

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Luiz Henrique Justen

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE LODO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO (LTE) E CASCA DE ARROZ (CA) NA PRODUÇÃO DE
CERÂMICAS VERMELHAS**

Santa Maria, RS
2022

Luiz Henrique Justen

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Erich D. Rodríguez Martínez

Santa Maria, RS
2022

Luiz Henrique Justen

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenheiro Civil**.

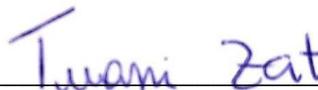
Aprovado em 02 de agosto de 2022



Erich D. Rodríguez Martínez, Prof. Dr. (UFSM)
(Orientador)



Gihad Mohamad, Prof. Dr. (UFSM)



Tuani Zat, Msc. (PPGEC UFSM)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, Lauri, Mariléia, Paula e Alessandra. Por todo o amor, apoio e incentivo recebido. Também aos meus amigos, Guilherme e Leonardo, que estiveram junto de mim desde o primeiro dia dessa caminhada e têm contribuição indissociável em todas as conquistas dos últimos anos. Agradeço igualmente aos meus queridos amigos Ananda, Bruna, Carlos, Daniela, Eduarda, Eduardo, Flaviana, Gabriela, Heliton, Jaqueline, João, Kauana, Leonardo, Mariana, Naquiele, Paloma, Sven e Tuani por fazerem parte e terem contribuído para a trajetória que me trouxe até aqui. Levo todos no coração e dedico este trabalho a vocês.

A todos professores, de profissão e de vida, que contribuíram para minha formação de engenheiro. Ao GEMASC pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico e pessoal e por todo apoio recebido no desenvolvimento deste trabalho. Ao Prof. Dr. Erich Rodriguez pela orientação e suporte prestados e pelo trabalho que vem desenvolvendo junto ao GEMASC. Ao grupo PET pela oportunidade de imersão na vivência acadêmica e no papel social da formação de engenharia.

Finalmente, agradeço à UFSM, ao Centro de Tecnologia, ao Laboratório de Materiais de Construção Civil, à São Gabriel Saneamento, à Cerâmicas Pauluzzi e ao CNPq pelo suporte material, técnico e financeiro ao desenvolvimento do presente trabalho.

RESUMO

AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (LTE) E CASCA DE ARROZ (CA) NA PRODUÇÃO DE CERÂMICAS VERMELHAS

AUTOR: Luiz Henrique Justen

ORIENTADOR: Erich David Rodriguez Martinez

A casca de arroz (CA) e o lodo de tratamento de esgoto (LTE) são dois resíduos industriais produzidos em grandes quantidades. O LTE é classificado como resíduo não perigoso de classe AII – não inerte e, apesar de suas características físicas e composição química semelhantes às argilas utilizadas na produção de cerâmicas, é comumente destinado a aterros sanitários. A CA tem aplicações na geração de energia como biocombustível e também como fertilizante para agricultura. No entanto a produção de CA excede o seu consumo e acaba tornando-a um passivo ambiental, assim como o LTE. A valorização destes resíduos para aplicações na produção de cerâmicas vermelhas é uma possível saída para este problema ambiental. Para verificar a viabilidade da aplicação de LTE e CA na produção de cerâmicas foram analisadas a retração, resistência mecânica, absorção de água, densidade aparente, eflorescência e presença de defeitos. Foram produzidas misturas com teores de substituição de argila por LTE de 0%, 2% e 6% em massa e a adição de 0%, 2% e 5% em volume de CA. Os blocos cúbicos de 30 mm produzidos por extrusão à vácuo foram queimados à 900 °C por três horas. Com uma taxa de aquecimento de 0,85 °C/min não ocorreu a formação de defeitos nas peças. A adição de CA causou uma diminuição da retração por secagem e um aumento na retração pós queima. Teores de 2% de LTE não causaram alterações significativas nas resistências mecânicas. Já a adição de 6% de LTE tornou as amostras menos confiáveis e gerou uma redução na resistência à compressão. A adição de CA nas proporções deste estudo não impactou significativamente as resistências. As adições conjuntas de CA e LTE causaram o aumento da absorção de água das peças e uma diminuição da densidade aparente. Baixos teores de LTE não causaram incremento na aparição de eflorescências, contudo os sistemas com 6% de lodo apresentaram o defeito de forma mais intensa. Constatou-se que a substituição concomitante de teores de até 2% de LTE e 5% de CA são seguros para a produção de blocos de cerâmica vermelha estrutural com desempenho semelhante à mistura referência.

Palavras-chave: casca de arroz, lodo de esgoto, cerâmica vermelha estrutural, avaliação de desempenho

ABSTRACT

EVALUATING THE USE OF SEWAGE SLUDGE (SS) AND RICE HUSK (RH) IN RED CERAMIC BRICKS

AUTHOR: Luiz Henrique Justen

ADVISOR: Erich David Rodriguez Martinez

Rice husk (RH) and sewage sludge (SS) are industrial by-products largely produced daily. The SS is classified as class II-A (not inert) non-hazardous waste. Despite its physical and chemical similarities to the ceramics industry's raw materials, the SS is commonly disposed in landfills. The RH has applications in power generation as a biofuel and agriculture as a fertilizer. Nonetheless, the production of RH exceeds its industrial consumption and, thus, becomes an environmental liability. The valorization of the RH and SS as raw materials for the ceramics industry is one alternative to its' current disposal in landfills. To evaluate the viability of using RH and SS in the ceramics manufacturing process, different mixtures were produced using the vacuum extrusion method. The mixtures had SS incorporated in 0 %, 2 % and 6 % weight ratio and RH incorporated in 0 %, 2 % and 5 % in volume ratio. The extruded specimens formed 30 mm cubic shape blocs. The firing temperature was set to 900 °C for three hours. The heating ratio adopted was 0,85 °C/min to obtain defects-free ceramics. The specimens' linear shrinkage, compressive strength, water absorption, apparent density, efflorescence, and visual defects were evaluated. RH addition decreased linear shrinkage and increased firing shrinkage. Compressive strength was not affected by 2% SS substitution. Although, 6% SS substitution caused the ceramics' compressive strength to decrease or to be less reliable. The tested RH proportions did not affect the ceramics' strength characteristics. The addition of both SS and RH led to an increase in water absorption and a decrease in the apparent density. The samples produced with 6% SS showed clear efflorescence stains. Meanwhile, the 2 % SS samples had similar behavior to the control group. The tests showed that it is possible to produce good quality red ceramics bricks with up to 2% w.r. SS and 5% v.r. RH.

Keywords: rice husk, sewage sludge, structural red ceramics bricks, physical properties

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de dosagem de Wrinkler.....	15
Figura 2 – Diagrama ternário de equilíbrio de fases do sistema FeO - Al ₂ O ₃ – SiO ₂	16
Figura 3 – Argilas utilizadas na fabricação dos blocos.....	21
Figura 4 – Malaxador homogeneizando a mistura de argilas, LTE e CA.....	26
Figura 5 – Espessuras mínimas, em milímetros (mm), das paredes de um bloco cerâmico estrutural vazado de paredes maciças. Devido à retração de secagem e de queima o molde deve ter dimensões superiores às dimensões expostas.....	26
Figura 6 – Bocal utilizado para conformar a mistura em tarugos com seção transversal de 30 x 30 mm.....	27
Figura 7 – Gabarito utilizado para cortar o tarugo em cubos.....	27
Figura 8 – Blocos cerâmicos em processo de secagem.....	28
Figura 9 – À esquerda, defeito chamado <i>coração negro</i> ; à direita bloco sem o defeito.....	29
Figura 10 – Blocos cerâmicos após queima. Verifica-se mudança de cor em relação aos blocos da Figura 8. Tal alteração é causada pelas transformações físico-químicas da queima.....	30
Figura 11 – Fluxograma do processo de dosagem das composições das cerâmicas.....	31
Figura 12 – Luxímetro utilizado para controlar a iluminação dos blocos.....	34
Figura 13 – Retração linear das cerâmicas.....	35
Figura 14 – Densidade aparente.....	37
Figura 15 – Absorção de água.....	38
Figura 16 – Resistência mecânica.....	40
Figura 17 – Fotografias do ensaio de efluorescência.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização das argilas.....	22
Tabela 2 – Caracterização do lodo de tratamento de esgoto.	23
Tabela 3 – Avaliação do lodo de tratamento de esgoto.....	24
Tabela 4 – Propriedades da casca de arroz.	25
Tabela 5 – Composições das misturas produzidas em laboratório.....	30
Tabela 6 – Ensaio realizados nas cerâmicas cozidas.	31
Tabela 7 – Retração linear das amostras.	36
Tabela 8 – Análise de variância das amostras.	41

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Argila clara
AE	Argila escura
ALOCER Cerâmicos	Aproveitamento de Lodos de Tratamentos de Água na Produção de Produtos
AMN	Associação Mercosul de Normalização
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
AV	Argila vermelha
CA	Casca de Arroz
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
ETE	Estação de tratamento de esgoto
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
FRX	Fluorescência de raios X
GEMASC	Grupo de estudos em materiais sustentáveis de construção
LTE	Lodo de tratamento de esgoto
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
ONU	Organização das Nações Unidas
SINIR+	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SINIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UFES	Universidade Federal de Santa Maria

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. REVISÃO DE LITERATURA	13
3.1 PRODUÇÃO DE CERÂMICAS NO BRASIL	13
3.2 ALVENARIA ESTRUTURAL.....	13
3.3 COMPOSIÇÕES DE CERÂMICAS VERMELHAS	14
3.4 MOLDAGEM.....	16
3.5 QUEIMA	17
3.6 MATÉRIAS PRIMAS.....	17
3.7 LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO	18
3.8 CASCA DE ARROZ.....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1 A ARGILA	21
4.2 O LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO	22
4.3 A CASCA DE ARROZ	24
4.4 PRODUÇÃO DOS BLOCOS	25
4.5 MISTURAS.....	30
4.6 ENSAIOS	31
4.6.1 RETRAÇÃO LINEAR.....	32
4.6.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA	32
4.6.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA	32
4.6.4 EFLORESCÊNCIA	33
4.6.5 DENSIDADE APARENTE	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
5.1 RETRAÇÃO.....	35
5.2 DENSIDADE APARENTE	37
5.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA	38
5.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO.....	39
5.5 EFLORESCÊNCIA	42
6. CONCLUSÕES.....	45
7. REFERÊNCIAS.....	46

1. INTRODUÇÃO

O Lodo de Tratamento de Esgoto (LTE) é um subproduto industrial gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Os sistemas de tratamento para grandes volumes de esgoto, como o de lodos ativados, geram enorme quantidade de LTE – sendo um passivo ambiental que precisa ser tratado e destinado adequadamente. Atualmente, um descarte comum para este resíduo são os aterros sanitários, alternativa que costuma ser custosa com elevadas restrições exigências políticas para sua potencial reciclagem e reutilização. (QUINTANA et al, 2011).

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR+) do Ministério do Meio Ambiente (MMA), são geradas anualmente 2,5 milhões de toneladas de Lodo de Tratamento de Esgoto (SINIR+, 2021). Essa quantidade, embora expressiva, é muito inferior ao potencial brasileiro, uma vez que, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINIS), o país possuía no ano de 2020 apenas 55% da população atendida por saneamento básico (SINIS, 2020).

Diante dessa situação, no ano de 2020, com o objetivo de universalizar o acesso ao Saneamento Básico, foi aprovado pelo congresso nacional o Marco Legal do Saneamento – Lei 14.026/2020. A nova legislação busca impulsionar o investimento na área de saneamento e, assim, fazer com que o serviço chegue a maior parte da população (CARVALHO, 2021). O projeto, se bem-sucedido, fará com que o tratamento de esgotos aumente e, conseqüentemente, haverá mais produção de lodo (resíduo).

O tratamento e destinação final do LTE são custosos e essa operação pode chegar a até 65% do custo total de uma ETE (LIU; TAY, 2001). Diante da produção já existente de lodos e com a perspectiva de crescimento do acesso ao saneamento, o esforço financeiro a ser despendido com o LTE será cada vez maior. Outro fator importante a ser considerado é a constância da produção do resíduo, uma vez que após implantada a coleta de esgoto, esta torna-se um serviço contínuo e, conseqüentemente, também serão contínuos os gastos envolvidos na gestão operacional do sistema de tratamento.

Para avaliar possíveis alternativas para o problema da destinação final de lodo, ainda deve-se levar em conta que o Brasil é signatário de dois documentos internacionais de cooperação para o desenvolvimento sustentável: os 8 objetivos do milênio (2000) e os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (ONU, 2022). Ambos documentos convergem para a adoção de uma agenda de busca por desenvolvimento sustentável. Dentro dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos em 2015 existem 3 temas especialmente importantes para este trabalho. São eles:

ODS N° 6 – Água Potável e Saneamento: garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos;

ODS N° 12 - Consumo e produção responsáveis: garantir padrões de consumo e de produção sustentáveis; e

ODS N° 13 - Ação contra a mudança global do clima: adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos.

A legislação aprovada pelo congresso em 2020 está em consonância com os ODS quando incentiva e viabiliza o acesso ao saneamento. Contudo ao analisar-se o processo industrial das ETEs e o manejo do LTE ainda grandes desafios para ser resolvidos. Uma solução sobre o lodo como matéria prima torna-se fundamental para tornar a cadeia produtiva mais sustentável (BLUMENSCHNEIN, 2009). Além disso, a reciclagem dos resíduos do tratamento de esgoto em processos industriais locais pode levar a redução de despesas com adequação e transporte e também reduzir o montante de energia gasto na produção da matéria prima a ser substituída pelo LTE.

