. Ao analisar os trabalhos de Cardoso (2022) e Azolim (2022), constatou-se que quanto maior a porcentagem de CCA adicionada, menor são os benefícios na resistência mecânica devido à elevação da porosidade aparente.

Fica evidente que quanto maior a porcentagem de porosidade presente na estrutura do material, há decréscimo nos resultados das propriedades mecânicas, apresentando uma ligação inversamente proporcional.

4.4 ENSAIO TERMOMECAÂNICO

Realizou-se ensaio de resistência ao choque térmico para avaliar as propriedades termomecânicas dos cerâmicos refratários.

4.4.1 Resistência ao Choque Térmico

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência ao choque térmico.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de Choque Térmico

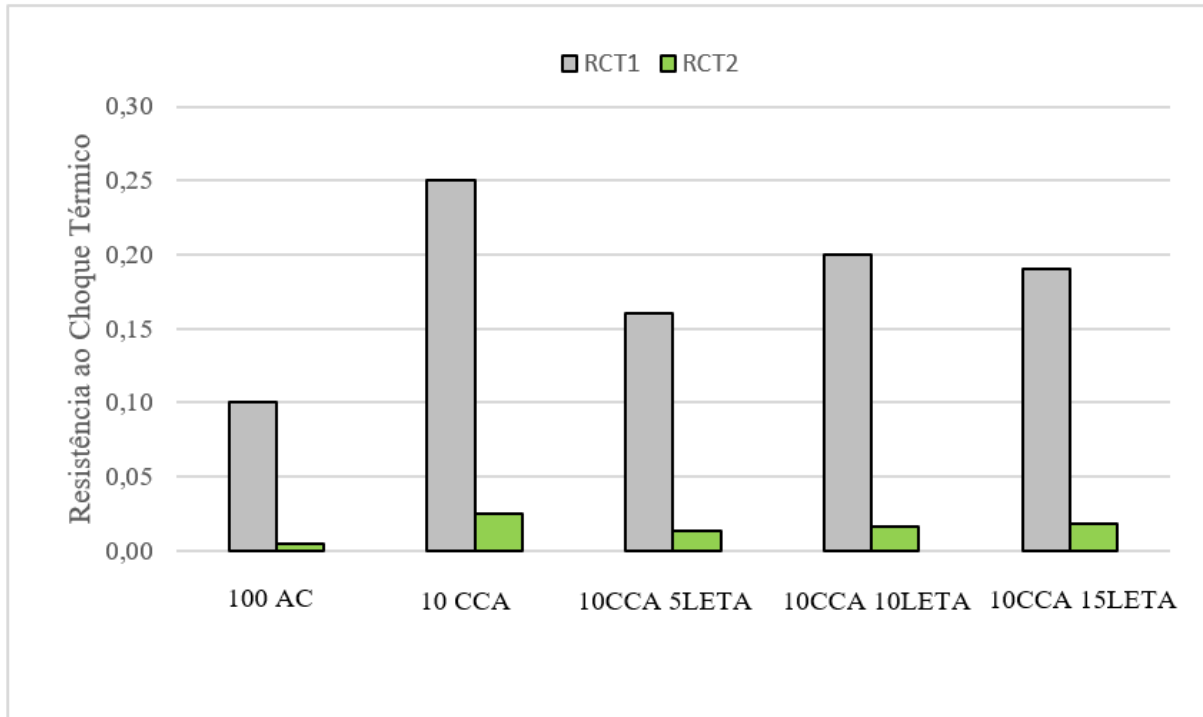
Cerâmicas	CP	Ciclo da primeira trinca (A)	Ciclo da Fratura (B)	RCT 1 (A/B)	RCT 2 (A)/(B²)
100 AC	A	2	22	0,09	0,004
	B	3	24	0,13	0,005
	C	2	21	0,10	0,005
	D	2	22	0,09	0,004
Média		2,25	22,25	0,10	0,005
90 AC 10 CCA	A	3	9	0,33	0,037
	B	2	18	0,11	0,006
	C	3	10	0,30	0,030
	D	3	11	0,27	0,025
Média		2,75	12	0,25	0,025
85 AC 10 CCA 5 LETA	A	2	11	0,18	0,017
	B	2	22	0,09	0,004
	C	2	13	0,15	0,012
	D	2	10	0,20	0,020
Média		2	14	0,16	0,013
80 AC 10 CCA 10 LETA	A	3	13	0,23	0,018
	B	2	11	0,18	0,017
	C	3	11	0,27	0,025
	D	2	19	0,11	0,006
Média		2,5	13,5	0,20	0,016
75 AC 10 CCA 15 LETA	A	3	8	0,38	0,047
	B	2	14	0,14	0,010
	C	2	16	0,13	0,008
	D	3	24	0,13	0,005
Média		2,5	15,5	0,19	0,018

Fonte: Autoria Própria

Observa-se que o ciclo da primeira trinca ocorreu entre o segundo e terceiro ciclo em todas as composições cerâmicas. O ciclo de fratura variou entre os CPs da mesma composição. A resistência ao choque térmico avalia a relação do ciclo da primeira trinca pelo ciclo de fratura, sendo assim, quanto menor o valor de RCT1 maior é sobrevida do material cerâmico.

Os resultados de RCT1 e RCT2 são mostrados no gráfico da Figura 44. Levando em consideração a duração de ciclos antes da ruptura do material, as amostras de 100AC foram as que apresentaram melhores resultados em RCT2.

Figura 44 – Resultados do ensaio de Choque Térmico

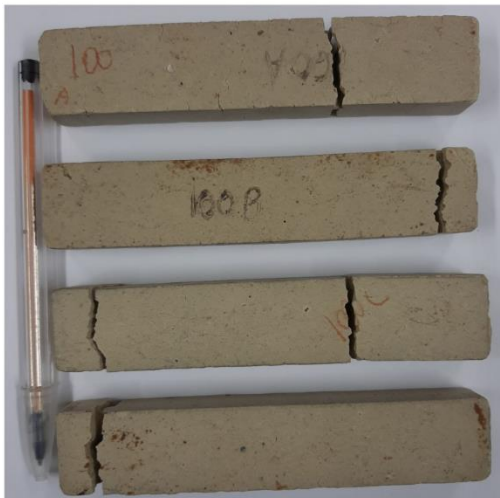


Fonte: Autoria Própria

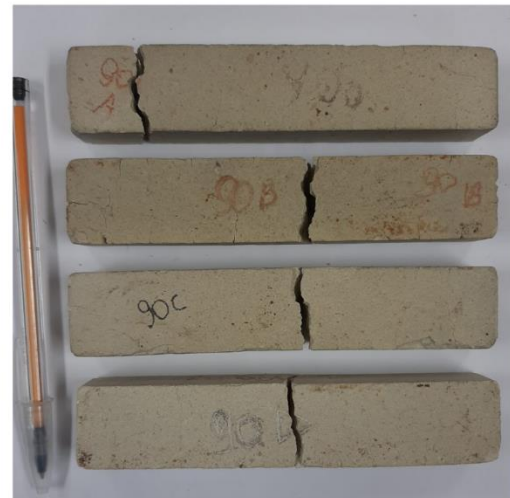
Nota-se que a cerâmicas compostas com lodo ETA apresentaram melhora na resistência ao choque térmico em relação a composição 10CCA. De acordo com Quevedo (2020), a melhora do desempenho térmico nos CPs com presença de alumina (oriunda do LETA) pode ser explicado pela maior porosidade do material, visto que a alumina é reconhecida pela sua baixa resistência ao choque térmico, devido a sua elevada condutividade térmica para um óxido.

