



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL – PPGECAM

ALESSANDRA DOS SANTOS QUEIROZ

**APROVEITAMENTO DE CINZAS DE ALGAROBA GERADAS NAS LAVANDERIAS  
DE JEANS DO APL DE CONFECÇÕES DE PERNAMBUCO PARA PRODUÇÃO DE  
TIJOLOS SOLO-CIMENTO**

Caruaru  
2024

ALESSANDRA DOS SANTOS QUEIROZ

**APROVEITAMENTO DE CINZAS DE ALGAROBA GERADAS NAS LAVANDERIAS  
DE JEANS DO APL DE CONFECÇÕES DE PERNAMBUCO PARA PRODUÇÃO DE  
TIJOLOS SOLO-CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECAM, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de concentração:** Tecnologia Ambiental.

**Orientadora:** Profa. Érika Pinto Marinho.

Caruaru  
2024

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Queiroz, Alessandra Dos Santos.

Aproveitamento de cinzas de algaroba geradas nas lavanderias de jeans do APL de confecções de Pernambuco para produção de tijolos solo-cimento / Alessandra Dos Santos Queiroz. - Caruaru, 2024.

131 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2024.

Orientação: Érika Pinto Marinho.

Inclui referências.

1. Resíduo industrial; 2. Caracterização microestrutural; 3. Resistência à compressão. I. Marinho, Érika Pinto. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

À Severina Queiroz e Edilene Andrade,  
minhas amadas avó e madrinha.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me acompanhar a cada passo da minha trajetória, me conceder força e determinação durante a realização deste trabalho, e colocar pessoas abençoadas no meu caminho para me auxiliar e apoiar.

A minha avó, Severina, que me criou como filha e segurou minha mão desde que eu nasci, me guiando pelo melhor caminho durante toda a minha vida com amor e carinho.

Ao meu marido, Allef Fraemann, que me apoiou e me incentivou desde o início a realizar o mestrado. Agradeço por me ensinar a enxergar todas as cores que o mundo tem a oferecer.

Ao meu pai, Alexsandro Queiroz, por me auxiliar durante a parte experimental de fabricação de tijolos, jamais irei esquecer da diferença que o senhor fez naquele momento.

Aos meus irmãos Vitória, Alysson e Anthony, por serem meus anjos e iluminar meus dias mais sombrios.

Aos meus tios, Alexandre Queiroz e Ariston Queiroz, por todo o apoio e amor durante todos estes anos, agradeço por poder ter vocês na minha vida.

As minhas madrinhas Lúcia Maria da Silva e Edilene Andrade dos Santos (*in memoriam*), e ao meu padrinho Paulino José dos Santos, por me tratarem como uma filha e participarem sempre da minha vida.

Aos meus amigos Alana Cecília, Ana Carolina, Mayara Santos, Paula Brazão, Paulo Oliveira e Rebeca Luiza, que me apoiaram e deram forças neste trabalho, o mestrado se tornou mais leve graças a vocês.

Ao Coordenador e Professor Arnaldo Manoel Pereira, do Laboratório de Construção Civil de Recife, Professor Fabrício Motteran do Laboratório de Biologia Molecular e Tecnologia Ambiental de Recife, e Coordenador André Dias do Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste por terem me permitido utilizar os laboratórios.

Aos Técnicos Henrique Sérgio Santos de Lira, do Laboratório de Química de Caruaru, Técnica Valquíria Barbosa, no Laboratório de Geotecnia de Caruaru, Técnico Everton Rodrigues Alves do Laboratório de Construção Civil de Caruaru, Técnicos Ezequiel Muniz, João Maria Cazuza da Rocha e Rinaldo Catunda do Laboratório de Construção Civil de Recife, e Técnica Danúbia Freitas do Laboratório de Biologia Molecular e Tecnologia Ambiental de Recife, pelo apoio, auxílio e ensinamentos durante os ensaios realizados no laboratório.

As Professoras Doutoradas Ana Cecília Vieira Nóbrega (UFRN) e Maria Victória Leal de Almeida Nascimento (UFPE), pelos conselhos oferecidos na qualificação da dissertação.

A Professora Sávia Gavazza dos Santos, por possibilitar as conexões entre laboratórios e abrir caminhos para que minha pesquisa pudesse ocorrer.