Uma possível solução para destinação de lodos é sua reciclagem como matéria prima na indústria cerâmica, por ser uma indústria presente em todo o país, com uma produção expressiva. O tema é objeto de estudo dentro do projeto ALOCER – Aproveitamento de Lodos de Tratamentos de Água na Produção de Produtos Cerâmicos – do Grupo de Estudos em Materiais Sustentáveis na Construção (GEMASC). O presente trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido complementarmente aos trabalhos de ZAT et al., 2021 e OLIVEIRA, 2022. No trabalho desenvolvido por Zat et al, foi proposta a utilização de LTE como substituto parcial de argila na produção de cerâmica vermelhas. Nos resultados, a utilização de LTE mostrou-se bastante promissora, sendo uma opção tecnicamente viável desde o ponto de vista do desempenho final das cerâmicas e do processo de fabricação.

Contudo, ainda necessita-se avaliar mais uma variável ocorrente no processo produtivo: a adição de Casca de Arroz (CA) na massa cerâmica verde. A utilização deste material tem por objetivo diminuir o consumo do combustível principal das fábricas através da gaseificação e pirólise da casca presente nos blocos durante o processo de queima (CABRAL JUNIOR, 2008) e é amplamente empregado na indústria cerâmica.

A casca de arroz tem produção mundial de 150 milhões de toneladas por ano e ,segundo a previsão da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), esse número deve crescer expressivamente até o ano de 2050, pressionado pelo aumento populacional (PODE, 2016). A utilização de CA como combustível para geração de energia já é amplamente discutida e aplicada. Porém, as usinas de reaproveitamento energético, além de

comprometerem a qualidade do ar da região em que estão instaladas e gerarem grandes quantidades de subprodutos (cinzas), não consomem toda a casca produzida anualmente. A utilização da casca excedente como fertilizante na agricultura não é difundida devido à sua estrutura rica em sílica e fibras de celulose, que tornam a sua decomposição um processo lento (CHABANNES et al., 2014) e (SERRANO et al., 2012).

Neste contexto, a incorporação da CA como matéria prima pela indústria cerâmica torna-se atrativa não apenas pela diminuição do consumo de energia nos fornos, mas também pela perspectiva de solucionar um problema ambiental e de tornar a cadeia produtiva mais sustentável. Existem diversos estudos utilizando CA e biomassas advindas de processos agroindustriais na produção de cerâmicas. A maioria, no entanto, está relacionada com os resíduos orgânicos como elementos formadores de poros para cerâmicas técnicas e para cerâmicas com finalidade de isolamento térmico. Assim, grandes quantidades de resíduos são adicionadas às misturas.

Faz-se necessário estudar o comportamento de cerâmicas vermelhas estruturais com baixas adições de CA para embasar e validar o aproveitamento deste resíduo nas indústrias cerâmicas existentes. Além disso, também é necessário compreender os efeitos das adições simultâneas de CA e LTE na cerâmica queimada, uma vez que ambos possuem altos teores de matéria orgânica e composições químicas que podem impactar no desempenho final do produto.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar corpos de prova de cerâmica vermelha fabricados a escala laboratorial com adição de lodo de tratamento de esgoto e casca de arroz em diferentes percentuais de substituição para verificar seu desempenho.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar os impactos da adição de LTE e CA na alteração da natureza da queima dos corpos cerâmicos, ajustando o processo para a produção de cerâmicas livres de defeitos;
- Determinar as modificações das características físicas das peças queimadas decorrentes da incorporação de LTE e CA;
- Avaliar o desempenho mecânico dos blocos, correlacionando os resultados com as características físicas e os teores de substituição de cada mistura realizada;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 PRODUÇÃO DE CERÂMICAS NO BRASIL

A indústria cerâmica é amplamente difundida no Brasil. Entre os bens mais produzidos estão os tijolos, blocos cerâmicos estruturais e telhas. As telhas exigem baixas permeabilidades, excluindo a possibilidade de incorporação de materiais geradores de poros, como a casca de arroz (GÖRHAN; ŞİMŞEK, 2013). Os tijolos e blocos são utilizados para executar paredes de alvenaria – método construtivo dominante no país. Enquanto os tijolos cerâmicos possuem função de vedação ou de suportar pequenas cargas edificações de alvenaria autoportante, os blocos cerâmicos estruturais são tecnicamente mais avançados e constituem parte fundamental do sistema estrutural das edificações onde são empregados (CAVALHEIRO, 2012).

Os blocos cerâmicos estão em crescente demanda devido à sua empregabilidade como sistema estrutural racionalizado e mais econômico. Segundo MOHAMAD, 2015, a economia deste sistema estrutural quando comparado ao convencional de concreto armado, pode chegar a até 30% em edifícios de até 4 pavimentos. O crescimento dos custos do aço e cimento em conjunto com as demandas por racionalização dos métodos construtivos fazem o sistema tornar-se cada vez mais atrativo para as construtoras.

Dentro desta perspectiva de crescimento de utilização, cada vez mais a indústria de cerâmicas estruturais se consolida distribuída por todo o território nacional. Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica - ANICER, 2018, a produção de blocos de cerâmica em 2016 já estava próxima de 6 bilhões de peças ao mês em 5.600 unidades fabris espalhadas por todo o país. Além da vasta presença, existe um Programa Setorial de Qualidade (PSQ) gerenciado e mantido pela ANICER que busca melhorar a produtividade, qualidade e confiabilidade das cerâmicas produzidas.

3.2 ALVENARIA ESTRUTURAL

A alvenaria estrutural teve seu início marcado, segundo RAMALHO, MARCIO ANTONIO; CORRÊA, 2003, no ano de 1977 em São Paulo com a construção de um prédio de 9 pavimentos em blocos cerâmicos estruturais não armados. Segundo MOHAMAD, 2013, os primeiros estudos no Brasil envolvendo a técnica datam das décadas de 70 e 80 em São Paulo - SP e Porto Alegre - RS, respectivamente. A primeira normativa brasileira regulando o tema, publicada em 1989, foi a NBR-10837 (ABNT, 1989). Tal norma fora substituída pelo conjunto de normas NBR-15961 (ABNT, 2011) publicado em 2011. Mais recentemente, no ano de 2020,

entrou em vigência o conjunto de normas NBR-16868 (ABNT, 2020). Esta última publicação busca modernizar e padronizar projeto, dimensionamento e desempenhos de qualidade do sistema estrutural como um todo. A regulamentação das diretivas de projeto e desempenho são ao mesmo tempo um reflexo da consolidação do sistema construtivo e um estímulo positivo para o avanço do emprego do método no país.

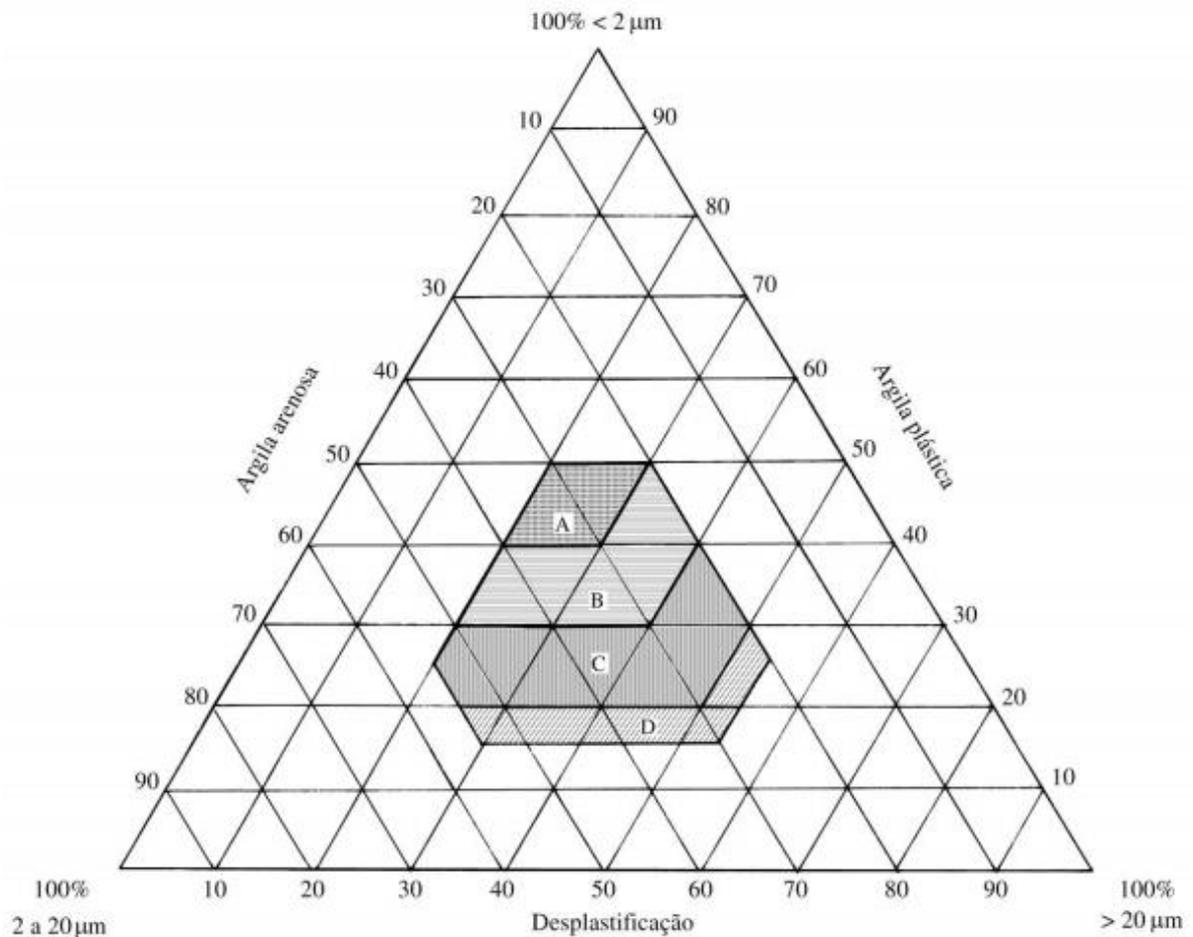
Parte fundamental do sistema de alvenaria estrutural, os blocos estruturais podem ser feitos de concreto ou cerâmica. Este trabalho aborda as particularidades dos blocos cerâmicos estruturais e sua produção é normatizada pelas NBR 15270-1 (ABNT, 2017a) e NBR 15270-2 (ABNT, 2017b).

3.3 COMPOSIÇÕES DE CERÂMICAS VERMELHAS

O processo de fabricação de cerâmicas data de milhares de anos atrás. Existem peças produzidas a partir da queima de argilas datadas de 7000 AC (CARTER, C. B.; NORTON, 2007). As técnicas evoluíram através do empirismo e da transmissão dos conhecimentos dos ceramistas através das gerações. Com o advento da engenharia moderna, no entanto, a ciência dos materiais dedicou-se ao estudo das cerâmicas, seus materiais, processos de moldagem, fabricação e sinterização. Assim, tornou-se possível analisar, prever e corrigir propriedades físicas e o desempenho mecânico.

A seleção das matérias primas das cerâmicas é um fator fundamental na produção de cerâmicas de qualidade. Existem dois métodos principais utilizados para compor as misturas com as propriedades desejadas. Um deles, o diagrama de Wrinkler, determina as proporções necessárias de solos com diferentes granulometrias para a produção de diferentes materiais cerâmicos com diferentes características. A Figura 1, extraída de PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997, ilustra um diagrama de dosagem de cerâmicas vermelhas baseado na granulometria das matérias primas. As áreas hachuradas dentro do diagrama correspondem às misturas que darão origem à materiais com as características adequadas para (A) materiais de alta qualidade e baixa permeabilidade; (B) telhas; (C) tijolos furados; e (D) tijolos maciços.

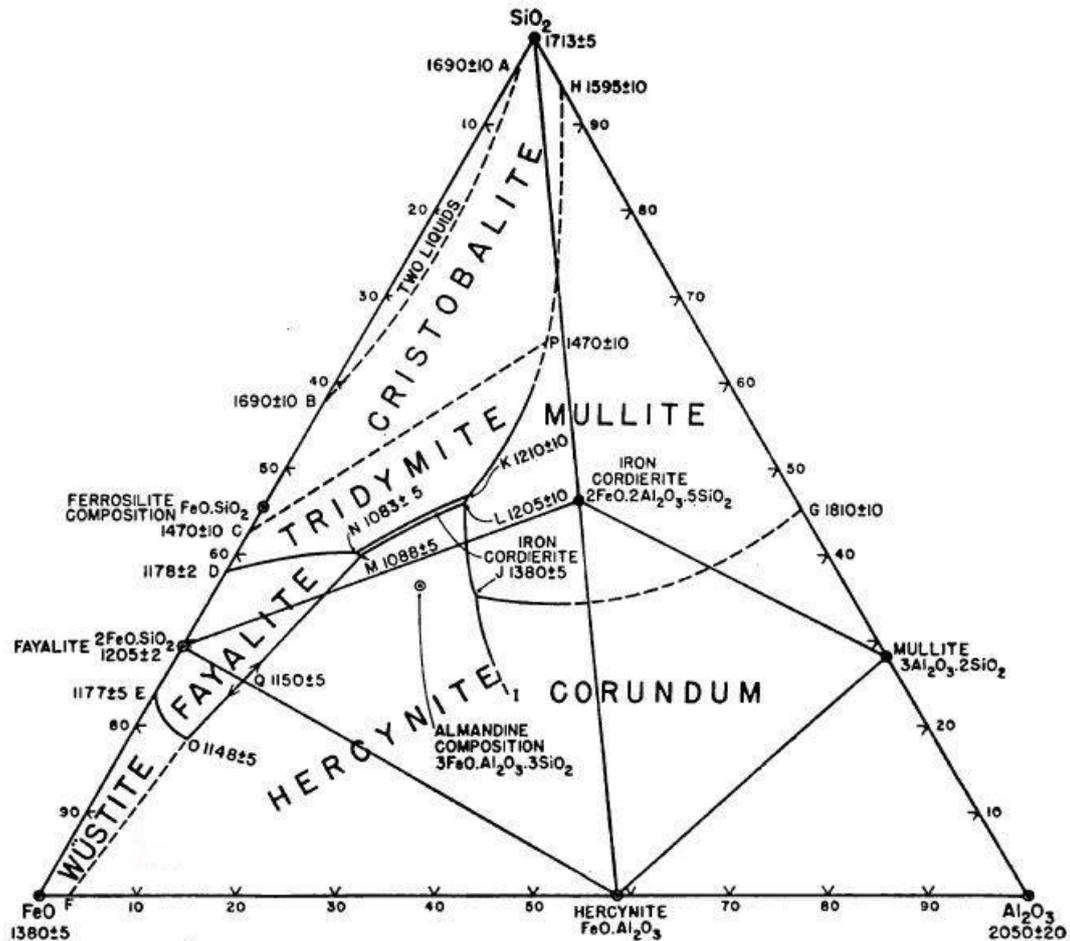
Figura 1 – Diagrama de dosagem de Wrinkler.