Segundo Oliveira *et al.* (2022), os poros facilitam a nucleação de trincas que podem levar ao fator de intensidade de tensão crítico da peça, sendo assim, a presença de microporos pode reduzir a energia de propagação da trinca, e conseqüentemente, levar o aumento da resistência ao choque térmico. A Figura 45 mostra o resultado dos CPs após o ensaio de choque térmico.

Figura 45 – CPs após ensaio de Choque Térmico



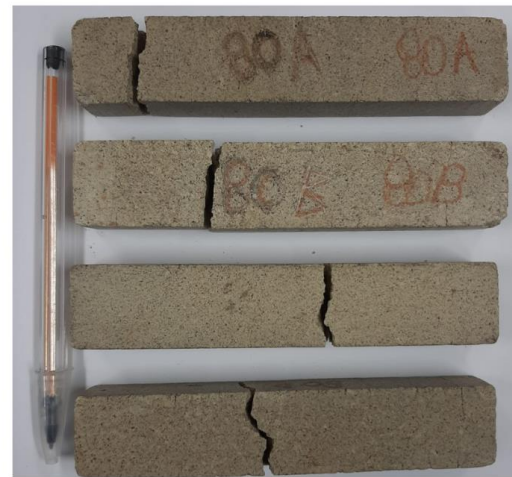
100 AC



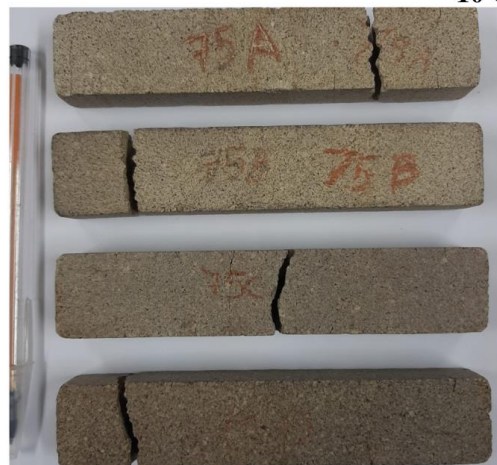
10 CCA



10 CCA 5 LETA



10 CCA 10 LETA



10 CCA 15 LETA

Fonte: Autoria Própria

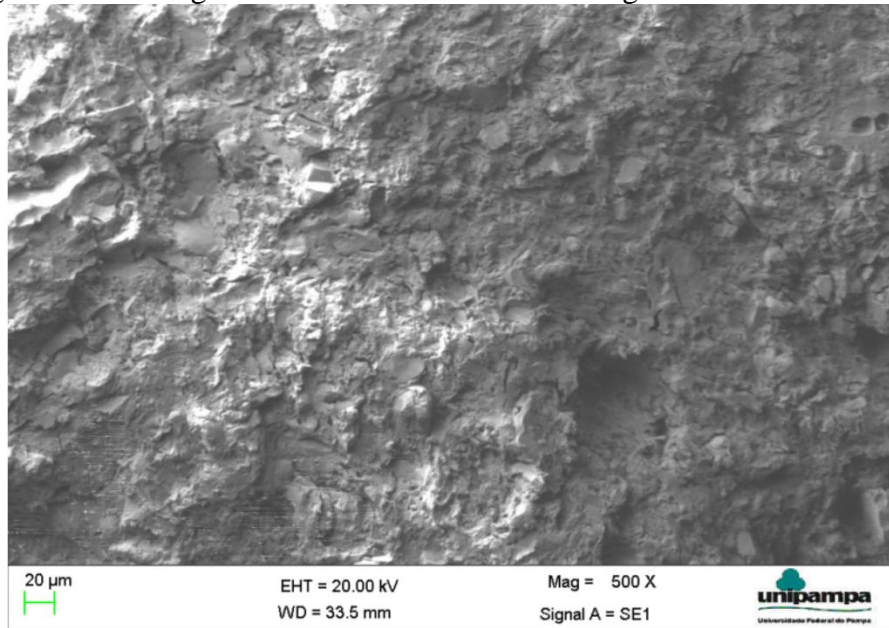
4.5 ANÁLISE MORFOLÓGICA

Foi realizado o ensaio de análise morfológica em MEV nos corpos cerâmicos.

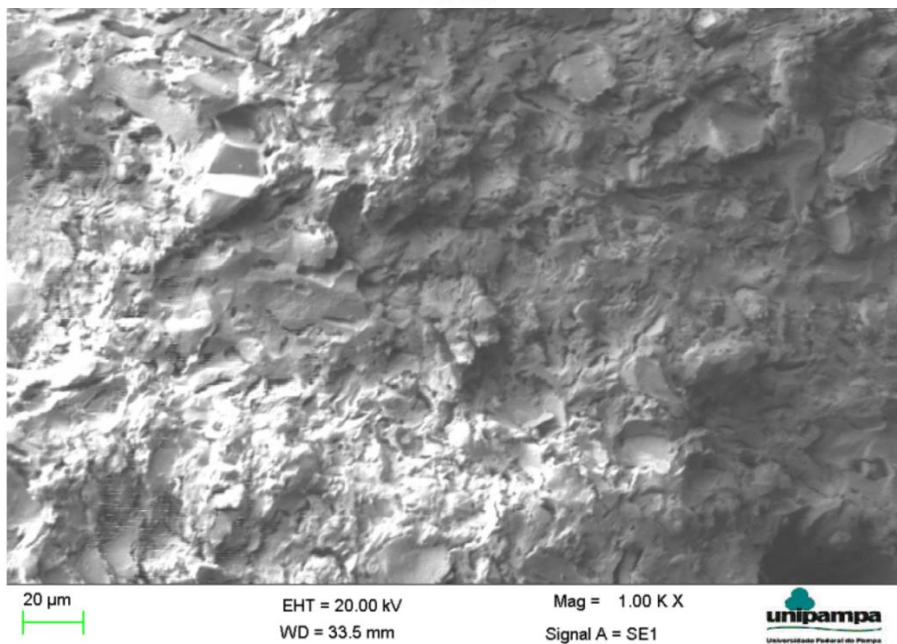
4.5.1 Análise morfológica em MEV

Foram realizadas micrografias com magnitudes de 500x e 1000x, como mostram a Figura 46 à Figura 50. A voltagem foi de 20 kV e distância de trabalho (WD) variou de 8,0 a 33,5 mm.