À FACEPE, Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de PE, pelos dois anos de bolsa que possibilitaram minha total atenção e foco à pesquisa.

E em especial, a minha Professora Orientadora Érika Pinto Marinho, Coordenadora do Laboratório de Química da UFPE de Caruaru. Agradeço por confiar em mim desde o princípio, me dedicar seu tempo e paciência, sem o seu apoio nada seria possível. Você foi um anjo da guarda durante estes anos de mestrado, sou imensamente grata por Deus ter lhe colocado no meu caminho.

“Quando atingimos o nosso ponto mais baixo é  
quando estamos abertos para a maior mudança.”

Avatar Aang

## RESUMO

A queima de algaroba para aquecer as caldeiras no APL de confecções do Agreste Pernambucano é uma prática comum na região, sendo responsável pela formação de grande quantidade de cinzas. A destinação deste resíduo em aterros é dispendiosa, sendo sua destinação geralmente em terrenos baldios ou coletado por agricultores para correção empírica do solo. Neste estudo, as cinzas de algaroba foram utilizadas para fabricação de tijolos de solo-cimento, utilizando solo do município de Caruaru e cimento Portland CPV-ARI. Os tijolos de solo-cimento (TSC) foram produzidos por prensagem uniaxial da mistura dos componentes da formulação (solo, cimento, água e cinzas de algaroba), com fator cimento: solo 1:6, variando-se o percentual da substituição da massa do solo pelo resíduo da cinza de algaroba na mistura em 0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50%. As cinzas de algaroba foram caracterizadas por massa específica, granulometria, FTIR, FRX, DRX, TGA/DTA e MEV. Foram realizadas análises de desempenho tecnológico (resistência à compressão, absorção de água e densidade), análise microestrutural (DRX, FTIR e MEV) e estudo de durabilidade nos TSC. A ferramenta estatística ANOVA foi empregada para avaliar o efeito do percentual de cinzas de algaroba nas propriedades dos tijolos produzidos. De acordo com os resultados de resistência à compressão e absorção de água, foi possível substituir o solo por cinzas de algaroba nos percentuais 5%, 10%, 20% e 35%. A incorporação de 50% de cinzas de algaroba resulta em desempenho inferior ao observado para os tijolos de solo-cimento de referência e aos valores estabelecidos por norma. Os tijolos TSC 5%, TSC 10% e TSC 20% e TSC 35% exibiram um aumento gradativo nas suas propriedades, com destaque para TSC 20% e TSC 35% que apresentaram os melhores desempenhos nos ensaios realizados. Estes resultados indicam que é possível aproveitar as cinzas de algaroba para produção de TSC até 20% de substituição. Conclui-se que esta tecnologia permite aproveitar as cinzas de algaroba de forma simples e barata para produção de tijolos que podem ser utilizados nas pequenas obras na própria lavanderia e reduz o impacto ambiental relacionado ao seu descarte indevido.

**Palavras-chave:** Resíduo industrial, caracterização microestrutural, resistência à compressão, durabilidade.

## ABSTRACT

The burning of algaroba to heat the boilers in the Agreste Pernambucano clothing industry is a common practice in the region, and is responsible for the formation of a large amount of ash. This waste is expensive to dispose of in landfills, and is usually disposed of on vacant lots or collected by farmers for empirical soil correction. In this study, algaroba ash was used to make soil-cement bricks, using soil from the municipality of Caruaru and CPV-ARI Portland cement. The soil-cement bricks (SCB) were produced by uniaxial pressing of the mixture of formulation components (soil, cement, water and algaroba ash), with a cement:soil ratio of 1:6, varying the percentage of soil mass replaced by the algaroba ash residue in the mixture by 0%, 5%, 10%, 20%, 35% and 50%. The algaroba ash was characterized by specific mass, granulometry, FTIR, FRX, DRX, TGA/DTA and SEM. Technological performance analysis (compressive strength, water absorption and density), microstructural analysis (XRD, FTIR and SEM) and durability study were carried out on the TSC. The ANOVA statistical tool was used to evaluate the effect of the percentage of algaroba ash on the properties of the bricks produced. According to the compressive strength and water absorption results, it was possible to replace the soil with algaroba ash in the percentages 5%, 10%, 20% and 35%. The incorporation of 50% algaroba ash resulted in lower performance than that observed for the reference soil-cement bricks and the values established by the standard. The TSC 5%, TSC 10%, TSC 20% and TSC 35% bricks showed a gradual increase in their properties, with TSC 20% and TSC 35% standing out as having the best performance in the tests carried out. These results indicate that it is possible to use algaroba ash to produce SPT with up to 20% substitution. The conclusion is that this technology makes it possible to use algaroba ash in a simple and inexpensive way to produce bricks that can be used in small construction projects in the laundry itself and reduces the environmental impact of improper disposal.