Fonte: PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997

Outra ferramenta utilizada na confecção de misturas para materiais cerâmicos são os diagramas de fases ternários. Estes diagramas trazem informações sobre o comportamento da mistura com a variação da temperatura de queima. Eles podem ser utilizados para prever quais fases serão formadas de acordo com a composição inicial, as configurações de queima e velocidade de resfriamento. Além da composição química de cada fase é possível verificar a composição mineralógica dos compostos formados. Assim, obtém-se uma análise muito mais aprofundada das características e do provável comportamento do material (CARTER, C. B.; NORTON, 2007). A Figura 2 representa o diagrama de equilíbrio de fases do sistema $\text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$.

Figura 2 – Diagrama ternário de equilíbrio de fases do sistema FeO - Al₂O₃ – SiO₂.



Fonte: KAPILASHRAMI; SAHAJWALLA; SEETHARAMAN, 2004.

O diagrama ilustrado na Figura 2 engloba os três principais componentes das argilas utilizadas na produção das cerâmicas deste trabalho. No entanto mesmo pequenas adições de outros materiais causam um efeito conhecido como *doping*, que consiste na alteração dos pontos de fusão, solidificação e eutéticos das cerâmicas. A presença de outros componentes nas misturas pode ter grande impacto sobre o processo de queima e alterar completamente a dinâmica prevista no diagrama de equilíbrio de fases (CARTER, C. B.; NORTON, 2007). Então os diagramas podem ser utilizados para verificar se ocorreram as condições para formação de componentes encontrados na mineralogia das cerâmicas, mas não necessariamente são um retrato fiel de todas as fases do material.

3.4 MOLDAGEM

Os diferentes tipos de aplicação, forma e requisitos de desempenho dos produtos cerâmicos levaram à uma gama de diferentes métodos de processamento, moldagem e queima.

Produtos como revestimentos, lajotas e telhas são geralmente moldados a partir do processo de prensagem. Geometrias complexas, como a de vasos sanitários e lavatórios são moldadas através do processo conhecido como barbotina. Já para tijolos, tubos, e blocos estruturais o processo mais comum de fabricação é a extrusão (CARTER, C. B.; NORTON, 2007). Quando comparada à prensagem, a extrusão exige maiores quantidades de umidade na mistura, o que leva a uma maior retração por secagem. Mesmo assim, a extrusão é capaz de produzir peças alta qualidade com alta produtividade. A utilização de extrusão à vácuo auxilia na densificação da mistura a partir da remoção do ar presente na massa.

3.5 QUEIMA

É no processo de queima que ocorrem as transformações físico químicas que darão ao produto as características físicas e de desempenho finais. Após a eliminação completa da água, no intervalo entre os 200 °C e 500 °C ocorre a desintegração da matéria orgânica, com a liberação de calor e gases (DAMIANI et al., 2001). Após o fim da decomposição da matéria orgânica a temperatura continua a ser elevada até valores próximos a 1000 °C, a depender das matérias primas e do material a ser produzido. Neste trabalho a temperatura máxima é de 900 °C e é mantida por um período de três horas. Antes de atingir-se esta temperatura ainda ocorrem reações químicas nas matérias primas. Os carbonatos, como o CaCO_3 , são desintegrados termicamente e também produzem gases como o CO_2 . Em temperaturas próximas os 900 °C a massa cerâmica funde-se parcialmente. Com a formação de fase líquida, a massa tende a densificação e aumenta o contato entre as partículas. Após o resfriamento a fase líquida solidifica-se, formando uma matriz cerâmica que une os materiais não fundentes e garante a integridade estrutural e as características finais das peças produzidas (CARTER, C. B.; NORTON, 2007).

3.6 MATÉRIAS PRIMAS

Historicamente, matérias primas naturais são utilizadas na produção de materiais cerâmicos. No caso de cerâmicas vermelhas é comum a utilização de argilas como matéria prima principal. As argilas são materiais de granulometria fina, com dimensões inferiores à 0,002 mm e que apresentam coesão e plasticidade. Os elementos formadores da argila, chamados de argilominerais, são partículas lamelares compostas de silicatos, óxidos de alumínio e diversos outros como ferro, magnésio, potássio, lítio, etc (ABNT, 2022a).

Conforme apresentado em 3.3, geralmente são utilizados materiais com diferentes granulometrias e composições para as misturas de cerâmicas vermelhas. A utilização de argilas com maiores proporções de sílica e alumina contribui para a obtenção de peças com melhor desempenho estrutural. Contudo é necessário atingir maiores temperaturas de queima devido a esses óxidos serem refratários, mesmo na presença de fundentes como o óxido de ferro. O processo e a temperatura de queima exercem grande influência sobre as peças produzidas a partir de materiais ricos em sílica. Mesmo pequenas alterações podem causar transformações profundas na microestrutura e desempenho da cerâmica. As matérias primas ricas em carbonatos de cálcio exigem menores temperaturas de queima quando comparadas com as ricas em sílica. Contudo, o desempenho das peças costuma ser inferior, principalmente em relação à defeitos ao longo da vida útil das peças. Cerâmicas produzidas a partir de argilas carbonatadas costumam não sofrer tanta influência da variação de temperatura de queima e, portanto, podem ser produzidas em fornos com menor controle de qualidade (ELERT et al., 2003), (SÁNCHEZ DE ROJAS et al., 2011) e (NETINGER et al., 2014).

3.7 LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

As estações de tratamento de esgoto (ETEs) são responsáveis pela melhoria da qualidade das águas residuais para atingir os padrões necessários para sua destinação à corpos d'água ou utilizações industriais. Nas ETEs o esgoto é submetido à processos de separação mecânica de partículas, conhecidos como tratamento primário. O esgoto, após ter os sólidos grosseiros e sedimentáveis removidos, é submetido à um tratamento biológico com o intuito de diminuir a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), agentes patológicos e alguns nutrientes. Esse processo é conhecido como tratamento secundário (NUVOLARI et al., 2016). O tratamento biológico forma flóculos a partir do crescimento simbiótico das bactérias, algas, protozoários e da aglutinação dos coloides presentes nesta etapa. Estes flóculos sedimentam-se conforme aumentam de tamanho e formam um resíduo chamado de lodo de tratamento de esgoto (VON SPERLING, 2002) e (MARA, 2020).

O lodo oriundo do processo de tratamento secundário é submetido a processos de densificação para remoção da água e diminuição do volume total de resíduos. Junto dos resíduos provenientes da sedimentação (tratamento primário), o LTE é passa por um processo de estabilização para eliminação de organismos patogênicos, diminuição da umidade e densificação (SPELLMAN, 2009). Após a estabilização o lodo é geralmente descartado em aterros sanitários.

Quanto a composição, o LTE é formado por uma fração de matéria orgânica e outra fração mineral. A matéria orgânica está relacionada aos agentes biológicos e compostos formados durante o tratamento do esgoto. Diferentes processos de tratamento geram diferentes composições de lodo. Processos aeróbios, como o de lodos ativados, geram grandes quantidades de biomassas de bactérias enquanto processos como os reatores anaeróbios produzem até 60% a menos. Assim, a quantidade de matéria orgânica presente no LTE é muito variável (MIKI, 2010).

Existem estudos sobre a utilização do LTE como fertilizante devido às semelhanças do material com o solo, nutrientes presentes e teor de matéria orgânica (QUINTANA, NÚRIA ROSA GAGLIARDI; CARMO, MARISTELA SIMÕES DO; MELO, 2011). Contudo a sua utilização esbarra nos teores de metais pesados, que são restritos no cultivo de alimentos. Assim, outra via de investigação aborda as semelhanças dos lodos com as matérias primas das cerâmicas. ZAT et al., 2021 e BANDIEIRA et al., 2021 testaram a produção de blocos cerâmicos estruturais com a adição de lodos de tratamentos de águas residuais e obtiveram bons resultados sobre a compatibilidade do material com a aplicação na indústria cerâmica.

3.8 CASCA DE ARROZ

A casca de arroz (CA) é um subproduto industrial gerado em todo o planeta. A fração de CA corresponde a aproximadamente 20% da massa de todo o arroz produzido. Assim, mais de 150 milhões de toneladas deste resíduo são geradas todos os anos. Ainda, como o arroz faz parte dos hábitos alimentares e da cultura de diversos países, o cultivo do cereal deve crescer até o ano de 2050, fazendo com que a produção de CA cresça proporcionalmente (BAOSAREE et al., 2018) e (CHABANNES et al., 2014).

Composta de fibras de celulose e rica em sílica, a CA tem aproveitamento energético como biocombustível para geração de energia. No entanto, a produção excede o consumo das termelétricas instaladas. A sua estrutura fibrosa torna a decomposição um processo lento e, assim, as cascas sem destinação tornam-se um problema ambiental (PHONPHUAK; SAENGTHONG; SRISUWAN, 2019), (GÖRHAN; ŞİMŞEK, 2013) e (BAOSAREE et al., 2018).

Devido à sua composição rica em sílica, diversos trabalhos abordam a utilização de CA na produção de cerâmicas. Grande parte dos estudos, no entanto, aborda a utilização das cinzas provenientes da queima do material como filler nas misturas para cerâmicas (KAZMI et al., 2016), (PODE, 2016) e (FARIA; GURGEL; HOLANDA, 2012). Outros abordam a casca como um elemento gerador de poros, buscando fabricar materiais mais leves e isolantes, portanto o

enfoque de seus estudos não está na produção de cerâmicas com boas características de resistência mecânica e desempenho estrutural (GÖRHAN; ŞİMŞEK, 2013), (BAOSAREE et al., 2018), (MOHANTA et al., 2014), (PHONPHUAK; SAENGTHONG; SRISUWAN, 2019) e (BAUTISTA-RUIZ; SÁNCHEZ-MOLINA; SÁNCHEZ-ZÚÑIGA, 2021). Assim, ainda é preciso estudar e compreender o comportamento das cerâmicas vermelhas estruturais com baixas adições de casca de arroz.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 A ARGILA

A matéria prima utilizada na produção dos blocos cerâmicos foi coletada na fábrica parceira do projeto. Para a produção dos blocos cerâmicos estruturais é utilizada uma mistura de três argilas: argila vermelha (AV), argila escura (AE) e argila clara (AC) (Figura 3). As argilas AV e AE são extraídas de jazidas no próprio município de Santa Maria enquanto a AC é proveniente de São Pedro do Sul. Ambas argilas escura e vermelha passam pelo processo de maturação por cerca de 6 meses, visando a diminuição do conteúdo de matéria orgânica.

Figura 3 – Argilas utilizadas na fabricação dos blocos.



Fonte: acervo do autor

A proporção da mistura de argilas já está definida pela indústria parceira na produção de blocos cerâmicos e não é objeto do presente trabalho o desenvolvimento de um estudo relacionado a otimização dos teores de argila. Neste sentido, a mistura estava constituída por 38,37% AV, 38,37% de AE e 23,26% de AC (massa seca). A fábrica realiza o processo de homogeneização das três argilas como beneficiamento para garantir estabilidade da mistura utilizada na produção de blocos.

A composição química foi obtida pelo ensaio de fluorescência de raios X (FRX). O teor de matéria orgânica foi determinado através do método da mufla – amostra seca do material mantida na mufla à 440 °C por um período de 12 horas, conforme a NBR 13600 (ABNT, 2022b). O tamanho médio de partícula foi determinado pelo ensaio de difração à laser. A massa específica foi determinada através das normas NM 23 (AMN, 2019) e NBR 6457 (ABNT, 2016a). Os ensaios de limite de liquidez de limite de plasticidade foram executados conforme as normas NBR 6459 (ABNT, 2016b) e NBR 7180 (ABNT, 2016c). Os resultados dos ensaios estão inseridos na Tabela 1. A caracterização mineralógica das argilas foi descrita por ZAT et al., 2021.

Tabela 1 – Caracterização das argilas.

