



Antônio Rodrigo do Carmo Moreira

**Efeito da temperatura de queima nas  
características de blocos cerâmicos com  
substituição parcial de argila por cinzas do  
caroço de açaí**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Alcebíades Negrão Macêdo e  
coorientada pela Professora Dra. Luciana Cordeiro

Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**Antônio Rodrigo do Carmo Moreira**

**Efeito da temperatura de queima nas características de blocos cerâmicos  
com substituição parcial de argila por cinzas do caroço de açaí**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alcebiádes Negrão Macêdo

Coorientadora: Prof. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Belém

Fevereiro de 2023

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Antônio Rodrigo do Carmo Moreira

TÍTULO: Efeito da temperatura de queima nas características de blocos cerâmicos com substituição parcial de argila por cinzas do caroço de açaí

GRAU: Mestre ANO: 2023

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

**Antônio Rodrigo do Carmo Moreira.**

rodrigoeng7@hotmail.com

Av. Augusto Correa, nº1, Campus Universitário do  
Guamá, Laboratório de Engenharia Civil, Belém, Pará.  
CEP 66075-970

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M835e Moreira, Antônio Rodrigo do Carmo.  
Efeito da temperatura de queima nas características de blocos  
cerâmicos com substituição parcial de argila por cinzas do caroço de  
açaí / Antônio Rodrigo do Carmo Moreira. — 2023.  
86 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo  
Coorientação: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, Belém, 2023.

1. Cerâmica Vermelha. 2. Argila. 3. Temperatura de  
Queima. 4. Substituição. 5. CCA. I. Título.

CDD 620.11

---



# EFEITO DA TEMPERATURA DE QUEIMA NAS CARACTERÍSTICAS DE BLOCOS CERÂMICOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE ARGILA POR CINZAS DO CAROÇO DE AÇAÍ

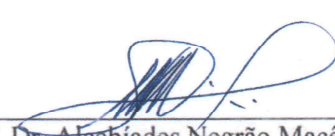
AUTOR:

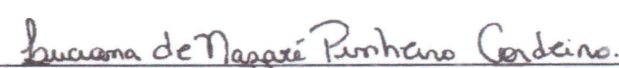
**ANTÔNIO RODRIGO DO CARMO MOREIRA**

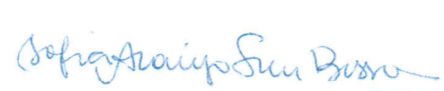
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA  
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E  
CONSTRUÇÃO CIVIL.

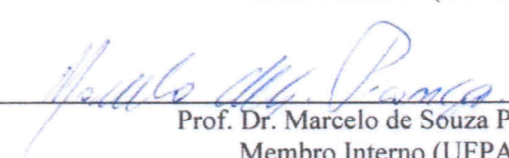
APROVADO EM: 07/02/2023.

BANCA EXAMINADORA:

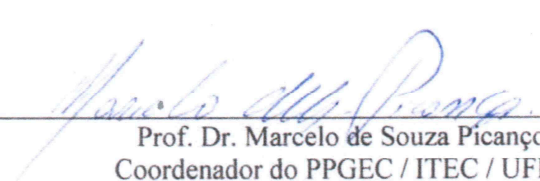
  
Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo  
Orientador (UFPA)

  
Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro  
Coorientadora (UFPA)

  
Profa. Dra. Sofia Araújo Lima Bessa  
Membro Externo (UFMG)

  
Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Membro Interno (UFPA)

Visto:

  
Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

*“A persistência é o caminho do êxito”*

*(Charles Chaplin)*

## **Agradecimentos**

Agradeço à Deus por me dar força e sabedoria para superar as adversidades ao longo desta caminhada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela bolsa de estudos concedida.

A todos que ajudaram no fornecimento de materiais e equipamentos para que fosse possível a realização da etapa experimental, em especial à Cerâmica Bom Jesus, pela disponibilidade na produção dos blocos cerâmicos utilizado nesta pesquisa. Muito Obrigado!

Ao Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR), da Universidade Federal do Paraná (UFPR); ao Laboratório Interdisciplinar para o Desenvolvimento de Nanoestruturas (LINDEN), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); e ao Laboratório de Cerâmica Vermelha (LACER), de São Miguel do Guamá/PA, pela parceria na caracterização dos materiais e dos blocos cerâmicos. Meus sinceros agradecimentos!

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPA (PPGEC), pelo conhecimento compartilhado, em especial, ao Professor Dr. Alcebíades Macêdo que me orientou na pesquisa, e à professora Dra. Luciana Cordeiro por me coorientar, sempre com muita paciência e disponibilidade, suas contribuições foram imprescindíveis para o delineamento desta pesquisa. Obrigado!

Aos meus pais Antônio (em memória) e Socorro por toda educação, apoio, carinho e incentivo. Obrigado pelos princípios transmitidos e pelos ensinamentos, pois foram extremamente significativos para o alcance deste momento. Amo vocês!

À minha esposa Daniela e minha filha Manuella, por todo amor, paciência e companheirismo durante essa jornada, sem a presença e o apoio de vocês a realização deste sonho seria muito mais difícil. Vocês são meus maiores incentivos. Amo vocês!

Aos meus amigos Sérgio e Antônio (Turu) pela parceria e pelo apoio nos momentos de dificuldades enfrentados durante a pesquisa. O companheirismo de vocês foi fundamental para a realização deste trabalho. Muito obrigado!

E por último, mas não menos importante, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização dos objetivos da pesquisa e para a realização desse sonho. Meus sinceros agradecimentos!!!

## Resumo

MOREIRA, A. R. C. **Efeito da temperatura de queima nas características de blocos cerâmicos com substituição parcial de argila por cinzas do caroço de açaí**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará. Belém, 2023.

A indústria da cerâmica vermelha faz parte de uma gama de setores que tem como fonte de matéria-prima os recursos naturais disponíveis no meio ambiente. A exploração das jazidas de argila por este setor pode acarretar em sérios impactos ambientais, uma vez que são extraídas quantidades significativas do material para suprir as altas demandas da construção civil, através da produção de artefatos cerâmicos, como telhas e tijolos. Paralelamente, na indústria extrativista de açaí, durante o beneficiamento do fruto são geradas grandes quantidades de resíduos (caroços) e o descarte é realizado, na maioria das vezes, de forma irregular, causando danos ao meio ambiente. Com o objetivo de minimizar os impactos ambientais provocados pelas indústrias da cerâmica vermelha e do beneficiamento de açaí, este trabalho se propôs a analisar os efeitos provocados pela temperatura de queima sobre o comportamento físico-mecânico de blocos cerâmicos de vedação, fabricados a partir da substituição parcial de argila por cinzas do caroço de açaí (CCA), nos teores de 0%, 5%, 10% e 15%. Inicialmente, a argila e as cinzas passaram por caracterização física (limites de Atterberg, granulometria, massa específica), química, mineralógica e térmica. Posteriormente, os blocos foram produzidos e queimados nas temperaturas de 950 °C, 1050 °C e 1150 °C, e por fim caracterizados de acordo com a ANBT NBR 15270:2017 e ASTM 373:88. Os resultados mostraram que todos os blocos produzidos atingiram todos os parâmetros mínimos de aceitabilidade estabelecidos por norma. Através da realização da análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey ficou evidente que a temperatura de queima influenciou de forma significativa os resultados obtidos, assim como sua combinação com o teor de resíduos. À 950 °C os blocos contendo maiores teores de cinzas apresentaram resistência a compressão e massa específica menor, enquanto que o inverso foi observado nos testes de sucção, absorção de água e porosidade aparente. Já a partir de 1050 °C observou-se que à medida que há o aumento de temperatura os blocos possuindo mais cinzas apresentam maior resistência mecânica, redução porosidade e menor índice de absorção de água. De modo geral, este estudo mostrou que a metodologia abordada em escala industrial é tecnicamente viável, ao aproveitar um resíduo até então pouco utilizado e ao mesmo tempo reduzir o volume de argila extraída do meio ambiente, tendo em vista que o controle da temperatura de queima e o teor de CCA são fatores preponderantes para obter um bloco cerâmico de qualidade.

**Palavras-chave:** cerâmica vermelha; argila; temperatura de queima; substituição; CCA.

## Abstract

The red ceramic industry is part of a range of sectors whose raw material is natural resources available in the environment. The exploitation of clay deposits by this sector can lead to serious environmental impacts, since significant amounts of material are extracted to meet the high demands of civil construction, through the production of ceramic artifacts, such as tiles and bricks. At the same time, in the açai extractive industry, during the processing of the fruit, large amounts of waste (seeds) are generated and disposal is carried out, most of the time, irregularly, causing damage to the environment. With the aim of minimizing the environmental impacts caused by the red ceramic and açai processing industries, this work aimed to analyze the effects caused by the firing temperature on the physical-mechanical behavior of ceramic sealing blocks, manufactured from the replacement partial clay by açai seed ash (ASA), in the contents of 0%, 5%, 10% and 15%. Initially, the clay and ash underwent physical (Atterberg limits, granulometry, specific mass), chemical, mineralogical and thermal characterization. Subsequently, the blocks were produced and burned at temperatures of 950 °C, 1050 °C and 1150 °C, and finally characterized according to ANBT NBR 15270:2017 and ASTM 373:88. The results showed that all the blocks produced reached all the minimum acceptability parameters established by the norm. By carrying out the analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test, it was evident that the firing temperature significantly influenced the results obtained, as well as its combination with the residue content. At 950 °C, the blocks with higher ash contents tended to have lower compression strength and specific mass, while the opposite was observed in the suction, water absorption and apparent porosity tests. From 1050 °C onwards, it was observed that as the temperature increases, the blocks with more ash present greater mechanical resistance, reduced porosity and lower water absorption index. In general, this study showed that the methodology addressed on an industrial scale is technically feasible, as it takes advantage of a residue that has so far been little used and at the same time reduces the volume of clay extracted from the environment, bearing in mind that controlling the firing temperature and the ASA content are preponderant factors to obtain a quality ceramic block.

**Keywords:** red ceramic; clay; firing temperature; replacement; ASA.



## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	18
2.1	ARGILA	18
2.1.1	Propriedades das Argilas	19
2.1.2	Classificação das Argilas	20
2.2	CERÂMICA VERMELHA	22
2.2.1	Processo de Produção de Blocos Cerâmicos	22
2.2.1.1	Extração da Matéria-Prima	22
2.2.1.2	Conformação e Corte	25
2.2.1.3	Secagem	25
2.2.1.4	Processo de Queima e Efeitos da Temperatura	26
2.2.2	Caracterização dos Blocos Cerâmicos	28
2.2.2.1	Determinação das Características Geométricas	28
2.2.2.2	Determinação das Características Físicas	29
2.2.2.3	Determinação da Resistência à Compressão	30
2.2.2.4	Determinação de Eflorescência	30
2.2.3	Aproveitamento de Resíduos em Cerâmica Vermelha	31
2.3	A PRODUÇÃO DE AÇAÍ E SEUS SUBPRODUTOS	33
2.3.1	Resíduos de Açaí	36
2.3.1.1	Aproveitamento das cinzas do caroço de açaí	38
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	40
3.1	COLETA E PREPARO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	41
3.1.1	Argila	41
3.1.2	Caroço de Açaí	41
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	43
3.2.1	Composição Química	43
3.2.2	Composição Mineralógica	43
3.2.3	Caracterização Física	44
3.2.3.1	Caracterização Granulométrica	44
3.2.3.2	Massa Específica	44

3.2.3.3	Limites de Atterberg.....	44
3.2.4	Análise Térmica .....	45
3.3	PRODUÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS.....	45
3.3.1	Composição .....	45
3.3.2	Preparo e Queima .....	46
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS .....	47
3.4.1	Determinação das características geométricas .....	48
3.4.2	Determinação da Absorção de Água Inicial.....	48
3.4.3	Determinação do Índice de Absorção de Água .....	49
3.4.4	Massa Específica Aparente .....	50
3.4.5	Porosidade Aparente.....	50
3.4.6	Determinação da Resistência à Compressão .....	51
3.4.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	51
3.4.8	Determinação de Eflorescência .....	52
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>53</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA E CCA .....	53
4.1.1	Composição Química .....	53
4.1.2	Composição Mineralógica.....	55
4.1.3	Análise Térmica .....	56
4.1.3.1	Argila.....	56
4.1.3.2	Cinzas do Caroço de Açaí .....	57
4.1.4	Limites de Atterberg.....	58
4.1.5	Distribuição Granulométrica .....	58
4.1.6	Massa Específica .....	59
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS .....	59
4.2.1	Características Geométricas .....	59
4.2.2	Massa Específica Aparente .....	63
4.2.3	Absorção de Água Inicial.....	65
4.2.4	Índice de Absorção de Água .....	67
4.2.5	Porosidade Aparente.....	69
4.2.6	Resistência à Compressão .....	70
4.2.7	Determinação de Eflorescência .....	73
4.2.8	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	74
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>76</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	76

5.2	SUGESTÕES .....	77
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>

## Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 1: Fluxograma do processo de produção de blocos cerâmicos. ....	22
Figura 2: Áreas de extração de argila na região de São Miguel do Guamá/PA. ....	23
Figura 3: Degradação ambiental provocada pela extração de argila na região de São Miguel do Guamá/PA. ....	24
Figura 4: Esquema de funcionamento de uma extrusora. ....	25
Figura 5: Determinação das características geométricas de blocos cerâmicos. ....	28
Figura 6: Comparação dos blocos cerâmicos após o ensaio de eflorescência. ....	31
Figura 7: Açaizeiro. ....	34
Figura 8: a) Açaí solteiro e b) açaí touceira. ....	34
Figura 9: Ranking Estadual da produção de açaí em 2020. ....	35
Figura 10: Ranking Municipal da produção de açaí em 2020. ....	35
Figura 11: Anatomia do fruto do açaí. ....	36
Figura 12: Disposição dos resíduos de açaí em alguns locais em Belém/PA. ....	37
Figura 13: Programa experimental da pesquisa. ....	40
Figura 14: a) Argila <i>in natura</i> ; b) argila seca e destorroada. ....	41
Figura 15: Estocagem dos caroços de açaí. ....	42
Figura 16: a) Caroços gerados no processo de fabricação do açaí; b) resíduo gerado através do procedimento de queima; c) cinza moídas. ....	42
Figura 17: a) Ensaio de Limite de Liquidez, através do aparelho Casagrande; b) corpo de prova moldado através do ensaio de Limite de Plasticidade. ....	45
Figura 18: a) Mistura dos materiais; b) processo de fabricação e obtenção dos blocos; c) e d) aspecto visual de um exemplar de cada classe de blocos formuladas, no estado cru. ....	46
Figura 19: Processo de queima. ....	47
Figura 20: Caracterização geométrica dos blocos. ....	48
Figura 21: Ensaio de absorção inicial. ....	49
Figura 22: Ensaio de resistência à compressão. ....	51
Figura 23: Ensaio de eflorescência. ....	52
Figura 24: Difrátograma de Raios-X da amostra de argila. ....	55
Figura 25: Difrátograma de Raios-X da amostra de CCA. ....	55
Figura 26: Análise térmica da argila. ....	56
Figura 27: Análise térmica das cinzas do caroço de açaí. ....	57
Figura 28: Valores da massa específica aparente dos blocos cerâmicos. ....	63
Figura 29: Resultados da absorção de água inicial. ....	65
Figura 30: Índices de absorção de água dos blocos cerâmicos. ....	67
Figura 31: Valores obtidos para porosidade aparente. ....	69
Figura 32: Resistência à compressão dos blocos cerâmicos. ....	71
Figura 33: Micrografias obtidas por MEV na superfície do corpo de prova Bref: a) 950 °C; b) 1050 °C; c) 1150 °C. ....	74
Figura 34: Micrografias obtidas por MEV na superfície do corpo de prova B5C: a) 950 °C; b) 1050 °C; c) 1150 °C. ....	74
Figura 35: Micrografias obtidas por MEV na superfície do corpo de prova B10C: a) 950 °C; b) 1050 °C; c) 1150 °C. ....	75
Figura 36: Micrografias obtidas por MEV na superfície do corpo de prova B15C: a) 950 °C; b) 1050 °C; c) 1150 °C. ....	75

## Lista de Tabelas

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 1: Caracterizações de eficiências energéticas de fontes de biomassa.....	37
Tabela 2: Composições a serem investigadas.....	45
Tabela 3: Composição química da argila das cinzas do caroço de açaí. ....	53
Tabela 4: Limites de Atterberg das amostras ensaiadas. ....	58
Tabela 5: Resultados do ensaio de granulometria. ....	59
Tabela 6: Resultados das medidas das faces. ....	60
Tabela 7: Valores obtidos da planeza das faces. ....	61
Tabela 8: Valores obtidos para os desvios em relação ao esquadro. ....	61
Tabela 9: Medidas das paredes externas e septos.....	62
Tabela 10: Análise de variância (ANOVA) do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a massa específica aparente dos blocos. ....	64
Tabela 11: Teste de Tukey do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a massa específica aparente.....	65
Tabela 12: Análise de variância (ANOVA) do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a absorção de água inicial. ....	66
Tabela 13: Teste de Tukey do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a absorção de água inicial.....	66
Tabela 14: Análise de variância (ANOVA) do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a absorção de água. ....	68
Tabela 15: Teste de Tukey do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre o índice de absorção de água.....	68
Tabela 16: Análise de variância (ANOVA) do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a porosidade aparente.....	70
Tabela 17: Teste de Tukey do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a porosidade aparente.....	70
Tabela 18: Análise de variância (ANOVA) do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a resistência à compressão. ....	72
Tabela 19: Teste de Tukey do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a resistência à compressão. ....	73
Tabela 20: Resultados da determinação de eflorescência. ....	73

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

<b>Sigla</b>	<b>Significado</b>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
CCA	Cinzas do caroço de açaí
CPs	Corpos de Prova
DRX	Difração de Raios-X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG	Termogravimetria diferencial
FRX	Fluorescência de Raios-X
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa	Megapascal
NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
PF	Ponto de fusão
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
TG	Análises termogravimétrica
VED15	Blocos cerâmicos com resistência à compressão de 1,5 MPa

## 1 INTRODUÇÃO

Os Estados do Pará e do Amazonas são destaques no cenário nacional, no que diz respeito ao extrativismo vegetal, mais especificamente na extração do fruto do açaí (*Euterpe Oleracea*). Segundo o último levantamento realizado, no ano de 2020 os dois Estados foram responsáveis por aproximadamente 99% de toda a produção de açaí do país, o que representa uma quantidade de aproximadamente 1,5 milhão de toneladas do fruto (SEDAP, 2021).

Por outro lado, a polpa do açaí representa aproximadamente 1/6 apenas do volume do fruto, o restante corresponde ao caroço, resíduo que não possui uma destinação e um descarte adequado após o processamento do fruto e que geralmente são lançados de forma irregular em vias públicas, feiras e terrenos baldios (CONTO *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2020; ARAÚJO *et al.*, 2021).

Nesse contexto, em 2010 foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) através da Lei nº 12.305/10. A lei foi criada para ser um instrumento de combate aos problemas ambientais, econômicos e sociais vivenciados cotidianamente pelo Brasil. Dentre suas diretrizes, está o incentivo ao manejo adequado de resíduos sólidos, bem como estimular o aumento da reciclagem e reutilização de resíduos que ofereçam riscos ao meio ambiente (BRASIL, 2010).

Nesse caminho, levando em consideração a expressividade do volume gerado, os resíduos do caroço de açaí necessitam de uma destinação adequada e aproveitamento em diversas áreas. Sob outra perspectiva, Cordeiro *et al.* (2019) destacam que a indústria da construção civil se apresenta como um campo propício para a incorporação de resíduos e subprodutos de outros segmentos industriais, na produção de materiais alternativos, como cimentos, argamassas, concretos.

Desta forma, o desenvolvimento de estudos alternativos que possam, por um lado, proporcionar avanços no setor da construção civil, e por outro, minimizar os impactos ambientais gerados pelos resíduos provenientes das indústrias, vem se consolidando com o passar dos anos (ZHU *et al.*, 2015; MA *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2017; BABISK, *et al.*, 2020). Paralelamente, a indústria da cerâmica vermelha é um segmento promissor para a incorporação de rejeitos, pelo fato de a mesma ter a capacidade de absorver materiais descartados, uma vez que as massas cerâmicas são heterogêneas por natureza, sendo,

portanto, tolerantes a adições de vários resíduos, dos mais diversos tipos e origens (SOUZA *et al.*, 2008; SHINOMIYA *et al.*, 2019).

No âmbito da construção civil, os elementos construtivos em alvenaria de blocos cerâmicos de vedação presentes em muitas obras, apresentam grande destaque pelo significativo volume de materiais empregados. Por possuir como matéria-prima a argila, a fabricação de blocos cerâmicos provoca sérios danos ao meio ambiente. Embora a extração da argila não seja considerada uma atividade poluidora, ela causa assoreamento nos rios e degrada o meio ambiente, a partir da alteração da topografia e desmatamento das áreas de extração (ALMEIDA, 2015; COSTA, 2014).

No que diz respeito a qualidade de blocos cerâmicos, Más (2006) destaca que o procedimento de queima da cerâmica vermelha é uma etapa fundamental e que interfere de maneira significativa na qualidade do produto. Holanda e Saleiro (2012) corroboram afirmando que além do processo de queima, a composição das matérias-primas são os principais fatores a serem levados em consideração durante o processo de produção.

Em relação à incorporação de resíduos em composições cerâmicas, na literatura é possível encontrar vários trabalhos com foco nessa temática e que apresentaram resultados satisfatórios. Como exemplo, é possível citar os trabalhos de: Medeiros *et al.* (2010), ao estudarem a incorporação de lenha, cinzas da casca de arroz e lodo de estação de tratamento de água em massa cerâmica; Faria *et al.* (2012) com a proposta de avaliar as propriedades tecnológicas da cerâmica vermelha com a adição de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar; Menezes *et al.* (2007), ao proporem a utilização do resíduo do beneficiamento de caulim para a produção de telhas e blocos cerâmicos; e Oliveira *et al.* (2016) analisaram a viabilidade da incorporação de chamote em massa cerâmica.

Visando a utilização de resíduos na elaboração de produtos alternativos e na diminuição dos impactos ambientais causados pela extração de argila, esta pesquisa se propôs estudar o aproveitamento das cinzas do caroço de açaí (CCA) em composição de blocos cerâmicos de vedação, mediante a substituição parcial da argila, bem como analisar as características físico-mecânicas da cerâmica vermelha, com a incorporação do resíduo, a partir dos efeitos provocados pelo tratamento térmico, através de variações da temperatura de queima.



## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar as propriedades de blocos cerâmicos produzidos com substituição parcial de argila por diferentes teores de cinzas do caroço de açaí (CCA), em variadas temperaturas de queima.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as características das matérias-primas por meio da realização de ensaios técnicos normativos;
- Investigar os efeitos da combinação entre o teor de resíduos em substituição e a variação de temperatura, sobre as propriedades físico-mecânicas dos blocos;
- Analisar a influência da incorporação da CCA nas propriedades técnicas e mecânicas dos blocos cerâmicos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ARGILA

A argila é tratada como sendo um material natural, predominantemente terroso, com granulometria fina, e plástico quando umedecido com água. Quimicamente, as argilas são compostas por silicatos de alumínio hidratado ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), magnésio e ferro, sendo que a fração de argila do solo é formada por argilominerais, que são partículas cristalinas muito pequenas de uma quantidade restrita de minerais. Em síntese, uma determinada argila pode apresentar em sua composição uma mistura de diversos argilominerais ou partículas de um único argilomineral (AZEREDO, 2015).

Nociti (2011) reitera destacando que os argilominerais são essencialmente a mistura de substâncias minerais oriundas da degradação do feldspato de rochas metamorfas e ígneas, através da ação de gás carbônico e água. Além disso, de acordo com Grun (2007), os argilominerais são caracterizados como filossilicatos hidratados em forma de cristais menores que 4 à  $8\mu\text{m}$ , com a aparência de lâminas hexagonais, sendo que os principais grupos formados são a caulinita, a illita e a montmorilonita. O mesmo autor descreve que a estrutura cristalina desses minerais equivale a um arranjo de folhas, com a formação de camadas.