**Keywords:** Industrial waste, microstructural characterization, compressive strength, durability.

## Lista de Figuras

Figura 1- Municípios do APL Têxtil do Agreste de Pernambuco.....	23
Figura 2- Algaroba.....	28
Figura 3- Lenha da algaroba.....	29
Figura 4- Sistema de aquecimento de água em lavanderia de jeans, onde é possível observar a caldeira e a fornalha de alimentação de lenha.....	30
Figura 5- Processo de produção das cinzas de algaroba.....	31
Figura 6- Tijolo solo-cimento de dois furos. ....	40
Figura 7- Fluxograma das atividades metodológicas. ....	52
Figura 8- Cinza de Algaroba coletada na lavanderia in natura.....	53
Figura 9- Moinho de bolas.....	54
Figura 10- Cinza de Algaroba após beneficiamento .....	55
Figura 11- Mapa físico da região de coleta do Solo .....	56
Figura 12- Solo do município de Caruaru – PE.....	57
Figura 13- Amostras no dessecador.....	60
Figura 14- Execução do ensaio de granulometria. ....	62
Figura 15- Aparelho de determinação do ensaio de liquidez. ....	65
Figura 16- Amostras do ensaio de plasticidade.....	66
Figura 17- Ensaio da determinação da massa específica.....	68
Figura 18- Execução do ensaio de compactação do solo .....	69
Figura 19- Prensa manual do laboratório da UFPE.....	73
Figura 20- Tijolos de solo-cimento com cinza de algaroba após fabricação.....	76
Figura 21- Ensaio de Resistência à compressão. ....	77
Figura 22 – Fluxograma do ensaio de durabilidade e análise da qualidade da água de imersão dos TSC.....	80
Figura 23 - Difratograma de Raios-X da cinza de algaroba. ....	93
Figura 24 - Curvas do TG/TGA/DTG da cinza de algaroba. ....	94
Figura 25 - Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier da cinza de algaroba. ....	96
Figura 26 - Microscópio eletrônico de varredura da cinza de algaroba. ....	97
Figura 27 - EDS da cinza de algaroba. ....	98

Figura 28 - Difractometria de Raios-X (DRX) do tijolo solo-cimento com cinza de algaroba. ....	106
Figura 29 - Curvas do TG/TGA/DTG dos tijolos solo-cimento.....	107
Figura 30 - Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier de TSC (0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50%). ....	109
Figura 31 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 0%.....	110
Figura 32 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 5%.....	110
Figura 33 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 10%.....	111
Figura 34 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 20%.....	111
Figura 35 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 35%.....	112
Figura 36 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 50%.....	112
Figura 37 - EDS dos tijolos de solo-cimento com cinzas de algaroba, de acordo com as Figuras (B) do MEV de TSC.....	114