Composição Química(%)			
	AC	AV	AE
SiO ₂	67,41	55,93	61,91
Al ₂ O ₃	17,58	10,76	14,83
Na ₂ O	-	5,86	-
Fe ₂ O ₃	4,36	5,44	6,26
K ₂ O	2,96	3,47	3,23
CaO	0,5	3,9	1,45
TiO ₂	0,87	1,16	1,12
P ₂ O ₅	1,28	0,93	0,84
SO ₃	0,79	0,74	0,58
Cl	0,55	0,44	0,46
ZrO ₂	0,1	0,24	0,13
MnO	0,07	0,08	0,07
MgO	-	2,29	-
Perda ao Fogo à 950°C	3,54	8,75	9,11
Propriedades Físicas			
Teor de Matéria Orgânica (%)	0,33	2,06	3,15
Tamanho médio de partícula D[4,3] (µm)	24,44	32,2	40,55
Massa Específica (kg/m ³)	2724,5	2840,5	2756
Limite de Liquidez (%)	--	43	56
Limite de Plasticidade (%)	--	24	24
Índice de Plasticidade (%)	--	26	33

Fontes: BANDIEIRA et al., 2021 e ZAT et al., 2021

4.2 O LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

O lodo de esgoto utilizado nesse trabalho tem origem uma estação de tratamento que atende uma população de aproximadamente 12 mil habitantes. O lodo é subproduto dos tanques *Imhoff* utilizados no processo secundário de tratamento. Antes de ser enviado ao aterro sanitário o lodo passa por um processo de estabilização em leitos de secagem por um período de aproximadamente três meses.

A coleta do LTE foi realizada em 3 pontos distintos do leito de secagem para garantir homogeneidade da amostra. A umidade do material antes do beneficiamento era de 4,8%. Para utilização na produção, o lodo foi destorroado e peneirado com a malha de 4,8 mm de abertura, visando remover raízes, folhas e corpos estranhos. Além disso, procedeu-se com 48 horas de estufa a 60 °C antes de armazenar todo o conteúdo em recipientes plásticos com tampa.

A composição química do LTE foi obtida pelo ensaio de fluorescência de raios X (FRX). O teor de matéria orgânica foi determinado através do método da mufla (assim como as argilas

em 4.1) – amostra seca do material mantida na mufla à 440 °C por um período de 12 horas. O tamanho médio de partícula foi determinado pelo ensaio de difração à laser. A massa específica foi determinada através das normas NM 23 (AMN, 2019) e NBR 6457 (ABNT, 2016a). Os resultados desses ensaios podem ser observados na Tabela 2. O teor de metais foi determinado à partir da NBR 10004 (ABNT, 2004) tanto pelo método da solubilização quanto pelo método da lixiviação e os resultados estão demonstrados na Tabela 3.

Tabela 2 – Caracterização do lodo de tratamento de esgoto.

Composição Química (%)	
SiO ₂	48,43
Al ₂ O ₃	8,92
Fe ₂ O ₃	6,86
SO ₃	2,21
CaO	2,1
P ₂ O ₅	1,67
K ₂ O	1,5
TiO ₂	1,22
MgO	0,32
ZrO ₂	0,17
ZnO	0,15
CuO	0,07
V ₂ O ₅	0,05
MnO	0,03
SrO	0,02
PbO	0,01
Outros	0,03
Perda ao fogo	26,23
Propriedades Físicas	
Teor de Matéria Orgânica (%)	0,33
Tamanho médio de partícula D[4,3] (µm)	24,44
Massa Específica (kg/m ³)	2724,5

Fonte: ZAT et al., 2021

O lodo foi classificado, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), como resíduo de classe II-A – não perigoso e não inerte. Sua característica não inerte deve-se principalmente ao teor de matéria orgânica.

Tabela 3 – Avaliação do lodo de tratamento de esgoto.

Parâmetros analisados	Resultado lixiviação	NBR 10.004 Limite máximo de lixiviação (mg/L)	Resultado solubilização	NBR 10.004 Limite máximo na solubilização (mg/L)
Ag	<0,010	5	0,012	0,05
Al	-	-	2,367	0,2
As	0,0,16	1	0,02	0,01
Ba	0,156	70	0,096	0,7
Cd	<0,010	0,5	0,005	0,005
Cl	-	-	0	250
Cr	<0,050	5	<0,050	0,05
Cu	-	-	0,177	2
F ⁻	5,7	150	10,3	1,5
Fe	-	-	14,56	0,3
Mn	-	-	0,58	0,1
NO ₃ ⁻	-	-	67,59	10
Na	-	-	47,94	200
Pb	<0,010	1	<0,010	0,01
SO ₄ ²⁻	-	-	1123,1	250
Se	<0,010	5	<0,010	0,01
Zn	-	-	8,48	5

Fonte: ZAT et al., 2021

4.3 A CASCA DE ARROZ

A casca de arroz utilizada na produção das amostras é a mesma utilizada pela indústria parceira do estudo e tem origem na região central do Rio Grande do Sul. A coleta foi realizada na fábrica e o material foi armazenado em sacolas plásticas lacradas. Não houve qualquer tipo de beneficiamento da CA para sua aplicação na massa cerâmica.

Os ensaios de caracterização realizados foram os de teor de cinzas, massa específica aparente e tamanho médio de partícula. O ensaio de teor de cinzas realizou-se conforme o proposto pela norma ASTM - E1755 - *Standard Test Method for Ash in Biomass* (ASTM, 2015). (CHABANNES et al., 2014). A densidade aparente foi determinada em conformidade com a normativa ASTM E873-18 (ASTM, 2014).

Para a determinação do tamanho médio de partícula utilizou-se do método de análise gráfica performado através do software *ImageJ*, aplicado na determinação de áreas de geometrias complexas (LABOREL-PRÉNERON; MAGNIONT; AUBERT, 2018). A análise é feita a partir de uma foto de alta qualidade de várias amostras, dispostas de forma a não se sobreporem ou encostarem umas nas outras. Através de ferramentas de edição, transforma-se a foto em imagem de alto contraste em preto e branco. O Software faz, então, a análise de todas as amostras presentes na imagem individualmente. Os dados obtidos são a projeção média de área da partícula e as dimensões (largura e comprimento) médias. As grandezas são

determinadas a partir da inserção de um elemento com dimensões conhecidas na foto original. Os resultados da caracterização da CA estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades da casca de arroz.

Propriedades físicas e caracterização	
Densidade aparente (kg/m ³)	131,86
Tamanho médio de partícula (mm ²)	10,20
Largura média (mm)	1,80
Comprimento médio (mm)	7,17
Teor de cinza (%)	17,33
Umidade (%)	9,76

Fonte: autor

4.4 PRODUÇÃO DOS BLOCOS

Os materiais foram dosados por peso e a umidade foi corrigida através da adição de água. A umidade aproximada para a massa verde foi de 28 % em peso, conforme os estudos envolvendo a extrudabilidade das massas cerâmicas de ZAT et al., 2021 e OLIVEIRA, 2022. As misturas de argilas e substituições de CA e LTE foram inicialmente homogeneizadas num malaxador de hélice dupla de 35 rpm, conforme Figura 4. O processo de mistura deu-se por 7 minutos.

As peças foram conformadas através do processo de extrusão à vácuo numa extrusora de escala laboratorial Varlali, modelo Nº 1, com helicoide de diâmetro de 115 mm e frequência de 35 rotações por minuto. A pressão de vácuo aplicada foi de 115 mm de Hg. A velocidade de extrusão controlou-se a aproximadamente 30 mm/s.

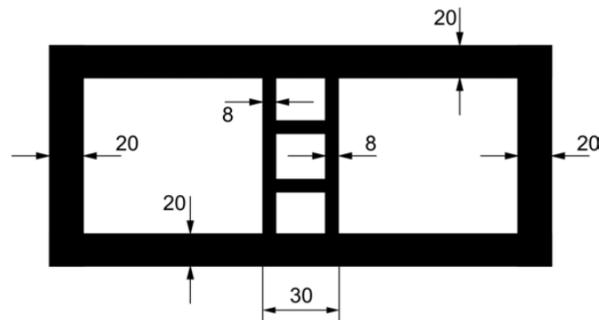
A norma NBR 15270-1 (ABNT, 2017a) discorre sobre as dimensões e requisitos mínimos dos blocos cerâmicos estruturais e, conforme ilustrado na Figura 5, pode-se observar que a espessura mínima da parede externa de um bloco estrutural de paredes maciças é de 20 mm.

Figura 4 – Malaxador homogeneizando a mistura de argilas, LTE e CA.



Fonte: acervo próprio

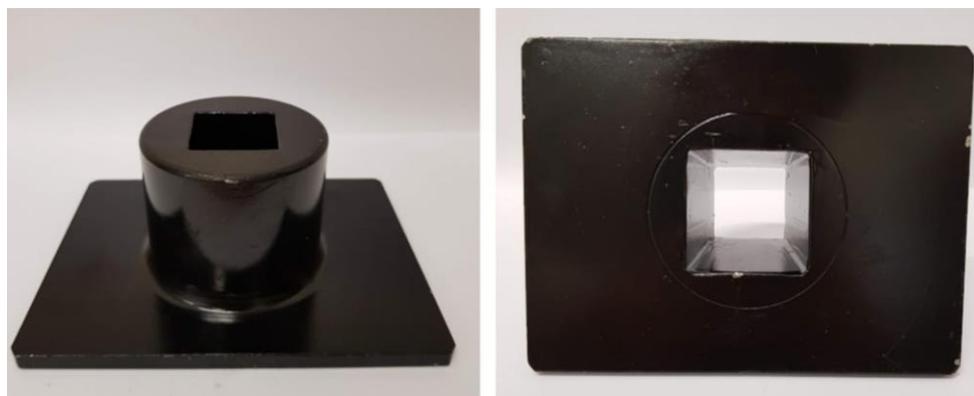
Figura 5 – Espessuras mínimas, em milímetros (mm), das paredes de um bloco cerâmico estrutural vazado de paredes maciças. Devido à retração de secagem e de queima o molde deve ter dimensões superiores às dimensões expostas.



Fonte: adaptação de ABNT, 2017a

Foram moldadas amostras cúbicas de 30 mm buscando semelhança com as espessuras de paredes verificadas nos blocos. Na Figura 6 pode-se observar o bocal com seção de 30 × 30 mm utilizado para conformar a massa verde em tarugos. Na Figura 7 pode-se observar o gabarito utilizado para cortar os tarugos a cada 30 mm.

Figura 6 – Bocal utilizado para conformar a mistura em tarugos com seção transversal de 30 x 30 mm.



Fonte: acervo do autor

Figura 7 – Gabarito utilizado para cortar o tarugo em cubos.



Fonte: acervo do autor

Os tarugos foram cortados com o auxílio de fios metálicos e dispostos em prateleiras para secagem, conforme Figura 8. Na etapa de corte os cubos foram medidos com paquímetros digitais com precisão de 0,001 mm para controle da retração por secagem. Após isso, o processo de secagem foi realizado em duas etapas: secagem ambiente e em estufa. Na primeira etapa os blocos ficaram dispostos por 4 dias em prateleiras para homogeneizar e perder a umidade em temperatura ambiente. Na segunda etapa os blocos foram transferidos para estufas com um ciclo de 12 h à 60 °C seguido de um segundo ciclo de 12 h à 100 °C. Após a secagem os blocos foram medidos novamente para determinação da retração.

Figura 8 – Blocos cerâmicos em processo de secagem.



Fonte: acervo do autor

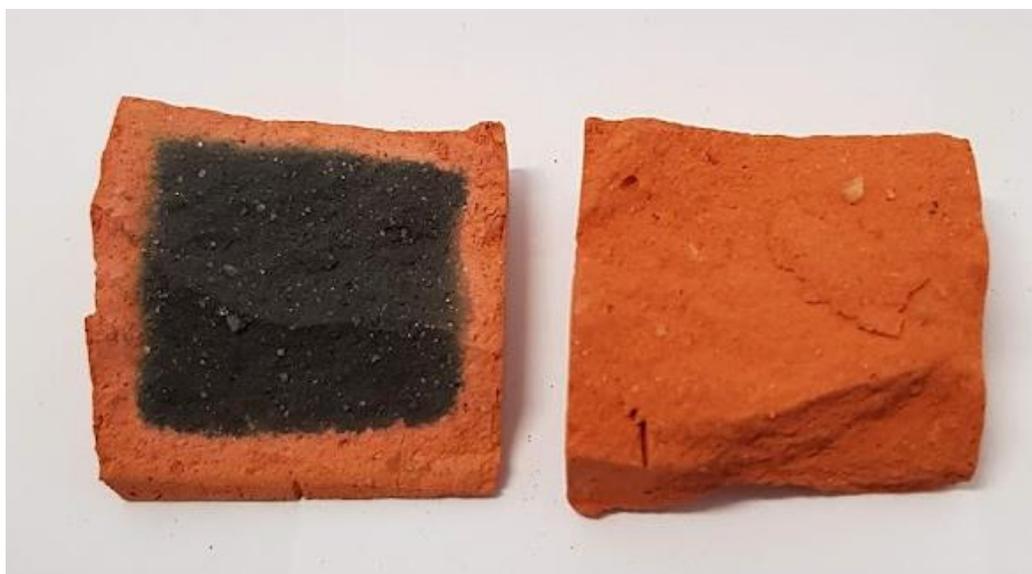
A queima procedeu-se em fornos industriais elétricos da marca Sanchis. A cerâmica foi queimada a 900 °C por um período de três horas. A elevação da massa cerâmica à altas temperaturas a funde parcialmente, levando à formação de uma fase líquida que atua como um ligante entre os elementos não fundidos (HEIMANN, 2010) e (BARSOUM, 2002). A taxa de aquecimento utilizada para atingir os 900 °C foi de 0,85 °C/min. Esta taxa é mais lenta que a adotada por ZAT et al., 2021 e BANDIEIRA et al., 2021 devido à alteração da geometria das cerâmicas produzidas. Com a maior espessura de material utilizada neste trabalho a formação do defeito conhecido como *coração negro* (Figura 9), descrito em WU et al., 2022 e DAMIANI et al., 2001, tornou-se expressiva e levou à necessidade de ajuste da curva de aquecimento da queima. O *coração negro* afeta a microestrutura da cerâmica, alterando as interações entre os elementos neutros e a fase vítrea. O gradiente térmico entre a superfície do bloco e o seu centro leva à fusão parcial prematura do material da superfície antes da degradação térmica completa dos compostos orgânicos e carbonatos situados no interior da peça. A fase líquida formada na superfície sela os poros e sua viscosidade elevada obstrui a exaustão dos gases formados após a temperatura do interior do bloco atingir os pontos de degradação térmica de seus compostos. Com isso, ocorre o aprisionamento dos gases gerados e o consequente inchamento do bloco. Ocorrem reações de oxirredução levando à formação de óxido ferroso (FeO) e fuligem. Tais

compostos dão coloração escura às regiões do bloco atingidas pelo defeito. As alterações nas fases formadas no processo de queima causam a diminuição drástica no desempenho da cerâmica como um todo, sobretudo na resistência mecânica.