A montmorilonita, cujo sua formula geral é dada por  $(\text{OH})_2(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$ , é constituída por partículas muito finas e sua principal característica é em ter a capacidade de absorver moléculas de água, assim, argilas ricas neste argilomineral pode apresentar elevada plasticidade e forte tendência em provocar fissuras de secagem. Por outro lado, as illitas, por possuírem sempre contaminação por impurezas, a determinação de sua composição química não é exata, e por conterem potássio em sua estrutura, elas denotam boa resistência mecânica após a sintetização. Já as argilas constituídas por caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), apresentam natureza refratária (NOCITI, 2011).

Gouveia (2008) reitera ainda que, além dos argilominerais as argilas contêm minerais amorfos e não cristalinos, e também outros materiais, como partículas de quartzo, calcita, matéria orgânica, mica, sais solúveis, pirita, dolomita e outros minerais residuais. Azeredo (2015) complementa destacando que esses minerais de origem natural possuem estrutura cristalina característica e composição química definida, contendo pequenas impurezas.

Na composição química das argilas é possível presenciar a existência de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ), cal ( $\text{CaO}$ ), óxido de férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), álcalis ( $\text{Na}_2$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ), magnésia ( $\text{MgO}$ ), anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) e anidrido carbônico ( $\text{CO}_2$ ). Em termos de composição, a sílica representa 40 a 80% da fração total da matéria-prima; a alumina está presente com o percentual variando de 10 a 40%; o óxido de férrico se faz presente em quantidades inferiores a 7%; enquanto que as parcelas de cal, magnésia e os álcalis compõem valores não superiores a 10, 1 e 10%, respectivamente, da fração total (ARAÚJO *et al.*, 2000; AZEREDO *et al.*, 2014).

Araújo *et al.* (2000) ressaltam que as argilas possuem partículas de água de absorção e de constituição. Entretanto, alguns grupos de argilas apresentam água zeolítica, onde as moléculas ficam intercaladas nos vazios da rede cristalina. Em um processo de queima do material, a água de absorção é eliminada na faixa de temperatura entre 100 e 110°C, enquanto que a zeolítica é suprimida entre 300 e 400°C e a de constituição entre 400 e 700°C. Nessas condições a estrutura cristalina não é quebrada, e o processo pode ser reversível através da reidratação do material. Todavia, na eliminação da água de constituição, dependendo do tipo de argila, a estrutura cristalina pode ser quebrada. Só a partir de altas temperaturas (900 a 1000°C) que as estruturas cristalinas das argilas se tornam amorfas, quando há a cristalização a partir da combinação da sílica com a alumina, fenômeno que proporciona estabilidade estrutural às cerâmicas.

Riella *et al.* (2002) destaca que quando um fundente é misturado com a argila há a formação de vidro, com ponto de fusão relativamente baixo. Com o aumento gradativo da temperatura há também o aumento de vitrificação. Os autores citam ainda que um dos agentes fundentes mais comuns são os feldspatos, que compõem um grupo de materiais compostos por aluminossilicatos, contendo íons  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$ .

### 2.1.1 Propriedades das Argilas

De acordo com Gouveia (2008) as argilas podem ser encontradas nos estados natural, plástico e seco, e para cada estado elas apresentam propriedades distintas, que servem para caracterizar e auxiliar na definição da melhor forma de utilização do material. Quanto ao estado natural das argilas, além da composição granulométrica e a forma das partículas, o estudo da composição química do material também é de grande relevância, uma vez que ela pode basicamente direcionar a melhor forma de aplicação de um referido tipo de argila

dentro da indústria cerâmica, levando em consideração os componentes químicos presentes (GOUVEIA, 2008).

Ao analisar a argila no estado plástico, para a produção de cerâmica vermelha as argilas devem atingir uma plasticidade ideal, Gouveia (2008) recomenda que seja determinada a quantidade mínima de água necessária para possibilitar a moldagem adequada das peças, uma vez que o excesso de água pode acarretar no aumento de deformações e fissuras durante as etapas de secagem e queima, além de favorecer o acréscimo de porosidade da cerâmica, resultando no aumento da permeabilidade e na perda de resistência mecânica.

Já ao analisar a argila no estado seco, pode-se destacar a retração linear de secagem e queima, que é definida como sendo a tendência que a argila tem em reduzir de volume pela perda de umidade, através dos processos de secagem e queima. O conhecimento do grau de retração da argila é extremamente importante, uma vez que esse parâmetro auxilia na determinação das dimensões ideais de blocos cerâmicos crus, para que possam alcançar as medidas desejadas após serem queimados (KAZMIERCZAK, 2007).

Na indústria da produção da cerâmica vermelha, outro fator preponderante é a porosidade dos produtos, que é dada em função das características das argilas e também pela umidade. A formação e a distribuição dos poros na cerâmica acontecem a partir da combinação entre a quantidade de água presente na argila, durante o processo de conformação, e as forças de atração existentes entre as partículas lamelares dos argilominerais (GOUVEIA, 2008)

Kazmierczak (2007) cita que a porosidade interfere diretamente em diversas propriedades da cerâmica. O aumento dos poros provoca o acréscimo da permeabilidade e causam a diminuição de resistência mecânica, assim como da condutibilidade elétrica e térmica. Além disso, a porosidade nos corpos cerâmicos seve como excelente indicador para a verificação do grau de sinterização, levando em consideração a temperatura de queima.

### 2.1.2 Classificação das Argilas

De acordo Gouveia (2008), a classificação das argilas é realizada de acordo com a sua estrutura cristalina, bem como seu emprego, suas propriedades essenciais e

características. Nos itens a seguir são apresentadas algumas das principais classificações das argilas.

*a) Classificação conforme sua estrutura cristalina*

Levando em consideração a estrutura cristalina, as argilas são classificadas como fibrosas e laminares. Na indústria da cerâmica vermelha, apenas as argilas de estrutura laminar podem ser empregadas, sendo que elas são subdivididas em iliticas, montmoriloniticas e cauliniticas. As mais utilizadas na fabricação de blocos cerâmicos são as ilitas, e também se apresentam em maior abundância na natureza (PETRUCCI, 2007).

*b) Classificação conforme seu emprego*

De acordo com Petrucci (2007), considerando a forma como são empregadas, as argilas podem ser divididas em refratárias, infusíveis e fusíveis. As argilas refratárias possuem baixo coeficiente de condutibilidade térmica e são muito puras. Já as infusíveis são formadas por caulins puros, enquanto que as fusíveis são as utilizadas na produção de blocos cerâmicos e se deformam em temperaturas abaixo de 1200°C.

*c) Classificação quanto a sua plasticidade*

Segundo Santos (1989), dentro desta classificação, as argilas se apresentam como plásticas e pouco plásticas. As argilas plásticas são comumente conhecidas como gordas, constituídas de argilominerais de baixa granulometria. Elas favorecem de forma significativa o processo de moldagem de peças, entretanto, essas argilas apresentam elevados índices de retração durante o processo de secagem. O autor destaca ainda que se não houver o controle adequado das operações de produção, poderá ocorrer o surgimento de tensões, trincas e deformações nas peças, uma vez que as argilas gordas, por possuírem baixa permeabilidade, dificultam a rápida difusão da água da região central para a superfície da peça.

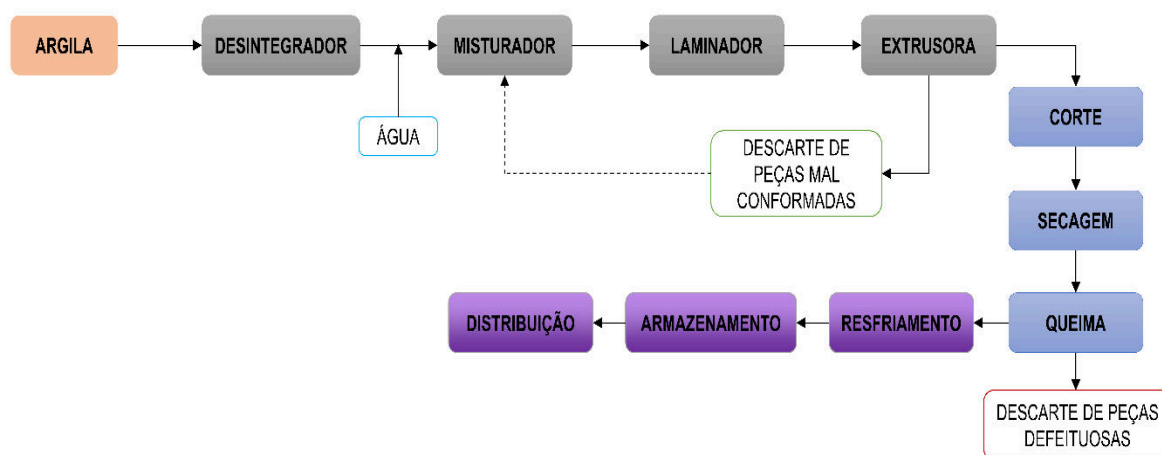
Por outro lado, as argilas com baixa plasticidade, também denominadas como magras, são apontadas como argelitos siltosos, contendo teores elevados de sílica. Além disso, essas argilas apresentam baixa retração linear e baixa resistência no estado pós secagem. Como aplicabilidade, elas são geralmente utilizadas na correção da plasticidade de argilas muito plásticas (SANTOS, 1989).

## 2.2 CERÂMICA VERMELHA

### 2.2.1 Processo de Produção de Blocos Cerâmicos

De acordo com Isaia (2007) e Alves Junior (2016), a fabricação de blocos cerâmicos envolve várias fases, que vai desde a escolha adequada da argila até a obtenção do produto final, sendo que cada etapa dentro do processo pode influenciar diretamente na etapa seguinte, que contribuirá para a perda de qualidade das peças. A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de fabricação.

Figura 1: Fluxograma do processo de produção de blocos cerâmicos.



Fonte: Adaptado de GOUVEIA, 2008.

Conforme as descrições presentes na NBR 15270-1 (ABNT, 2017), os blocos cerâmicos precisam ser produzidos por conformação plástica das massas argilosas, através do processo de prensagem ou extrusão. Os produtos podem conter ou não aditivos e precisam ser queimados em altas temperaturas. Gouveia (2008) corrobora mencionando que o controle preciso de todo o processo de produção pode diminuir manifestações defeituosas dos produtos.

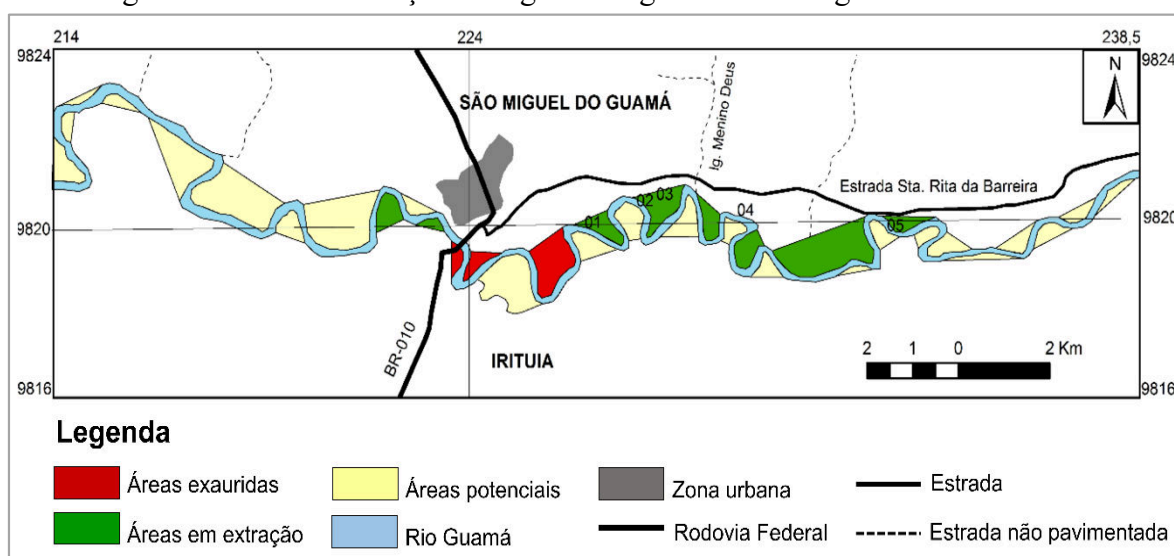
#### 2.2.1.1 Extração da Matéria-Prima

O método mais utilizado para a extração de argila é a lavra de exploração, processo que ocorre a céu aberto, uma vez que os depósitos sedimentares estão localizados próximos a superfície terrestre. Através de maquinários, como escavadeiras e pás carregadeiras, é realizado o desmonte das camadas de argila em tiras. Posteriormente, a matéria-prima é armazenada em locais próximos das jazidas por um determinado período de tempo e em

seguida são transportadas, por caminhões, para o interior das unidades fabris de cerâmica (MORAIS, 2007).

No município de São Miguel do Guamá/PA, região nordeste paraense, a extração de argila vem ocorrendo de forma significativa a mais de quatro décadas. As atividades são realizadas de forma irregular e praticamente não há nenhuma preocupação em minimizar os impactos causados. Outro aspecto preponderante é o fato de que 90% das áreas de extração se encontram nas proximidades dos rios Guamá e Irituia (Figura 2), que são os principais efluentes da região (SANTOS, 2016).

Figura 2: Áreas de extração de argila na região de São Miguel do Guamá/PA.



Fonte: SANTOS, 2016.

A extração da argila provoca sérios danos ao meio ambiente. Através da retirada de vegetação, a superfície do solo fica mais exposta a intempéries, o que contribui para a modificação do aspecto físico do mesmo. Nessas condições, o solo passa por um processo de compactação e alteração de sua rugosidade superficial, uma vez que as taxas de infiltração da água causam distúrbios consideráveis no ambiente (REGENSBURGER, 2004).

Santos (2016) destaca que no processo de extração de argila, além da retirada da cobertura vegetal (Figura 3a), há a necessidade de abertura de cavas para a retirada da matéria-prima, o que modifica a topografia do local, provocando a mudança do regime do fluxo basal da área explorada (Figura 3b). Além disso, o autor ainda ressalta que essa modificação topográfica favorece os riscos de assoreamento dos rios próximos as áreas de lavra (Figura 3c).

Figura 3: Degradação ambiental provocada pela extração de argila na região de São Miguel do Guamá/PA.



Fonte: SANTOS, 2009.

Segundo os cálculos realizados por Santos (2016), em 2015 os depósitos de argila não explorados na região de São Miguel do Guamá/PA correspondiam a uma área de aproximadamente  $4.541.334 \text{ m}^2$ , o que representa  $6.812.001 \text{ m}^3$  de argila. Realizando uma comparação dos números em um intervalo de 15 anos, nos cálculos de Lima (2000), no ano de 2000 haviam aproximadamente  $1.175.496,7 \text{ m}^2$  de áreas de depósitos não exploradas, que correspondia a um volume de  $1.763.245 \text{ m}^3$  de argila. Para o primeiro autor, o aumento considerável de indústrias ceramistas nesse período contribuiu para a procura de jazidas na região e a descobertas de novas áreas potenciais para a extração de argila.

Após o processo de extração as argilas são estocadas a céu aberto, em uma etapa de preparação conhecida como sazonalização, que geralmente varia de seis meses a dois anos. Esse procedimento atua no tratamento da matéria-prima, uma vez que o intemperismo provoca a lavagem dos sais solúveis, como também a oxidação da matéria orgânica e a fermentação, o que contribui para a melhora da plasticidade, possibilitando a moldagem por extrusão. O processo ainda inibe as expansões de peças após a moldagem, impede grandes deformações, rupturas e trincas, e minimiza o desenvolvimento de gases durante o procedimento de queima (BAUER, 2007; PETRUCCI, 2007).

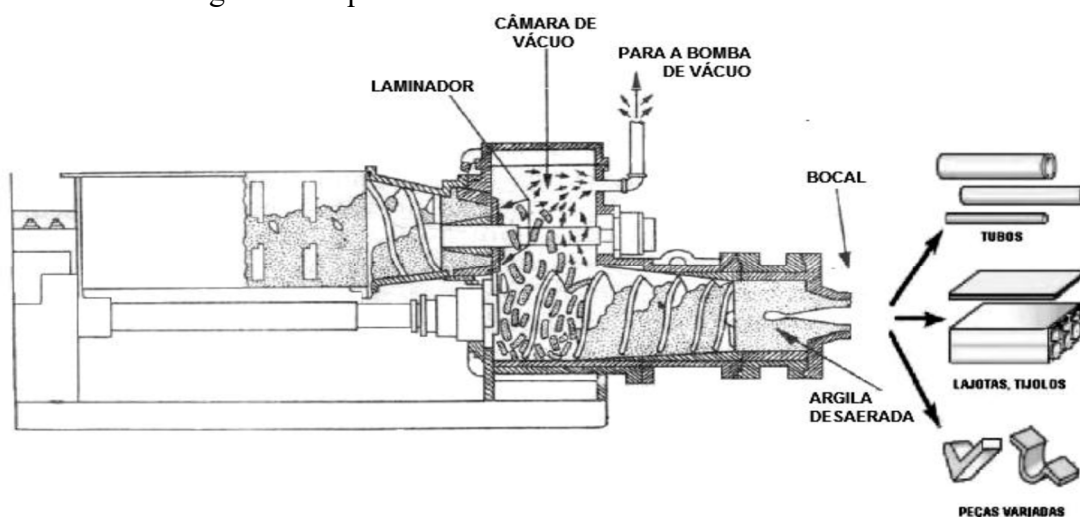
Após o sazonalização, Morais e Sposto (2006) citam que as argilas são transportadas para caixões alimentadores, onde será, se necessário, realizada a dosagem adequada com proporções pré-estabelecidas. Em seguida, a massa de argila é levada para o desintegrador, para que ocorra o destorroamento dos grãos. Posteriormente, o material é conduzido ao misturador, onde será processada a homogeneização com o ajuste do teor de água, se necessário. Na etapa final, a mistura é remetida ao laminador, onde ocorrerá a pré-laminação e a finalização do procedimento de homogeneização.



### 2.2.1.2 Conformação e Corte

O método de moldagem mais utilizado em fábricas de blocos cerâmicos é a conformação por extrusão, onde utiliza-se um equipamento mecânico chamado extrusora (ou maromba). Conforme mostrado na Figura 4, o processo consiste em moldar e impulsionar as massas cerâmicas através de um propulsor (rosca sem fim), por meio de uma chapa de aço perfurada, e lança-las no interior de uma câmara de vácuo. Dentro da câmara ocorre a retirada de ar e através de outra rosca sem fim, a massa então é forçada por um molde (boquilha) que imprime uma coluna contínua de massa cerâmica prensada de formato predefinido, e em seguida ocorre o corte no comprimento desejado (MORAIS, 2016).

Figura 4: Esquema de funcionamento de uma extrusora.



Fonte: GUIMARÃES, 2017.

De acordo com Oliveira (2011), o processo de extrusão é extremamente importante para a qualidade do produto final, uma vez que o procedimento provoca a retirada de ar da massa cerâmica no estado plástico e possibilita uma maior compactação dos grãos, proporcionando maior resistência mecânica. A má execução do processo, ou até mesmo a ausência, pode fazer com que o ar fique presente na mistura, ocasionando uma compactação insuficiente dos grãos, o que provocará a redução de resistência mecânica dos blocos.

### 2.2.1.3 Secagem

Após o procedimento de conformação e corte dos blocos inicia-se o processo de secagem, com a finalidade de eliminar a água utilizada na produção das peças, uma vez

que as partículas de água estão distribuídas de forma homogênea entre as partículas de argila. Para que os blocos alcancem os padrões adequados de qualidade, a água precisa ser eliminada homogeneamente para facilitar a aproximação entre as partículas de argila. Essa aproximação diminui as dimensões da peça, causando retração linear, e caso não ocorra a eliminação homogênea da água, haverá o surgimento de trincas nas peças, tornando-as quebradiças (OLIVEIRA, 2011).

Segundo Oliveira (2011), a etapa de secagem deve ser uniforme e lenta, uma vez que após o processo de extrusão a umidade das peças cerâmicas oscilam geralmente de 20% a 30%, e após a secagem esse percentual deverá ficar abaixo de 5%. No processo de queima, se as peças forem levadas ainda úmidas para o forno, a umidade interior irá reter na crosta externa e provocará tensões internas, causando fendilhamento.

Gouveia (2008) salienta que a secagem pode ocorrer de forma natural ou artificial. O processo de secagem natural consiste em expor as peças mediante a ação de agentes atmosféricos, como ar e luz solar. Por outro lado, a secagem artificial é realizada através de mecanismos que promovam a evaporação de partículas de água, como o emprego de gases quentes e ventilação, para provocar a evaporação de umidade e remover o ar saturado, respectivamente.

#### 2.2.1.4 Processo de Queima e Efeitos da Temperatura

De acordo com Bauer (2000), o procedimento de queima de blocos cerâmicos é a etapa mais importante dentro do processo de fabricação, uma vez que esta é considerada uma fase complexa, pois envolvem reações químicas importantes, que proporcionam características finais aos blocos, como cor, resistência mecânica e outros padrões físicos. O autor destaca ainda que o tempo de queima, a temperatura, as características do ambiente, a velocidade de aquecimento e resfriamento das peças, o tipo de forno utilizado e o tipo de combustível empregado, estão entre os principais fatores que influenciam a queima dos blocos.

Para esse processo não existe uma temperatura de queima ideal de forma global, pois esta pode variar com o tipo de argila e de forno, bem como os tipos de blocos a serem queimados, a eficácia do procedimento de queima, as condições atmosféricas e a distribuição de calor no interior das câmaras. Desta forma, o controle adequado da

temperatura de queima juntamente com o tempo, podem garantir a qualidade do produto final (PETRUCCI, 2007).

Em relação ao tempo de queima, Gouveia (2008) ressalta que se o processo for lento, haverá uma tendência de diminuição dos defeitos nas peças, no entanto, ocorrerá um maior consumo de combustível. Por outro lado, se a queima for realizada em um curto período de tempo ou sob baixas temperaturas, os blocos apresentarão pontos crus e impróprios para o consumo. A mesma autora reitera que os defeitos gerados pela queima em baixas temperaturas estão ligados ao processo de sinterização da argila, uma vez que a sinterização é o ápice da integração entre os minerais, que necessitam de níveis adequados de temperatura para ocorrer a fundição.

De acordo com Más (2005), no processo de sinterização é fundamental que se tenha o conhecimento prévio do material utilizado, devido à complexidade da técnica. O autor cita que na fase crua, a plasticidade conecta as partículas de argila, e quando postas em temperatura acima de 700°C os materiais fundentes tornam-se líquidos e vitrificam, consolidando as partículas. A partir da formação de fase líquida, são geradas “soldas internas” junto as partículas do corpo cerâmico, e ao resfriar o material, o líquido entre as partículas formam “pontos de solda”. A quantidade de líquido formado é essencial, uma vez que os altos teores dessa fase favorecem uma maior distribuição de pontos de solda na malha cristalina, e isso é possível com o aumento gradativo de temperatura.

Posses (2013) destaca que com a elevação da temperatura, os blocos cerâmicos sofrem retração linear, ou seja, as peças diminuem de tamanho, proporcionalmente ao acréscimo de temperatura. A autora menciona ainda que com o aumento da temperatura de queima, as taxas de absorção de água tendem a decair, confirmando a teoria de que os poros dos materiais cerâmicos diminuem com o aumento da temperatura.

Por outro, Pagnussat (2013) comprovou em seus estudos que a partir do aumento da temperatura de queima, curiosamente também há o aumento de sucção capilar dos substratos cerâmicos. O autor supõe que o fenômeno é proporcionado pelo refinamento gradual dos poros dos blocos, uma vez que nenhuma das temperaturas de queima estudadas (700, 800, 900 e 1000°C) promoveu uma superfície completamente impermeabilizada, a partir da vitrificação do processo de fusão entre os aluminatos e silicatos presentes na argila.