## Lista de Tabelas

Tabela 1- Classificação dos resíduos sólidos industriais.....	25
Tabela 2- Parâmetros químicos e físico-químicos de cinzas de algaroba determinados no extrato lixiviado, segundo NBR 10005 (2004), e extrato solubilizado, segundo NBR 10006 (2004).....	33
Tabela 3- Composição química (% em massa) das cinzas de algaroba.....	33
Tabela 4- Principais pesquisas com a utilização das cinzas de algaroba.....	35
Tabela 5- Comparação do custo por metro quadrado dos tijolos de solo-cimento e cerâmico convencional. ....	45
Tabela 6- Principais pesquisas com a fabricação dos tijolos solo-cimento.....	46
Tabela 7- Determinação do tempo de moagem a seco. ....	54
Tabela 8- Procedimento após peneiramento do solo.....	58
Tabela 9- Quantidade de amostra a ser tomada para realização dos ensaios de caracterização do solo.....	59
Tabela 10- Quantidade de amostra do solo para análise granulométrica.....	59
Tabela 11- Quantidade de amostra do solo utilizada em função da dimensão dos grãos maiores.....	60
Tabela 12- Determinação da massa seca de solo ao ar.....	61
Tabela 15- Classificação dos Solos HRB-AASH.....	64
Tabela 13- Classificação do solo através do IC.....	67
Tabela 14- Energias de compactação. ....	69
Tabela 16- Quantidade de materiais para fabricação de tijolos solo-cimento.....	74
Tabela 17 – Resultados do teor de umidade do solo utilizado. ....	82
Tabela 18 - Fluorescência de Raios-X da cinza de algaroba.....	91
Tabela 19 - Fluorescência de Raios-X da cinza de algaroba de Leloup (2013) e Melo (2012), recalculados considerando os valores de perda ao fogo desta pesquisa. ....	92
Tabela 20- Resistência à compressão dos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba em MPa, aos 7 e 28 dias. ....	99
Tabela 21 - Análise estatística ANOVA de resistência à compressão dos TSC. ....	100
Tabela 22 - Absorção de água (%) dos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba aos 7 e 28 dias.....	101
Tabela 23 - Análise estatística ANOVA da absorção de água dos TSC. ....	102

Tabela 24- Resultados de densidade dos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba em g/cm <sup>3</sup> .....	103
Tabela 25 - Análise estatística ANOVA da densidade dos TSC.....	105

## Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Resistência à compressão com a utilização de cinzas de algaroba em diversos materiais construtivos. ....	38
Gráfico 2 - Resultados do ensaio de limite de liquidez realizado na amostra de solo utilizado para fabricação dos tijolos de solo-cimento. ....	83
Gráfico 3 - Curva granulométrica do solo coletado. ....	85
Gráfico 4 - Curva granulométrica do solo coletado obtida por sedimentação. ....	85
Gráfico 5 - Curva granulométrica do solo coletado obtida por sedimentação. ....	87
Gráfico 6 - Tamanho das partículas por difração a laser da cinza de algaroba e do solo do município de Caruaru. ....	89
Gráfico 7 - Curva granulométrica a laser da cinza de algaroba.....	90
Gráfico 8 - Box plot de densidade dos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba aos 7 e 28 dias de cura. ....	104
Gráfico 9 - Perda de massa após o ensaio de durabilidade dos tijolos solo-cimento com cinzas de algaroba.....	117

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APL	Arranjos Produtivos Locais
CPII E	Cimento Portland composto com escória
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente do Estado de Pernambuco
CPV ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difratometria De Raios X
FRX	Fluorescência De Raios X
FTIR	Espectroscopia De Infravermelho Por Transformada De Fourier
IC	Índice De Consistência
IP	Índice De Plasticidade
LL	Limite De Liquidez
LP	Limite De Plasticidade
MEV	Microscópio Eletrônico De Varredura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCD	Resíduos De Construção E Demolição
RSI	Resíduos Sólidos Industriais
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
TGA	Termogravimetria
TSC	Tijolo solo-cimento

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	18
2	OBJETIVOS.....	21
2.1	OBJETIVO GERAL .....	21
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	21
3	REFERENCIAL TEÓRICO .....	22
3.1	APL DE CONFECÇÕES DE PERNAMBUCO.....	22
3.2	RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS .....	23
3.3	CINZAS DE ALGAROBA.....	27
3.3.1	Algaroba ( <i>Prosopis juliflora</i> ) .....	27
3.3.2	Produção da Cinza de Algaroba .....	29
3.3.3	Destinação da Cinza de Algaroba.....	31
3.3.4	Características Físico-químicas da Cinza de Algaroba .....	32
3.3.5	Principais Pesquisas Sobre Cinzas de Algarobas .....	34
3.4	TIJOLO SOLO-CIMENTO .....	38
3.4.1	Tijolo Solo-Cimento como Método Construtivo.....	38
3.4.2	Características Físico-químicas do Tijolo Solo-Cimento.....	40
3.4.3	Custo-benefício Relacionado a Fabricação do Tijolo Solo-Cimento .....	44
3.4.4	Principais Pesquisas Sobre Tijolo Solo-Cimento .....	45
4	METODOLOGIA .....	52
4.1	COLETA E BENEFICIAMENTO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	53
4.1.1	Coleta das cinzas de algarobas .....	53
4.1.2	Beneficiamento das cinzas de algaroba .....	54
4.1.3	Coleta do solo .....	56
4.1.4	Caracterização do solo.....	57
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MICROESTRUTURAL DAS CINZAS DE ALGAROBA.....	70
4.2.1	Área Específica.....	70
4.2.2	Granulometria.....	71
4.2.3	Fluorescência de Raios-X.....	71
4.2.4	Difratometria de Raios-X .....	71
4.2.5	Termogravimetria / Análise Térmica Diferencial .....	72
4.2.6	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier.....	72
4.2.7	Microscopia eletrônica de varredura .....	72
4.3	PRODUÇÃO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO .....	73