Figura 46 - Micrografias 100 AC em MEV com magnitude de 500x e 1000x



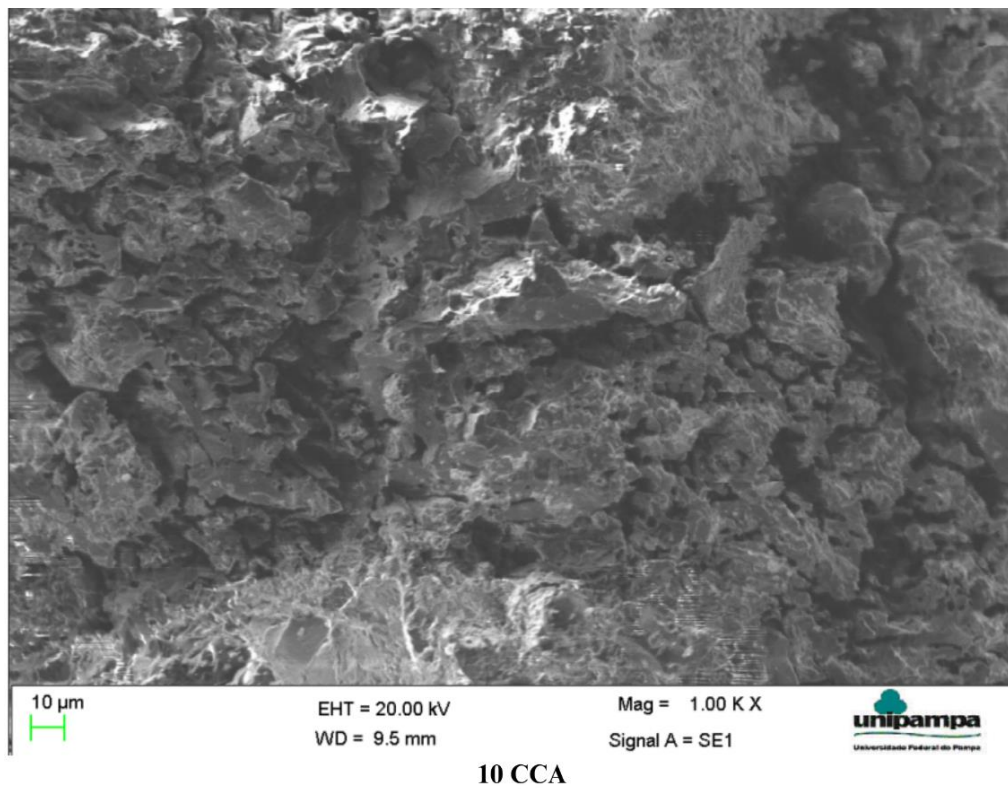
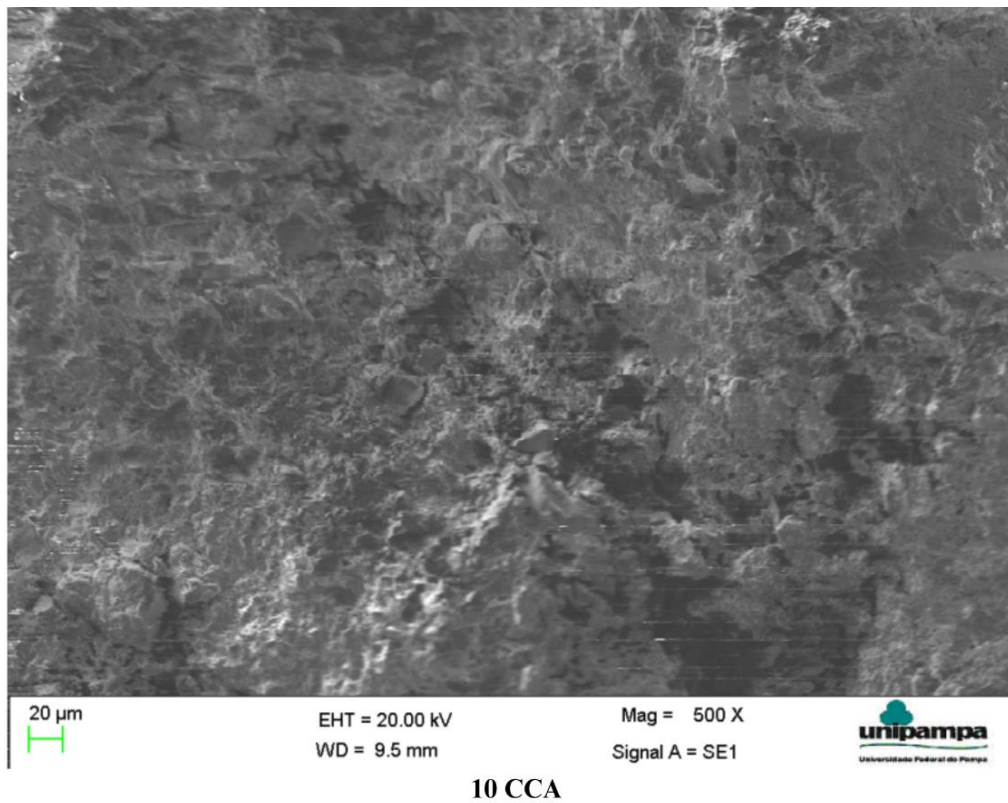
100 AC