Buscando eliminar-se a formação do defeito, foram testadas diversas taxas de aquecimento, até verificar-se uniformidade visual por toda a peça. A diminuição da taxa de aquecimento buscou permitir a oxidação da matéria orgânica e a desintegração de compostos como o carbonato de cálcio antes da formação de fase líquida nas peças. Assim, evita-se o aprisionamento de gases e elimina-se o defeito (DAMIANI et al., 2001). A maior taxa de aquecimento livre da aparição do defeito foi a de 0,85 °C/min. Apesar do aumento significativo do tempo gasto com o ciclo de queima, a duração total ficou semelhante ao tempo gasto na indústria parceira.

Após a manutenção da temperatura de 900 °C por 3 horas, o resfriamento ocorreu de forma gradual e contínua com o forno fechado. Ao atingir-se a temperatura ambiente os blocos foram medidos novamente para controle de retração pelo processo de queima. As cerâmicas prontas ficaram armazenadas à temperatura e umidade ambiente até a realização dos ensaios.

Figura 9 – À esquerda, defeito chamado *coração negro*; à direita bloco sem o defeito.



Fonte: acervo do autor

Figura 10 – Blocos cerâmicos após queima. Verifica-se mudança de cor em relação aos blocos da Figura 8. Tal alteração é causada pelas transformações físico-químicas da queima.



Fonte: acervo do autor

4.5 MISTURAS

No objetivo de avaliar a influência da adição tanto de lodo de esgoto quanto de casca de arroz na massa cerâmica, produziram-se 7 misturas diferentes. Além mistura controle, sem adição de LTE e CA, foram produzidos outros dois grupos de misturas: com adição somente de CA e com adição de ambos LTE e CA. Na Tabela 5, pode-se verificar os sistemas produzidos e a porcentagem de substituição do material original pelo LTE e CA. Os teores de substituição de LTE foram definidos à partir das análises de utilização deste material realizadas por ZAT et al., 2021. Os teores de substituição de CA foram definidos visando reproduzir e extrapolar os valores utilizados na indústria cerâmica parceira do estudo.

Tabela 5 – Composições das misturas produzidas em laboratório.

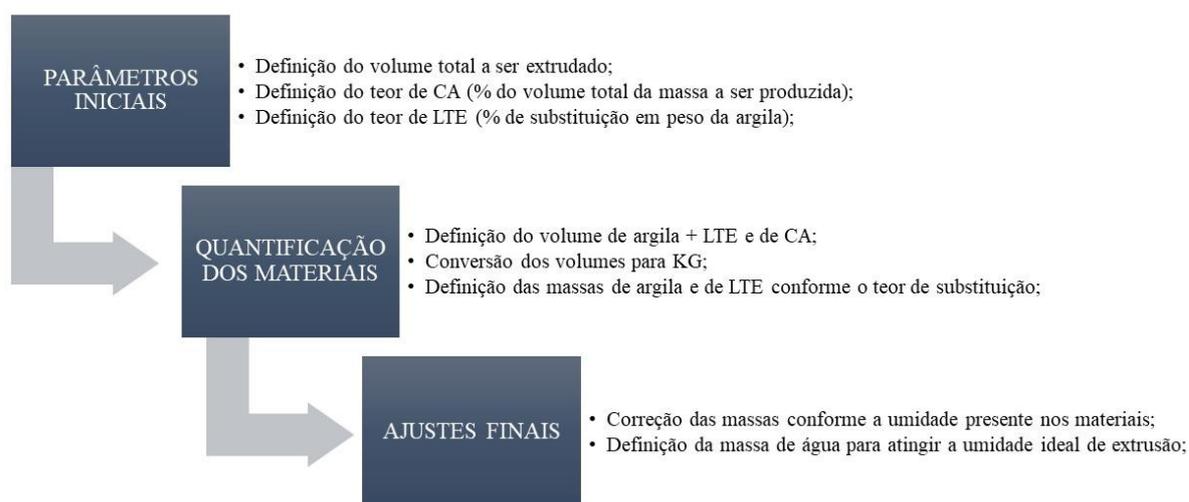
Mistura Referência	
REF	0% LTE 0% CA
Misturas com CA	
2CA	02% CA
5CA	05% CA
Misturas com LTE + CA	
2LE2CA	02% LTE 02% CA
2LE5CA	02% LTE 05% CA
6LE2CA	06% LTE 02% CA
6LE5CA	06% LTE 05% CA

Fonte: autor

A substituição da composição da massa referência por lodo foi realizada por peso, com porcentagens de substituição variando de 2% até 6%. A substituição da composição referência

por casca de arroz foi feita baseada na massa específica solta da CA, sendo adicionados às misturas valores de 2% até 5% do volume de argila mais lodo de cada batelada. A umidade de cada um dos componentes foi determinada visando controlar a umidade global da mistura no processo de homogeneização. Adicionou-se água dosada em massa para garantir a extrudabilidade das peças sem a ocorrência de falhas ou deformações excessivas. A Figura 11 ilustra o processo de dosagem e ajustes de umidade realizados.

Figura 11 – Fluxograma do processo de dosagem das composições das cerâmicas.



Fonte: autor

4.6 ENSAIOS

Para determinar as características físico-mecânicas e como elas são afetadas pela adição de lodo de esgoto e casca de arroz procederam-se 6 avaliações normatizadas em cada uma das composições. A Tabela 6 resume os ensaios conduzidos.

Tabela 6 – Ensaios realizados nas cerâmicas cozidas.

Ensaios Realizados	Metodologia
Retração linear	NBR 15270
Resistência mecânica	NBR 15270/ASTM C1239-13
Absorção de água	NBR 15270
Eflorescência	NBR 15270
Densidade aparente	ASTM C 373-17

Fonte: autor

4.6.1 RETRAÇÃO LINEAR

A determinação da retração linear realizou-se através da medição das três dimensões dos blocos produzidos com um paquímetro digital. As peças foram medidas em três momentos: (1) após conformação, (2) após secagem e (3) após queima. A retração de secagem é a diferença entre as dimensões das amostras antes e após a secagem (1) – (2). A retração de queima é a diferença entre as dimensões dos blocos após a secagem e após a queima (2) – (3). A retração total é a diferença entre o tamanho inicial e o somatório das retrações de queima e secagem (1) - (2+3).

Os resultados são expressos em porcentagem de variação média das dimensões. A retração foi medida e analisada nas três dimensões das amostras. No entanto, analisou-se apenas a retração linear no sentido de extrusão, por ter sido a dimensão que apresentou maiores valores de retração média. Os valores foram determinados posicionando as garras do paquímetro no centro de cada face a ser medida.

4.6.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Para a determinação da resistência mecânica dos blocos estruturais procedeu-se conforme preconizado pela NBR 15270-1 (ABNT, 2017a) e NBR 15270-2 (ABNT, 2017b). Obteve-se as áreas a partir das dimensões das faces dos blocos após a queima, conforme descrito no item 4.6.1. O ensaio foi realizado em prensa hidráulica *Instron*, dotada de três sensores de carga. Para a determinação da resistência característica utilizou-se dois métodos: o proposto pela NBR 15270-1 (ABNT, 2017a) e o da norma americana ASTM C1239-06a (ASTM, 2000), que tem como base a distribuição estatística de *Weibull*.

Para determinar a relevância estatística das diferenças encontradas entre as resistências das misturas foi realizada uma análise de variância (ANOVA-TUKEY). O nível de significância (p) para afirmar que há diferença entre os sistemas deve ser inferior a 0,05. Os sistemas tiveram o nível de significância analisado aos pares e, ao todo, foram calculados 21 valores de p .

4.6.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água foi determinada a partir da metodologia da norma NBR 15270-2 (ABNT, 2017b). Os blocos foram secos em estufa à 105 °C até não haver variação de massa superior à 0,25% e então determinou-se as suas massas. As amostras foram submetidas, então, à 24 horas de submersão em água à temperatura ambiente. Após esse período os blocos foram

removidos do banho, tiveram a superfície seca por material absorvente e tiveram sua massa determinada novamente. A absorção de água calculou-se através da fórmula:

$$AA(\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$$

Sendo AA= Absorção de água (%); Mu= massa úmida; e Ms= massa seca.

4.6.4 EFLORESCÊNCIA

O ensaio de eflorescência realizou-se seguindo a normativa NBR 15270-2 (ABNT, 2017b). Separou-se 5 pares de cada mistura secos em estufa. Um exemplar de cada par foi imerso parcialmente em 5 mm de água por 7 dias em condições ambientais controladas (24 °C e umidade relativa entre 30 e 70%) enquanto o segundo exemplar foi mantido nas mesmas condições, mas sem contato com o filme d'água. O filme de 5 mm de água é uma fração de 1/5 dos 25 mm propostos pela normativa. Os valores selecionados mantem as proporções entre o tamanho original de um bloco estrutural e as dimensões dos cubos produzidos em laboratório. Após o período de 7 dias as cerâmicas foram secas novamente em estufa para eliminar a umidade e poder ser realizada a comparação entre os blocos submetidos à imersão parcial e os mantidos em condições ambiente. As amostras foram analisadas a uma distância de 0,60 metros (1/5 dos 3 metros propostos pela norma) e sob uma iluminação de 540 lm/m². A iluminação é controlada para garantir que os blocos recebam quantidade adequada de luz e não ocorram erros de identificação das manchas de eflorescência relacionados às condições de visibilidade. A aferição da iluminação foi feita através de um luxímetro *Politem* POL-10B, conforme Figura 12.

Figura 12 – Luxímetro utilizado para controlar a iluminação dos blocos.



Fonte: acervo do autor

A análise é feita a partir da comparação visual entre o exemplar de controle e seu par imerso parcialmente por 7 dias. O resultado do ensaio consiste na constatação, ou não, da ocorrência do fenômeno de eflorescência. Para ilustrar os resultados foram tiradas fotos de cada exemplar.

4.6.5 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente das cerâmicas produzidas foi determinada através da norma americana ASTM C 373-17 (ASTM, 2017). As amostras tiveram sua massa seca (D) determinada. Após isso foram deixadas 24 h submersas em água à temperatura ambiente. Determinou-se então a massa suspensa (S) e em seguida a massa saturada (M). A densidade aparente foi determinada conforme a equação:

$$B = \frac{D}{(M - S)}$$

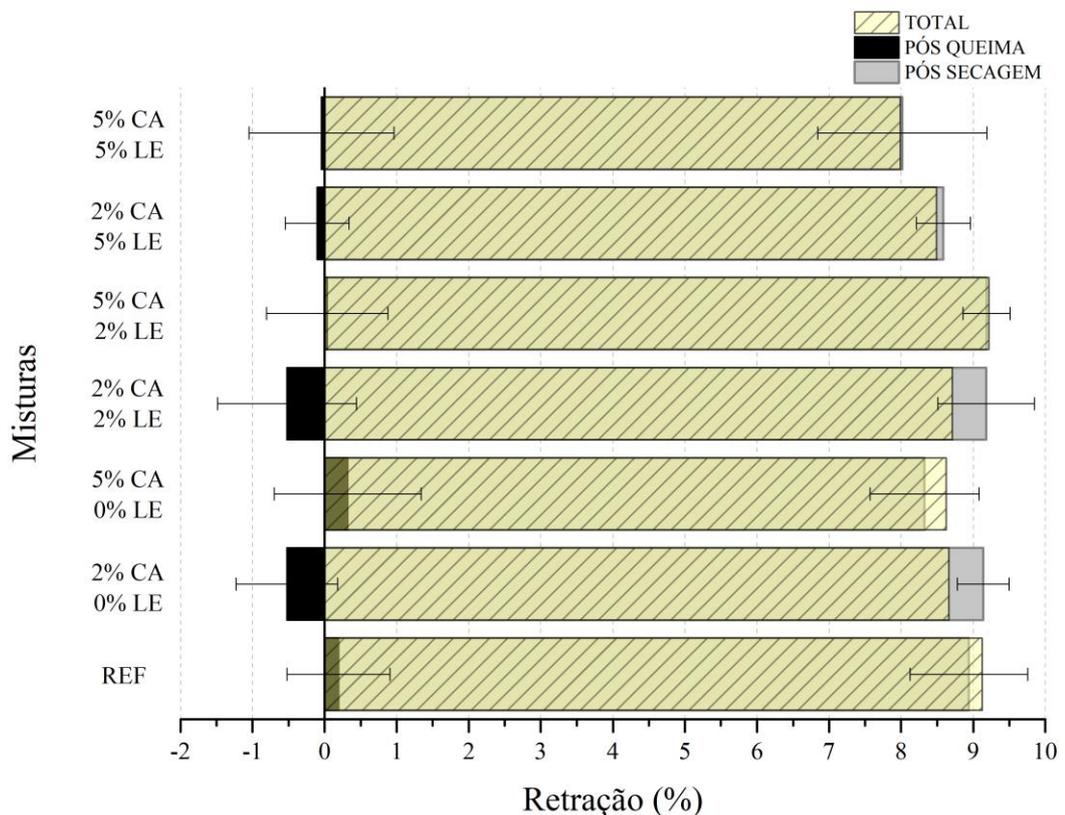
Onde B é densidade aparente (kg/m³), D é massa seca (kg), M é massa saturada (kg) e S é a massa suspensa (kg). Considera-se que 1 grama de água tem volume de 1 cm³ para determinação do volume ocupado pela amostra (M - S).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RETRAÇÃO

A retração linear das cerâmicas na secagem e queima está ilustrada na Figura 13 e Tabela 7. A direção analisada foi a paralela ao sentido de extrusão por ser a que apresentou as maiores retrações médias. Pode-se observar que as amostras tiveram retração total – representada pela cor amarela – de valores entre 8 e 9%. A retração pós secagem – representada pela cor cinza- é a parcela de maior contribuição para a contração das peças. A segunda parcela é a retração pós-queima – representada pela cor preta. O traço referência e o traço 0LE5CA apresentaram retração pós queima. Os 4 sistemas restantes apresentaram expansão durante esta etapa (os valores registrados de retração pós queima foram negativos). Comportamento semelhante foi verificado por ZAT et al., 2021 e BANDIEIRA et al., 2021, e está relacionado com o relaxamento da estrutura com a formação de fase líquida. Este comportamento é intensificado com a adição de matéria orgânica, que sofre decomposição térmica, e os gases produzidos contribuem para o afastamento das partículas durante a formação de fase líquida (BAOSAREE et al., 2018).