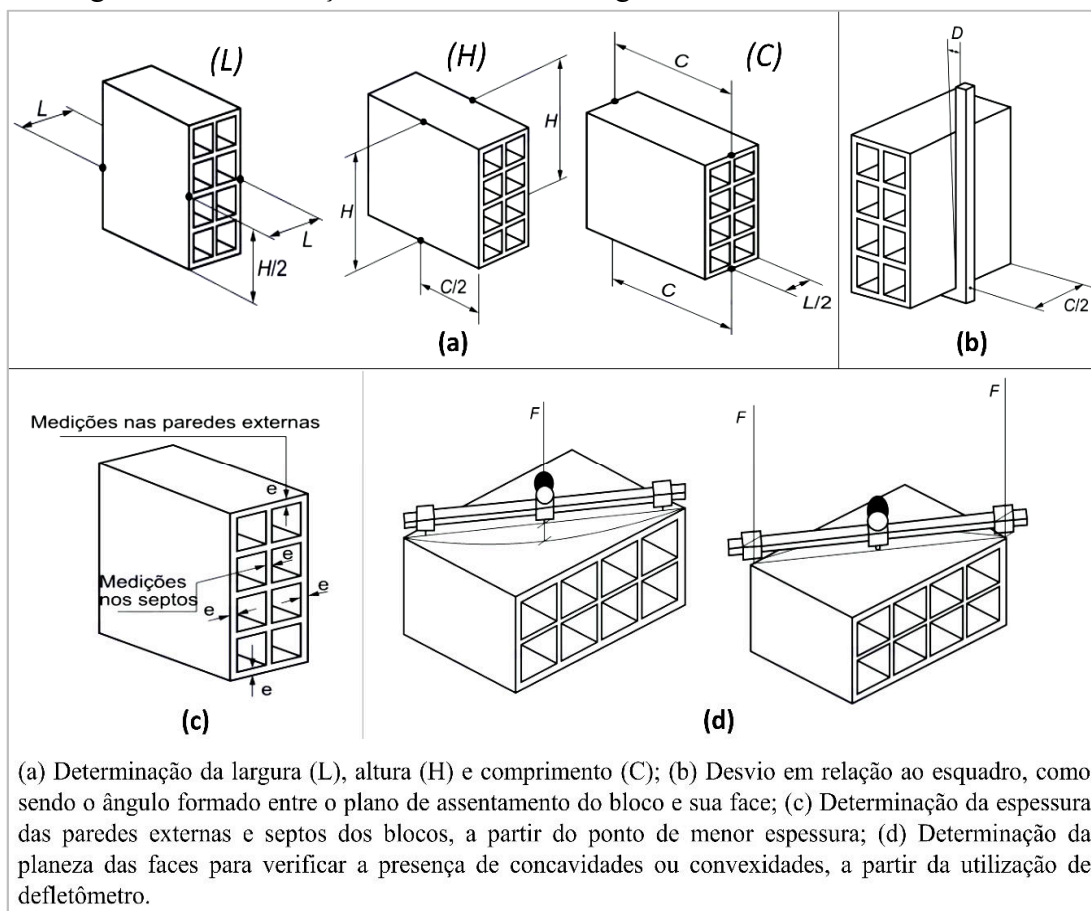
## 2.2.2 Caracterização dos Blocos Cerâmicos

Com o intuito de verificar as características e as propriedades dos blocos cerâmicos, são necessários a realização de ensaios físicos, mecânicos e ambientais para atestar se de fato as peças cumprem os requisitos mínimos estabelecidos por normas. O mesmo vale para analisar se o comportamento de peças cerâmicas é afetado pela incorporação de resíduos (NOCITI, 2011).

### 2.2.2.1 Determinação das Características Geométricas

Os ensaios de determinação das características geométricas de blocos cerâmicos, como área líquida ( $A_{liq}$ ), área bruta ( $A_b$ ), espessura dos septos e paredes externas dos blocos, planeza das faces ( $F$ ), medida das faces (dimensões efetivas) e desvio em relação ao esquadro ( $D$ ), estão descritos no anexo A da NBR 15270-2 (ABNT, 2017). A norma estabelece que todas as determinações devem ser realizadas em uma superfície plana e indeformável. Na Figura 5 é mostrado a metodologia para cada determinação.

Figura 5: Determinação das características geométricas de blocos cerâmicos.



Fonte: Adaptado de ABNT, 2017.

Em relação a área bruta ( $A_b$ ), esta deve ser determinada através da multiplicação entre a largura (L) e o comprimento (C) (bloco com furo na vertical) ou pela multiplicação entre a largura (L) e a altura (H) (bloco com furo na horizontal). Já para a determinação da área líquida ( $A_{liq}$ ), de acordo com a equação 1, os blocos são imersos em água à temperatura ambiente para saturação e após esse procedimento é obtido a massa aparente ( $m_a$ ), a partir da pesagem dos blocos imersos em água à temperatura de  $23 \pm 5^\circ \text{C}$ . Posteriormente, os blocos são enxugados superficialmente com um pano úmido e pesados, obtendo-se a sua massa saturada ( $m_s$ ) (ABNT, 2017).

$$A_{liq} = \frac{(m_s - m_a)}{y \cdot H} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$A_{liq}$ : é a área líquida, expressa em  $\text{cm}^2$ .

H: é a altura do bloco, expressa em mm.

y: é a massa específica da água, expressa em  $\text{g/mm}^3$ .

As tolerâncias dimensionais são estabelecidas pela NBR 15270-1 (ABNT, 2017), onde determina que as variações dos valores médios de altura, largura e comprimento sejam de  $\pm 3\text{mm}$ . Em relação a espessura dos septos e paredes externas dos blocos, a norma define no item 5.2 a tolerância de 0,5mm. Já nos itens 5.3 e 5.4 é fixado o valor de 3mm para os desvios de esquadro e planeza das faces. Além disso, no item 8.2.2, recomenda-se que seja adotada uma amostragem simples de 13 blocos para a realização dos ensaios, de modo que o limite mínimo para a aceitação do lote é de somente 2 blocos com inconformidades.

#### 2.2.2.2 Determinação das Características Físicas

Assim como na determinação da resistência à compressão e características geométricas, os ensaios para o conhecimento das características físicas dos blocos também são fixados pela NBR 15270-2 (ABNT, 2017), em seu anexo B. Através dos ensaios são determinados a massa úmida ( $m_u$ ), a massa seca ( $m_s$ ) e o índice de absorção de água. De acordo com a norma, para a obtenção a massa seca, os corpos de prova são submetidos à secagem em estufa a  $105 \pm 5^\circ \text{C}$  e posteriormente são pesados até que duas pesagens consecutivas diferirem em no máximo 0,25%, em um intervalo mínimo de uma hora. Já a

massa úmida é determinada após a pesagem da amostra submergida por duas horas em água fervente.

A NBR 15270-1 (ABNT, 2017) estabelece no item 8.2.4, que para o ensaio de absorção de água é necessária uma amostragem simples de 06 blocos, sendo que apenas 1 pode apresentar valor não conforme com a norma. Para a categoria de bloco VED15 (bloco de vedação de 1,5 MPa), o índice de absorção de água deverá variar entre os percentuais de 8 e 25%.

Nos anexos D e F da NBR 15270-2 (ABNT, 2017) são descritos também os métodos de ensaios de determinação do índice de absorção inicial e massa específica aparente, respectivamente. Entretanto, a norma não estabelece limites de referência para o ensaio de massa específica aparente. Em relação ao índice de absorção inicial, Baptista (2018) cita que o ensaio é indicado para avaliar a aderência do bloco cerâmico, sendo que valores acima de 30 g/194cm<sup>2</sup>/min pode comprometer a aderência entre o substrato e o revestimento de argamassa.

#### 2.2.2.3 Determinação da Resistência à Compressão

O ensaio de determinação da resistência à compressão de blocos cerâmicos de vedação é regido pela NBR 15270-2 (ABNT, 2017), em seu anexo C. De acordo com a norma, através do ensaio destrutivo, é possível observar a ruptura frágil dos corpos de prova, por meio do rompimento dos septos externos e internos. A partir do ensaio, é calculado a resistência média à compressão, obtido a partir do somatório dos valores individuais de 13 CPs, e o resultado precisa ser igual ou superior a 1,5 megapascals (MPa) para ser considerado satisfatório.

#### 2.2.2.4 Determinação de Eflorescência

No anexo E da NBR 15270-2 (ABNT, 2017) está descrito o procedimento experimental para determinar a eflorescência nos blocos cerâmicos. O ensaio consiste em separar cinco pares de blocos cerâmicos de um mesmo lote, de modo que um exemplar de cada par seja parcialmente imerso em um recipiente com água destilada por um período de 7 dias. Passado esse intervalo, os blocos passam por secagem em estufa por 24 horas e finalmente são comparados com os pares que não foram imersos (Figura 6), para que assim sejam classificados como eflorescente ou não eflorescente.

Figura 6: Comparação dos blocos cerâmicos após o ensaio de eflorescência.



Fonte: BEZERRA *et al.*, 2012.

Baptista (2018) destaca que a realização do ensaio é extremamente necessária, uma vez que a eflorescência é um fenômeno que não pode ser considerado meramente estético, pois a evolução do problema pode gerar muitos danos à edificação, através dos depósitos salinos gerados pelo contato entre o material cerâmico e o ambiente propício para a geração da patologia.

### 2.2.3 Aproveitamento de Resíduos em Cerâmica Vermelha

Segundo Babisk *et al.* (2020), com o passar dos anos foi possível perceber o crescente interesse das indústrias pelo conceito de sustentabilidade, como forma de minimizar os impactos ambientais causados pelos processos produtivos e geração de resíduos. Nessa questão, os autores enfatizam que a indústria da construção civil vem sendo considerada o setor mais promissor para o aproveitamento de resíduos.

Nessa perspectiva, na literatura existem diversos estudos que tiveram como objetivo incorporar resíduos industriais em massas de cerâmica vermelha, como por exemplo, a pesquisa realizada por Cota *et al.* (2018), ao investigarem a utilização do lodo de tanques de decantação de liga de ferromangânese e pó de pedra-sabão (esteatita) na fabricação de peças cerâmicas. Os autores notaram que os blocos cerâmicos contendo 5% de lodo e queimados a 1000°C apresentam melhores desempenhos. Por outro lado, blocos com substituição parcial de argila pela combinação de lodo e esteatita apresentaram melhor retração linear de secagem e cozimento, assim como excelente melhora de absorção de água.

Paralelamente, Mymrin *et al.* (2017) ao estudarem a incorporação de lodo, proveniente do tratamento de água, em composições de cerâmica vermelha, constataram

que os sedimentos da estação de tratamento podem substituir em até 60% o teor de argila, adotando uma temperatura de sinterização das peças cerâmicas superior a 950°C. Os autores destacam ainda que a incorporação do resíduo proporcionou aos produtos um ganho significativo de resistência à flexão, na ordem de 246%.

Milak *et al.* (2017) avaliaram a utilização de cinzas de casca de arroz na produção de blocos cerâmicos. Ao incorporarem às massas argilosas teores de cinzas na ordem de 8% e 12%, constatou-se que os limites aceitáveis de porosidade foram atendidos. Segundo os autores, o método também proporcionou melhores valores de resistência a flexão, e concluíram que os resultados técnicos se mostraram satisfatórios.

No Paquistão, Kazmi *et al.* (2016) estudaram a substituição parcial de argila por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e cinzas da casca de arroz. Através de ensaios, os autores verificaram que a utilização das cinzas com 5% em substituição à argila provocou um aumento de resistência de 7,18 e 6,62 Mpa, respectivamente. Eles destacam ainda que a partir do aumento dos teores de cinzas, há uma diminuição da propriedade e absorção de água.

Mendes *et al.* (2019), que propôs o reaproveitamento do rejeito de minério de ferro, proveniente da região do Estado de Minas Gerais, na composição de blocos cerâmicos. Como resultados, os autores demonstraram que os blocos elaborados com o resíduo apresentaram bom desempenho mecânico e ambiental, comprovando que é possível manter a qualidade técnica em um produto sustentável.

Paralelamente, Almeida *et al.* (2020) analisaram, através de uma revisão, os efeitos da incorporação de resíduos de gesso e granito em cerâmica vermelha e concluíram que o método é uma alternativa viável. Eles constataram o aumento qualitativo do produto e melhora da qualidade ambiental. Entretanto, os autores destacam que ainda existem escassez de estudos com o objetivo de reaproveitar tais resíduos em produtos cerâmicos em escala industrial.

Zaccaron *et al.* (2020), por outro lado, analisaram a incorporação de escória de alto forno em massa cerâmica vermelha. Os autores observaram que as peças cerâmicas obtiveram bom desempenho, a partir da realização de ensaios, e concluíram que o resíduo pode ser aplicado em composições de cerâmica vermelha, com incorporação de até 20% e adotando a temperatura de queima entre 850 e 950°C.



Zaccaron *et al.* (2014) também estudaram a viabilidade de utilização de outro resíduo na composição de cerâmica vermelha, o chamote. A partir das análises realizadas, eles verificaram que a incorporação de até 20% do resíduo na massa cerâmicas é tecnicamente viável. Entretanto, os autores destacam que, apesar de todos os parâmetros atenderem às normas técnicas, o resíduo provocou a diminuição da absorção de água em blocos cerâmicos e proporcionou uma menor taxa de retração de secagem.

Coutinho e Vieira (2016) também contribuíram cientificamente ao pesquisarem a incorporação das cinzas de resíduos sólidos urbanos em cerâmica vermelha. Os resultados mostraram que as massas cerâmicas com incorporação de 5% das cinzas e sintetizadas à 750°C é viável tecnicamente. Através de ensaios realizados, eles concluíram que o método reduz a absorção de água e a retração linear dos produtos cerâmicos.

Santos (2016), através de sua pesquisa, constatou que a substituição parcial de argila plástica por cinzas de serragem de madeira se mostrou um método tecnicamente viável. O autor detalha que os corpos de prova cerâmicos apresentaram pequenas variações de retração linear e boa absorção de água. Por outro lado, a resistência à compressão, a massa específica aparente e a porosidade aparente apresentaram maiores variações, porém sem comprometer a qualidade do produto.

La Casa (2014) comenta que na Espanha, assim como em vários países mediterrâneos, é encontrarmos grandes volumes de bagaço de azeitona, oriundos da produção de azeite. Segundo os autores, esse resíduo é bastante aproveitado como biomassa para a produção de calor e eletricidade em usinas locais. Entretanto, as cinzas geradas no processo de queima são pouco utilizadas. Pensando nisso, eles relatam que as cinzas tem sido objeto de estudos por diversos pesquisadores da região, como adição em materiais cerâmicos, e apontam que os resultados obtidos são bastante satisfatórios do ponto de vista técnico.

### 2.3 A PRODUÇÃO DE AÇAÍ E SEUS SUBPRODUTOS

De acordo com IMAZON e SEBRAE (2010), o açaizeiro (Figura 7), assim como grandes quantidades de espécies de plantas perenes, pode ser encontrado facilmente em áreas submetidas a inundações periódicas, na região amazônica do Brasil. Por apresentarem reprodução de forma assexuada e sexuada, as palmeiras se multiplicam de forma acelerada, gerando o fruto e palmito em praticamente todo o período do ano.

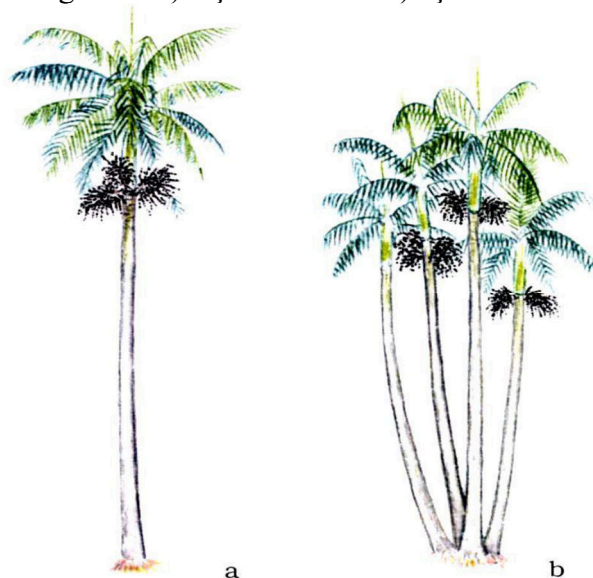
Figura 7: Açaizeiro.



Fonte: EMBRAPA, 2017.

Dentre as espécies existentes no país, as duas mais comuns estão presentes na Amazônia, o açaí de touceira (*Euterpe oleracea* Mart.) e o açaí solteiro (*Euterpe precatória* Mart.), como mostrado na Figura 8. O primeiro é conhecido por possuir diversos perfilhamentos e se concentrarem principalmente na região Oriental, enquanto que o segundo se caracteriza por apresentar estipe delgada e uma palmeira de monocaule, com predominância na região Ocidental (HERRAIZ, 2013).

Figura 8: a) Açaí solteiro e b) açaí touceira.



Fonte: WADT, 2004.

Geograficamente, as palmeiras de açaí podem ser encontradas em alguns países da América Central e América do Sul, como no Panamá, Equador, Venezuela, Suriname,

Colômbia e principalmente no Brasil (TAGORE, 2017). No território nacional, o Estado do Pará se destaca como maior produtor de açaí, sendo responsável em 2020 por 94,03% de toda a produção do país, o que representa uma quantidade de 1.389.941 toneladas do fruto, como mostrado na Figura 9 (SEDAP, 2021).

Figura 9: Ranking Estadual da produção de açaí em 2020.

Ranking	Unidade Federativa	Quantidade Produzida (t)	%
-	<b>Brasil</b>	<b>1.478.168</b>	<b>100,0%</b>
1º	Pará	1.389.941	94,03%
2º	Amazonas	73.538	4,97%
3º	Bahia	5.445	0,37%
4º	Roraima	4.271	0,29%
5º	Rondônia	2.260	0,15%
6º	Maranhão	1.370	0,09%
7º	Tocantins	1.015	0,07%
8º	Espirito Santo	190	0,01%
9º	Alagoas	82	0,01%
10º	Mato Grosso	36	0,00%

Fonte: SEDAP, 2021.

Ainda de acordo com a SEDAP (2021), no mesmo ano de 2020, dentre os municípios pertencentes ao Estado do Pará, Igarapé-Miri ocupa a primeira posição da produção Estadual de açaí, com 420.000 toneladas (30,22%), seguido por Cametá (11,48%), Abaetetuba (7,86%) e Barcarena (5,83%). Na Figura 10 é possível visualizar um comparativo entre os 10 principais produtores do fruto no Estado.

Figura 10: Ranking Municipal da produção de açaí em 2020.

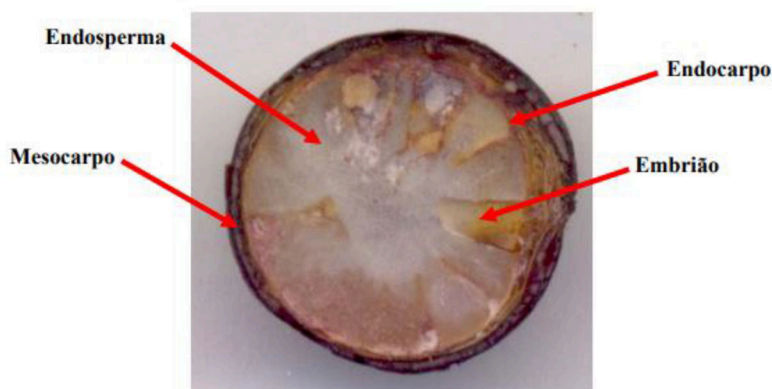
Ranking	Municípios	Quantidade Produzida (t)	%
-	<b>Estado do Pará</b>	<b>1.389.941</b>	<b>100,0%</b>
1º	Igarapé-Miri	420.000	30,22%
2º	Cametá	159.540	11,48%
3º	Abaetetuba	109.200	7,86%
4º	Barcarena	81.000	5,83%
5º	Bujaru	70.488	5,07%
6º	Santa Izabel do Pará	51.665	3,72%
7º	Anajás	48.000	3,45%
8º	Bagre	44.100	3,17%
9º	Limoeiro do Ajuru	39.900	2,87%
10º	Oeiras do Pará	32.487	2,34%

Fonte: SEDAP, 2021.

No Pará, Serra (2021) destaca que a comercialização do fruto do açaí é responsável por 3% do produto interno bruto (PIB) do Estado, uma vez que são exportados de 5% da produção para países como Portugal, Alemanha, França, Japão, Estados Unidos e Austrália, enquanto que 35% seguem para outras regiões do Brasil e 60% é consumido no próprio Estado, fazendo com que o mesmo seja também o maior consumidor do fruto.

Possuindo uma tonalidade roxa ou verde e pesando cerca de 1,5 gramas, a semente única do açaí possui de 1 a 2 cm de diâmetro e é constituída por mesocarpo oleaginoso, de onde se extrai a polpa ou suco, que é responsável por 15% do fruto. Os outros 85% correspondem ao caroço, endocarpo com característica física fibrosa e rígida (ALMEIDA *et al.*, 2017). Na Figura 11 é possível visualizar a anatomia do fruto do açaí.

Figura 11: Anatomia do fruto do açaí.



Fonte: Stefanini, 2010.

Após o beneficiamento do fruto, são geradas grandes quantidade de resíduos do caroço de açaí (RCA), material orgânico composto por celulose (53,20%), hemicelulose (12,26%) e lignina (2,30%) (RODRIGUES *et al.*, 2006). Pereira e Rodrigues (2013) reiteram que esse resíduo representa um problema ambiental, apesar de possuírem uma fonte de material lignocelulósico renovável.

### 2.3.1 Resíduos de Açaí

Tomando como base a realidade vivenciada no Estado do Pará, a partir dos grandes volumes gerados e do descarte irregular dos resíduos do caroço de açaí pós beneficiamento, o material é facilmente encontrado em feiras, vias públicas, terrenos baldios e até mesmo em canais de drenagem, provocando o surgimento de lixões à céu aberto sem nenhum tratamento (COSTA, 2014). Na Figura 12 é possível visualizar o acúmulo de caroços próximos a canais de esgoto.

Figura 12: Disposição dos resíduos de açaí em alguns locais em Belém/PA.



Fonte: Autor, 2022.

Pereira (2019) relata que diversos métodos vêm sendo desenvolvidos para investigar a utilização dos resíduos do caroço de açaí gerados através do beneficiamento. Dentre as alternativas encontradas, as mais comuns é a utilização do material para a geração de energia, extração de antioxidante e produção de adubo. Dentro do campo da biomassa, Rocha (2013) reitera que o resíduo do caroço de açaí se destaca em relação as demais resíduos agroindustriais, uma vez que possui elevada quantidade de emissão de Poder Calorífico Superior (PCS), como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterizações de eficiências energéticas de fontes de biomassa.

Espécies vegetais	PCS (MJ/kg)	Carbono fixo (%)	Teor de voláteis (%)	Teor de cinzas (%)
Cascas de castanha do Pará	20,28	27,1	71,0	1,9
Referência		Nogueira e Rendeiro (2008)		
Caroço de açaí	19,16	19,5	79,4	1,1
Referência		Nogueira e Rendeiro (2008)		
Bagaço de cana	18,99	13,7	75,4	10,8
Referência	Jenkins (1998)	Braunbeck e Cortez (2005)	Braunbeck e Cortez (2005)	Braunbeck e Cortez (2005)
Sabugo de milho	18,77	18,32	81,31	0,7
Referência	Jenkins & Ebeling (1985)	Paula <i>et al.</i> (2011)	Paula <i>et al.</i> (2011)	Vieira (2012)
Fibra de coco	18,67	24,7	70,6	4,7
Referência		Nogueira e Rendeiro (2008)		
Resíduos de mandioca	17,21	11,22	85,87	2,91
Referência		Veiga (2012)		
Fibra de dendê	16,55	19,6	76,2	4,2
Referência		Nogueira e Rendeiro (2008)		
Casca de arroz	15,84	15,8	63,6	20,6
Referência	Jenkins (1998)	Nogueira (2007)	Nogueira (2007)	Nogueira (2007)
Casca de cacau	13-16	21,04	69	9,96
Referência	Alburo <i>et al.</i> (2010)	Garcia <i>et al.</i> (2012)	Garcia <i>et al.</i> (2012)	Garcia <i>et al.</i> (2012)

Fonte: Rocha, 2013.