100 AC

Fonte: Autoria Própria

Figura 47 - Micrografias 10 CCA em MEV com magnitude de 500x e 1000x



Fonte: Autoria Própria

Figura 48 - Micrografias 10 CCA 5LETA em MEV com magnitude de 500x e 1000x

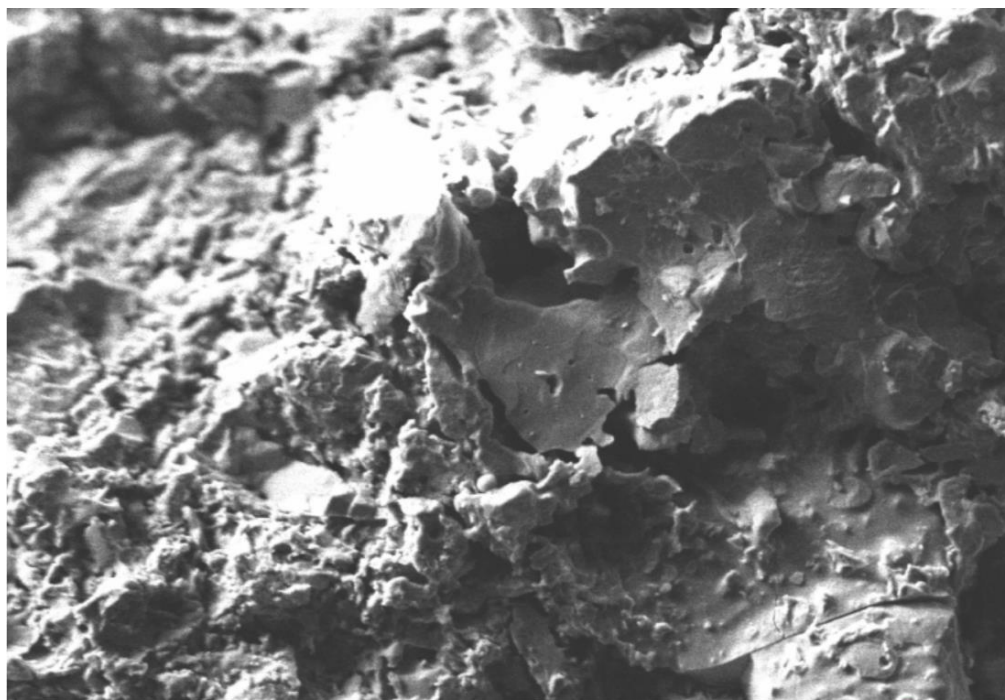
20 μ m

EHT = 20.00 kV

Mag = 500 X

WD = 10.0 mm

Signal A = SE1

**10 CCA 5LETA**10 μ m

EHT = 20.00 kV

Mag = 1.00 K X

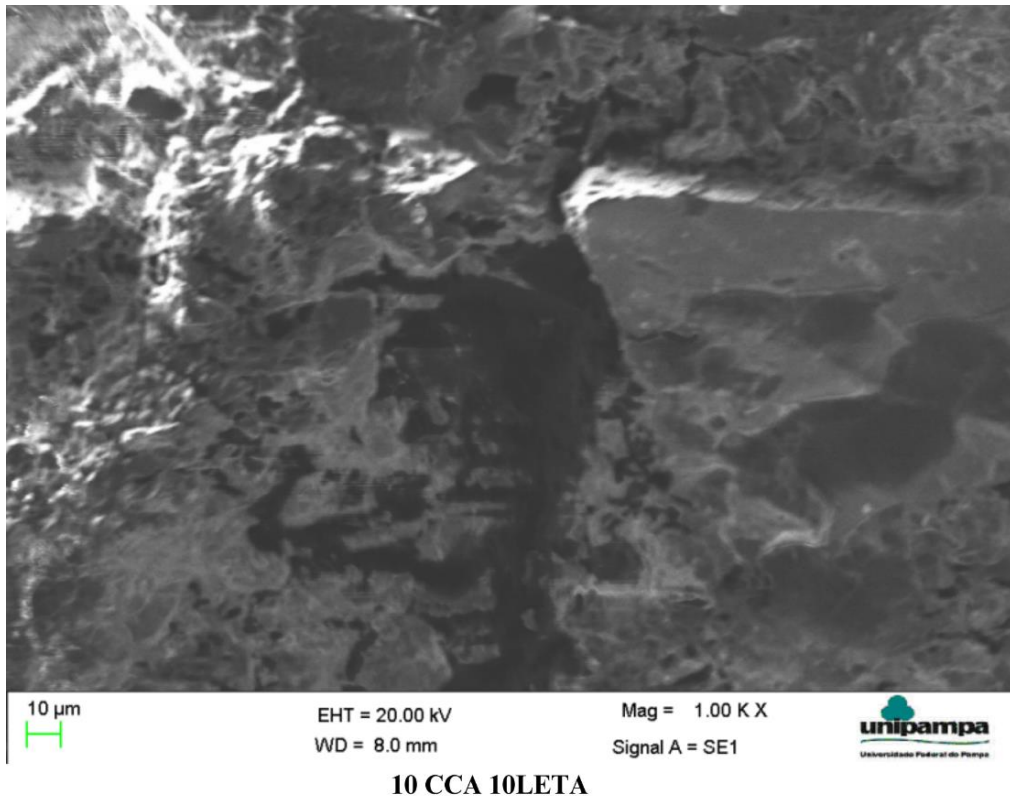
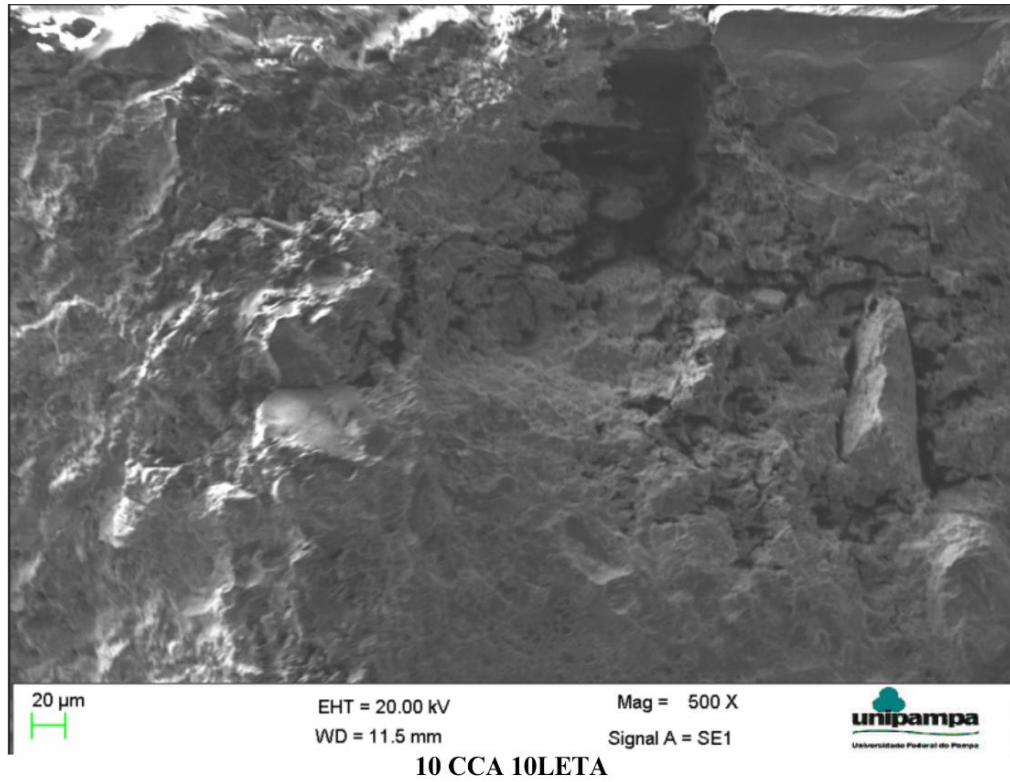
WD = 10.0 mm