Figura 13 – Retração linear das cerâmicas.



Fonte: acervo do autor

Tabela 7 – Retração linear das amostras.

Mistura	Retração (mm)		
	Secagem	Queima	Total
0LE0CA	2,70	0,12	2,82
0LE2CA	2,81	-0,15	2,66
0LE5CA	2,56	0,09	2,65
2LE2CA	2,80	-0,14	2,66
2LE5CA	2,80	0,11	2,91
6LE2CA	2,62	-0,03	2,59
6LE5CA	2,46	-0,01	2,45

Fonte: autor

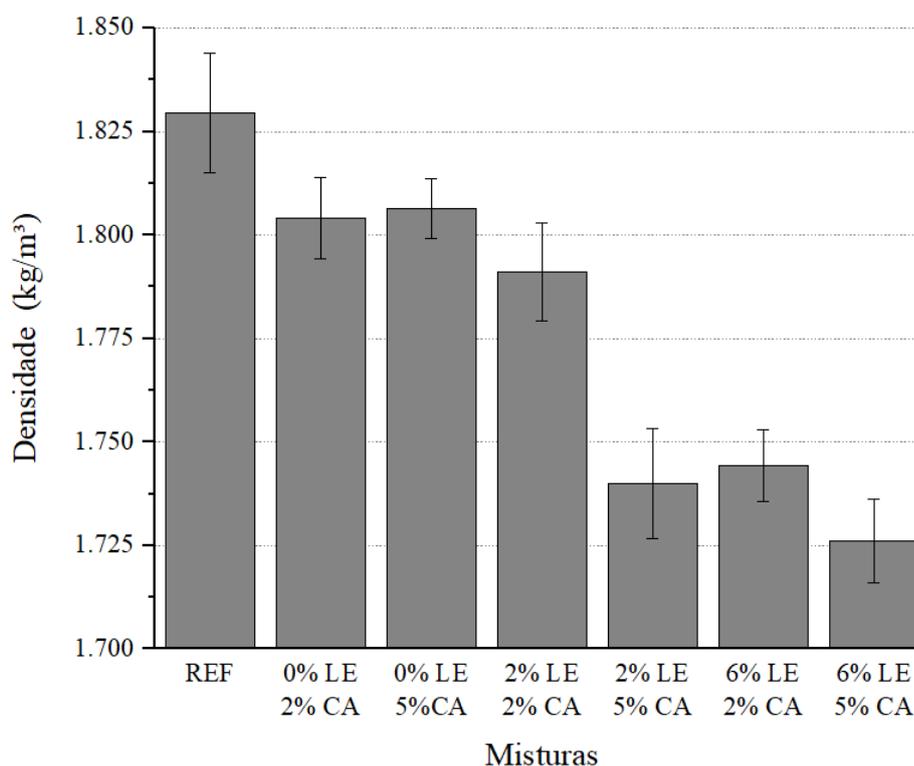
A retração por secagem teve leve incremento nas misturas com 2% de LTE, contudo as misturas com 6% de LTE tiveram retrações de secagem menores que o traço referência. Tal comportamento é coerente com o reportado por ZAT et al., 2021 que verificou que baixos teores de LTE não tiveram impacto significativo sobre a retração por secagem. Analisando os efeitos da adição de casca de arroz, a retração por secagem dos blocos produzidos com maiores quantidades de casca (5%) foi menor do que com aqueles com menores quantidades de substituição (2%). Uma possibilidade para este comportamento é a quantidade de fibras presentes no material. Tais fibras são materiais inertes e podem atuar na preservação da estrutura dos blocos e reduzir o fenômeno de retração por secagem ao manter o afastamento das partículas com a remoção da água presente na massa verde (BORIES et al., 2015; FARIA; GURGEL; HOLANDA, 2012; GÖRHAN; ŞİMŞEK, 2013). O tamanho das partículas de biomassa introduzidas também impacta a retração por secagem. As cascas adicionadas em tamanhos maiores contribuem para menores retrações por secagem quando comparadas com a adição do mesmo material em dimensões reduzidas (BAUTISTA-RUIZ; SÁNCHEZ-MOLINA; SÁNCHEZ-ZÚÑIGA, 2021). No entanto, observa-se o comportamento inverso na retração pós queima. Enquanto a CA pode ter contribuído para diminuir a retração por secagem, maiores adições de casca (5%) apresentaram as maiores retrações pós queima. A casca de arroz quando sofre uma degradação térmica diminuiu de tamanho e gera vazios dentro das peças. Os vazios gerados resultam em uma rede de poros interligados (MOHANTA et al., 2014). Tais poros são fundamentais para a exatidão dos gases formados pela desintegração da matéria orgânica e demais reações físico-químicas dos minerais presentes nas massas. Maiores quantidades de casca podem ter auxiliado na liberação dos gases produzidos durante a queima das cerâmicas. A menor quantidade de gases presos dentro das misturas pode diminuir o

relaxamento ocorrido durante a formação de fase líquida verificada nos trabalhos de BAOSAREE et al., 2018 e ZAT et al., 2021, contribuindo para menores expansões no processo.

5.2 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente diminuiu com a substituição por LTE e CA. Na Figura 14 pode-se observar que conforme os teores de substituição das misturas aumentam, diminui a densidade aparente. A matéria orgânica contida no lodo e casca de arroz contribui para o aumento da porosidade e da quantidade de vazios dentro das peças (BORIES et al., 2015; GÖRHAN; ŞİMŞEK, 2013; PHONPHUAK; SAENGTHONG; SRISUWAN, 2019). A casca de arroz é utilizada como agente formador de poros para cerâmicas especiais (BAOSAREE et al., 2018) e os efeitos da diminuição da densidade das peças produzidas é diretamente proporcional à quantidade de CA introduzida nas misturas. Os sistemas com baixas adições de lodo tiveram valores menores de densidade quando comparados com as densidades aparentes verificadas por ZAT et al., 2021. Enquanto isso, as misturas com 6% de LTE apresentaram valores maiores de densidade neste estudo quando comparados com os valores de ZAT et al., 2021. As alterações no comportamento do material cerâmico podem estar relacionadas com a presença da casca de arroz e também com as modificações no processo de queima.

Figura 14 – Densidade aparente.

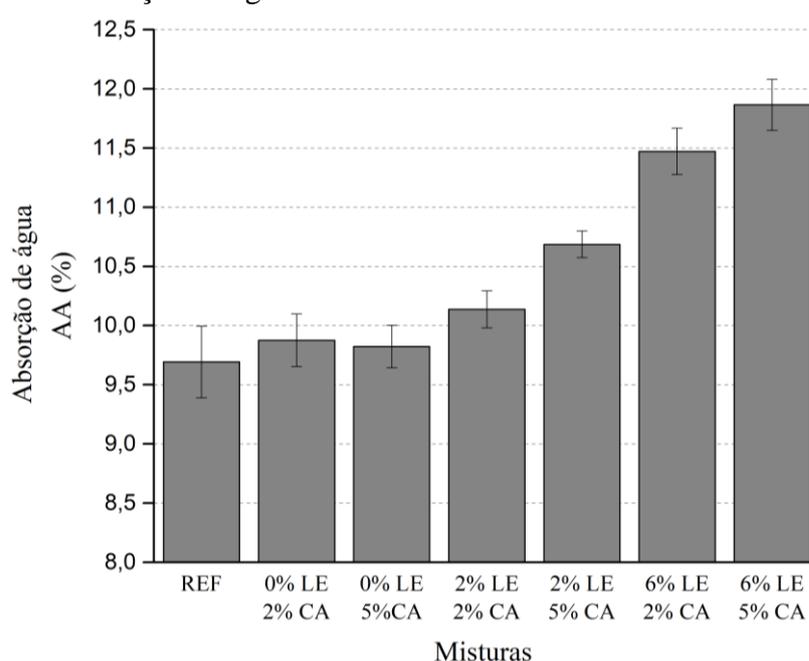


Fonte: autor

5.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Pode-se observar um aumento da absorção de água com o incremento de LTE e CA nas misturas (Figura 15). Ao comparar os valores da mistura com maior substituição (6LE5CA) com a mistura referência observa-se um crescimento de 22,39% na absorção de água. ZAT et al., 2021 encontrou que para substituições de 15% de LTE os valores de absorção podem aumentar em até 70%. A inserção de CA e outros tipos de biomassas em cerâmicas está relacionado ao aumento da absorção de água e diminuição da densidade aparente 5.2. O incremento nos valores é esperado com a adição de materiais contendo matéria orgânica nas misturas (BAOSAREE et al., 2018; BAUTISTA-RUIZ; SÁNCHEZ-MOLINA; SÁNCHEZ-ZÚÑIGA, 2021). BORIES et al., 2015 verificou que a substituição de 4% em peso de diferentes biomassas nas cerâmicas pode levar a um aumento na porosidade de 29% à 49% para tijolos queimados à 920 °C. O aspecto negativo de altos teores de absorção de água é a diminuição da durabilidade do material cerâmico, que torna-se mais suscetível à ataques químicos, congelamentos e eflorações (PHONPHUAK; SAENGTHONG; SRISUWAN, 2019). Uma solução possível para contornar o aumento da porosidade e, conseqüentemente, da absorção de água, é o incremento da temperatura de queima (GÖRHAN; ŞİMŞEK, 2013). As cerâmicas produzidas com adição de LTE e CA tiveram valor máximo de absorção de água de 11,86%, atendendo aos requisitos da NBR 15270-1 (ABNT, 2017a) que exige valores de absorção de água entre 8% e 20%.

Figura 15 – Absorção de água.



Fonte: autor

5.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

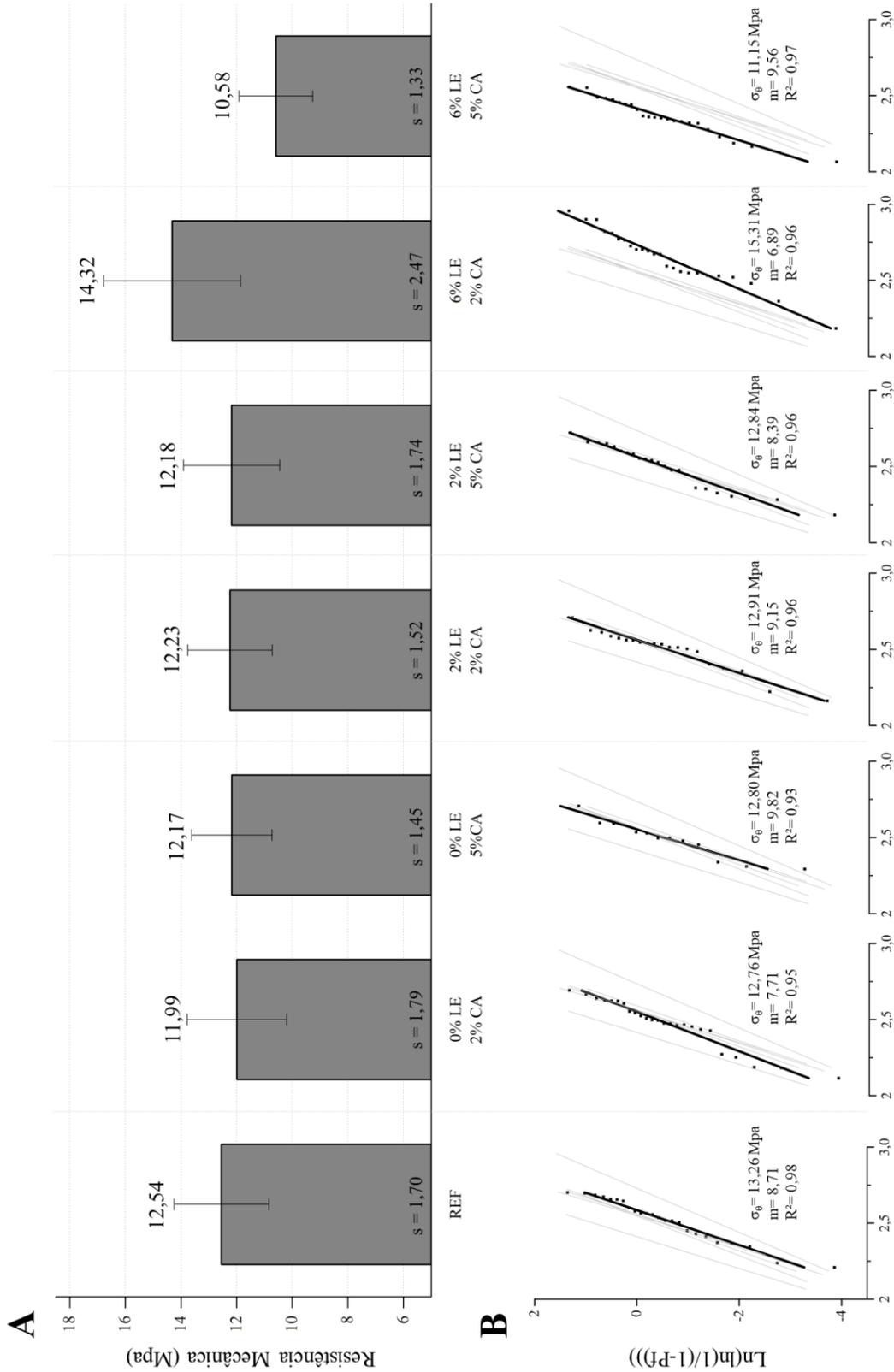
A resistência mecânica das cerâmicas está representada na Figura 16. Os valores de resistência calculados conforme a NBR 15270-2(ABNT, 2017b) são apresentados na Figura 16A, assim como as distribuições de *Weibull* e as resistências das cerâmicas calculadas a partir da norma americana ASTM C1239-13 (ASTM, 2000) (Figura 16B). A resistência característica (σ_{θ}) é o valor de compressão no qual há 63,2% de probabilidade de falha, conforme estabelece a norma. Em termos gerais pode-se observar uma sutil diminuição das resistências conforme aumenta o teor de LTE e CA.