Concomitantemente, Santos *et al.* (2021) apontam que os caroços de açaí cumprem satisfatoriamente os padrões da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e

Biocombustível (ANP), ao possuírem alta eficiência energética para a produção de biocombustível. Desta forma, o resíduo tem uma participação significativa no setor energético, contribuindo para a geração de energia sustentável e rentável.

No Estado do Pará os resíduos do caroço de açaí já são empregados em alguns setores industriais, como na produção da cerâmica vermelha, através da queima do material para a geração de calor, e consequente queima dos produtos cerâmicos. Entretanto, após o processo, são produzidas grandes quantidades de cinzas, um resíduo que ainda é pouco aproveitado pela indústria (ROCHA, 2013).

#### 2.3.1.1 Aproveitamento das cinzas do caroço de açaí

Nos estudos desenvolvidos por Sato *et al.* (2020), foi comprovado que o carvão ativado, produzido a partir das cinzas residuais do caroço de açaí, promoveu o aumento de nutrientes no solo. Na pesquisa, os autores notaram uma melhoria na qualidade física e química do solo, uma vez que os níveis de fosforo, magnésio e potássio foram elevados. Eles destacam ainda que ao submeter a produção do carvão ativado a uma temperatura de 700°C por 60 minutos, haverá a potencialização do sequestro de carbono e promoção da fertilidade do solo.

No campo da construção civil, Araújo *et al.* (2021) analisaram as propriedades da argamassa de chapisco contendo cinzas do caroço de açaí. Os resultados mostraram que a substituição parcial de cimento por CCA provocou algumas melhorias nas características da argamassa, como aumento de resistência mecânica, diminuição de ar incorporado e menor retração. No entanto, houve um aumento significativo de absorção de água, na ordem de 56,83%, e perda de consistência de até 4,17%.

Cordeiro *et al.* (2019), por sua vez, caracterizaram as cinzas do caroço de açaí residual (CCAR) visando a sua utilização como adição no concreto. Através da realização de diversos ensaios, os autores concluíram que as cinzas possuem características físicas que favorecem o seu aproveitamento como adição não reativa. Em relação ao desempenho mecânico dos corpos de prova, constatou-se um aumento na resistência à compressão para algumas classes. Eles relatam ainda que o CCAR não atendeu aos padrões normativos aceitáveis de atividade pozolânica, e recomendam a realização de ensaios complementares.



Na indústria da cerâmica vermelha também existem alguns estudos acerca da utilização das cinzas do caroço de açaí em composições cerâmicas. Ferreira *et al.* (2020) analisaram a influência da cinza do caroço de açaí em composições de cerâmica vermelha, e mostraram que a incorporação de 10% de cinzas melhorou o desempenho dos corpos de prova, uma vez que houve o aumento de resistência mecânica, diminuição da absorção de água e redução da porosidade aparente.

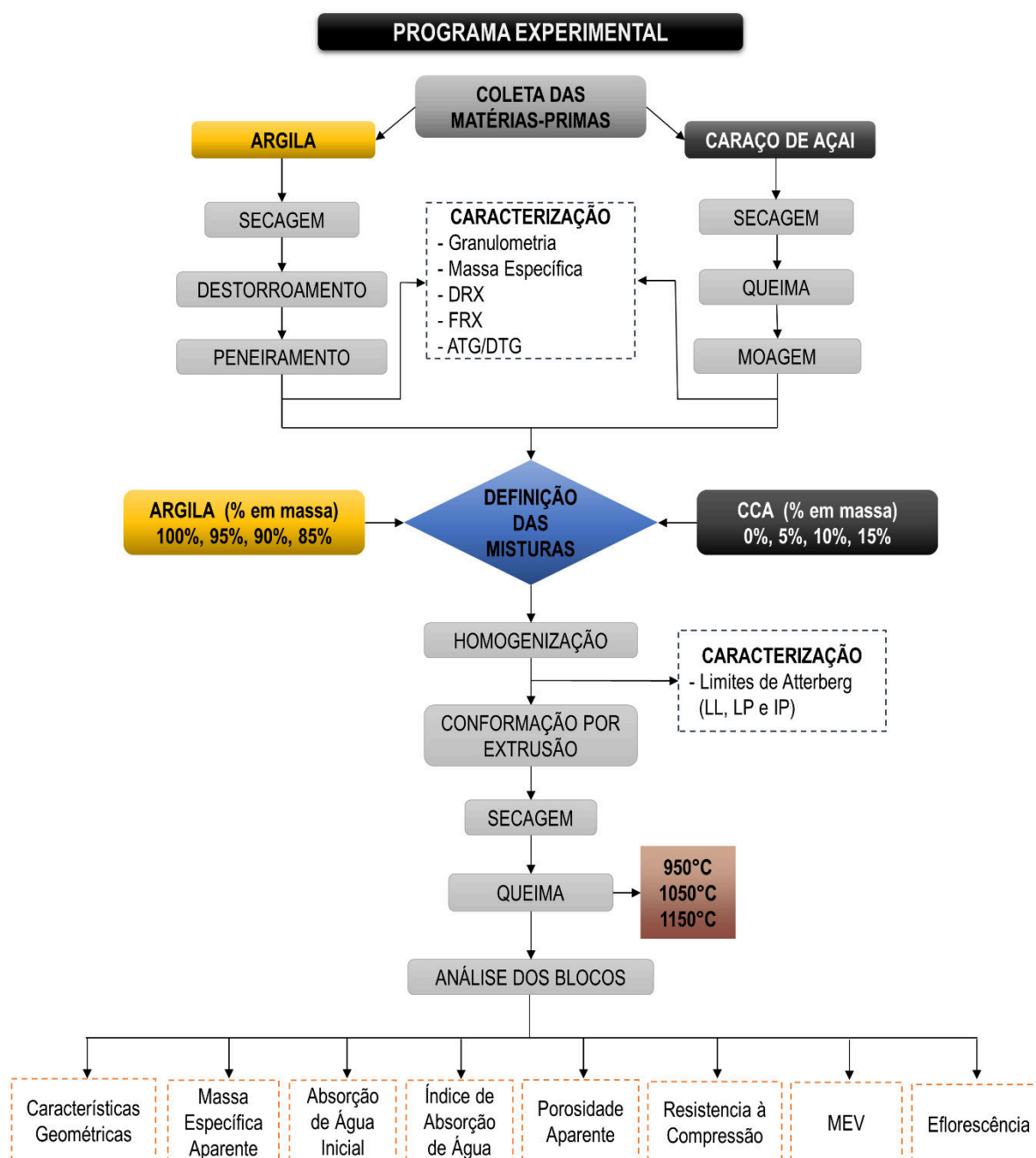
Marins *et al.* (2014) também avaliaram a incorporação de CCA em formulações de cerâmica vermelha, visando a produção de cerâmica estrutural. Como resultados, os autores observaram que a adição das cinzas apresenta uma alternativa promissora, uma vez que teores de até 15% do resíduo provocaram melhoria nas propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova.

De modo geral, de acordo com Oliveira *et al.* (2020), as investigações acerca do aproveitamento do resíduo do caroço de açaí contribuem não somente para sua utilização em sim, mas também surge como uma possibilidade de minimizar os impactos provocados pela extração de matérias-primas do meio ambiente por parte da indústria da construção civil, uma vez que há pesquisas científicas com o intuito de propor a inserção das cinzas do caroço de açaí em materiais alternativos, seja a partir da substituição parcial ou através da incorporação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os procedimentos experimentais adotados para o alcance dos objetivos propostos nesta pesquisa. A Figura 13 contempla o fluxograma das etapas do estudo, que vai desde a coleta e caracterização das matérias-primas até a confecção dos blocos cerâmicos e realização das análises físicas, mecânicas e de toxicidade. Nas seções subsequentes são detalhadas cada etapa realizada.

Figura 13: Programa experimental da pesquisa.



Fonte: Autor, 2023.

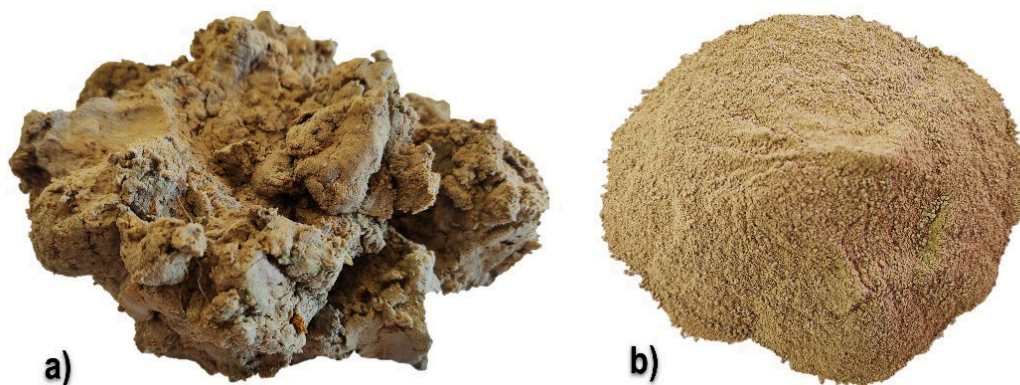


### 3.1 COLETA E PREPARO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

#### 3.1.1 Argila

A argila utilizada na pesquisa foi proveniente do município de Ourém, no Estado do Pará, extraída da jazida da empresa Cerâmica Bom Jesus, uma das maiores indústrias produtoras de cerâmica vermelha (telhas e blocos) da região nordeste paraense. Após a extração e passado o período de sazonalidade, a matéria-prima coletada para a realização das análises em laboratório foi secada e destorroada. Posteriormente, o material passou por peneiramento, através da peneira com abertura de 0,3 mm, e caracterizado para a fabricação dos blocos cerâmicos propostos. A Figura 14 mostra o aspecto visual da argila empregada na pesquisa.

Figura 14: a) Argila *in natura*; b) argila seca e destorroada.



Fonte: Autor, 2023.

#### 3.1.2 Carço de Açaí

A coleta do resíduo foi realizada junto a uma empresa de polpa de frutas localizada no município de Castanhal/PA. Na indústria, após o beneficiamento do fruto do açaí, são geradas aproximadamente 1,2 toneladas do resíduo (carço) por dia, que ficam armazenados em um galpão da empresa (Figura 15). Dentro do polo produtivo, a mesma empresa utiliza os caroços de açaí como material de combustão para alimentar caldeiras, gerando um grande volume de cinzas no final do processo. De acordo com os gestores da empresa, as cinzas não tem nenhum aproveitamento na região e toda a quantidade produzida é destinada à aterros sanitários.

Figura 15: Estocagem dos caroços de açaí.



Fonte: Autor, 2023.

No processo de queima dos caroços realizado pela empresa, primeiramente o material é disposto em lonas e posteriormente passa por um processo de secagem a céu aberto. Após a secagem, o resíduo é queimado em temperatura média de 600°C, gerando calor para caldeiras.

As cinzas geradas, objeto de estudo desta pesquisa, foram coletadas e moídas em um moinho de bolas de 120 litros (modelo SL-36/120), em um laboratório particular no município de Castanhal/PA. Para o processo de moagem foi adotado a metodologia proposta por Pouey (2006), que consistiu no emprego da proporção de 5 kg de bolas para 1 kg de CCA, sendo 1/3 de bolas grandes e 2/3 de bolas pequenas. Afim de se obter a granulometria desejada do material, a moagem foi realizada em um intervalo de 3 horas. No total, foram processados 50 quilos de cinzas. Na Figura 16 é possível visualizar a transformação do resíduo, desde o caroço no seu estado natural até às cinzas moídas.

Figura 16: a) Caroços gerados no processo de fabricação do açaí; b) resíduo gerado através do procedimento de queima; c) cinza moídas.



Fonte: Autor, 2023.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Afim de identificar e conhecer as características das matérias-primas, foram realizados ensaios em laboratório para determinar as composições químicas, físicas e mineralógicas.

### 3.2.1 Composição Química

Para a determinação das composições químicas da argila e da CCA, foi utilizado um dos métodos mais conhecidos em estudos científicos, a Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX). Este método determina de forma quantitativa e semiquantitativa os elementos presentes em uma amostra através da incidência de raios-X, que agitam as camadas eletrônicas. Em resposta, as camadas emitem um novo espectro de raios-X característico de cada elemento químico presente na composição do material. O ensaio foi realizado no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR), na Universidade Federal do Paraná (UFPR).

As amostras foram previamente secas em estufa a  $105 \pm 5$  °C e passadas na peneira com abertura de 0,075 mm. O espectrômetro de fluorescência de raios-X utilizado foi da marca PANalytical, modelo Axios Max. Para a amostra de argila foi realizada uma análise quantitativa, através de partilha fundida. Já para a amostra de CCA a caracterização química foi semiquantitativa, por meio do pó solto.

### 3.2.2 Composição Mineralógica

As composições mineralógicas da CCA e da argila foram determinadas pelo método de Difração de Raios-X (DRX). A realização do ensaio tem como objetivo analisar de forma qualitativa os minerais presentes nas amostras, cujo os resultados são apresentados através de um gráfico, onde os picos indicam cada espécie mineral. Assim como na análise química, a caracterização mineralógica das amostras também foi realizada no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR), na Universidade Federal do Paraná (UFPR).

As amostras foram analisadas por meio do difratômetro da marca PANalytical, modelo Empyrean, através da técnica do pó total prensado. Através da análise é possível identificar a estrutura cristalina dos materiais, uma vez que é possível indicar a fase mineralógica do mineral detectado comparando com os padrões do *ICDD (International Centre for Diffraction Data)*.

### 3.2.3 Caracterização Física

#### 3.2.3.1 Caracterização Granulométrica

Afim de definir a curva granulométrica e determinar o diâmetro médio das partículas de CCA e da argila, foi realizado o ensaio de granulometria à laser através do Laboratório Interdisciplinar para o Desenvolvimento de Nanoestruturas (LINDEN), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A distribuição do tamanho das partículas por espalhamento à laser foram realizadas com o auxílio do Granulometro Malvern Zetasize. No ensaio, as amostras foram preparadas com 0,1 g de material em 100 ml de água deionizada para as análises.

#### 3.2.3.2 Massa Específica

Baseados e vários trabalhos existentes na literatura, as massas específicas da argila e de CCA foram determinadas através da metodologia presente na norma NBR 6458 (ABNT, 2016) em seu anexo B, a partir dos grãos que passam na peneira de abertura 4,8 mm, através da equação 2.

$$\rho_s = \frac{M_1 \times 100 / (100 + w)}{[M_1 \times 100 / (100 + w)] + M_3 - M_2} \times \rho_{w(T)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$\rho_s$ : é a massa específica dos grãos, expressa em g/cm<sup>3</sup>;

$M_1$ : é a massa da amostra úmida;

$M_2$ : é a massa do picnômetro + amostra + água, à temperatura T de ensaio;

$M_3$ : é a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência, à temperatura T de ensaio;

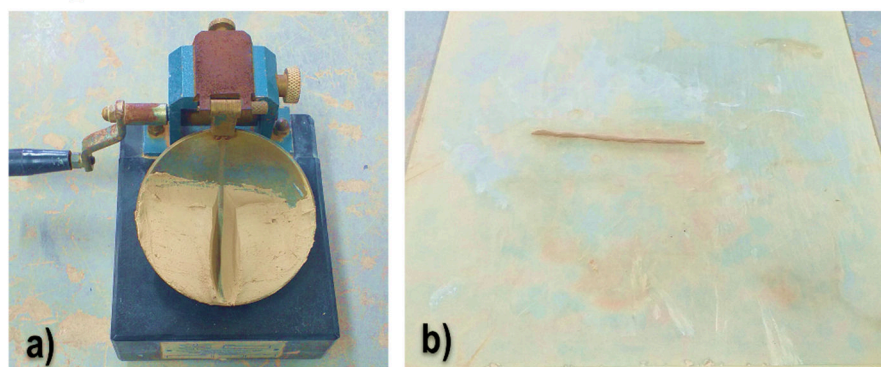
w: é a umidade inicial da amostra;

$\rho_{w(T)}$ : é a massa específica da água, à temperatura T de ensaio.

#### 3.2.3.3 Limites de Atterberg

Com o objetivo de determinar os Índices de Plasticidade (IP) das amostras, afim de verificar a quantidade aceitável de água para que as amostras de argila mantenham o estado tolerante de moldagem, foram realizados no Laboratório de Cerâmica Vermelha (LACER), no Município de São Miguel do Guamá, os ensaios de Limite de Liquidez (LL) com base na NBR 6459 (ABNT, 2016) e os ensaios de Limite de Plasticidade (LP), de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 2016). Na Figura 17 está representado o aparelho utilizado no ensaio de LL (Casagrande) juntamente com a amostra e os corpos de prova para os ensaios de LP.

Figura 17: a) Ensaio de Limite de Liquidez, através do aparelho Casagrande; b) corpo de prova moldado através do ensaio de Limite de Plasticidade.



Fonte: Autor, 2023.

### 3.2.4 Análise Térmica

Afim de observar o comportamento das amostras de CCA e argila mediante a aumento de temperatura, foram realizadas análises termogravimétricas (TG) e termogravimétrica diferencial (DTG), além da Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). Os ensaios foram realizados na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no Laboratório Interdisciplinar para o Desenvolvimento de Nanoestruturas (LINDEN).

Foram utilizadas 5 mg de cada amostra já pulverizada, adicionadas em cadinho de porcelana. Como parâmetros, adotou-se a atmosfera de nitrogênio com fluxo de 60 ml/min, sob uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, entre o intervalo de 25 e 1200 °C. O equipamento utilizado foi o analisador térmico simultâneo NETZSCH, modelo STA 449F3.

## 3.3 PRODUÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS

### 3.3.1 Composição

A produção dos blocos ocorreu no polo produtivo da Cerâmica Bom Jesus, no Município de Ourém/PA. Foram definidos neste estudo os teores de substituição de 0%, 5%, 10% e 15% de argila por CCA nas composições das massas cerâmicas (Tabela 2).

Tabela 2: Composições a serem investigadas.

Matéria-prima	Composição dos blocos cerâmicos (%)			
	Bref	B5C	B10C	B15C
Argila	100	95	90	85
Cinzas do caroço de açaí	0	5	10	15

Fonte: Autor, 2023.



A escolha por estes teores baseou-se nas pesquisas de Marins *et al.* (2014) e Ferreira *et al.* (2020). Os autores avaliaram o comportamento das cinzas do caroço de açaí em formulações de cerâmicas vermelhas em escala laboratorial, e notaram que substituições com teores superiores a 15% influenciam negativamente nas propriedades mecânicas e na capacidade de absorção das peças.

### 3.3.2 Preparo e Queima

Para a produção dos blocos foram separadas as quantidades necessárias de argila para cada classe de bloco proposto, afim de produzir as peças nas dimensões de 9x14x19 cm, de acordo com a NBR 15270-1 (ABNT, 2017).

Inicialmente, a argila foi transportada através de esteiras de alimentação até o destorrador, onde também foram adicionadas as cinzas do caroço de açaí no processo (figura 18a). Em seguida, as misturas passaram pelo misturador e laminadora, afim de proporcionar a homogeneização dos materiais. Baseado nos trabalhos de Mendes (2019) e Pedroti *et al.* (2011), foi definido a quantidade de água na ordem de 10% para todas as amostras. Por fim, o material foi prensado e moldado por extrusão, por meio do equipamento do tipo maromba à vácuo, dando formato aos blocos cerâmicos (Figuras 18b, 18c e 18d).

Figura 18: a) Mistura dos materiais; b) processo de fabricação e obtenção dos blocos; c) e d) aspecto visual de um exemplar de cada classe de blocos formuladas, no estado cru.



Fonte: Autor, 2023.

Após o processo de conformação e corte, as peças foram submetidas à secagem em temperatura ambiente por 48 horas, afim de minimizar o aparecimento de trincas ocasionadas pela retração.

Para o processo de queima, com o objetivo de verificar o comportamento físico-mecânico dos blocos mediante à queima em diferentes níveis de temperatura, as variações adotadas foram definidas de acordo com estudos presentes na literatura. Santos (2016) enfatiza que no intervalo entre 900 °C e 1200 °C ocorre o processo de vitrificação, ou seja, nessa faixa de temperatura a sílica é fundida, dando origem a pequenas quantidades de cristais de vidros. Desta forma, para o presente estudo foram adotadas três temperaturas de queima, 950 °C, 1050 °C e 1150 °C.

Cada classe de blocos foi queimada nas temperaturas propostas por 48 horas em fornos, como mostrado na Figura 19. Afim de manter a temperatura constante, a queima foi monitorada durante todo o processo com medições em termômetro apropriado para a faixa de temperatura trabalhada.

Figura 19: Processo de queima.



Fonte: Autor, 2023.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS

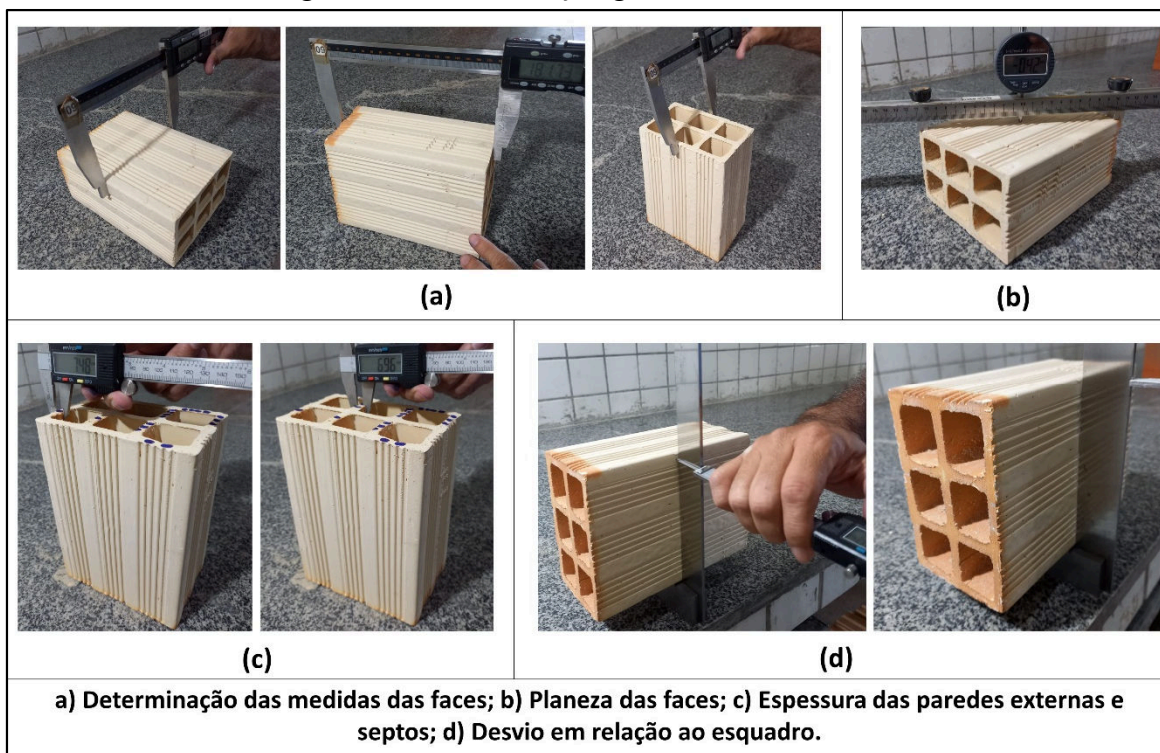
Afim de conhecer as características e propriedades dos blocos, os corpos de prova passaram por ensaios de caracterização física e mecânica, conforme padrões estabelecidos por normas. Dentre as análises realizadas, foram verificadas as características geométricas dos blocos; absorção de água inicial; índice de absorção de água; massa específica

aparente; porosidade aparente; e resistência à compressão. Os ensaios de caracterização dos blocos foram realizados no Laboratório de Cerâmica Vermelha (LACER), em São Miguel do Guamá.