Signal A = SE1

**10 CCA 5LETA**

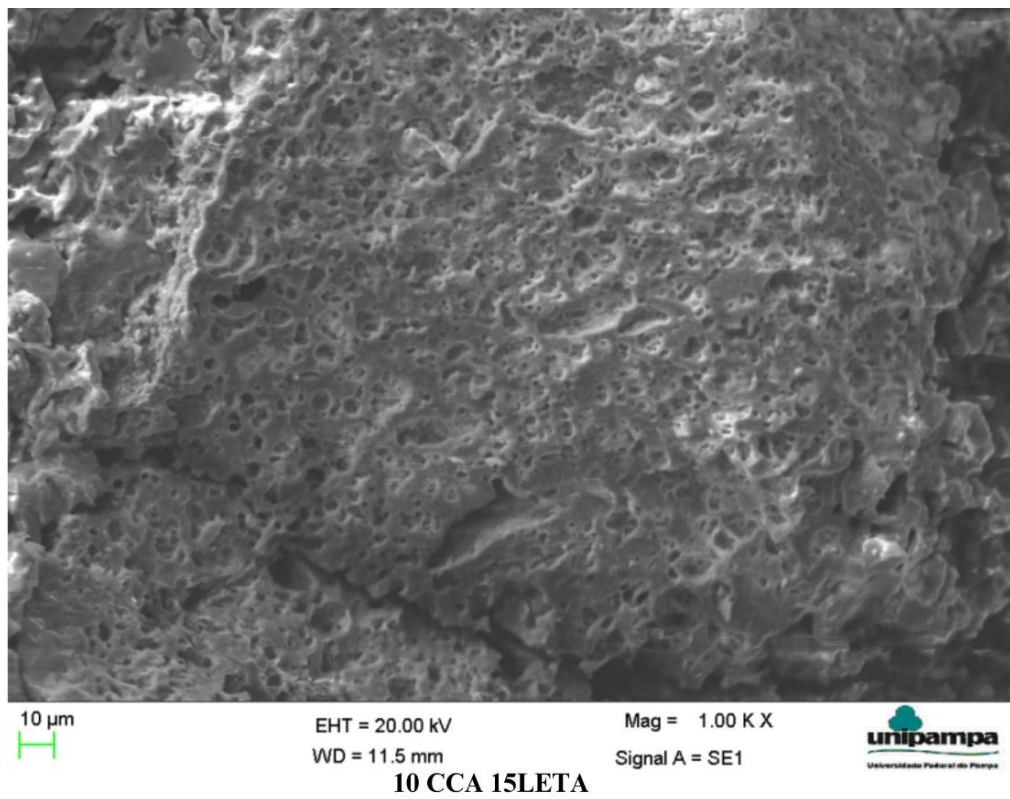
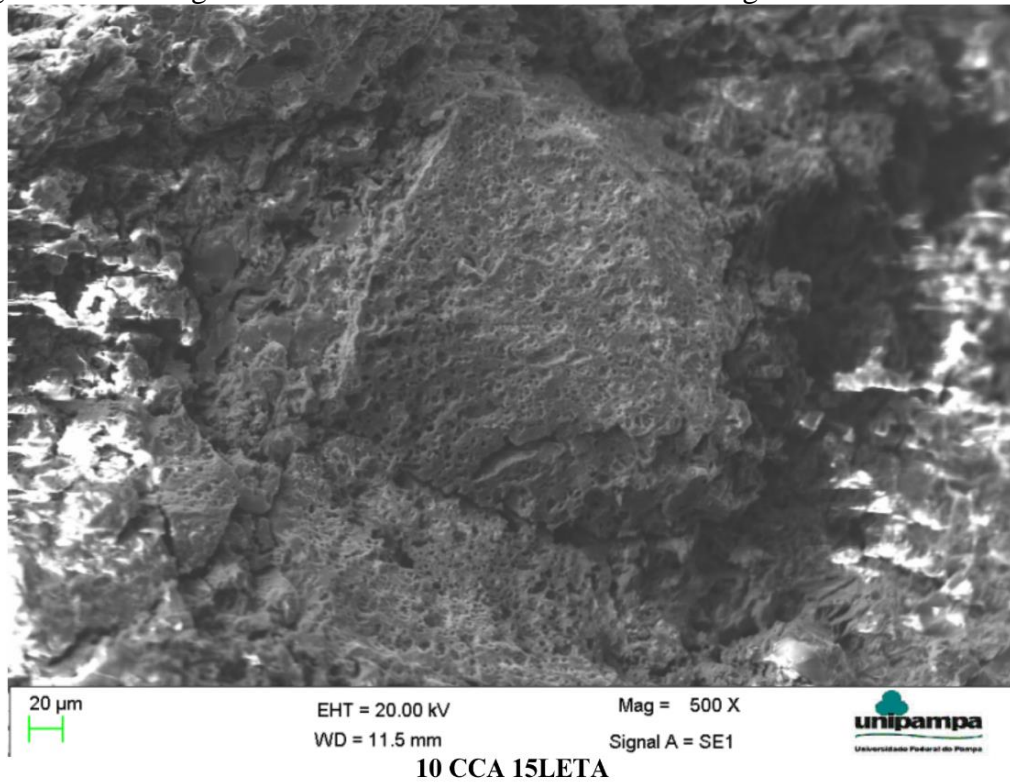
Fonte: Autoria Própria

Figura 49 - Micrografias 10CCA 10LETA em MEV com magnitude de 500x e 1000x



Fonte: Autoria Própria

Figura 50 - Micrografias 10CCA 15LETA em MEV com magnitude de 500x e 1000x



Fonte: Autoria Própria

Visualmente, a amostra 100AC da Figura 46 apresentou uma estrutura mais lisa, grãos em formato de esfera e baixa presença de vazios. Essa amostra obteve a menor porosidade e maior densidade de massa aparente e, conseqüentemente, o melhor desempenho nos ensaios mecânicos e termomecânico. A amostra com 10CCA15LETA apresentou uma estrutura menos frágil em comparação com as demais.