As resistências médias (Figura 16A) determinadas conforme os critérios da normativa brasileira, são ligeiramente menores que as resistências calculadas pela distribuição de *Weibull* (expressos na Figura 16B). A análise dos dados pela NBR 15270 levou à adoção dos valores médios como resistência característica, com menor probabilidade de falha em relação aos 63,2% da norma americana. Na distribuição estatística das resistências apresentada na Figura 16B os valores do módulo de *Weibull* (m) ficaram entre 6,89 até 9,82. Valores de m mais elevados indicam uma menor dispersão dos dados, com os valores de ruptura mais próximos do valor da resistência característica (σ_{θ}). Valores menores de m indicam maior distanciamento das tensões de ruptura do valor de (σ_{θ}). Pode-se correlacionar os valores de m com os desvios-padrão apresentados na Figura 16A.

Ocorre uma pequena diminuição nas resistências mecânicas das amostras conforme o incremento das substituições de CA e LTE. Nas misturas com 0% e 2% de substituição de LTE pode-se observar poucas alterações tanto nas resistências características quanto nos desvios-padrão das amostras. Os sistemas com 6% de LTE (6LE2CA) apresentou a menor confiabilidade como consequência de seu elevado desvio padrão e reduzido valor de m , mesmo que exibiu os valores de resistência 14 % mais elevados, quando comparados ao sistema de referência. A mistura 6LE5CA apresentou o menor valor de resistência de toda série, porém seus resultados foram também os mais confiáveis (valor de m 9,76 % maior quando comparado com a referência). A partir da análise de variância (ANOVA-TUKEY) dos valores de resistência à compressão, conclui-se que existem diferenças significativas (p inferior à 0,05) entre algumas misturas. Na Tabela 8 estão as análises de significância par a par. Observa-se que os sistemas referência, os com adição somente de CA e os com adição de 2% de LTE não apresentaram diferenças entre si. Todas as diferenças significativas encontradas envolvem os

sistemas com 6% de substituição de LTE. Os valores com p inferior à 0,05 estão grifados para facilitar a identificação.

Figura 16 – Resistência mecânica.



Fonte: autor

Tabela 8 – Análise de variância das amostras.

Teste de significância nível = 0,05					
REF - 0LE2CA	0,929	0LE2CA - 2LE2CA	0,999	0LE5CA - 6LE5CA	0,133
REF - 0LE5CA	0,997	0LE2CA - 2LE5CA	1,000	2LE2CA - 2LE5CA	1,000
REF - 2LE2CA	0,997	0LE2CA - 6LE2CA	0,000	2LE2CA - 6LE2CA	0,003
REF - 2LE5CA	0,993	0LE2CA - 6LE5CA	0,089	2LE2CA - 6LE5CA	0,040
REF - 6LE2CA	0,012	0LE5CA - 2LE2CA	1,000	2LE5CA - 6LE2CA	0,001
REF - 6LE5CA	0,004	0LE5CA - 2LE5CA	1,000	2LE5CA - 6LE5CA	0,039
0LE2CA - 0LE5CA	1,000	0LE5CA - 6LE2CA	0,010	6LE2CA - 6LE5CA	0,000

Fonte: autor

Pode-se concluir que a resistência mecânica não foi afetada negativamente em baixos teores de substituição de LTE (0LE2CA, 0LE5CA, 2LE2CA e 2LE5CA) em coerência com o apresentado por ZAT et al., 2021. No entanto, as substituições de 6% de LTE já apresentaram alterações consideráveis em seu comportamento, seja na diminuição da resistência, seja na diminuição da confiabilidade. Tal mudança de comportamento é confirmada pela análise de variância indicando diferenças significativas com as populações com 6% de LE. Diversos estudos apontam para a diminuição da resistência mecânica com a adição de CA, no entanto, a maioria aborda o material como elemento gerador de poros e as quantidades de substituição são superiores às praticadas neste trabalho (BAOSAREE et al., 2018; BAUTISTA-RUIZ; SÁNCHEZ-MOLINA; SÁNCHEZ-ZÚÑIGA, 2021; BORIES et al., 2015). Quando adicionados menores percentuais de substituição de CA (2,5% em peso) verificou-se que, apesar de ocorrer diminuição dos valores, as cerâmicas ainda atendem os requisitos mínimos de resistência mecânica das normativas americanas (GÖRHAN; ŞİMŞEK, 2013; PHONPHUAK; SAENGTHONG; SRISUWAN, 2019).

A diminuição da resistência mecânica está diretamente ligada à diminuição da densidade aparente 5.2 e o aumento da absorção de água 5.3. A adição de elementos formadores de poros aumenta a distância entre as partículas e torna a estrutura do material menos densa. Com maiores espaços entre as partículas, o módulo de elasticidade e a coesão diminuem (SHATSOV, 2003). Além da densidade, outro fator envolvido na piora das propriedades mecânicas são as falhas microestruturais que podem ser causadas por elementos de granulometria elevada ou por poros interligados e de formatos alongados (AOUBA et al., 2016). Tais falhas na microestrutura do material cerâmico atuam como o elo fraco de uma corrente, servindo como pontos de partida para a ruptura do material quando carregado. Diversos autores correlacionam a inserção de materiais ricos em matéria orgânica com a diminuição da densidade e a consequente diminuição das propriedades mecânicas, como a resistência à compressão (AHMAD; IQBAL;

MUHAMMAD, 2017; BAUTISTA-RUIZ; SÁNCHEZ-MOLINA; SÁNCHEZ-ZÚÑIGA, 2021; BORIES et al., 2015; CULTRONE et al., 2004; NJEUMEN NKAYEM et al., 2016). Assim, uma medida para contornar o efeito negativo da adição de CA e LTE nas misturas é o aumento da temperatura de queima. Maiores temperaturas de sinterização aumentam a formação de fase líquida e vitrificação da cerâmica. Através destes processos a matriz densifica-se e, assim, tem melhores desempenhos mecânicos (CULTRONE et al., 2004). Outra modificação causada pelas temperaturas mais elevadas de queima é a verificada no tamanho médio dos poros. Temperaturas acima dos 1000 °C formam poros de diâmetros consideravelmente inferiores aos formados à 900 °C. A diminuição do tamanho dos poros torna a matriz mais uniforme e diminui as chances da formação de microfissuras (BAOSAREE et al., 2018) e (NETINGER et al., 2014) torna possível que a fase líquida ocupe e feche os poros originados pela desintegração do material orgânico, melhorando o desempenho da cerâmica como um todo.

Ao analisar as resistências dos corpos de prova com as classes de resistência previstas na normativa NBR 15270-1, a cerâmica referência se enquadra na classificação EST120, correspondente à resistência característica de 12 MPa. Estendendo a análise para as misturas com adição de LTE e CA, percebe-se que apenas duas composições não se enquadram na mesma classe de resistência. A mistura 0LE2CA apresentou resistência característica de 11,99 MPa e a mistura 6LE5CA apresentou resistência característica de 10,58 MPa. Tal resultado as classifica como EST80, correspondente à classe de resistência de 8 MPa. Ressalta-se que tal análise é uma extrapolação do comportamento verificado nos corpos de prova ensaiados para um bloco maciço de dimensões normativas.

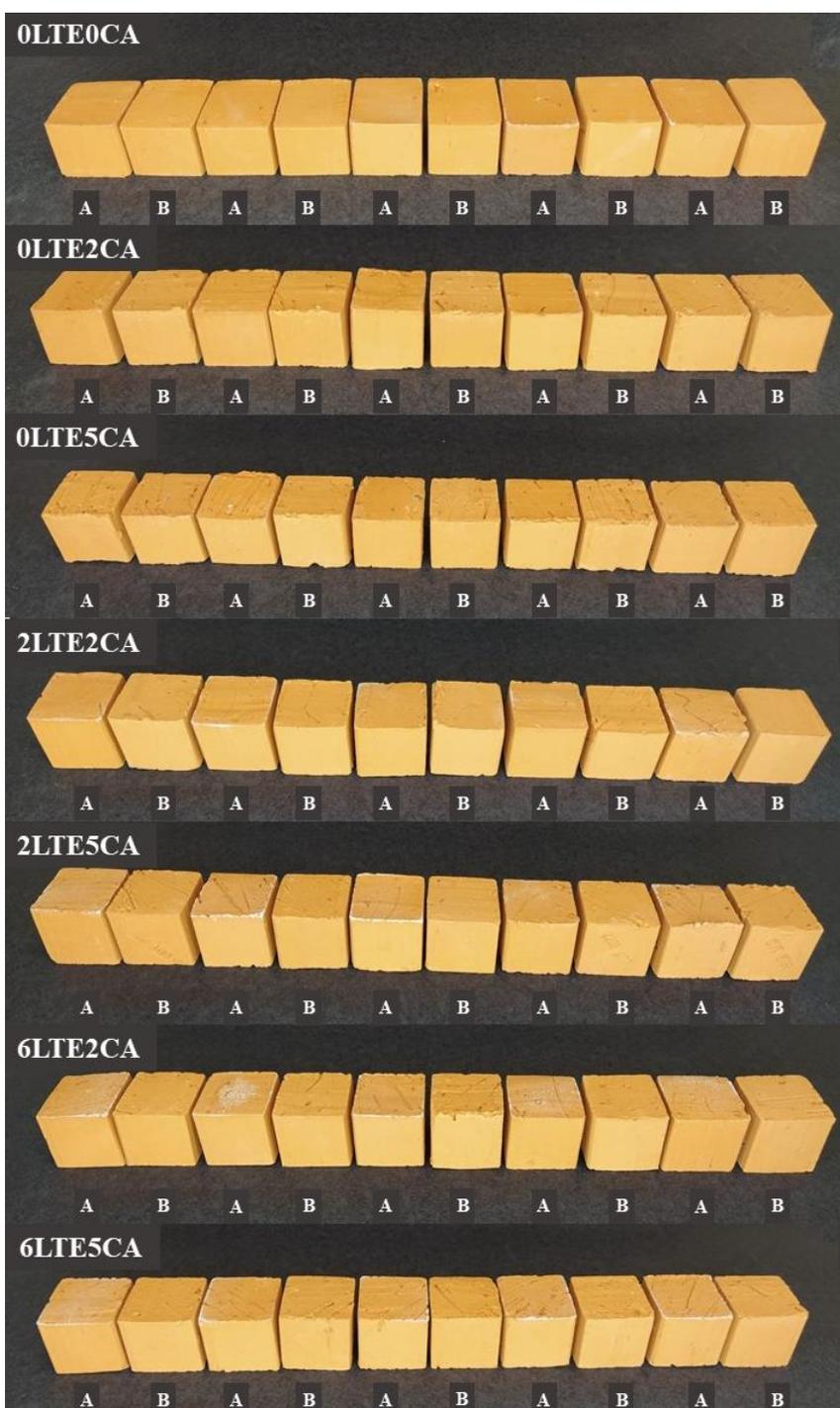
5.5 EFLORESCÊNCIA

A Figura 17 mostra os blocos após a realização do ensaio. Cada linha da imagem apresenta cinco pares de blocos. O primeiro bloco de cada par (A) é o mantido parcialmente submerso e o bloco seguinte (B) é o controle, mantido a condições ambiente durante o ensaio. Esse padrão repete-se cinco vezes, totalizando dez exemplares.

Pode-se verificar nos blocos mantidos em contato com a lâmina d'água (A) que há pequenas manifestações de eflorescências em forma de linhas brancas nas arestas de todos os exemplares de todos os sistemas. Não há diferenças entre o sistema referência (0LE0CA), os com adição somente de CA (0LE2CA e 0LE5CA) e os sistemas com 2% de LTE (2LE2CA e 2LE5CA). Contudo, as amostras das misturas 6LE2CA e 6LE5CA apresentaram manifestações

mais significativas de eflorescência. Nessas duas misturas, além das linhas esbranquiçadas nas arestas, observa-se manchas difusas nas paredes dos blocos. Ainda, verifica-se que as manchas de eflorescência no sistema 6LE2CA foram mais pronunciadas que as do sistema 6LE5CA.