#### 3.4.1 Determinação das características geométricas

Para a determinação das características geométricas dos blocos cerâmicos, foram utilizados os procedimentos descritos no anexo A da NBR 15270-2 (ABNT, 2017). Conforme mostrado na Figura 20, com o auxílio de paquímetro digital, trena analógica e esquadro metálico, foram determinadas as medidas das faces, a espessura das paredes externas e septos, desvio em relação ao esquadro e planeza das faces, em uma amostragem de 13 blocos cerâmicos.

Figura 20: Caracterização geométrica dos blocos.



Fonte: Autor, 2023.

#### 3.4.2 Determinação da Absorção de Água Inicial

Os índices de absorção inicial foram calculados a partir de uma amostragem de seis blocos de cada tipo produzido, tomando como base o anexo D da NBR 15270-2 (ABNT, 2017). Inicialmente os corpos de prova foram limpos e secos em estufa por 24 horas em temperatura igual a  $105 \pm 5$  °C. Passado esse período, os blocos foram resfriados ao ar livre por 2 horas e posteriormente pesados e anotado seus pesos. Em seguida, como



mostrado na Figura 21, cada bloco foi colocado sobre apoios metálicos dentro de um tanque com água, de modo que a base do bloco ficasse em contato com uma lâmina de água de aproximadamente 3 mm, por um período de 60 segundos. Por fim, com o auxílio de uma toalha de algodão umedecida, foi retirado o excesso de água da face de cada bloco ensaiado, para que fosse possível determinar sua massa final.

Figura 21: Ensaio de absorção inicial.



Fonte: Autor, 2023.

Em posse dos dados, o índice de absorção de água inicial foi calculado de acordo com a equação 3.

$$AAI = 194 \times \frac{\Delta p}{\text{Área}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

AAI = Índice de absorção de água inicial, expresso em (g/194<sup>2</sup>)/min.

$\Delta p$  = Variação da massa (g).

Área = Área líquida da face ensaiada (cm<sup>2</sup>).

### 3.4.3 Determinação do Índice de Absorção de Água

Tomando como base os parâmetros presentes na NBR 15270-2 (ABNT, 2017), em seu anexo B, foram determinados os índices de absorção de água, a partir de uma amostragem de 06 blocos. Inicialmente, os corpos de prova passaram pelo processo de secagem em estufa por 24 horas. Após esse período, os blocos foram pesados e em seguida imersos em um tanque com água, ficando em repouso por 24 horas.

Por fim, passado o período de imersão, foi definido o peso úmido das amostras e calculado os índices de absorção de água conforme a equação 4.

$$AA = \frac{m_u - m_s}{m_s} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

AA = Índice de absorção de água (%).

$m_u$  = Massa do bloco úmido (g).

$m_s$  = Massa do bloco seco (g).

#### 3.4.4 Massa Específica Aparente

Baseado nos estudos de Santos (1989) e na NBR 6458 (ABNT, 2017), a massa específica aparente dos corpos de prova foi determinada a partir da massa pelo volume do bloco, conforme o cálculo estabelecido pela equação 5.

$$\rho_{ap} = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \times \rho_w \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$\rho_{ap}$  = Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>).

$M_s$  = Peso do corpo de prova seco (g).

$M_{sat}$  = Peso do corpo de prova úmido (g).

$M_i$  = Peso do corpo de prova imerso em água (g).

$\rho_w$  = Massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>).

#### 3.4.5 Porosidade Aparente

Seguindo as recomendações da norma ASTM 373:88, a determinação da porosidade aparente dos corpos de prova foi definida através do método gravimétrico, que consiste em estabelecer o percentual de poros no material. Para cada tipo de bloco proposto, foram utilizados 05 corpos de prova de cada lote, afim de obter a média dos resultados.

Inicialmente, os corpos de prova foram fervidos em água durante 2 horas e posteriormente resfriados em temperatura ambiente. Com auxílio de uma balança hidrostática, cada amostra de uma parcela dos corpos de prova foi suspensa por um arame e seguidamente anotado seu peso. Posteriormente, as amostras foram secas com auxílio de um pano, afim de retirar o excesso de água e em seguida registrando-se sua massa saturada. Por fim, os corpos de prova foram levados para secagem em estufa à 110 °C por um período de 24 horas. Após esse intervalo, as amostras foram pesadas novamente e através da equação 6 foi possível calcular a porosidade aparente.

$$PA = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \times 100\% \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$PA$  = Porosidade Aparente (%).

$P_u$  = Peso do corpo de prova úmido (g).

$P_s$  = Peso do corpo de prova seco (g).

$P_i$  = Peso do corpo de prova imerso em água (g).

### 3.4.6 Determinação da Resistência à Compressão

Seguindo as recomendações da NBR 15270-2 (ABNT, 2017), com base em seu anexo C foi determinada a resistência à compressão dos blocos cerâmicos. Inicialmente, as faces em contato com as placas da prensa foram capeadas com pasta de argamassa, afim de regularizar as superfícies. Posteriormente, os blocos em condição saturada, foram ensaiados de modo que a carga aplicada fosse na mesma direção do esforço que o bloco recebe em seu emprego. Na Figura 22 é possível visualizar a execução do ensaio.

Figura 22: Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autor, 2023.

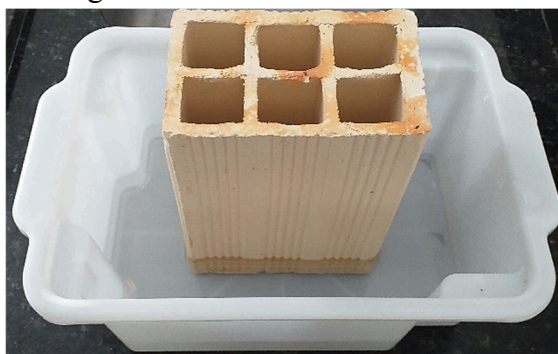
### 3.4.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A partir das amostras selecionadas de fragmentos após a execução do ensaio de resistência compressão, foram realizadas as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um laboratório particular no Município de Santarém/PA. Afim de identificar e examinar os poros presentes em cada amostra, foram analisadas as superfícies das amostras no microscópio eletrônico de varredura da marca TESCAN, modelo VEGA 3 LMU, com ampliação de 1000x para todas as amostras.

### 3.4.8 Determinação de Eflorescência

Com base no anexo E da NBR 15270-2 (ABNT, 2017), inicialmente foram separados cinco pares de corpos de prova de cada tipo de bloco produzido, de modo que cada par fosse mais parecido possível. Em seguida, os exemplares foram devidamente limpos e submetidos à secagem em estufa por um período de 24 horas. Passado esse intervalo, os blocos foram devidamente pesados e resfriados em ambiente climatizado com temperatura de  $24 \pm 8$  °C. Após esse procedimento, um exemplar de cada par de blocos foi inserido dentro de um recipiente com água destilada, de forma que cada bloco foi imerso parcialmente em aproximadamente 25 mm de água destilada, permanecendo nesta condição por 07 dias, como mostrado na Figura 23.

Figura 23: Ensaio de eflorescência.



Fonte: Autor, 2023.

Por fim, após o período de imersão parcial, os corpos de prova passaram por secagem em estufa por um intervalo de 24 horas e em seguida foi realizada a comparação com os pares que não foram imersos, afim de classificar cada lote como “eflorescente” ou “não eflorescente”.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão abordados os resultados obtidos na caracterização dos materiais, bem como nos ensaios físicos e mecânicos dos blocos propostos, comparando as classes de blocos produzidos com a substituição parcial de 0%, 5%, 10% e 15% de argila por cinzas do caroço de açaí, a partir dos efeitos provocados pela variação da temperatura de queima.

Afim de avaliar a variabilidade amostral e verificar se o efeito da temperatura e o teor de resíduo exercem influencias significativas nos blocos cerâmicos, foi realizada a análise variância (ANOVA) e Tukey por meio do software *IBM SPSS Statistics*. Essencialmente, as análises foram realizadas para os resultados de massa específica aparente dos blocos, absorção de água inicial, porosidade aparente, índice de absorção de água e resistência à compressão.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA E CCA

#### 4.1.1 Composição Química

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da análise química das amostras obtidas através da técnica de fluorescência de raio-X.

Tabela 3: Composição química da argila das cinzas do caroço de açaí.

Composição Química	Presença na amostra (% massa)	
	Argila	CCA
SiO <sub>2</sub>	71,84	8,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,77	0,43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,16	1,12
CaO	0,04	1,04
MgO	0,37	0,97
K <sub>2</sub> O	1,15	4,51
Na <sub>2</sub> O	0,26	0,00
TiO <sub>2</sub>	1,06	0,10
MnO	0,02	0,21
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	2,80
SO <sub>3</sub>	0,00	0,65
Cl	0,00	0,22
Rb <sub>2</sub> O	0,00	< 0,1
CuO	0,00	< 0,1
ZrO <sub>2</sub>	0,00	< 0,1
ZnO	0,00	< 0,1
SrO	0,00	< 0,1
P.F	6,93	79,74

Fonte: Autor, 2023.

Ao analisar os resultados, percebe-se que a argila estudada é constituída principalmente por sílica (71,84%), alumina (15,77%) e hematita (2,16%), percentuais similares aos resultados obtidos em vários trabalhos presentes na literatura, como em Oikonomopoulos *et al.* (2015), Oliveira *et al.* (2016), Acevedo *et al.* (2017), Ramos *et al.* (2019) e Pinto *et al.* (2021). Destaca-se também a presença de uma quantidade pequena de  $K_2O$  (1,15%), elemento que contribui para a formação de fase líquida durante o processo de queima. Para a mesma amostra a perda ao fogo foi de 6,93% de sua massa total, abaixo do limite máximo recomendado para a fabricação de materiais cerâmicos, que é na ordem de 13% (SANTOS, 1992). Essa perda se dá em função da oxidação de matéria orgânica, desidratação de hidróxidos e eliminação de água por parte dos argilominerais (RACANELLI *et al.*, 2020).

Em relação a quantidade elevada de  $SiO_2$  presente na amostra de argila, Souza (2015) indica que esse elemento está associado à redução da plasticidade da argila, bem como com o controle da retração do processo de queima e à resistência mecânica dos blocos cerâmicos. O autor destaca ainda que a argila apresenta caráter refratário quando o somatório das quantidades de  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$  ficam próximos de 85%. Nesta pesquisa, o percentual total de desses elementos presentes na argila foi de 87,61%.

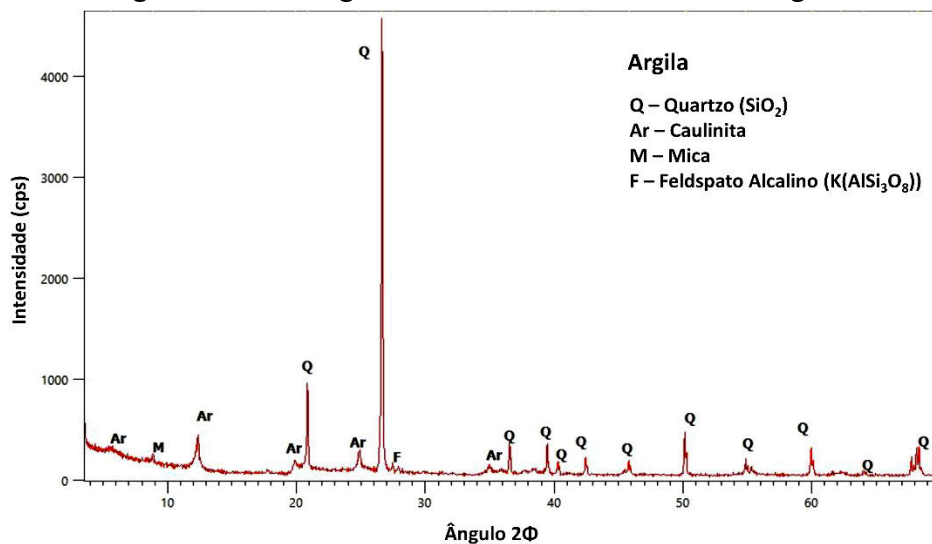
Analizando a amostra de CCA, o resíduo é composto em sua maioria por  $SiO_2$  (8,31%). Também estão presentes no resíduo  $K_2O$  (4,51%) e  $P_2O_5$  (2,80%), muito provavelmente em decorrência do uso de produtos agrícolas durante o cultivo do açaí ou até mesmo resultante do próprio solo, como explica Cordeiro *et al.* (2019). Na composição do material cabe destacar a presença de uma pequena quantidade de  $CaO$  (1,04%), que junto com os óxidos de silício e de potássio favorecem a redução da porosidade, uma vez que possuem efeito fundente (RIELLA, *et al.*, 2002).

Ainda ao analisar a CCA, nota-se um percentual bastante elevado de perda ao fogo (79,74%). O valor obtido pode estar relacionado ao fato de que as cinzas utilizadas na pesquisa serem provenientes de uma queima não controlada. Por esse motivo, de acordo com Vitorino *et al.* (2009), o material quando exposto em altas temperaturas tende a perder uma parte significativa de seu volume, uma vez que ainda há material orgânico e hidróxidos a serem consumidos pela combustão.

#### 4.1.2 Composição Mineralógica

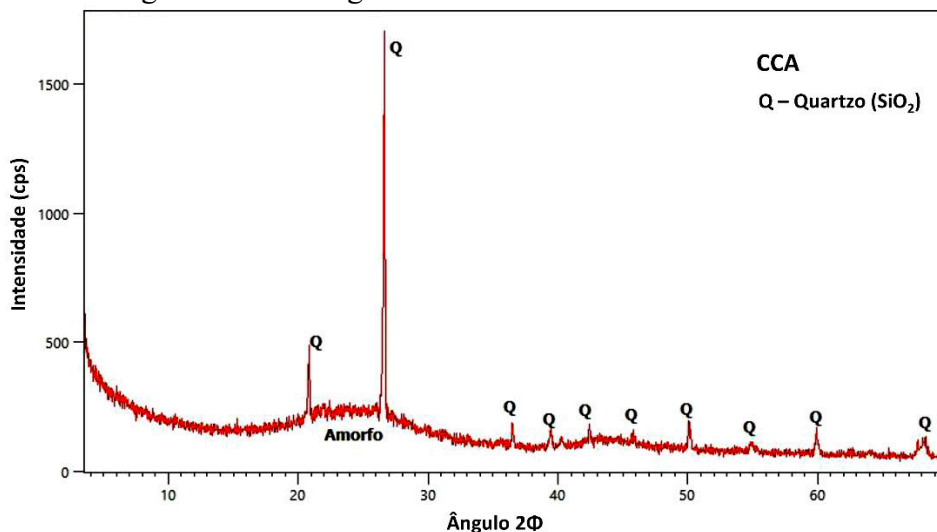
Nas Figuras 24 e 25 são apresentados os difratogramas de Raios-X das amostras de argila e CCA, respectivamente. Os gráficos são estruturados a partir do cruzamento da intensidade dos picos de incidência com o ângulo de espalhamento ( $2\Phi$ ).

Figura 24: Difratograma de Raios-X da amostra de argila.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 25: Difratograma de Raios-X da amostra de CCA.



Fonte: Autor, 2023.

Ao analisar o difratograma da argila, é possível observar a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) em maior grau de cristalinidade. Este constituinte proporciona à matéria-prima caráter não-plástico e durante a sinterização se comporta como material inerte (RACANELLI *et al.*, 2020). Também cabe destacar a presença do argilomineral caulinita,

responsável pela plasticidade da argila em contato com a água. Já a mica e o feldspato alcalino atuam como fundentes, pois em suas estruturas há a presença de óxidos alcalinos.

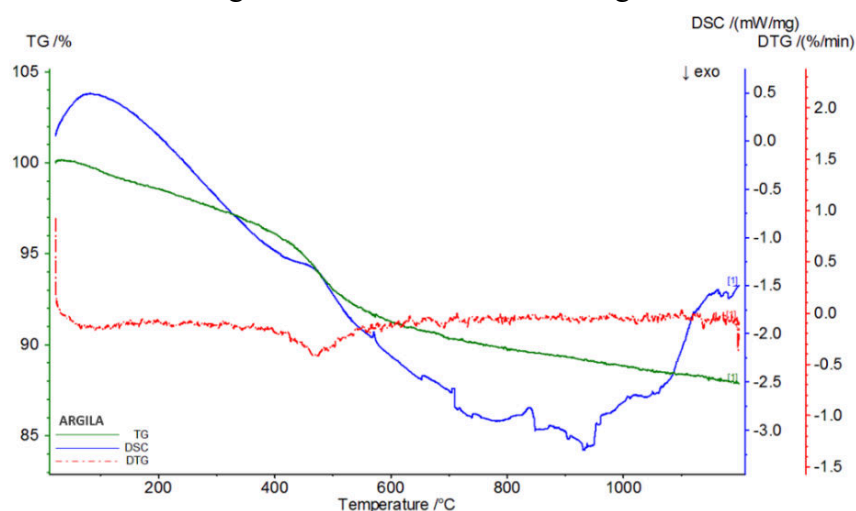
Através dos picos cristalinos, o difratograma da amostra de CCA indica estrutura cristalina amorfa e a presença de quartzo, confirmando os resultados de espectrometria de raios-X. Souza (2015) destaca que o quartzo presente na amostra atua como material não plástico e inerte durante a queima.

### 4.1.3 Análise Térmica

#### 4.1.3.1 Argila

Na Figura 26 estão representados o termograma (TG), a segunda derivada (DTG) e a curva de calorimetria exploratória diferencial (DSC) da amostra de argila.

Figura 26: Análise térmica da argila



Fonte: Autor, 2023.

É possível identificar através da curva DSC que o material tem características de um caulim, baseado em Oliveira & Barbosa (2006) e Santos (1992). Entre as temperaturas de 50 °C e 137 °C, há um leve pico endotérmico, possivelmente referente à perda de umidade superficial. Outro pequeno pico endotérmico é identificado entre as temperaturas de 450 °C e 620 °C, o que pode estar associado à transformação da caulinita em metacaulinita (OLIVEIRA *et al.*, 2010). Por volta de 950 °C há um pico exotérmico, no qual Santos (1992) pressupõe que seja resultante da transformação da metacaulinita em mulita.

Ao observar a curva de análise termogravimétrica (TG), nota-se uma similaridade com os resultados obtidos por Oliveira *et al.*, (2010). Em torno de 500 °C ocorre a

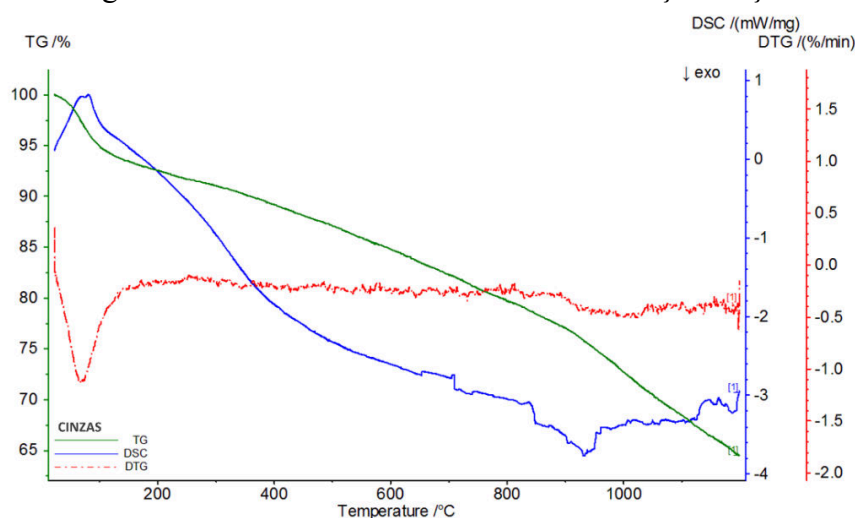


eliminação de matéria orgânica e perda de água intersticial (hidroxilas), e a partir da temperatura de 620 °C a curva de perda de massa é relativamente estável, o que indica pouca perda de massa a partir de temperatura próxima à 700 °C. Até 1200 °C a perda de massa total da amostra foi de 12,19%.

#### 4.1.3.2 Cinzas do Caroço de Açaí

Os resultados obtidos para a análise térmica da amostra de cinzas do caroço de açaí estão representados na Figura 27.

Figura 27: Análise térmica das cinzas do caroço de açaí



Fonte: Autor, 2023.

Ao analisar o termograma das cinzas do caroço de açaí, nota-se através da curva TG, uma perda de massa de aproximadamente 7%, entre o intervalo de 25 a 112 °C, provavelmente em decorrência da eliminação de água contida na amostra. Pelo fato de as cinzas analisadas nesta pesquisa serem provenientes do resíduo de um processo de queima em temperatura próxima a 600 °C, não foram detectados perfis significativos de processos entálpicos, a partir da avaliação da curva DSC. Diferentemente quando se analisa o comportamento térmico dos caroços de açaí *in natura*, uma vez que, de acordo com Castro (2019), a degradação da matéria orgânica do caroço de açaí, ensaiado em seu estado natural, ocorre até uma faixa temperatura próxima à 550 °C. Nessa narrativa, Yang *et al.* (2007) sintetiza que é nos intervalos de temperatura entre 200 a 315 °C, 315 a 400 °C e 160 a 900 °C, que ocorre a decomposição da hemicelulose, celulose e lignina, respectivamente. Deste modo, a curva TG, presente na figura 27, representa possivelmente a degradação lentamente da lignina restante e ainda presente na amostra.

Ainda de acordo com a curva DSC, há um pequeno pico endotérmico entre 850 °C e 950 °C, mesmo fenômeno observado por Seye *et al.* (2008), onde pressupõem que o fato pode estar relacionado à fusão das cinzas. A curva TG mostra que até à temperatura de 1200 °C a perda de massa total da amostra foi de 37,2%.

#### 4.1.4 Limites de Atterberg

Através dos dados obtidos (Tabela 4) foi possível determinar parâmetros para a moldagem das peças, que nesta pesquisa foi por extrusão. A partir dos Índices de Plasticidade foi possível classificar as amostras de acordo com a escala de Jenkins, segundo Caputo (1998), em fracamente plásticas ( $1 < IP < 7$ ), mediantemente plásticas ( $7 < IP < 15$ ) e altamente plásticas ( $15 < IP$ ).

Tabela 4: Limites de Atterberg das amostras ensaiadas.

Teor de Argila (% em volume)	Teor de Cinzas (% em volume)	Limites de Atterberg (%)		
		LL	LP	IP*
100	0	45,19	21,17	24,02
95	5	42,57	20,49	22,08
90	10	40,84	20,08	20,76
85	15	39,63	20,37	19,26

\* $IP = LL - LP$

Fonte: Autor, 2023.

Percebe-se que todas as combinações se apresentaram como altamente plásticas. A amostra contendo apenas argila obteve o maior Índice de Plasticidade (24,02%), bem como os maiores Índices de Liquidez e Plasticidade. Já a amostra contendo 15% de CCA e 85% de argila apresentou o menor Índice de Plasticidade (19,26%). Ferreira *et al.* (2020) destaca que nessas condições, quanto maior o IP maior será a necessidade em acrescentar água ao material, afim de obter a plasticidade ideal.

Nota-se também que a substituição parcial de CCA por argila não exerceu grandes influencias na trabalhabilidade das amostras, no entanto, a presença do resíduo provocou uma redução do Índice de Plasticidade, confirmando os resultados obtidos por Ferreira *et al.* (2020). A redução do IP se deu de forma satisfatória, uma vez que foram necessários menores teores de água, o que contribui para a redução da retração das peças cerâmicas.

#### 4.1.5 Distribuição Granulométrica

Os resultados obtidos nos ensaios de granulometria das amostras de argila e cinzas do caroço de açaí são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados do ensaio de granulometria.