A Figura 47 mostra a micrografia da composição 10CCA, foi possível observar uma grande quantidade de vazios intercomunicados e granulometria irregular. Esse resultado era esperado devido ao desempenho refratário em relação as propriedades físicas e os ensaios mecânicos e termomecânico.

Através das micrografias, observa-se que com a adição de sílica as superfícies apresentaram elevada quantidade de poros de menor dimensão e textura irregular. Conforme aumentou-se progressivamente o uso de lodo ETA nas composições, estas apresentaram uma estrutura com poros mais abertos, porém, em menor quantidade e textura lisa em comparação com a amostra 10CCA.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como foco as cerâmicas refratárias sílico aluminosas. Utilizou-se como fonte de sílica a cinza da casca de arroz (CCA) e o lodo de estação de tratamento de água (lodo ETA) como fonte de alumina. Foi substituído em massa à argila caulim (AC) por 10% CCA e 5, 10 e 15% lodo ETA para análise das propriedades físicas, mecânicas e termomecânicas. A partir das análises dos resultados obtidos, pode ser apresentadas as seguintes conclusões:

- A análise dos difratogramas mostrou que para a adição de 15% de lodo ETA houve o decréscimo na intensidade dos picos de quartzo.
- Ao comparar com a amostra 100 AC, verificou-se que as composições com adição de lodo ETA, diminuiram a densidade de massa, porém aumentaram tanto a porosidade quanto a absorção por água.
- Em comparação com a amostra referência 100AC (16,30 MPa), a cerâmica 10CCA 10LETA apresentou o melhor resultado na resistência à tração na flexão (15,38MPa). Em contrapartida, apenas com a substituição de 10% CCA ocorreu uma diminuição de 12% da resistência.
- A adição de 5, 10 e 15% de lodo ETA apresentou acréscimo no resultado a resistência à compressão. Porém, a cerâmica com adição de 10% CCA apresentou redução de aproximadamente 40% na resistência a compressão em comparação à amostra 100AC.
- A placa de acetato de vinila (EVA) colaborou para a diminuição do desvio padrão nos resultados de resistência à compressão.
- As cerâmicas compostas com lodo ETA (5, 10 e 15%) apresentaram melhora na resistência ao choque térmico em relação a composição com substituição de 10% CCA.
- De modo geral, a cerâmica 10CCA10LETA foi a composição em que se conseguiu a melhor relação entre associar o aproveitamento do uso das substituições sustentáveis e obter desempenho satisfatório nos ensaios físicos, mecânicos e termomecânicos, obtendo-se um refratário que atende aos parâmetros de utilização e em que 20% da composição são resíduos agroindustriais.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através dos resultados obtidos nesta pesquisa, faz-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Utilizar lodo de estação de tratamento de água direto do decantador, evitando o lodo gerado pelos filtros;
- Fabricar no mínimo 6 corpos de prova para cada ensaio realizado;
- Fabricar cerâmicos refratários com composições de lodo com granulometria de areia fina e composições de lodo com granulometria de areia grossa;
- Verificar a influência da granulometria do lodo nas propriedades físicas, mecânicas e termomecânica;
- Analisar a melhor rampa de queima para sinterização e verificar os componentes químicos gerados nelas na DRX.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROEXPORT. **Arroz: 2022 deve ser de recorde na exportação em volume e receita cambial.** Canal Rural, 2022. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/noticias/agricultura/arroz-2022-deve-ser-de-recorde-na-exportacao-em-volume-e-receita-cambial>. Acesso em: 15, dezembro de 2022.

ALENCAR, V. N. S.; BATISTA, J. M. S.; NASCIMENTO, T. P.; CUNHA, M. N. C. C.; LEITE, A. C. L., **Resíduos Agroindustriais: Uma alternativa promissora e sustentável na produção de enzimas por microorganismos.** Congresso Internacional da Agroindústria. CIAGRO, 2020. Disponível em: <https://ciagro.institutoidv.org/ciagro/uploads/1753.pdf>. Acesso: 22 janeiro 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **ABIFA CEMP 120:** Determinação da perda ao fogo. 2015. Disponível em: <http://www.tecnofund.com.br/cemp/normas/120.pdf> . Acesso: 04 janeiro 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **ABIFA CEMP 120:** Determinação da perda ao fogo. 2015. Disponível em: <http://www.tecnofund.com.br/cemp/normas/120.pdf>. Acesso em: 04 janeiro 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001:2015: Sistemas de gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso.** Rio de Janeiro, p.8. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 5014:** Produtos refratários conformados densos e isolantes - Determinação do módulo de ruptura à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 10059-2:** Produtos refratários prensados densos – Determinação da resistência à compressão a frio. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 13202:** Materiais refratários – Determinação da resistência ao choque térmico com resfriamento em água. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 16661:** Materiais refratários densos conformados - Determinação do volume aparente, volume aparente da parte sólida, densidade de massa aparente, densidade aparente da parte sólida, porosidade aparente e absorção. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 6457:** Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR. 10237:** Materiais refratários – Classificação. Rio de Janeiro, 2014.

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.

BOEIRA, A.P.; **Tecnologia dos Materiais**, 2007. Disponível em: http://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/2_Mecatr%C3%B4nica/Materiais_1_Meca_2/Tecnologia%20dos%20Materiais_Complementar.pdf. Acesso em: 12, janeiro de 2023.

Brasil. Fundação Nacional de Saúde. Manual de fluoretação da água para consumo humano / Fundação Nacional de Saúde. – Brasília : **Funasa**, 2012. 72 p. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/mnl_fluoretacao_2.pdf. Acesso em: 20 novembro 2022.

BRITO, A. W. L., **Introdução Geral à Tecnologia Cerâmica**. Curso técnico de nível médio em cerâmica, 2011. Disponível em: https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2011/10/ceramica_introducao_geral_a_tecnologia_ceramica.pdf. Acesso em: 10, janeiro 2023.

CAESB. **Como a Água é tratada?** 2022. Disponível em: <https://www.caesb.df.gov.br/como-a-agua-e-tratada.html#:~:text=Filtra%C3%A7%C3%A3o,impurezas%20ainda%20presentes%20na%20%C3%A1gua>. Acesso em: 23 novembro 2022.

CALIARI, H. F. **Análise de difusividade térmica na junção metal/cerâmica uns 32304/Sílico-aluminosa 45-50**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. v.5, p. 281. LTC, 2002.

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. v.9, p. 1014. LTC, 2018

CARDOSO, C. V. **Avaliação das propriedades mecânicas e termomecânicas em compósitos cerâmicos refratários utilizando cinza da casca de arroz e lodo de estação de tratamento de água**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Universidade Federal do Pampa. Alegrete, Rio Grande do Sul, 2022.