Figura 17 – Fotografias do ensaio de eflorescência.



Fonte: acervo do autor

O comportamento apresentado sugere que a adição de LTE tem impacto direto na aparição de eflorescências, uma vez que o defeito se manifestou com mais intensidade nas misturas com

maior teor de LTE (6%). O fenômeno está atrelado à ocorrência de sais solúveis na matriz cerâmica. A presença de carbonato de cálcio (CaCO_3), óxido férrico (Fe_2O_3), sulfatos (SO_3) e de sais alcalinos como o óxido de potássio (K_2O) está frequentemente ligada à aparição dos depósitos de sais responsáveis pelas eflorescências (DONDI et al., 1997) e (NETINGER et al., 2014). A composição química do LTE indica teores mais elevados de sulfatos, óxido de ferro e de óxidos de cálcio quando comparada à composição das argilas. A maior quantidade de componentes ligados à formação de eflorescências pode ter levado à intensificação do defeito com o aumento do teor de substituição de lodo. Na contramão do LTE, a casca de arroz após queimada é rica em dióxido de silício (SiO_2) e sua adição em massas cerâmicas pode diminuir a intensidade do defeito através da substituição das matérias primas com maiores quantidades de sais solúveis (KAZMI et al., 2016). A utilização de lodos de tratamento de água residuais também levou ao aumento da eflorescência para UKWATTA et al., 2015. Ainda, LESOVIK et al., 2020 verificou que o alumínio presente no material cerâmico pode reagir com diferentes componentes, atmosféricos ou presentes no material, e ocasionar aparecimento de eflorescências. Para reduzir a manifestação do defeito para os padrões das normativas é possível aumentar a temperatura de queima, promovendo maior formação de fase líquida e o consequente empacotamento das partículas solúveis pela vitrificação da cerâmica (NETINGER et al., 2014).

6. CONCLUSÕES

Foi possível produzir amostras cúbicas de 30 mm de cerâmicas vermelhas com adição de CA e LTE sem a aparição de defeitos à uma temperatura de queima de 900 °C por um período de três horas com uma curva de aquecimento de 0,85 °C/min. Taxas de aquecimento superiores à praticada acarretaram o surgimento de *coração negro* nas peças.

As adições de CA e LTE alteraram o comportamento das cerâmicas quanto à retração. Teores mais altos de CA diminuíram a retração por secagem. Os blocos produzidos com adições de LTE e CA apresentaram leve inchamento durante a queima. Tal inchamento foi menor nos traços com maiores teores de CA.

A adição de até 2% de LTE em peso e 5% de CA em volume nas amostras não impactou negativamente as resistências mecânicas. Já as misturas com 6% de LTE apresentaram alterações significativas na confiabilidade e nos resultados de resistência mecânica. Apesar de a maior resistência característica verificada ser a do sistema 6LE2CA, este sistema também apresentou o maior desvio padrão das amostras. A menor resistência mecânica verificada foi a do sistema 6LE5CA. Os blocos com adição de até 2% de LTE mantiveram a mesma classe de resistência dos blocos referência. Em todos os teores de substituição ocorreu diminuição da densidade aparente acompanhada do aumento da absorção de água. Apesar do incremento, a absorção de água manteve-se dentro dos padrões normativos brasileiros para blocos estruturais.

As cerâmicas produzidas com até 2% de LTE apresentaram pequenas manifestações de eflorescência similares às verificadas na mistura referência. Os sistemas com 6% de adição de LTE tiveram eflorescências mais abrangentes. Não foram verificadas diferenças entre os sistemas com 2% e 5% de CA, exceto nas misturas com 6% de LTE. Neste caso, os blocos 6LE2CA apresentaram maiores eflorescências que aqueles da mistura 6LE5CA.

Desde as características avaliadas conclui-se que a produção de cerâmicas vermelhas estruturais com adição de LTE e CA é factível até 2% de substituição em peso de LTE e 5% de substituição em volume de CA. Maiores investigações são necessárias relacionadas à composição e origem das eflorescências verificadas.

Ainda, como sugestão para trabalhos futuros, fica a investigação sobre a natureza microestrutural das cerâmicas com adição de LTE e CA bem como estudos sobre as suas porosimetrias. Buscando compreender melhor o impacto das adições de CA e LTE sobre a microestrutura e matriz das cerâmicas bem como a quantidade, forma e distribuição dos poros.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 10837 - Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 15961 - Alvenaria estrutural - Blocos de concreto. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 6457 - Amostras de Solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 6459: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 15270-1 - Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 15270-2: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 16868 Alvenaria estrutural - Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 6502 - Solos e rochas: Terminologia. Rio de Janeiro, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 13600: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio e Janeiro, 2022b.

AHMAD, S.; IQBAL, Y.; MUHAMMAD, R. Effects of coal and wheat husk additives on the physical, thermal and mechanical properties of clay bricks. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, v. 56, n. 3, p. 131–138, 2017.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO (AMN). AMN NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). Dados Do Setor Cerâmico, 2018. Acessado em 18/04/2022. Disponível em: <www.anicer.com.br/anicer/setor/>

AOUBA, L. et al. Properties of fired clay bricks with incorporated biomasses: Cases of Olive Stone Flour and Wheat Straw residues. *Construction and Building Materials*, v. 102, p. 7–13, 2016.

ASTM. Standard Practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics. *Astm*, v. i, n. January, p. 1–17, 2000.

ASTM. Standard Test Method for Bulk Density of Densified Particulate Biomass Fuels (ASTM E873). *ASTM International*, v. 82, n. Reapproved 2013, p. 2013–2014, 2014.

ASTM. Standard Test Method for Ash in Biomass. *ASTM International*, v. 25, n. Reapproved, p. 1–3, 2015.

ASTM. Standard Test Methods for Determination of Water Absorption and Associated Properties by Vacuum Method for Pressed Ceramic Tiles and Glass Tiles and Boil Method for Extruded Ceramic Tiles and Non-tile Fired Ceramic Whiteware Products, 2017.

BANDIEIRA, M. et al. Water treatment sludge in the production of red-ceramic bricks: effects on the physico-mechanical properties. *Materials and Structures*, v. 54, n. 4, 2021.

BAOSAREE, J. et al. The Effect of Rice Husk Charcoal and Sintering Temperature on Porosity of Sintered Mixture of Clay and Zeolite. *Indian Journal of Science and Technology*, v. 11, n. 8, p. 1–12, 2018.

BARSOUM, M. W. Fundamentals of ceramics. *Fundamentals of Ceramics*, p. 1–612, 2002.

BAUTISTA-RUIZ, J.; SÁNCHEZ-MOLINA, J.; SÁNCHEZ-ZÚÑIGA, J. V. Effect of the addition of rice husk in technological properties of materials for the manufacture of ceramic. *Rasayan Journal of Chemistry*, v. 14, n. 2, p. 712–718, 2021.

BLUMENSCHNEIN, R. N. Introduzindo sustentabilidade na cadeia produtiva da indústria da construção. *Revista Mosaico*, v. 2, p. 17–25, 2009.

BORIES, C. et al. Fired clay bricks using agricultural biomass wastes: Study and characterization. *Construction and Building Materials*, v. 91, p. 158–163, 2015.

CABRAL JUNIOR, M.; MOTTA, J. F. M.; ALMEIDA, A. S.; TANNO, L. C. RMIs: argila para cerâmica vermelha. *Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 747-770. 2008.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. 2. ed. New York: Springer, 2007.

CARVALHO, A. A. D. *Regulação Econômica e Contratos Sob O Novo Marco Legal Do Saneamento Básico: Estudo De Caso Da Concessão Da Região Metropolitana De Maceió*. Alagoas, Escola Nacional De Administração Pública, 2021.

CAVALHEIRO, O. P. ALVENARIA ESTRUTURAL: Tão antiga e tão atual. *Anicer*, p. 8, 2012.

- CHABANNES, M. et al. Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application. *Construction and Building Materials*, v. 70, p. 428–438, 2014.
- CULTRONE, G. et al. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 24, n. 3, p. 547–564, 2004.
- DAMIANI, J. C. et al. Coração Negro em Revestimentos Cerâmicos: Principais Causas e Possíveis Soluções. *Cerâmica Industrial*, v. 6, n. 2, p. 12–16, 2001.
- DONDI, M. et al. Soluble salts and efflorescence in structural clay products: A scheme to predict the risk of efflorescence. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, v. 36, n. 6, p. 619–629, 1997.
- ELERT, K. et al. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings - Influence of composition and microstructure. *Journal of Cultural Heritage*, v. 4, n. 2, p. 91–99, 2003.
- FARIA, K. C. P.; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. *Journal of Environmental Management*, v. 101, p. 7–12, 2012.
- GÖRHAN, G.; ŞİMŞEK, O. Porous clay bricks manufactured with rice husks. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 390–396, 2013.
- HEIMANN, R. B. *Classic and Advanced Ceramics: From Fundamentals to Applications*. Weinheim, WILEY-VCH, 2010.
- KAPILASHRAMI, E.; SAHAJWALLA, V.; SEETHARAMAN, S. Slag formation during high-temperature interactions between SiO₂-containing refractories and iron melts with oxygen. *Materials Science*, p. 417–422, 2004.
- KAZMI, S. M. S. et al. Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. *Construction and Building Materials*, v. 120, p. 29–41, 2016.
- LABOREL-PRÉNERON, A.; MAGNIONT, C.; AUBERT, J. E. Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials. *Waste and Biomass Valorization*, v. 9, n. 7, p. 1095–1112, 2018.
- LESOVIK, V. S. et al. Analysis of the Causes of Brickwork Efflorescence in the Aral Sea Region. *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*, v. 77, n. 7–8, p. 277–279, 2020.
- LIU, Y.; TAY, J. H. Strategy for minimization of excess sludge production from the activated sludge process. *Biotechnology Advances*, v. 19, n. 2, p. 97–107, 2001.
- MARA, D. *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors. Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*, p. 217–223, 2020.
- MIKI, M. K. Dilemas do UASB. *Revista DAE*, v. 58, n. 183, p. 1–37, 2010.

MOHAMAD, G. Construções em Alvenaria Estrutural – Materiais, projeto e desempenho. São Paulo: Blucher, 2015.

MOHANTA, K. et al. Processing and properties of low cost macroporous alumina ceramics with tailored porosity and pore size fabricated using rice husk and sucrose. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 34, n. 10, p. 2401–2412, 2014.

NETINGER, I. et al. Evaluation of brick resistance to freeze / thaw cycles according to indirect procedures. *Gradjevinar*, v. 66, n. 3, p. 197–209, 2014.

NJEUMEN NKAYEM, D. E. et al. Preliminary study on the use of corn cob as pore forming agent in lightweight clay bricks: Physical and mechanical features. *Journal of Building Engineering*, v. 5, p. 254–259, 2016.

NUVOLARI, A. et al. Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola / coordenação Ariovaldo Nuvolari – 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2011

OLIVEIRA, L. M. DE. Valorização de resíduos na indústria da cerâmica vermelha: caracterização da plasticidade de tarugos com adição de lodo esgoto através de ensaios de deformação e reologia. Santa Maria, 2022.

ONU. Objetivos do desenvolvimento sustentável. Acessado em 10/03/2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>.

PHONPHUAK, N.; SAENGTHONG, C.; SRISUWAN, A. Physical and mechanical properties of fired clay bricks with rice husk waste addition as construction materials. *Materials Today: Proceedings*, v. 17, p. 1668–1674, 2019.

PODE, R. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53, p. 1468–1485, 2016.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*, v. 2, p. 31–35, 1997.

QUINTANA, NÚRIA ROSA GAGLIARDI; CARMO, MARISTELA SIMÕES DO; MELO, W. J. DE; Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. p. 183–192, 2011.

RAMALHO, M. A.; CORREA, M. R. S. Projeto de edifícios de alvenaria estrutural. 1. ed. São Paulo: PINI, 2003.

SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I. et al. Influence of freezing test methods, composition and microstructure on frost durability assessment of clay roofing tiles. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 6, p. 2888–2897, 2011.

SERRANO, T. et al. Lightweight mortars with rice husk: Mix design and properties evaluation. *DYNA (Colombia)*, v. 79, n. 175, p. 128–136, 2012.

SHATSOV, A. A. Mechanical properties of porous materials. *Metal Science and Heat Treatment*, v. 45, n. 11–12, p. 441–444, 2003.

SINIR+. Resíduos (sólidos) dos serviços de saneamento. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-dos-servicos-de-saneamento-basico/>>. Acesso em: 3 fev. 2022.

SINIS. Painel do Esgotamento Sanitário. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-esgotamento-sanitario>>. Acesso em: 12 fev. 2022.

SPELLMAN, F. R. *Water and Wastewater Treatment Plant Operations*. New York: Taylor & Francis Group, 2009.

UKWATTA, A. et al. Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids. *Journal of Cleaner Production*, v. 119, p. 76–85, 2015.

VON SPERLING, M. *Lodos ativados*. 4. edição. Universidade Federal e Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016.

WU, K. et al. Promoting the sustainable fabrication of bricks from municipal sewage sludge through modifying calcination: Microstructure and performance characterization. *Construction and Building Materials*, v. 324, n. August 2021, p. 126401, 2022.

ZAT, T. et al. Potential re-use of sewage sludge as a raw material in the production of eco-friendly bricks. *Journal of Environmental Management*, v. 297, 2021.