4.4	ANÁLISES DE DESEMPENHO TECNOLÓGICO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO.....	76
4.4.1	Resistência à compressão .....	76
4.4.2	Absorção de água.....	77
4.4.3	Densidade .....	78
4.5	ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....	79
4.6	ESTUDO DE DURABILIDADE DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO .....	79
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	82
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO .....	82
5.1.1	Teor de Umidade do solo.....	82
5.1.2	Determinação do limite de liquidez e limite de plasticidade.....	82
5.1.3	Ensaio de granulometria e sedimentação do solo .....	84
5.1.4	Ensaio de compactação.....	87
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS DE ALGAROBA .....	88
5.2.1	Área específica e granulometria .....	88
5.2.2	Fluorescência de raios-x .....	90
5.2.3	Difratometria de Raios-X .....	92
5.2.4	Termogravimetria / Análise Térmica Diferencial .....	93
5.2.5	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier.....	95
5.2.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	96
5.3	ANÁLISES DE DESEMPENHO TECNOLÓGICO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO.....	98
5.3.1	Resistência à compressão .....	98
5.3.2	Absorção de água.....	101
5.3.3	Densidade .....	103
5.4	ANÁLISE MICROESTRUTURAL DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO	105
5.4.1	DRX dos tijolos solo-cimento .....	105
5.4.2	Termogravimetria e análise térmica diferencial dos tijolos solo-cimento	106
5.4.3	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier nos tijolos solo-cimento.....	108
5.4.4	Microscopia eletrônica de varredura dos tijolos solo-cimento.....	109
5.5	ESTUDO DE DURABILIDADE DOS TIJOLOS .....	116
6	CONCLUSÃO .....	118
	REFERÊNCIAS .....	120

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades relacionadas ao setor têxtil no Agreste Pernambucano são essenciais para a economia da região, sendo de extrema relevância para a geração de renda e desenvolvimento social da população local. O Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, mais comumente conhecido como Sebrae (2014) descreve que esta atividade constitui um arranjo produtivo local, também conhecido pela sigla APL, importante no PIB estadual, entretanto, sua cadeia produtiva causa uma série de impactos ambientais associados ao seu elevado consumo de água (numa região de escassez hídrica), bem como pelo consumo de insumos químicos e emissões sólidas, líquidas e gasosas (Viana *et al.*, 2018).

Com relação aos insumos químicos remanescentes nas águas residuárias, a remoção da poluição é realizada em uma série de processos físico-químicos nas estações de tratamento de efluentes das lavanderias (Lorena *et al.*, 2016). As emissões gasosas são consequentes ao uso de matriz energética baseada na queima de biomassa de algaroba (planta nativa da região), realizada nas caldeiras das lavanderias para aquecer a água nas etapas de tingimento das peças de jeans. Associada a essa queima, observa-se um outro impacto que é a geração de cinzas de algaroba em grande volume dada a grande demanda energética do setor (Melo, 2012).

Nesse contexto, o grupo de pesquisa GPEMAT - Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais – UFPE Campus Caruaru - tem desenvolvido pesquisas em valorização de resíduos de lavanderias de jeans com cinzas de algaroba em materiais de construção, já tendo abrangido materiais cimentícios (Lima, 2019; Marinho, 2019; Pires, 2016), cerâmica vermelha (Almeida, 2015; Santos, 2014) e materiais asfálticos (Moura, 2017). A valorização dos resíduos visa não só redução de custos e desenvolvimento de materiais de construção ambientalmente amigáveis, mas também a imobilização-estabilização dos resíduos.