CNI: Reduzir resíduos sólidos é prioridade ambiental para empresas. **Poder 360**. Brasília (DF), 09 novembro de 2022. Disponível em: [https://www.poder360.com.br/industria-sustentavel/cni-reduzir-residuos-solidos-e-prioridade-ambiental-para-empresas/#:~:text=Pesquisa%20da%20CNI%20\(Confedera%C3%A7%C3%A3o%20Nacional,pr%C3%A1ticas%20para%20cumprir%20essa%20meta](https://www.poder360.com.br/industria-sustentavel/cni-reduzir-residuos-solidos-e-prioridade-ambiental-para-empresas/#:~:text=Pesquisa%20da%20CNI%20(Confedera%C3%A7%C3%A3o%20Nacional,pr%C3%A1ticas%20para%20cumprir%20essa%20meta)>. Acesso em: 23 novembro de 2022.

CONCEIÇÃO, E. S. **Influência da distribuição granulométrica no empacotamento de matérias-primas na formulação de porcelânicos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2011.

COSTA, V. M.; SILVA, D. C. S.; Lyra, M. W. C. Incorporação do Lodo de Estação de Tratamento de Água em concretos e argamassas. **Canapesc**. Rio de Janeiro, 2021.

COTTA, L. S.; RODRIGUES, C. G. **Avaliação de Revestimento Refratário no Processo Siderúrgico**. Revista E-xacta, Belo Horizonte: Editora UniBH , v. 7, n. 1, p.185-203, 2014.

CUNHA, M. V. P. O., **Importância da frequência de descarte de lodo na eficiência dos decantadores de estações de tratamento de água em ciclo completo**. Orientador: Dr. José Almir Rodrigues Pereira. 2004. 263 p. Dissertação de mestrado. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/1885/1/Dissertacao_ImportanciaFrequenciaDescarte.pdf. Acesso em: 24 novembro 2022

CUNHA-DUNCAN, F. N.; BRADT, R. C. Fratura de refratários. **Cerâmica**, v. 49, n. 312, p. 199-215, 2003.

DA LUZ, A. B., LINS, F. A. **Rochas & Minerais Industriais - Usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

DA SILVA, D.R., ROSA, G. **Estudo comparativo de custos entre o tijolo de solo-cimento, tijolo de solo-cimento com incorporação de lodo de estação de tratamento de água e o tijolo cerâmico**. Monografia – Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão, p.57, 2020.

DELLA, V.P.; HOTZA, D.; JUNKES, J.A., OLIVEIRA, A.P.N., **Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz**, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/tmqz5kqfhyypGSRmJvMxXyy/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 05 janeiro de 2023.

DELLA, V.P.; KUHN, I.; HOTZA, D., **Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica**, 2005.

DELLA, V.P.; KUHN, I.; HOTZA, D., **CHARACTERIZATION OF RICE HUSK ASH FOR USE AS RAW MATERIAL IN THE MANUFACTURE OF SILICA REFRACTORY**, 2001. **Quim. Nova**, Vol. 24, No. 6, 778-782.

DELLA, V. P., **Processamento e caracterização de sílica ativa obtida a partir de cinza da casca de arroz**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

EMBRAPA. **Cultivo do arroz: Importância econômica e social**, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pre-producao/socioeconomia/importancia-economica-e-social>. Acesso em: 20, dezembro de 2022.

FOLETTTO, E.L.; HOFFMANN, R., HOFFMANN, R.S., JR, U.L.P., JAHN, S.L., **Aplicabilidade das Cinzas da Casca de Arroz**, 2005.

FONSECA, M.R.G., **Isolantes térmicos fabricados a partir da cinza da casca de arroz: obtenção, caracterização de propriedades e sua relação com a microestrutura**. 1999. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, metalurgia e de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999, 140p.

GANZALA, G. G., **A industrialização, impactos ambientais e a necessidade de desenvolvimento de políticas ambientais sustentáveis no século XXI**. UNINTER, 2018.

GOMES, L.S.; FURTADO, A.C.R.; SOUZA, M.C., **A Sílica e suas Particularidades**, 2018. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v10n4a19.pdf> . Acesso: 05, janeiro de 2023.

GONÇALVES, M.R.F.; BERGMANN, C.P. **Thermal insulators made with rice husk ashes; production and correlation between properties and microstructure. Construction and Building Materials**, 21:2059-2065, 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censos 2017. **Atlas de Saneamento**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/atlas_saneamento/#/home/. Acesso em: 22 novembro de 2022. Acesso em: 04 dezembro de 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censos 2017. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/30/84366?ano=2017>. Acesso em: 22 novembro de 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. PAM, 2021. **Produção Agrícola Municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. Acesso em: 22 novembro de 2022. Acesso em: 20, dezembro de 2022.

IWAKI, G., Destinação final de Lodos de ETAs e ETEs. Portal tratamento de água, 2018. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-etas-e-etes/>. Acesso em: 14, dezembro de 2022.

JUNIOR, V.M.T. **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de lodo de estações de tratamento de água, microsferas de vidro de jateamento, sais de neutralização de ácidos de baterias e areias de fundição**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2009.

JUNIOR, C. A. L., **Estudo das propriedades mecânicas do concreto com substituição parcial do agregado miúdo pela casca de arroz *in natura***. Trabalho de conclusão de curso. Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.

KIELING, A.G.; MORAES, C.A.M.; BREHM, F.A.; KULAKOWSKI, M.P., **Influência do Processo de Combustão nas Características das Cinzas de Cascas de Arroz**, 2010. LOPES, E.R; MEDINA, A.L.; RIBEIRO, A.S.; BRANDALISE, J.N; NUNES, A.M., **Caracterização elementar da casca de arroz e suas cinzas por mip oes após decomposição ácida com sistema de refluxo**, 2017.

LUZ, A.B.; CAMPOS, A.R.; CARVALHO, E. A.; BERTOLINO, L. C.; SCORZELLI, R. B., Argila – Caulim. Rochas e Minerais Industriais – **CETEM/2008**, 2ª Edição. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1101/1/12%20CAULIMmar%C3%A7o%20Revisado%20B%20ertolino%20e%20Scorzelli.pdf>. Acesso em: 27, dezembro de 2022.

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: 06, janeiro de 2023.

MEDEIROS, S.G.; DUTRA, R.P.S.; GRILO, J.P.F; MARTINELLI, A.E.; PASKOCIMAS, C.A.; MACEDO, D.A., **Preparação de compósitos alumina-mulita de baixo custo via sinterização reativa entre uma argila caulinítica da Paraíba e hidróxido de alumínio**, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/74ndjp9MXwH7nwW599jfRqv/?format=pdf&lang=pt>. Acesso: 06 janeiro de 2023.