<b>Amostra</b>	<b>D<sub>10</sub></b>	<b>D<sub>50</sub></b>	<b>D<sub>90</sub></b>	<b>D<sub>médio</sub></b>
Argila	11,22 $\mu\text{m}$	5,27 $\mu\text{m}$	1,87 $\mu\text{m}$	5,96 $\mu\text{m}$
CCA	987,19 $\mu\text{m}$	314,73 $\mu\text{m}$	98,61 $\mu\text{m}$	466,84 $\mu\text{m}$

Fonte: Autor, 2023.

A partir dos dados obtidos, constatou-se que a amostra de argila é constituída por 43,4% de argila ( $\emptyset < 2 \mu\text{m}$ ), 29,2% de silte ( $2 \mu\text{m} < \emptyset < 20 \mu\text{m}$ ) e 27,4% de areia ( $20 \mu\text{m} < \emptyset < 200 \mu\text{m}$ ). Observa-se que, a partir dos teores de argila e areia, a matéria-prima é considerada ideal para a produção de blocos cerâmicos, uma vez que os percentuais se encontram dentro dos limites propostos por Souza Santos (1989), 15% a 45% para argila e 15% a 30% para areia.

Em relação a análise granulométrica das cinzas do caroço de açaí, o material é composto por 4,2% de partículas finas ( $\emptyset < 2 \mu\text{m}$ ), 63,6% de partículas médias ( $2 \mu\text{m} < \emptyset < 20 \mu\text{m}$ ) e 32,2% de partículas grosseiras ( $20 \mu\text{m} < \emptyset$ ). O resíduo pode ser considerado como não plástico, e de acordo com Pracidelli e Melchiades (2007), quando incorporado de forma moderada em composições cerâmicas, poderá contribuir positivamente para a redução dos efeitos da retração de secagem e queima.

#### 4.1.6 Massa Específica

A partir da realização dos ensaios, verificou-se que a massa específica da argila e das cinzas do caroço de açaí (CCA) são, respectivamente, 2,67 g/cm<sup>3</sup> e 1,56 g/cm<sup>3</sup>. Para a CCA, o resultado é próximo ao valor determinado por Araújo *et al.* (2021), ao obterem 1,45 g/cm<sup>3</sup> na caracterização de cinzas do caroço de açaí proveniente do município de Tucuruí, no Pará. Já em relação à argila, a mesma possui massa específica similar às argilas estudadas por Souza (2015), no município de Visconde do Rio Branco, em Minas Gerais. O autor identificou que as massas específicas das argilas presentes na região (vermelha, amarela e clara) variam entre 2,65 g/cm<sup>3</sup> e 2,85 g/cm<sup>3</sup>.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS

### 4.2.1 Características Geométricas

Após a realização dos ensaios propostos na NBR 15270-2 (ABNT, 2017), foram determinadas as medidas das faces, a espessura das paredes externas e septos, desvio em relação ao esquadro e planeza das faces.

Na Tabela 6 são apresentados os valores obtidos na caracterização das medidas das faces dos blocos cerâmicos. Para cada medida (largura, altura e comprimento), foram calculadas as médias obtidas através de duas determinações.

Tabela 6: Resultados das medidas das faces.

Temp. de queima (°C)	Blocos	Dimensões	Médias (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coef. de Variação (%)
950	Bref	Largura (L)	89,83	0,2	0,2
		Altura (A)	138,28	0,2	0,2
		Comprimento (C)	187,95	1,3	0,9
	B5C	Largura (L)	88,96	0,5	0,5
		Altura (A)	138,72	0,6	0,5
		Comprimento (C)	187,67	0,7	0,4
	B10C	Largura (L)	88,84	0,3	0,4
		Altura (A)	138,41	0,4	0,3
		Comprimento (C)	187,52	1,2	1,0
	B15C	Largura (L)	89,73	0,2	0,2
		Altura (A)	138,63	0,5	0,4
		Comprimento (C)	187,84	1,6	1,3
1050	Bref	Largura (L)	89,32	0,2	0,3
		Altura (A)	138,16	0,3	0,2
		Comprimento (C)	187,65	1,2	1,0
	B5C	Largura (L)	88,92	0,3	0,4
		Altura (A)	138,55	0,7	0,4
		Comprimento (C)	187,81	0,5	0,6
	B10C	Largura (L)	89,13	0,3	0,4
		Altura (A)	138,30	0,3	0,4
		Comprimento (C)	187,97	1,1	0,8
	B15C	Largura (L)	88,55	0,3	0,4
		Altura (A)	138,42	0,4	0,6
		Comprimento (C)	187,71	1,4	1,1
1150	Bref	Largura (L)	88,40	0,5	0,4
		Altura (A)	137,36	0,4	0,3
		Comprimento (C)	187,24	1,1	1,3
	B5C	Largura (L)	88,34	0,3	0,3
		Altura (A)	137,32	0,5	0,4
		Comprimento (C)	187,13	0,6	0,8
	B10C	Largura (L)	88,12	0,3	0,2
		Altura (A)	137,52	0,4	0,3
		Comprimento (C)	187,24	1,1	0,9
	B15C	Largura (L)	88,11	0,4	0,3
		Altura (A)	137,43	0,4	0,5
		Comprimento (C)	187,16	1,2	1,0

Fonte: Autor, 2023.

Nota-se pelos resultados obtidos que todos os blocos satisfazem os critérios normativos estabelecidos pela NBR 15270-1 (ABNT, 2017), que determina a tolerância das dimensões individuais de  $\pm 5$  mm, e  $\pm 3$  mm para as tolerâncias dimensionais relacionadas à média das medidas para largura, altura e comprimento.

Os valores de planeza das faces foram determinadas a partir de uma das faces destinadas ao revestimento, com base na leitura do defletômetro na flecha formada na diagonal do bloco. Na Tabela 7 encontram-se os valores obtidos.

Tabela 7: Valores obtidos da planeza das faces.

Temp. de queima (°C)	Blocos	Média das maiores medidas (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coef. de Variação (%)
950	Bref	1,52	0,3	22,1
	B5C	1,35	0,5	36,5
	B10C	1,38	0,5	40,7
	B15C	1,44	0,5	36,6
1050	Bref	1,41	0,4	23,7
	B5C	1,42	0,3	32,4
	B10C	1,51	0,4	33,1
	B15C	1,33	0,4	37,8
1150	Bref	1,44	0,4	21,9
	B5C	1,36	0,4	34,6
	B10C	1,20	0,5	38,5
	B15C	1,52	0,4	35,3

Fonte: Autor, 2023.

Os resultados mostram que os blocos cerâmicos atendem aos quesitos de planeza estabelecidos pela NBR 15270-1 (ABNT, 2017), que estabelece para blocos de vedação a tolerância máxima de 3 mm de desvio da planeza (flecha) das faces.

Na Tabela 8 estão representados os resultados das medições do desvio em relação ao esquadro. Foram medidas a maior face destinada ao revestimento e uma das faces destinadas ao assentamento.

Tabela 8: Valores obtidos para os desvios em relação ao esquadro.

Temp. de queima (°C)	Blocos	Média das maiores medidas (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coef. de Variação (%)
950	Bref	1,81	0,8	0,4
	B5C	2,13	0,9	0,4
	B10C	1,81	0,6	0,4
	B15C	1,66	0,8	0,5
1050	Bref	1,71	0,7	0,4
	B5C	1,82	0,8	0,3
	B10C	1,64	0,7	0,4
	B15C	1,68	0,6	0,4
1150	Bref	1,67	0,6	0,3
	B5C	1,73	0,9	0,4
	B10C	1,73	0,5	0,4
	B15C	1,51	0,7	0,6

Fonte: Autor, 2023.

Conforme descrito na NBR 15270-1 (ABNT, 2017), para blocos de vedação a tolerância máxima para o desvio em relação ao esquadro é de 3 mm, portanto, todas as

classes de blocos atendem aos requisitos da norma, uma vez que todos não ultrapassam a tolerância estabelecida.

Para a determinação das medidas das paredes externas e septos, foram realizadas quatro medições para cada tipo de espessura das paredes, externa e interna (septos), de cada bloco cerâmico, buscando as medidas de menores espessuras. Ao final das medições, foram destacadas as menores medidas das paredes externas e dos septos, bem como calculado a soma das espessuras das paredes em um mesmo corte transversal. Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 9: Medidas das paredes externas e septos.

Temp. de queima (°C)	Blocos	Menores medidas (mm)		Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
950	Bref	Paredes externas	7,22	0,2	2,6
		Septos	6,01	0,3	4,8
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>21,62 mm</b>			
	B5C	Paredes externas	7,15	0,1	2,4
		Septos	6,14	0,3	5,8
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>21,71 mm</b>			
	B10C	Paredes externas	7,17	0,1	1,3
		Septos	6,02	0,3	5,7
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>20,90 mm</b>			
	B15C	Paredes externas	7,24	0,2	3,8
		Septos	6,15	0,3	5,7
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>21,23 mm</b>			
1050	Bref	Paredes externas	7,36	0,4	2,3
		Septos	6,20	0,3	3,9
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>21,35 mm</b>			
	B5C	Paredes externas	7,23	0,2	2,6
		Septos	6,17	0,3	4,7
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>20,88 mm</b>			
	B10C	Paredes externas	7,19	0,2	1,1
		Septos	6,27	0,5	5,1
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>21,15 mm</b>			
	B15C	Paredes externas	6,84	0,2	3,7
		Septos	6,16	0,7	5,4
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>20,72 mm</b>			
1150	Bref	Paredes externas	7,25	0,7	2,9
		Septos	6,21	0,4	3,2
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>20,62 mm</b>			
	B5C	Paredes externas	7,22	0,2	2,6
		Septos	6,14	0,1	3,1
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>20,76 mm</b>			
	B10C	Paredes externas	6,91	0,2	0,8
		Septos	6,15	0,6	4,3
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>20,93 mm</b>			
	B15C	Paredes externas	7,05	0,4	2,7
		Septos	6,02	0,6	5,9
		Média da soma mínima das esp. ext. e int. no corte transversal = <b>20,81 mm</b>			

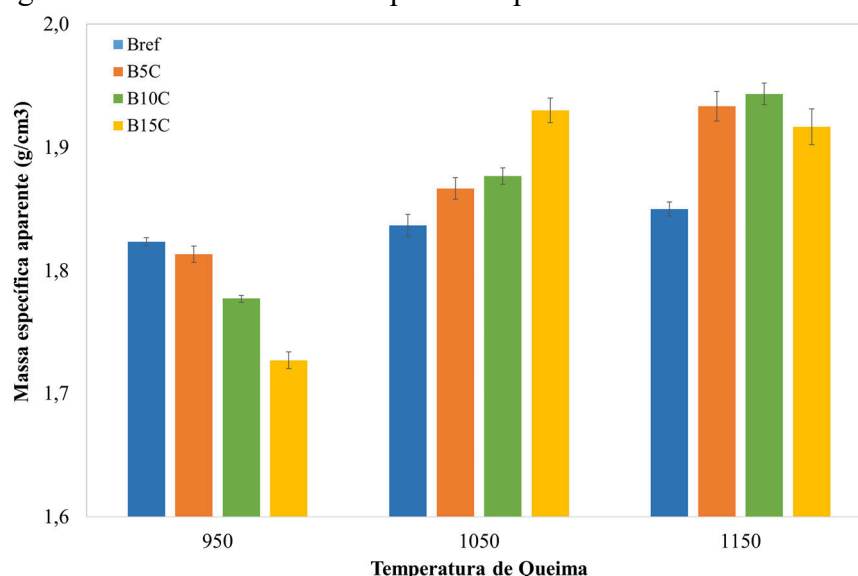
Fonte: Autor, 2023.

De acordo a NBR 15270-1 (ABNT, 2017), a espessura da parede externa para VED15 é de 7 mm, com tolerância de -0,5 mm, portanto, os valores obtidos se enquadram satisfatoriamente dentro dos limites aceitáveis. A mesma norma estabelece que a soma das espessuras (paredes e septos) de um corte transversal do bloco deve ser calculada a partir da dimensão real de cada parede e septo, devendo a soma ser maior ou igual a 20 mm, sem valores mínimos toleráveis. Desta forma, todas as classes de blocos também cumprem esse requisito.

#### 4.2.2 Massa Específica Aparente

Após a realização dos ensaios, os valores obtidos para cada classe de blocos cerâmicos podem ser visualizados na Figura 28. Como referência, para as massas cerâmicas, Santos (1989) sugere que a massa específica aparente esteja no intervalo entre  $1,5 \text{ g/cm}^3$  e  $2,0 \text{ g/cm}^3$ . Logo, todos os blocos encontram-se dentro da margem recomendada.

Figura 28: Valores da massa específica aparente dos blocos cerâmicos.



Fonte: Autor, 2023.

Ao analisar os resultados obtidos, percebe-se que na faixa de temperatura de 950 °C houve uma tendência de diminuição da massa específica aparente a partir do aumento do teor de cinzas. Já nas temperaturas de 1050 °C e 1150 °C, observou-se o inverso, ou seja, houve um aumento dos valores de massa específica. Por outro lado, ao analisar cada tipo de bloco em cada faixa de temperatura, nota-se que o aumento do teor de cinzas provocou o aumento da massa específica aparente, exceto para os blocos B15C, uma vez que

apresentaram um ganho à 1050 °C, em relação à 950 °C, e um decréscimo à 1150 °C, em comparação aos valores obtidos à 1050 °C.

De acordo com Santos (1989), nos blocos cerâmicos a massa específica aparente aumenta quando expostos em temperaturas próximas de 1000 °C, uma vez que o preenchimento dos interstícios entre as partículas ocorre nessa faixa de temperatura. Assim como neste trabalho, essa tese também é confirmada no trabalho de Gouveia (2008), pois a mesma constatou o aumento da massa específica aparente em corpos de prova cerâmicos contendo teores de chamote, a partir do aumento da temperatura de queima.

Analisando os blocos sem resíduo (Bref) percebe-se que os mesmos não sofreram grandes variações com o aumento da temperatura de queima, no entanto, os corpos de prova contendo resíduo apresentaram variações mais acentuadas, evidenciando que a combinação entre a temperatura e o teor de cinzas exercem influências sobre a massa específica aparente. Tal fato pode ser confirmado estatisticamente através da análise de variância (ANOVA) presente na Tabela 10. Os dados mostram que a partir das variações de temperatura e do teor de cinzas há alterações significativas nos valores de massa específica aparente dos blocos ( $p < 0,05$ ), tanto ao analisar as variáveis de forma isolada, como a interação entre elas.

Tabela 10: Análise de variância (ANOVA) do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a massa específica aparente dos blocos.

	<b>SQ</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>calc.</sub></b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
Temperatura	0,099	2	0,049	243,795	0,000	SIM
Teor de Resíduo	0,005	3	0,002	8,927	0,000	SIM
Temp. x Teor de Res.	0,040	6	0,007	33,037	0,000	SIM
Erro	0,005	24	0,000			

Fonte: Autor, 2023.

Afim de localizar as diferenças estatisticamente significativas apontadas pela ANOVA, foi realizado o teste de Tukey para identificar as interações que apresentam significância. Os dados na Tabela 11 mostram que não houveram diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) nos blocos de referência (Bref) mediante à variação de temperatura, bem como os blocos B15C queimados à 1050 °C e 1150 °C. Por outro lado, a interação entre a temperatura e o teor de resíduo provocou diferenças entre todos os blocos B5C e B10C combinados com todas as faixas de temperatura, assim como para a classe B15C queimados à 950 °C e 1050 °C, e à 950 °C e 1150 °C.



Tabela 11: Teste de Tukey do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a massa específica aparente.

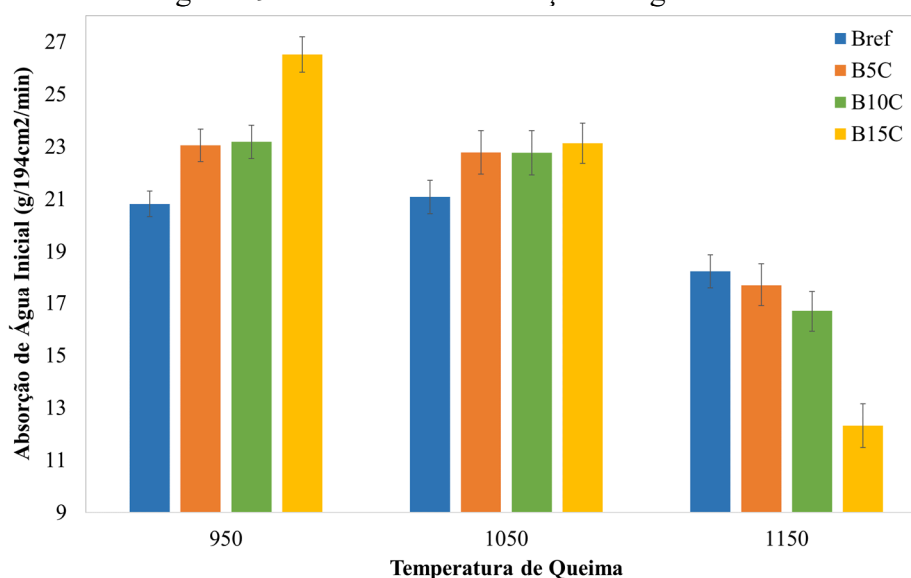
Interações	Diferença entre Médias	Erro Padrão da Diferença	IC de 95% para Diferença	Valor-P
Bref [950 e 1050]	-0,013	0,012	(-0,043; 0,017)	0,599
Bref [950 e 1150]	-0,027	0,012	(-0,057; 0,003)	0,090
Bref [1050 e 1150]	-0,013	0,012	(-0,043; 0,017)	0,599
B5C [950 e 1050]	-0,053	0,012	(-0,083; -0,023)	0,000
B5C [950 e 1150]	-0,110	0,012	(-0,140; -0,080)	0,000
B5C [1050 e 1150]	-0,057	0,012	(-0,087; -0,027)	0,000
B10C [950 e 1050]	-0,100	0,012	(-0,130; -0,070)	0,000
B10C [950 e 1150]	-0,167	0,012	(-0,197; -0,137)	0,000
B10C [1050 e 1150]	-0,067	0,012	(-0,097; -0,037)	0,000
B15C [950 e 1050]	-0,203	0,012	(-0,233; -0,173)	0,000
B15C [950 e 1150]	-0,190	0,012	(-0,220; -0,160)	0,000
B15C [1050 e 1150]	0,013	0,012	(-0,017; 0,043)	0,599

Fonte: Autor, 2023.

#### 4.2.3 Absorção de Água Inicial

Na Figura 29 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de absorção inicial dos blocos cerâmicos.

Figura 29: Resultados da absorção de água inicial.



Fonte: Autor, 2023.

Os corpos de prova contendo 15% de resíduo (B15C) queimados à 950 °C e 1150 °C obtiveram a maior e menor média de absorção inicial, 26,5 g/194cm²/min e 12,2 g/194cm²/min respectivamente. Observa-se também que para cada tipo de bloco há uma diminuição dos valores de absorção inicial a partir do aumento de temperatura. Já ao analisar o efeito provocado pelo teor de cinzas nos blocos em cada faixa de temperatura, percebe-se que a partir do aumento do teor de resíduo as médias dos índices tendem a ser

maiores nas temperaturas de 950 °C e 1050 °C. Entretanto, esse fenômeno ocorre de forma inversa na temperatura de 1150 °C, ou seja, o aumento do teor de cinzas provoca a diminuição da absorção inicial.

A análise mostra ainda que nenhum corpo de prova apresentou valor superior à 30 g/194cm<sup>2</sup>/min, limite máximo indicado por Baptista (2018) para que não haja falhas de aderência entre o substrato e o sistema de revestimento de argamassa (reboco ou emboço).

Analizando os dados a partir da ANOVA (Tabela 12), observa-se que estatisticamente não existem diferenças significativas ao avaliar apenas a variação do teor de cinzas ( $p > 0,05$ ). Por outro lado, a análise mostra que o efeito da temperatura de forma isolada e a interação da mesma com a variação do teor de cinzas exercem influências significativas nos valores de absorção de água inicial.

Tabela 12: Análise de variância (ANOVA) do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a absorção de água inicial.

	<b>SQ</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>calc.</sub></b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
Temperatura	722,690	2	361,345	115,409	0,000	SIM
Teor de Resíduo	12,499	3	4,166	1,331	0,273	NÃO
Temp. x Teor de Res.	233,172	6	38,862	12,412	0,000	SIM
Erro	187,859	60	3,131			

Fonte: Autor, 2023.

A partir do teste de Tukey (Tabela 13), é possível atestar que os blocos queimados à 1150 °C possuem diferenças em comparação as médias das interações nas outras faixas de temperatura ( $p < 0,05$ ), exceto para os blocos B15C queimados à 950 °C e 1050 °C, que também apresentaram médias significantes através do ponto de vista estatístico.

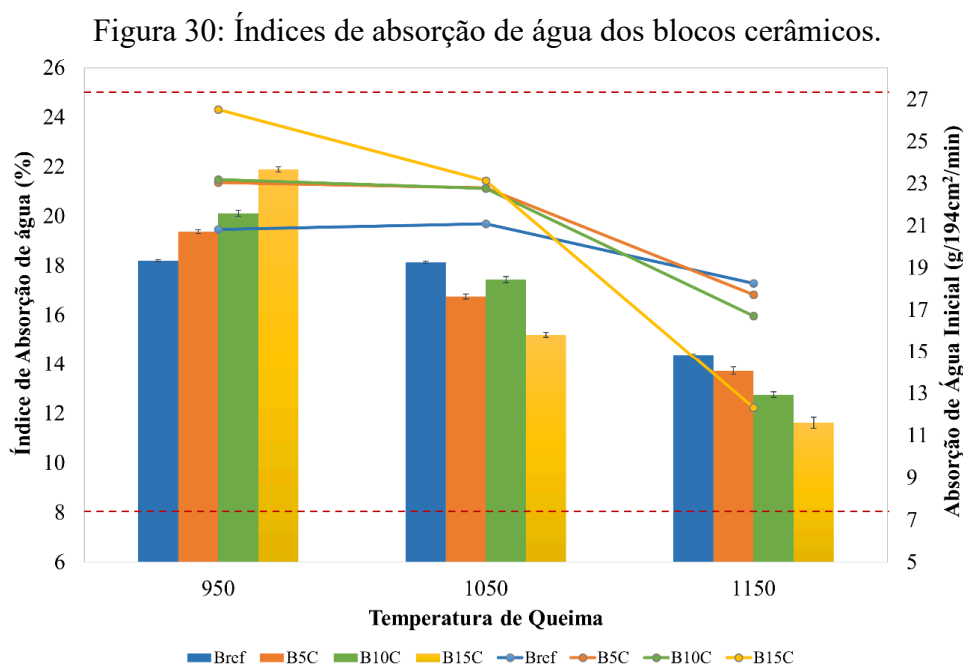
Tabela 13: Teste de Tukey do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a absorção de água inicial.

<b>Interações</b>	<b>Diferença entre Médias</b>	<b>Erro Padrão da Diferença</b>	<b>IC de 95% para Diferença</b>	<b>Valor-P</b>
Bref [950 e 1050]	-0,260	1,022	(-2,769; 2,249)	0,992
Bref [950 e 1150]	2,567	1,022	(0,057; 5,076)	0,043
Bref [1050 e 1150]	2,827	1,022	(0,317; 5,336)	0,022
B5C [950 e 1050]	0,267	1,022	(-2,243; 2,776)	0,991
B5C [950 e 1150]	5,333	1,022	(2,824; 7,843)	0,000
B5C [1050 e 1150]	5,067	1,022	(2,557; 7,576)	0,000
B10C [950 e 1050]	0,417	1,022	(-2,093; 2,926)	0,969
B10C [950 e 1150]	6,483	1,022	(3,974; 8,993)	0,000
B10C [1050 e 1150]	6,067	1,022	(3,557; 8,576)	0,000
B15C [950 e 1050]	3,383	1,022	(8,74; 5,893)	0,005
B15C [950 e 1150]	14,200	1,022	(11,961; 16,709)	0,000
B15C [1050 e 1150]	10,817	1,022	(8,307; 13,326)	0,000

Fonte: Autor, 2023.