Tem-se observado que apesar de resultados promissores, sabe-se que quando se trata de materiais cimentícios, a incorporação de resíduos interfere em suas reações químicas de hidratação. Ao se voltar para materiais sinterizados, como o resíduo da cinza de algaroba, a matéria-prima tem a capacidade de desempenhar um efeito filler quando aplicado em conjunto com materiais construtivos com formatação cimentícia de base Portland (Macena, 2019).

Diante disso, torna-se promissor investigar a incorporação dos resíduos sólidos prioritários gerados no APL de Confeções Pernambucanos em matrizes de base terra crua. Dentre elas tem-se o adobe, os tijolos de solo prensado, solo-cimento prensados, solo-cal prensados, entre outras. Tijolos leves foram manufacturados com solo, lodo têxtil e cinzas em (Kumar; Ravichandran; Rajkumar, 2019; Chen; Wu, 2018; Velumani; Senthilkumar; Premalatha, 2016).

Os tijolos ecológicos à base de terra crua são de simples conformação, realizada por meio manual, no caso dos tijolos de adobe; e, de máquinas prensadoras de baixo custo, no caso dos tijolos prensados. Além disso, sua matéria-prima (terra) é de alta disponibilidade na região; bem como, necessitam de pouca água para conformação (Pisani, 2005). Os tijolos de base de terra-crua têm potencial de serem facilmente produzidos na própria lavanderia, bem como em parcerias com cooperativas para produção de casas em comunidades do entorno, espaços públicos, bem como espaços industriais. Assim, o uso de tijolos ecológicos pode compor um ciclo de destinação das cinzas de algaroba geradas nas lavanderias do APL para minimizar o problema com moradia na região, e contribuir para uma construção civil mais sustentável.

Neste aspecto, o estudo realizado por Melo (2018) mostrou que as cinzas de algaroba podem ser usadas na fabricação de blocos de solo-cal, após beneficiamento com lavagens em água, em substituição à cal, pois este resíduo é rico em potássio e cálcio e são ativos para reações pozolânicas. Diante do estudo de Melo, é possível propor também a sua utilização em tijolos sustentáveis de solo-cimento. O solo-cimento é uma evolução do adobe. A vantagem é que os aglomerantes naturais, de características variáveis e instáveis, foram substituídos pelo cimento, produto industrializado e de qualidade controlada.

O solo-cimento é um material alternativo de baixo custo, obtido pela mistura e compactação de solo, água e cimento (Ferreira et al., 2018). A massa compactada endurece com o tempo, e em poucos dias ganha consistência e durabilidade suficientes para diversas aplicações na construção civil, indo de paredes e pisos até muros de arrimo (ABCP, 2000; Ferreira et al., 2018). O solo-cimento pode ser produzido no local, diminuindo o custo da construção, ocasionando menor impacto ambiental, usando mão-de-obra da região. Além disso, produz habitações com conforto térmico, ajudando a diminuir a necessidade de ar condicionado e calefação, diminuindo a demanda por energia.

Diante deste contexto, esta proposta pretende produzir e avaliar o desempenho de tijolos ecológicos com cinzas de algaroba geradas no APL de confecções do Agreste Pernambucano e analisar a viabilidade desta tecnologia como forma de destinação final e agregar valor econômico a este resíduo industrial. Para isso, serão realizados ensaios de desempenho, análise microestrutural e ensaios de durabilidade.

Em Caruaru, está localizado um APL de confecções têxteis, que movimentam a economia da região realizando o beneficiamento de peças de jeans. Nas lavanderias, a lenha de algaroba é utilizada como matriz energética para aquecer as caldeiras e realizar os processos de lavagem e tingimento. Segundo as informações obtidas de empresa local estimasse que mensalmente são produzidas cerca de 4800 kg de resíduo de cinza de algaroba, sendo de base e topo. As cinzas geradas são ensacadas e direcionadas ao aterro ou descartadas de maneira incorreta, agredindo o meio ambiente. O aterro no momento, é considerado a melhor solução de descarte para estes resíduos, porém os aterros sanitários possuem limites de armazenamento, devido a isto, esta pesquisa tem o intuito de encontrar outra alternativa de descarte aos resíduos da cinza de algaroba.