MENDONÇA, L. C., MEICHTRY, R. S., NUNES, A. S., MARANGON, E., TIER, M. A. D., Compósitos cerâmicos de argila refratária, sílica da casca de arroz e fibras: avaliação das propriedades. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, 2020.

MEERT, R., HASTENPFLUP, D., ANDRADE, J. J. O., Contribution to the use of wet sludge water treatment plant fine aggregate in Portland cement concretes: Evaluation of consistency, density, porosity, absorption, strength and tensile strength. **Revista Matéria**, 2021. V.26 N.03. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/Ng9cpFNDQB3MNJwhm6xByzJ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 22 maio de 2023.

MURARO, PÉRSIO; CAMELO, C.O.; DENIS, F.A., **Aproveitamento e valorização da casca de arroz: Uma revisão bibliométrica**, 2018.

NAKAGAWA, Z. **Refractories Handbook**: Testing of refractories. Japão, 1998. 577p. Acesso: 21 maio de 2023.

NIESWALD, R.; ANTONIO DURLO TIER, M. Desenvolvimento de materiais cerâmicos refratários empregando sílica residual da casca de arroz. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 11, n. 2, 30 mar. 2020.

NUNES, A.S. **Desenvolvimento de cerâmicas refratárias com substituição da argila refratária por sílica da casca de arroz, microfibras cerâmicas e fibras de aço: caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas**. Orientador: Marco Antonio Durlo Tier. 2017. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Pampa. Alegrete - RS, 2017. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/riu/1950/1/Alessandro%20da%20Silva%20Nunes%20-%202017.pdf>. Acesso em: 16 janeiro 2023.

OLIVEIRA, E.M.S; MACHADO S.Q.; HOLANDA, J.N.F., **Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha**, p. 330, 2004.

OLIVEIRA, J. C. M.; SILVA, F. J. S.; MARQUES, L. F. N.; RABELO, A. A., Influência da granulometria do agregado na resistência ao choque térmico de refratário de alta alumina. **Revista Matéria**, Guamá, v. 27, n.2, p. 11 – 16, março, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/9HMxtK8QkRXjpGTQrHNNdPP/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 janeiro 2023.

OLIVEIRA, R. L. G; RODRIGUES, J. P. C.; PEREIRA, J.M., Aplicações industriais das cerâmicas refratárias: Estado da Arte. **6as Jornadas de Segurança de Incêndios Urbanos. Universidade de Coimbra – Portugal**, 2018. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/68142/1/2018_Aplicacoes%20industriais%20de%20ceramica%20refrataria_o%20estado%20da%20arte%20%286as%20JORPROCIV%29.pdf. Acesso em: 28 março 2023.

ONU News. Mais de 4,2 bilhões de pessoas vivem sem acesso a saneamento básico. **Nações Unidas**. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2020/11/1733352> 29/11/2022. Acesso: 29 novembro 2022.

PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, v. 54, p. 63-76, 2008.

PEIXOTO, E. M. A., Silício – Elemento químico, 2001. Disponível em <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc14/v14a12.pdf>. Acesso: 05, janeiro de 2023.

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**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, Rio Grande do Sul, 2018.

PETTERLE, A. R.; SANTIAGO, G. G.; CHONG, W.; SOMENSI, L.; TAMBORIM, S.M. **Placas cerâmicas contendo lodo de ETA e cinza de casca de arroz: correlação de suas propriedades físico-químicas com sua microestrutura**, p. 1117-1126, 2018.

PILECCO NOBRE. **Sílica ecológica e energia renovável**. Disponível em: <https://pileconobre.com.br/silica/>. Acesso: 04 janeiro 2023.

QUEVEDO, J. C, **Estudo das propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias derivadas da cinza da casca de arroz e alumina calcinada**, p. 21, 2020.

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.

RESÍDUO ZERO, **O que é resíduo zero?** [s.d.]. Disponível em: <https://residuozero.org.br/o-conceito/>. Acesso em: 27, dezembro de 2022.

ROSCHILD, C.V.P.; GUEDES, H.A.S., **Tratamento de Água**. 2016. 118 slides.

RUVIARO, A. S.; SILVESTRO, L.; SCOLARO, T. P.; PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P. Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 243-260, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/DqFcBnGfDVbPFZJw96gH5Jy/citation/?format=pdf&lang=pt>. Acesso: 17 janeiro 2023.

SABESP. **Tratamento da Água.** 2022. Disponível em: <https://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=47>. Acesso em: 25 novembro 2022.

SANTOS, F. P. **Caracterização e estudo da incorporação do lodo de ETA em argamassa.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, Rio Grande do Sul, 2018.

SCHULLER, D.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. **Influência de defeitos e diferentes processos de fabricação nas propriedades mecânicas finais de cerâmicas.** Cerâmica, vol. 54, n. 332, p. 435 – 442, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ce/v54n332/08.pdf>. Acesso em: 15 janeiro 2023.

SEBRAE. **O que são resíduos (O que fazer com eles).** 2022. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-que-sao-residuos-e-o-que-fazer-com-eles,ca5a438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD> Acesso em: 30 novembro 2022.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina. **Cerâmica**, v.50, p.345-354, 2004.

SILVEIRA, G. R. **Efeito da temperatura e do tempo de sinterização nas propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias fabricadas com cinza da casca de arroz.** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Pampa, Rio Grande do Sul, 2022.

SOARES, L. V.; ACHON, C. L.; MEGDA, C.R., Impactos ambientais provocados pelo lançamento in natura de lodos provenientes de estações de tratamento de água. ICTR 2004. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/ictr/2004/ARQUIVOS%20PDF/08/08-020.pdf>. Acesso em: 03 dezembro 2022.

SOBROSA, F. Z. **Desenvolvimento de materiais cerâmicos refratários com adição da sílica residual proveniente da queima da casca de arroz.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, Rio Grande do Sul, 2014.

STOCHERO, N. P. **Desenvolvimento de cerâmica refratária com fibra de aço e sílica residual proveniente da queima da casca de arroz.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, Rio Grande do Sul, 2015.

UFRGS, Terra de Arroz [s.d.]. Disponível em: https://www.ufrgs.br/alimentus1/terraearroz/grao/gr_casca_fertilizante.htm. Acesso em: 22, dezembro de 2022.

VICTÓRIA, A.M., **Argilas e Minerais Refratários.** Recursos Minerais de Minas Gerais, 2018. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/wp-content/uploads/2018/10/ArgilasRefratarios.pdf>. Acesso em: 17 janeiro 2023.

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>. Acesso em: 17 janeiro 2023.