#### 4.2.4 Índice de Absorção de Água

Após os procedimentos de pesagem das massas seca e úmida de cada tipo de bloco, foram calculadas as médias dos índices de absorção de água, como mostrado na Figura 30. Os resultados mostram que todos os blocos atendem aos critérios presentes na NBR 15270-1 (ABNT, 2017), uma vez que os índices de absorção superam o limite mínimo tolerável (8%) e não ultrapassam o limite máximo admissível (25%). A mesma figura faz um comparativo com resultados de absorção de água inicial, mostrando a mesma tendência de comportamento.



Fonte: Autor, 2023.

Ao analisar os dados percebe-se que, a partir do aumento da temperatura de queima, há uma diminuição na capacidade de absorção de água por parte dos blocos. Observa-se também que, dependendo da faixa de temperatura, o comportamento dos blocos é distinto, ou seja, em temperaturas menores os blocos que possuem maiores teores de cinzas apresentam maior permeabilidade, porém, à medida que há o aumento da temperatura o comportamento muda.

A partir do aumento do teor de cinzas, em substituição parcial à argila, há claramente o aumento do índice de absorção de água dos blocos cerâmicos queimados à 950 °C, confirmando os dados obtidos por Ferreira (2019), que constatou o mesmo fenômeno ao analisar pequenos corpos de prova cerâmicos confeccionados em laboratório, a partir da adição de pequenos teores de cinzas do caroço de açaí.

Por outro lado, em temperaturas próximas 1150 °C notou-se o comportamento inverso ao observado em 950 °C, de modo que os blocos com menores teores de cinzas se mostraram mais permeáveis. Os resultados se assemelham aos valores encontrados por Marins *et al.* (2014), que analisaram o comportamento de corpos de prova cerâmicos estruturais compostos por argila caulínica, caulim e cinzas do caroço de açaí, mediante ao aumento da temperatura de sinterização.

Na Tabela 14 apresenta-se os resultados da ANOVA do conjunto de amostras. Os dados mostram que há variações significativas de absorção de água ( $p < 0,05$ ), causadas pela temperatura de queima dos blocos e pelo teor de resíduo. Assim, a partir da variação da temperatura de queima e do teor de resíduo, os resultados sofrem alterações de forma significativa, de modo que as médias de todos os grupos são diferentes.

Tabela 14: Análise de variância (ANOVA) do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a absorção de água.

	<b>SQ</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>calc.</sub></b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
Temperatura	553,760	2	276,880	3567,532	0,000	SIM
Teor de Resíduo	4,487	3	1,496	19,270	0,000	SIM
Temp. x Teor de Res.	92,581	6	15,430	198,814	0,000	SIM
Erro	4,657	60	0,078			

Fonte: Autor, 2023.

Conforme o teste de Tukey (Tabela 15), verificou-se que apenas não houveram diferenças estatisticamente significativas de absorção de água entre os blocos sem resíduos (Bref) queimados nas temperaturas de 950 °C e 1050 °C ( $p > 0,05$ ). Por outro lado, as interações entre as demais combinações apresentaram diferenças de médias significativas.

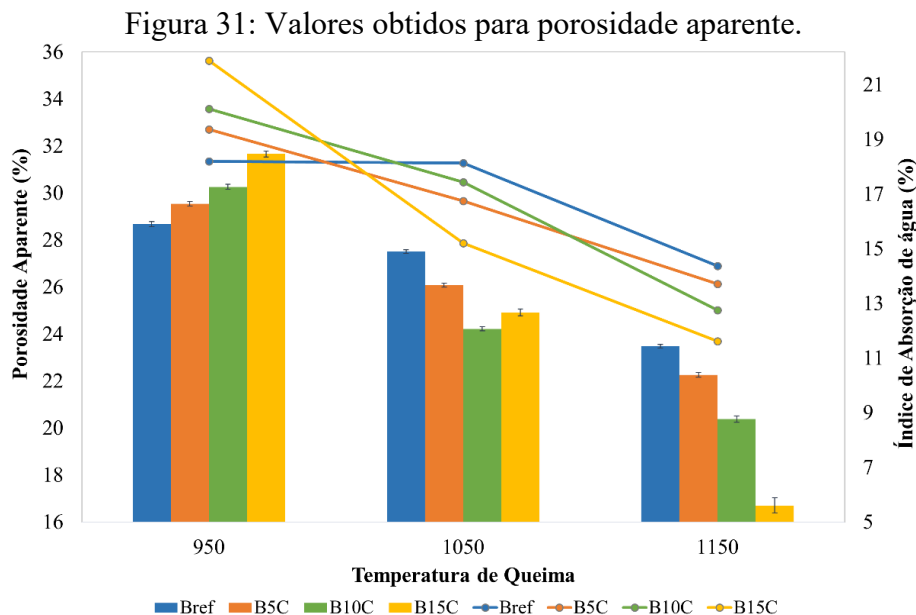
Tabela 15: Teste de Tukey do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre o índice de absorção de água.

<b>Interações</b>	<b>Diferença entre Médias</b>	<b>Erro Padrão da Diferença</b>	<b>IC de 95% para Diferença</b>	<b>Valor-P</b>
Bref [950 e 1050]	0,067	0,161	(-0,328; 0,462)	0,967
Bref [950 e 1150]	3,833	0,161	(3,438; 4,228)	0,000
Bref [1050 e 1150]	3,767	0,161	(3,372; 4,162)	0,000
B5C [950 e 1050]	2,817	0,161	(2,222; 3,012)	0,000
B5C [950 e 1150]	5,650	0,161	(5,255; 6,045)	0,000
B5C [1050 e 1150]	3,033	0,161	(2,638; 3,428)	0,000
B10C [950 e 1050]	2,683	0,161	(2,288; 3,078)	0,000
B10C [950 e 1150]	7,367	0,161	(6,972; 7,762)	0,000
B10C [1050 e 1150]	4,683	0,161	(4,288; 5,078)	0,000
B15C [950 e 1050]	6,683	0,161	(6,288; 7,078)	0,000
B15C [950 e 1150]	10,267	0,161	(9,872; 10,662)	0,000
B15C [1050 e 1150]	3,583	0,161	(3,188; 3,978)	0,000

Fonte: Autor, 2023.

#### 4.2.5 Porosidade Aparente

A Figura 31 traz os resultados de porosidade aparente e um comparativo com os índices de absorção de água, mostrando que há similaridade entre os comportamentos.



Os dados mostram que todos os blocos atenderam satisfatoriamente o limite máximo admissível de porosidade recomendado por Santos (1989), que é de 35%. Os resultados mostram também que, assim como nos valores obtidos para os índices de absorção de água, os teores de cinzas do caroço de açaí presentes na matriz cerâmica influenciaram também para o aumento da porosidade dos corpos de prova, em temperatura próxima à 950 °C. Ferreira (2019) acrescenta que a absorção de água e a porosidade aparente estão intimamente relacionadas, pois quanto maior for o teor de cinzas, maior será a porosidade do material e proporcionalmente a absorção de água será maior, quando queimados à 950 °C, pois de acordo com a autora, esses poros provavelmente estão conectados.

Por outro lado, a partir do aumento de temperatura entre 1050 °C e 1150 °C, a porosidade aparente dos corpos de prova diminuiu, mediante ao aumento do teor de cinzas. Pureza (2004) destaca que nas argilas as reações entre a alumina e a sílica com outros elementos ocorrem no intervalo de temperatura entre 900 °C a 1000 °C, produzindo silicoaluminatos complexos, e que é na faixa de temperatura próxima ou superior à 1000 °C que ocorre a formação da fase vítrea, a partir do amolecimento e da fusão desses silicoaluminatos, proporcionando resistência mecânica, compactação, dureza e impermeabilidade aos blocos cerâmicos.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados obtidos através da ANOVA do conjunto de amostras ensaiadas. Observa-se que houveram variações significativas nas médias de porosidade aparente ( $p < 0,05$ ) de todos os grupos, causadas pela temperatura de queima dos blocos e pelo teor de resíduo presente nas amostras. Desta forma, conclui-se que os resultados sofrem alterações de forma significativa a partir da variação do teor de resíduo e da temperatura de queima dos blocos, fenômeno semelhante observado nos dados obtidos para a análise de absorção de água.

Tabela 16: Análise de variância (ANOVA) do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a porosidade aparente.

	<b>SQ</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>calc.</sub></b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
Temperatura	868,912	2	434,456	4613,694	0,000	SIM
Teor de Resíduo	41,230	3	13,743	145,946	0,000	SIM
Temp. x Teor de Res.	144,680	6	24,113	256,070	0,000	SIM
Erro	4,520	48	0,094			

Fonte: Autor, 2023.

O teste de Tukey (Tabela 17) mostrou que todos os valores obtidos são inferiores à 0,05 e por regra do método estatístico todas as interações entre as variações da temperatura de queima e do teor de resíduo apresentaram diferenças de médias significativas.

Tabela 17: Teste de Tukey do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a porosidade aparente.

<b>Interações</b>	<b>Diferença entre Médias</b>	<b>Erro Padrão da Diferença</b>	<b>IC de 95% para Diferença</b>	<b>Valor-P</b>
Bref [950 e 1050]	1,180	0,194	(0,700; 1,660)	0,000
Bref [950 e 1150]	5,200	0,194	(4,720; 5,680)	0,000
Bref [1050 e 1150]	4,020	0,194	(3,540; 4,500)	0,000
B5C [950 e 1050]	3,460	0,194	(2,980; 3,940)	0,000
B5C [950 e 1150]	7,280	0,194	(6,800; 7,760)	0,000
B5C [1050 e 1150]	3,820	0,194	(3,340; 4,300)	0,000
B10C [950 e 1050]	6,040	0,194	(5,560; 6,520)	0,000
B10C [950 e 1150]	9,820	0,194	(9,340; 10,340)	0,000
B10C [1050 e 1150]	3,780	0,194	(3,300; 4,260)	0,000
B15C [950 e 1050]	6,740	0,194	(6,260; 7,220)	0,000
B15C [950 e 1150]	14,960	0,194	(14,460; 15,440)	0,000
B15C [1050 e 1150]	8,220	0,194	(7,740; 8,700)	0,000

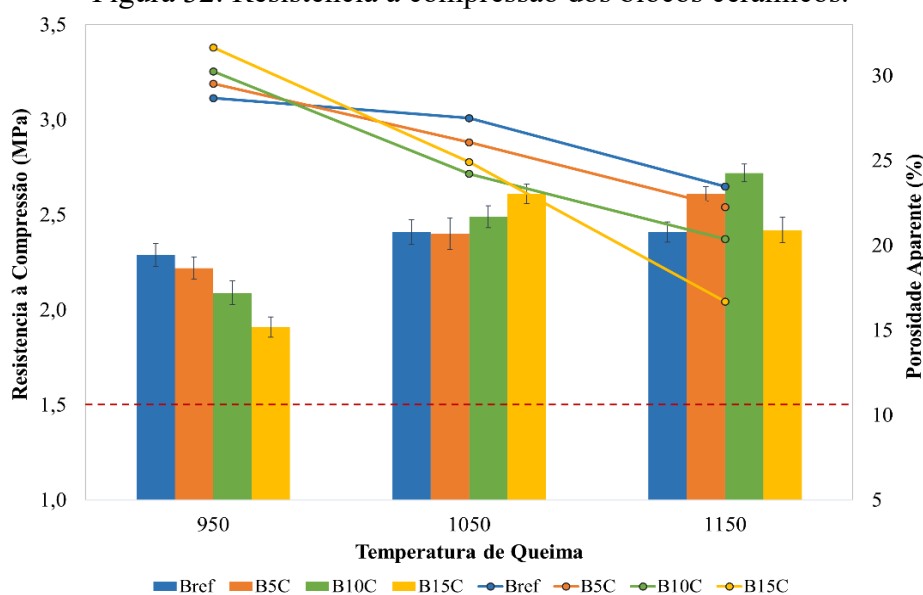
Fonte: Autor, 2023.

#### 4.2.6 Resistência à Compressão

Considerado como um dos principais parâmetros para avaliar a qualidade de blocos cerâmicos, a resistência à compressão dos blocos é apresentada na Figura 32, juntamente com um comparativo dos valores obtidos para porosidade aparente. Nota-se que ambos

estão interligados, de modo que a porosidade aparente exerce influência sobre a resistência mecânica dos produtos. Paralelamente, a resistência à compressão dos blocos também está diretamente relacionada com os índices de absorção de água, uma vez que as menores resistências obtidas estão relacionadas a blocos que apresentaram os maiores índices de absorção e porosidade aparente. O mesmo fenômeno foi observado por Sultana e Ahmed (2022) ao analisarem as propriedades da cerâmica vermelha com substituição parcial de argila por cinzas do bagaço de cana de açúcar na região norte de Bangladesh.

Figura 32: Resistência à compressão dos blocos cerâmicos.



Fonte: Autor, 2023.

Percebe-se que a partir dos resultados obtidos, todos os tipos de blocos apresentam valores médios superiores a 1,5 MPa de resistência à compressão, valor mínimo estabelecido pela NBR 15270-1 (ABNT, 2017) para blocos cerâmicos de vedação. Os blocos contendo 10% de cinzas (B10C) queimados à 1150 °C obtiveram a maior resistência (2,72 MPa), enquanto que os blocos com substituição parcial de 15% de argila por cinzas queimados à 950 °C (B15C), apresentaram a menor média de resistência à compressão (1,89 MPa).

Analisando as classes dos blocos na faixa de temperatura de 950 °C, observa-se que com o aumento do teor de cinzas provoca uma leve queda os valores de resistência à compressão, fenômeno semelhante constatado por Ferreira (2019), mas o inverso encontrado por Marins *et al.* (2014). Por outro lado, entre 1050 °C e 1150 °C, com o aumento da temperatura e do teor de cinzas, percebe-se que há um ganho de resistência mecânica.

Os resultados mostram ainda que ao analisar os blocos dentro de cada faixa de temperatura, nota-se que com a elevação da temperatura a partir de 1050 °C há um ganho de resistência à compressão a partir do aumento do teor de CCA. O fato pode estar relacionado ao teor de material fundente presente na composição química da CCA, como o K<sub>2</sub>O (4,51%), elemento com a segunda maior concentração, atrás apenas do SiO<sub>2</sub> (8,31%). Esta tese é confirmada por Marins *et al.* (2014), uma vez que os autores concluíram em suas pesquisas que a partir do aumento da temperatura de queima, entre 950 °C e 1150 °C, as cinzas do caroço de açaí atuam como fundente na mistura cerâmica, aumentando a densificação do material a partir do preenchimento parcial da porosidade pela fase líquida, proporcionando o aumento da resistência mecânica do produto.

Em relação aos blocos B15C queimados à 1150 °C, percebe-se nitidamente que houve uma diminuição de resistência à compressão comparado aos demais tipos queimados na mesma temperatura. Nesse caso, Marins *et al.* (2014) afirmam que devido ao alto teor de carbono presentes nas cinzas do caroço de açaí, atuando como fundente, acaba ocorrendo a fusão insipiente da massa argilosa.

De acordo com a Tabela 18, através da ANOVA, não foram detectadas diferenças estatisticamente significativas de resistência à compressão, ao avaliar apenas a variação do teor de resíduo ( $p > 0,05$ ). Por outro lado, ao analisar os efeitos da temperatura e sua combinação com o teor de resíduo, nota-se que os resultados sofrem alterações de forma significativa, de modo que as médias entre os grupos são diferentes estatisticamente.

Tabela 18: Análise de variância (ANOVA) do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a resistência à compressão.

	<b>SQ</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>calc.</sub></b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
Temperatura	5,031	2	2,516	56,182	0,000	SIM
Teor de Resíduo	0,315	3	0,105	2,342	0,076	NÃO
Temp. x Teor de Res.	1,967	6	0,328	7,321	0,000	SIM
Erro	6,448	144	0,045			

Fonte: Autor, 2023.

Analisando o teste de Tukey (Tabela 19), ao comparar os grupos estudados verificou-se que não houveram diferenças estatisticamente significativas do efeito da variação das três temperaturas de queima sobre os blocos sem resíduos (Bref), assim como nos blocos contendo 5% de resíduos (B5C) queimados à 950 °C e 1050 °C, e blocos com 15% de resíduos (B15C) queimados à 1050 °C e 1150 °C. As interações entre as demais combinações apresentaram diferenças de médias significativas.



Tabela 19: Teste de Tukey do efeito de temperatura e o teor de resíduo sobre a resistência à compressão.

Interações	Diferença entre Médias	Erro Padrão da Diferença	IC de 95% para Diferença	Valor-P
Bref [950 e 1050]	-0,115	0,083	(-0,316; 0,085)	0,421
Bref [950 e 1150]	-0,115	0,083	(-0,316; 0,085)	0,421
Bref [1050 e 1150]	0,075	0,083	(-0,201; 201)	1,000
B5C [950 e 1050]	-0,185	0,083	(-0,385; 0,016)	0,081
B5C [950 e 1150]	-0,392	0,083	(-0,593; -0,192)	0,000
B5C [1050 e 1150]	-0,208	0,083	(-0,008; 0,393)	0,040
B10C [950 e 1050]	-0,400	0,083	(-0,601; -0,199)	0,000
B10C [950 e 1150]	-0,608	0,083	(-0,808; -0,407)	0,000
B10C [1050 e 1150]	-0,208	0,083	(-0,408; -0,007)	0,040
B15C [950 e 1050]	-0,700	0,083	(-0,901; -0,499)	0,000
B15C [950 e 1150]	-0,508	0,083	(-0,708; -0,307)	0,000
B15C [1050 e 1150]	0,192	0,083	(-0,008; 0,393)	0,064

Fonte: Autor, 2023.

#### 4.2.7 Determinação de Eflorescência

Na Tabela 20 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de determinação de eflorescência dos blocos ensaiados. As análises mostram que não foram observadas nenhuma mancha de sais visíveis a olho nu em quaisquer corpos de prova. Desta forma, os resultados indicam que as cinzas do caroço de açaí como substituto parcial à argila não provocaram o surgimento da patologia.

Tabela 20: Resultados da determinação de eflorescência.

Temp. de queima (°C)	Blocos	Classificação
950	Bref	Não eflorescente
	B5C	Não eflorescente
	B10C	Não eflorescente
	B15C	Não eflorescente
1050	Bref	Não eflorescente
	B5C	Não eflorescente
	B10C	Não eflorescente
	B15C	Não eflorescente
1150	Bref	Não eflorescente
	B5C	Não eflorescente
	B10C	Não eflorescente
	B15C	Não eflorescente

Fonte: Autor, 2023.

Ferreira (2009) cita que os sais mais comuns que provocam o fenômeno da eflorescência são: nitrato de potássio ( $\text{KNO}_3$ ), sulfato de magnésio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), nitrato de sódio ( $\text{NaNO}_3$ ), sulfato de potássio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), cloreto de potássio ( $\text{KCl}$ ), gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Ele

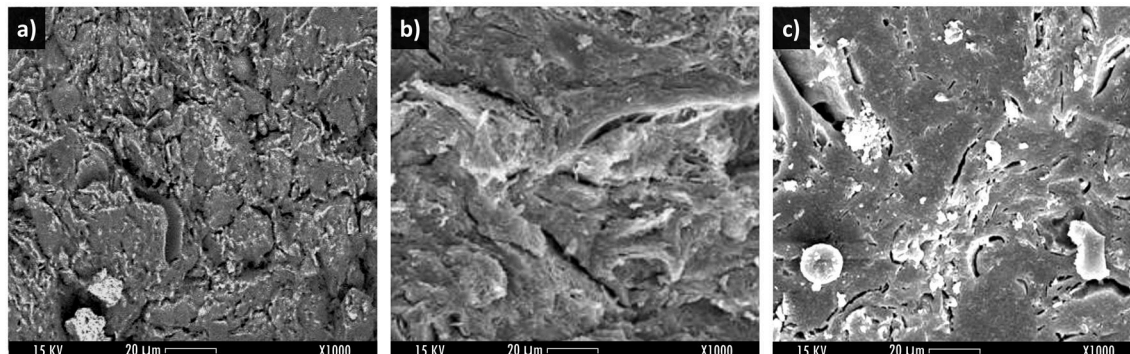
destaca que os sais solúveis presentes em produtos cerâmicos podem ser provenientes da matéria-prima que constitui as massas cerâmicas, ou formados na etapa de secagem, através da reação entre gases sulfurosos presentes no ambiente e a massa cerâmica.

Como visto no item 4.1.2 desta pesquisa, tanto a argila como a CCA possuem hematita em suas composições, 2,16% e 1,12% respectivamente. Entretanto, o baixo teor deste sal presente nas massas cerâmicas não foi determinante para o surgimento de eflorescência nos blocos analisados a olho nu.

#### 4.2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

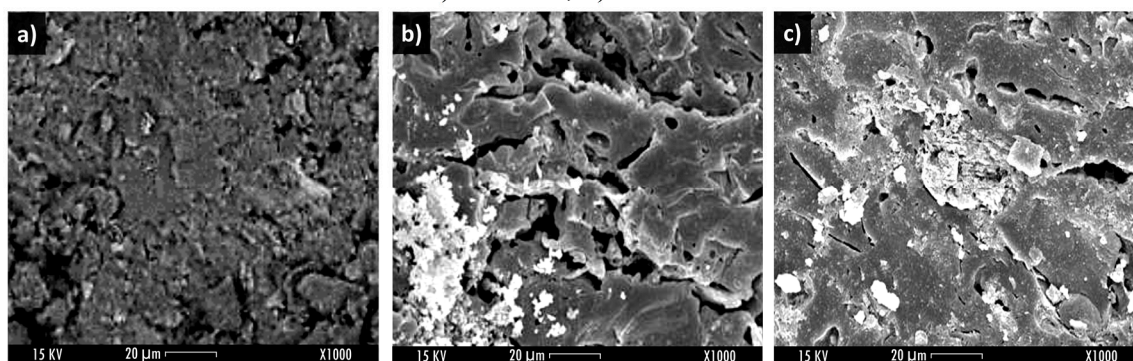
Nas Figuras 33 a 36 são apresentadas as micrografias, obtidas através de Microscopia Eletrônica de varredura (MEV), de cada classe de blocos produzidas. Percebe-se que na temperatura de queima à 950 °C, as superfícies apresentam-se muito rugosas, ou seja, estruturalmente porosas, confirmando os dados obtidos nos ensaios de porosidade aparente. Pinheiro e Holanda (2010) afirmam que esses poros abertos interpartículas com morfologia irregular, são característicos da etapa inicial de sinterização.

Figura 33: Micrografias obtidas por MEV na superfície do corpo de prova Bref: a) 950 °C; b) 1050 °C; c) 1150 °C.



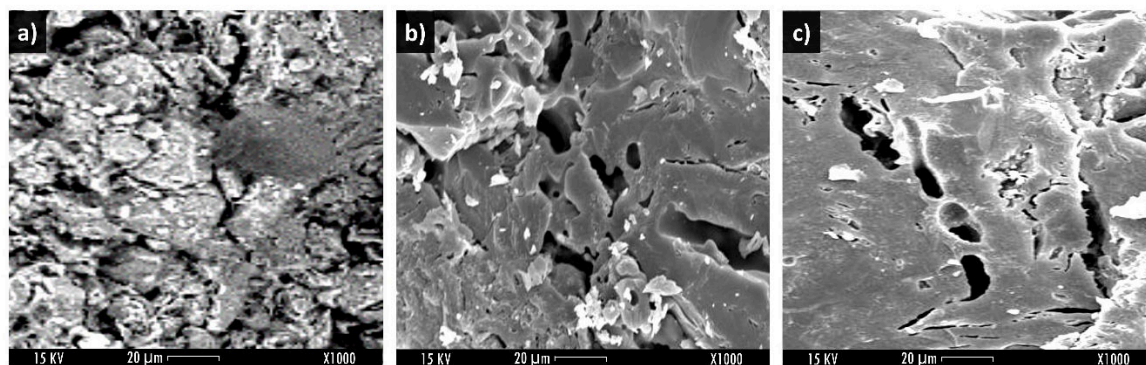
Fonte: Autor, 2023.