A utilização de cinza de algaroba incorporada no tijolo de solo-cimento pode ser uma solução sustentável para destinar o resíduo, reduzindo o impacto negativo ao meio ambiente através do descarte incorreto ou custos com aterro sanitário. Além disso, possibilitando à construção civil um material com melhoramento de propriedades mecânicas, como a resistência à compressão e durabilidade.

Os tijolos foram conformados a partir da prensagem do solo com incorporação de percentuais variáveis de cinzas de algaroba, a fim de mensurar seu efeito no desempenho das propriedades macroscópicas dos tijolos, como resistência mecânica e absorção de água e durabilidade. Foi realizado um estudo microestrutural para compreender como o resíduo é fixado na matriz sólida, a partir de análises de DRX, FTIR e MEV.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Este trabalho tem como objetivo principal realizar a destinação adequada das cinzas de algaroba geradas no APL de confecções do agreste pernambucano a partir do seu uso para fabricação de tijolos de solo-cimento, a fim de ser utilizados como material de construção de baixo custo e desempenho tecnológico adequado.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Avaliar a viabilidade do uso de solo de Caruaru para produção de tijolos de solo-cimento;
- Investigar o percentual de algaroba que podem ser incorporados à massa de tijolos de solo-cimento a partir dos efeitos no desempenho tecnológico;
- Realizar estudos de FTIR, DRX e MEV para avaliar os efeitos da presença do resíduo na microestrutura de tijolos de solo-cimento;
- Avaliar a durabilidade dos tijolos com a presença de cinzas na matriz de solo-cimento.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 APL DE CONFECÇÕES DE PERNAMBUCO**

Os Arranjos Produtivos Locais, conhecidos pela sigla APL, são junções de empresas e empreendimentos existentes em uma área, responsáveis pelo desenvolvimento, geração de renda e economia local. O Sebrae (2014) define o APL como “uma aglomeração de empresas, localizadas em um mesmo território, que apresentam especialização produtiva e mantêm vínculos de articulação, interação, cooperação e aprendizagem entre si e com outros atores locais”.

O APL de confecções têxteis em Pernambuco começou a ser difundido no ano de 1990 como a Feira da Sulanca, sendo realizada em várias cidades, com a produção e venda de peças de roupas a baixo custo, estruturando um comércio internalizado, fazendo com que os produtos e retorno econômico circulassem entre seus bairros e cidades (Jornal do comércio, 2014).

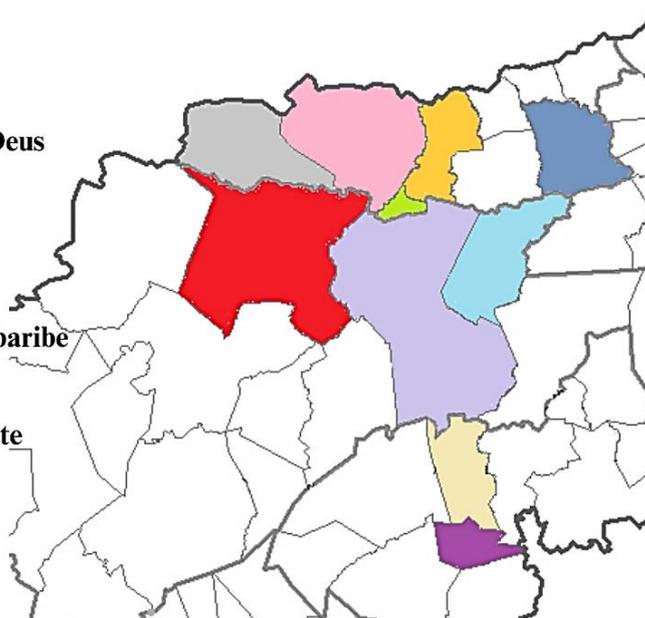
O Jornal do Comércio (2014) relata a história da Feira da Sulanca, iniciando-se no ano de 1970 em que Pernambuco apresentava um grande índice de produção e venda do algodão e a partir desta quantidade de matéria-prima a área têxtil fora de indústrias começou a ser explorado por mulheres na década de 80, onde elas reaproveitavam retalhos para a produção de peças, gerando renda às suas famílias utilizando um material que seria descartado. A partir da confecção em larga escala na década de 90 efetuada pelo trabalho manual feminino, a manufatura têxtil se expandiu de forma acentuada nos anos seguintes, até chegar no ano de 2014, se manifestando como o maior centro atacadista têxtil do país.