Figura 34: Micrografias obtidas por MEV na superfície do corpo de prova B5C: a) 950 °C; b) 1050 °C; c) 1150 °C.



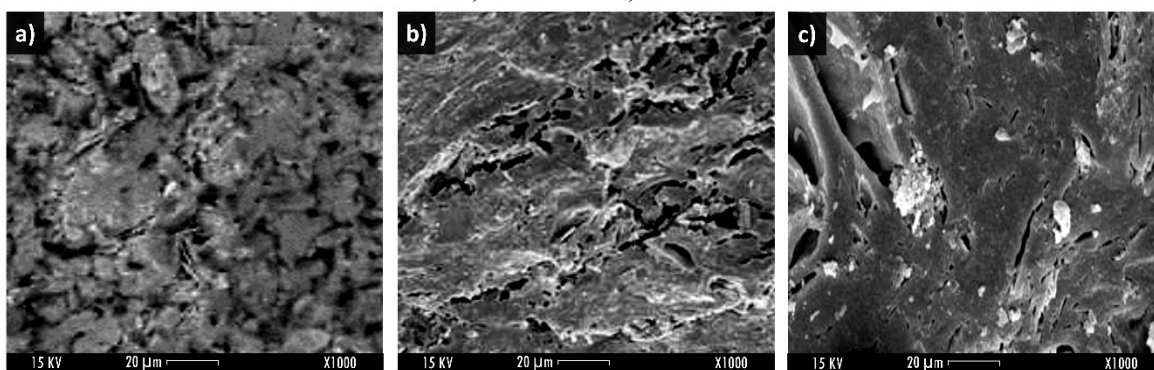
Fonte: Autor, 2023.

Figura 35: Micrografias obtidas por MEV na superfície do corpo de prova B10C: a) 950 °C; b) 1050 °C; c) 1150 °C.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 36: Micrografias obtidas por MEV na superfície do corpo de prova B15C: a) 950 °C; b) 1050 °C; c) 1150 °C.



Fonte: Autor, 2023.

Percebe-se que com o aumento do teor de cinzas, juntamente com o aumento da temperatura de queima, as superfícies se apresentam mais lisas e significativamente menos porosas, ao apresentarem menos pontos mais escuros (poros). A partir de 1050 °C é evidente a formação de fase líquida, uma vez que, após o resfriamento, são observados filamentos vítreos, que reduzem a porosidade através do preenchimento parcial dos poros. Vieira *et al.* (2008) reiteram que a partir dessa faixa de temperatura as partículas tendem a coalescer, proporcionando a compactação e união dos grãos, e consequentemente diminuindo a presença dos poros.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Com o intuito de minimizar os impactos ambientais causados pela extração da argila pela indústria da cerâmica vermelha, como também elaborar produtos alternativos tecnicamente viáveis para a construção civil, a partir de resíduos pouco aproveitados e descartados de forma irregular no meio ambiente, esta pesquisa se propôs avaliar os efeitos provocados pela temperatura de queima, nas faixas de 950 °C, 1050°C e 1150 °C, de blocos cerâmicos de vedação produzidos a partir da substituição parcial de argila por cinzas do caroço de açaí, nos teores de 0%, 5%, 10% e 15%.

Os limites de Atterberg demonstraram que a substituição parcial de argila por cinzas do caroço de açaí não provocou alterações significativas na trabalhabilidade das massas argilosas. No entanto, as análises mostraram que há uma redução do Índice de Plasticidade a partir do aumento do teor de CCA, o que contribui para a redução da quantidade água necessária para a moldagem e diminuição dos efeitos de retração das peças.

Através das análises química, física, mineralógica e térmica foi possível verificar que as cinzas do caroço de açaí não possuem elementos minerais significativos que prejudique sua incorporação em cerâmica vermelha. Por outro lado, foram observados um grau de compatibilidade entre as matérias-primas, principalmente ao constatar a presença de materiais fundentes em ambas. Os ensaios de granulometria mostraram que a argila analisada é ideal para a produção de blocos cerâmicos e tem suas propriedades melhoradas quando misturadas com CCA, uma vez que o resíduo foi classificado como não plástico, o que contribui positivamente para a redução da retração de secagem e de queima.

Com base nos resultados obtidos para na caracterização tecnológica dos blocos cerâmicos, foi possível concluir que a variação da temperatura de queima provoca alterações significativas nas propriedades dos blocos. De modo geral, ficou evidente que a partir do aumento da temperatura há uma diminuição na capacidade de sucção (absorção inicial), bem como redução do índice de absorção de água e porosidade aparente em todos os tipos de blocos. Por outro lado, ao verificar essas propriedades através dos efeitos provocados pelo teor de resíduo, em 950 °C foi observado um aumento nos valores desses parâmetros em blocos com maiores quantidades de CCA, mas sofrem grandes alterações a partir do aumento da temperatura.

Em relação ao comportamento mecânico dos blocos, é possível concluir que a substituição de argila pelo resíduo é tecnicamente viável. No entanto, ao analisar os corpos de prova queimados à 950 °C observou-se uma redução de resistência à compressão a partir do aumento do teor de cinzas, apesar de atingirem a resistência mínima estabelecida por norma. Por outro lado, a partir do aumento de temperatura, os blocos contendo maiores quantidades de CCA tenderam a apresentar maiores valores de resistência à compressão, em decorrência do aumento da sinterização das cinzas.

Por fim, a presença do resíduo nos blocos não exerceu influência para o surgimento do fenômeno de eflorescência, uma vez que não foram observadas mudanças no aspecto visual após a realização do ensaio.

## 5.2 SUGESTÕES

- Realizar uma análise do ponto de vista econômico do método proposto, afim de verificar sua viabilidade nesse quesito;
- Analisar os efeitos da temperatura queima sobre blocos cerâmicos estruturais com substituição parcial de argila por CCA;
- Avaliar o mecanismo de aderência entre o revestimento de argamassa e os substratos dos blocos propostos nesta pesquisa;
- Verificar a viabilidade técnica de utilização de outros resíduos de biomassa em composições de massas cerâmicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, N. I. A.; ROCHA, M. C. G.; BERTOLINO, L. C. Mineralogical characterization of natural clays from Brazilian Southeast region for industrial applications. **Cerâmica**, v. 63, n. 366, pp. 253-262, 2017.

ALMEIDA, A. V. C.; MELO, I. M.; PINHEIRO, I. S.; FREITAS, J. F.; MELO, A. C. S.; Revalorização do caroço de açaí em uma beneficiadora de polpas do município de Ananindeua/PA: proposta de estruturação de um canal reverso orientado pela PNRS e logística reversa. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, Ano 12, n. 3, 2017, p. 59-83.

ALMEIDA, K. S.; SOARES, R. A. L.; MATOS, J. M. E. Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica. **Revista Matéria**, v. 25, n. 1, 2020.

ALMEIDA, Melise Carina Duarte de. **Estudo da incorporação de cinza e chamote gerado pela cerâmica vermelha ao próprio processo industrial**. 2015. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

ALVES JUNIOR, Rubens. **Efeito de variáveis e tipos de secagem na eficiência de secagem de blocos cerâmicos de vedação**. 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

ANDRADE, J. J. O. Propriedades físicas e mecânicas dos materiais, In: ISAIA, G. C. (ed) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**, 1 ed., v. 1, São Paulo, IBRACON, 2007.

ARAÚJO, J. C. S.; GARCIA, A. S.; BONFIM, F. P.; SOUZA, G. T. Influência da cinza do caroço de açaí nas propriedades de argamassas de chapisco. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v.13, n. 3, p. 216-226, 2021.

ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. G. A. Produtos cerâmicos. Materiais de construção. Rio de Janeiro, RJ: EDUR, 2000.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C 373-88** - Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products. West Conshohocken: ASTM International; 2006

AZEREDO, N. G.; ALEXANDRE, J.; AZEVEDO, A. Diagnóstico da Matéria-Prima Argilosa Empregada na Produção de Blocos Cerâmicos Estruturais em Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil. *In: XIV SAFETY, HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS*, Cubatão, v. 14, 2014, p. 301-304.

AZEREDO, Neila Gondim de. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas em blocos cerâmicos estruturais através do método de ultrassom na região de campos dos Goytacazes-RJ**. 2015. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2015.

BABISK, M. P.; AMARAL, L. F.; RIBEIRO, L. S.; et al. Evaluation and application of sintered red mud and its incorporated clay ceramics as materials for building construction. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 2, p. 2186-2195, 2020.

BAPTISTA, Adriana. **Atualização de procedimentos e resultados de ensaios de caracterização de blocos cerâmicos nacionais**. 2018. 142 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

BARREIRA, R. M. **Caracterização físico-química do endocarpo do açaí (Euterpe Oleracea Mart.) para aplicação em síntese de poliuretano**. 2009. 85f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2009.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 705 p.

BRASIL. **LEI nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, DF, n. 147, p. 03, seção 1, 03 de ago., 2010.

CALLISTER, JR., WILLIARN, D. **Ciência e engenharia de materiais: urna introdução**. Tradução Sérgio Murilo Starnile Soares - Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora S.a, 1998. 234 p.

CASTRO, Douglas Alberto Rocha de. **Estudo do processo de pirólise de sementes de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) para produção de biocombustíveis**. 2019. 300 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia), Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2019.

CONTO, V.; OLIVEIRA, M. L.; RUPPENTHAL, J. E. Certificações ambientais: contribuição à sustentabilidade na construção civil no Brasil. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 12, n. 4, pp. 100–127, 2017.

CORDEIRO, L. N. P.; PAES, I. N. L.; SOUZA, P. S. L.; AZEVEDO, C. M. Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. **Ambiente Construído** [online]. 2019, v. 19, n. 1, pp. 45-55.

COSTA, Diogo Henrique Pereira e. **Desempenho estrutural de blocos, primas, mini-paredes e paredes de alvenaria estrutural confeccionadas com blocos cerâmicos produzidos a partir da mistura de lama vermelha com argila**. 2014. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, Pará, 2014.

COTA, T. G.; REIS, E. L.; LIMA, R. M. F.; CIPRIANO, R. A. S. Incorporation of waste from ferromanganese alloy manufacture and soapstone powder in red ceramic production. **Applied Clay Science**, v. 161, p. 274-281, 2018.

COUTINHO, N. C.; VIEIRA, C. M. F. Caracterização e incorporação de cinza de resíduo sólido urbano em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 62, n. 363, p. 249-255, 2016.

FARIA, K. C. P.; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. Influência da adição de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha. **Matéria** (Rio de Janeiro). 2012, v. 17, n. 3.

FERREIRA, C. C.; BERGMANN, C. P. Formação da eflorescência em cerâmica vermelha: fatores de influência no transporte dos íons  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ . **Cerâmica**, v. 57, pp. 356-363, 2011.

FERREIRA, T. S. **Análise das propriedades tecnológicas da cinza do caroço do açaí na cerâmica vermelha**. 2019. 105f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

FERREIRA, T. S.; MESQUITA, F. J. M.; ISHIHARA, J. H.; SOUZA, P. S. L. Analysis of the technological properties of ash from seed the açaí in red ceramic. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e76996343, 2020.

GOUVEIA, Fernanda Pereira. **Efeito da incorporação de chamote (resíduo cerâmico queimado) em massas cerâmicas para a fabricação de blocos de vedação para o Distrito Federal: um estudo experimental**. 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Universidade de Brasília, Brasília, 2008.



GRUN, Elayne. **Caracterização de argilas provenientes de Canelinha - SC e estudo de formulações de massas cerâmicas**. 2007. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2007.

HERRAIZ, Aurélio Diaz. **Opções sustentáveis: Manejo e cultivo de açaí na calha do rio Madeira, Sul do Amazonas**. Humaitá - AM: Projeto Fronteiras Florestais, 2013. 19 p.

HOLANDA, J. N. F.; SALEIRO, G. T., Processing of red ceramic using a fast-firing cycle. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 58, p. 393-399, 2012.

IMAZON; SEBRAE. **Boas práticas para manejo florestal e agroindustrial – Produtos florestais não madeireiros: Açaí, Andiroba, Babaçu, Castanha-do-Brasil, Copaíba e Unha-de-gato**. Imazon e Sebrae, Belém, 2010. 66p.

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.

KAZMIERCZAK, C. S. Produtos de Cerâmica Vermelha. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007, v. 1, p. 563-586.

LA CASA, J. A.; CASTRO, E. Recycling of washed olive pomace ash for fired clay brick manufacturing, **Construction and Building Materials**, v. 61, 2014, pp. 320-326.

LIMA, José Janio Castro. **Estudo Geoeconômico e Tecnológico das Argilas Utilizadas na Indústria Cerâmica dos Municípios de Irituia e São Miguel do Guamá, Nordeste do Pará**. 2000. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade federal do Pará, Belém, Pará, 2000.

LIU, S.; GUAN, X.; ZHANG, S.; DOU, Z.; FENG, C.; ZHANG, H.; LUO, S. Sintered bayer red mud based ceramic bricks: Microstructure evolution and alkalis immobilization mechanism. **Ceramics International**, v. 43, n. 15, p. 13004-13008, 2017.

MA, B.; CAI, L.; LI, X.; JIAN, S. Utilization of iron ore tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 162-171, 2016.

MANDAL, A. K.; VERMA, H. R.; SINHA, O. P. Utilization of aluminum plant's waste for production of insulation bricks. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 949-957, 2017.

MARINS, L. F. B et al. Incorporação da cinza do caroço de açaí em formulações de cerâmica estrutural. In: **21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Cuiabá. Anais..., 2014. p. 1538-1544.

MÁS, Edgar. **A queima cerâmica forno a forno**. Edição 2006, Criciúma/SC: Polo Produções, 2006.

MÁS, Edgar. **Qualidade e Tecnologia em Cerâmica Vermelha**. Apostila 3, p. 9 a 29. Editora Polo Produções, 2005.

MEDEIROS, E. N. M.; SPOSTO, R. M.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R. Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica: utilização da técnica de planejamento. **Cerâmica** [online]. 2010, v. 56, n. 340.

MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; ALVARENGA, R. D. S. S.; *et al.* Effect of the Incorporation of Iron Ore Tailings on the Properties of Clay Bricks. In: Characterization of Minerals, Metals, and Materials. **Springer**, p. 617-627, 2019.

MENDES, Beatriz Cardoso. **Reaproveitamento do rejeito de minério de ferro, liberado no desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão (MG), na produção de blocos cerâmicos**. 2019. 76 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019.

MENEZES, R. R.; ALMEIDA, R. R.; SANTANA, L. N. L.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos. **Revista Matéria**, v. 12, n. 1, p. 226-236, 2007.

MILAK, P. *et al.* Valorization of rice husk ash in ceramic bricks. **Cerâmica** [online]. 2017, v. 63, n. 368, pp. 490-493.

MORAIS, D. M.; SPOSTO, R. M. Propriedades Tecnológicas e Mineralógicas das argilas e suas influências na qualidade de blocos cerâmicos de vedação que abastecem o mercado do Distrito Federal. **Cerâmica Industrial**, v. 11, p. 35-38, 2006.

MORAIS, Dirceu Medeiros de. **Briquetes de Resíduos Ligno-celulósicos como Potencial Energético para a Queima de Blocos Cerâmicos: Aplicação em uma Indústria que abastece o Distrito Federal**. 2007. 230 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

MYMRIN, V.; ALEKSEEV, K.; FORTINI, O. M.; CATAI, R. E.; *et al.* Water cleaning sludge a principal component of composites to enhance mechanical properties of ecologically clean red ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 145, p. 367-373, 2017.

NOCITI, Denyse Meirelles. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

OIKONOMOPOULOS, I. K.; PERRAKI, M.; TOUGIANNIDIS, N.; *et al.* Clays from Neogene Achlada lignite deposits in Florina basin (Western Macedonia, N. Greece): A prospective resource for the ceramics industry. **Applied Clay Science**, v. 103, pp. 1-9, 2015.

OLIVEIRA, Armando Alves de. **Tecnologia em Cerâmica**. Nova Letra. Blumenau - SC. 176p. 2011.

OLIVEIRA, C. I. R.; ROCHA, M. C. G.; SILVA, A. L. N.; et al. Characterization of bentonite clays from Cubati, Paraíba (Northeast of Brazil). **Cerâmica**, v. 62, n. 363, pp. 272-277, 2016.

OLIVEIRA, M. G.; SOUSA, D. L.; SOUZA, M. R.; CORDEIRO, L. N. P.; TEIXEIRA, M. R.; SILVA, S. H. M. Análise bibliográfica da (re) utilização do caroço de açaí na indústria da construção civil. *In: II Congresso Araguaense de Ciências Exatas, Tecnológica e Social Aplicada*. Santana do Araguaia, Pará, Anais..., 2020, p. 1-11.

OLIVEIRA, M. P.; BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p. 490–496, 2006.

OLIVEIRA, O. M.; ZANDONADI, A. R.; MARTINS, M. V. S.; CARRIÓ, J. A. J.; MUNHOZ JR, A. H. Caracterização de uma argila de vitória da conquista – Bahia, por análise térmica. *In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat*, Campos do Jordão, São Paulo, Anais..., 2010, p. 440-448.

OLIVEIRA, T. M. C.; et al. Aproveitamento das cinzas de caroço de açaí na produção de concreto sustentável analisando sua durabilidade, **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, pp. 30749–30756, 2020.

PAGNUSSAT, Daniel Tragnago. **Efeito da temperatura de queima de blocos cerâmicos sobre a resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa**. 2013. Tese (Doutorado) - Programa de Pos-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PEDROTI, L. G. *et al.* Desenvolvimento de Massa Cerâmica para Blocos Queimados e Prensados. **Cerâmica Industrial**, v. 16, n. 1, p. 25-30, 2011.

PEREIRA, E. N; RODRIGUES JÚNIOR, V. C. Carvão do caroço de açaí (*Euterpe oleracea*) ativado quimicamente com Hidróxido de sódio (NaOH) e sua eficiência no tratamento de água para o consumo. **Moju: Ccim**, 2013. 24 p.

PEREIRA, Maria Clara Macedo. **Desenvolvimento de painéis sanduíche com núcleo de concreto leve com caroço de açaí e laminados cimentícios reforçados com fibras de juta**. 2019. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2019.

PESSOA JÚNIOR, Wanison André Gil. **Incorporação de Iodo de estação de tratamento de água em tijolo de argila cozida**. 2019. 66 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. Editora Globo. São Paulo. 2007.

PINHEIRO, B. C. A. HOLANDA, J. N. F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica** [online]. 2010, v. 56, n. 339, pp. 237-243.

PINTO, L. A.; SOUZA, T. D.; SILVA, D. B.; PEIXOTO, L. P.; RODRIGUES, M. I. B. Study of clay used in the production of red ceramic pottery on semi-arid Cearense, Brazil. **Matéria**, v. 26, n. 03, pp. 1-11, 2021.

POSSES, Ivana Pereira das. **Caracterização tecnológica de blocos cerâmicos de alvenaria de vedação produzidos por empresas cerâmicas do estado do Espírito Santo**. 2013. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2013.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamento da casca de arroz residual com vista à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 345 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da Composição Granulométrica de Massas Para a Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1/2, p.31-35, 10 abr. 2007.

PUREZA, J. C. C. **Utilização de resíduos industriais de baixa granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

RACANELLI, L. A.; CÂNDIDO, V. S.; SOUZA, J. A. S.; CARDOSO, D. N. Caracterização e Estudo das Propriedades Físicas, Químicas e Mecânicas das Argilas Cauliniticas da Região Nordeste do Estado do Pará. **Matéria**, Rio de Janeiro. v. 25, n. 1, 2020.

RAMOS, S. O.; DANTAS, G. C. B.; LIRA, H. L.; PIMENTEL, P. M.; MARCIANO, J. E. A. Caracterização de argilas de novos jazimentos situados em Parelhas/RN, Brasil, visando aplicação na indústria cerâmica. **Matéria**, v. 24, n. 02, pp. 1-9, 2019

REGENSBURGER, Brigitte. **Recuperação de áreas degradadas pela mineração de argila através da regularização topográfica, da adição de insumos e serapilheira, e de atratores de fauna**. 2004. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

RIELLA, H. G.; FRAJNDLICH, E. U. C.; DURAZZO, M. Caracterização e utilização de fundentes em massas cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 3, p. 33-36, 2002.

ROCHA, Alexandre Lobo. **Alternativa de abastecimento energético dos fornos de indústrias cerâmicas localizadas no município de São Miguel do Guamá-PA**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

RODRIGUES, D.; ASTOLFI FILHO, S.; CLEMENT, C. R. Molecular marker-mediated validation of morphologically defined landraces of pejiabaye (*Bactrisgasipaes*) and their

phylogenetic relationships. **Genetic Resources and Crop Evolution**, Dordrecht, v. 51, p. 871-882, 2006.

SANTOS, Deivid Teixeira. **Caracterização socioambiental, econômica da extração de argila no município de São Miguel do Guamá-PA**. 2016. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade federal do Pará, Belém, Pará, 2016.

SANTOS, F. **Influência do resíduo de cinza de serragem de madeira nas propriedades técnicas de cerâmica vermelha**. 2016. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2016

SANTOS, I. O. et al. Estudo da avaliação de catalisadores a base de caroço de açaí e resíduos de conchas de água doce para a produção de biodiesel. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 22623-22630, 2021.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1989. 408p.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 3ª Ed., v. 1, Edgard Blücher. SP, 1992.

SATO, M. K. et al. Biochar as a sustainable alternative to açaí waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety and Environmental Protection**. v. 139. p. 36-46. 2020.

SEDAP, **Panorama Agrícola do Pará do Açaí - Ano de 2020**. Belém, PA. 2021, 12p.

SERRA, Florence Rios. **Açaí - Análise mensal - dezembro 2020**. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), 2021.

SEYE, O.; SOUZA, R. C. R.; BACELLAR, A. A.; MORAIS, M. D.; Caracterização do caroço de açaí como insumo para geração de eletricidade via gaseificação. *In: Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural*, p. 1–7, 2008.

SHINOMIYA, L. D.; GOMES, J. O.; ALVES, J. O. Análises de cenários para reaproveitamento do resíduo de bauxita no Pará. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 16, n. 1, p. 75-81, 2019.

SOUZA, C. C.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro. **Revista Matéria**. v. 13, n. 1, p. 194-202, 2008.

SOUZA, R. C. **Utilização de metodologia de análise de combinação de matérias-primas para indústria cerâmica, com planejamento em rede simplex**. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2015.

SULTANA, M. S.; AHMED, A. N. Study on Sugarcane Bagasse Ash–Clay Mixture Properties to Develop Red Ceramic Materials. **Sugar Tech**, 24, 1147–1154, 2022.

TAGORE, Márcia de Pádua Bastos. **O aumento da demanda do açaí e as alterações sociais, ambientais e econômicas: o caso das várzeas de Abaetetuba, Pará**. 2017. 155 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão dos Recursos Naturais e Desenvolvimento, Núcleo de Meio Ambiente, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, J. B.; MONTEIRO, S. N. Desenvolvimento de massas de revestimento cerâmico com argila caulinítica e nefelina sienito. **Cerâmica**, n. 54, pp. 184-192, 2008.

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

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, p. 1781-1788, 2007.

ZACCARON, A.; FERNANDES, P.; NANDI, V. S.; ROSSO, F. Incorporação de escória de alto forno a carvão vegetal em massa de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 25, n. 1, p. 34-42, 2020.

ZACCARON, A.; GALATTO, L. S.; NANDI, V. S.; FERNANDES, P. Incorporação de Chamote na Massa de Cerâmica Vermelha como Valorização do Resíduo. **Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 3, p. 33-39, 2014.

ZHU, X.; LI, W.; GUAN, X. An active dealkalization of red mud with roasting and water leaching. **Journal of Hazardous Materials**, v. 286, p. 85-91, 2015.