Fazem parte deste APL as cidades Agrestina, Brejo da Madre de Deus, Caruaru, Cupira, Riacho das Almas, Santa Cruz do Capibaribe, Surubim, Taquaritinga do Norte, Toritama e Vertentes, como é apresentado na Figura 1. Embora este empreendimento se localize em dez cidades diferentes, do ponto de vista econômico três municípios lideram o grupo em relação à questão econômica, onde Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama juntas possuem um produto interno bruto de 77% (Sebrae, 2013).

Figura 1- Municípios do APL Têxtil do Agreste de Pernambuco.

### Legenda

- Agrestina
- Brejo da Madre de Deus
- Caruaru
- Cupira
- Riacho das Almas
- Santa Cruz do Capibaribe
- Surubim
- Taquaritinga do Norte
- Toritama
- Vertentes



Fonte: A Autora (2024).

Os municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama, como apresentado na Figura 1 foram responsáveis por grande parte da propagação do serviço da atividade têxtil em Pernambuco, em que através desta disseminação, é comum que encontremos pessoas de outros estados e cidades que viagem para consumir os produtos gerados no agreste (Sebrae, 2013).

### 3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

Os resíduos sólidos costumam ser caracterizados e intitulados como “lixo” devido a sociedade não expor o hábito contínuo de reutilização. O descarte incorreto destes materiais é uma das grandes preocupações dos pesquisadores ambientalistas atualmente. Estes destacam a divergência entre resíduo e lixo a partir da ideia de que o resíduo pode agregar valor, ser reutilizado e se reintegrar à indústria, favorecendo o capitalismo. Já o lixo não apresenta mais utilidade e sua incorporação em outros produtos se demonstraria inviável. Neste caso, o termo adequado seria rejeito. (Marin e Sobarzo, 2010).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) 12.305/2010 no Art. 3º, são definidos resíduos sólidos como “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólidos ou semissólido”, assim como gases e líquidos que se encontrem em recipientes.

A geração de resíduos em termos de quantitativo e composição é influenciada por uma série de fatores, em relação a localidade ela varia de acordo com a densidade populacional, estrutura demográfica, cultura e práticas locais, regulamentações e políticas de gestão de resíduos e disponibilidade de infraestrutura de reciclagem e gestão de resíduos. No que se refere aos fatores socioeconômicos, podem ser influenciadas em relação a situação econômica, ao estilo de vida e padrões de consumo. As atividades executadas também podem interferir na geração de resíduos sólidos, por meio das atividades industriais, comerciais, tecnologia e inovação utilizadas (Abdel-Shafy; Mansour, 2018; Gidakos; Havas; Ntzamilis, 2006; Sankoh; Yan; Conteh, 2012).

O crescimento populacional de uma região está correlacionado a geração de resíduos sólidos. Tendo em consideração que a geração de renda populacional e a expansão do mercado dependem da utilização de bens de insumo para realização de produtos e por meio deles são obtidos os resíduos. Em razão disso, não seria possível suspender a produção de resíduos sem abalar toda uma cadeia produtiva, e consecutivamente, a população responsável pela sua produção e consumo. Devido a isto, é necessário encontrar a destinação ou tratamento adequado aos resíduos sólidos gerados (Santos, 2011).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, na lei 12.305/2010 no Art. 13º classifica os resíduos sólidos quanto a origem em: domiciliares, de limpeza urbana, sólidos urbanos, de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, dos serviços públicos de saneamento básico, industriais, de serviços de saúde, da construção civil, agrossilvopastoris, de serviços de transportes e de mineração.

A partir disso, ainda no artigo 13, a PNRS 12.305/2010 fornece a definição de resíduos industriais como aqueles “gerados nos processos produtivos e instalações industriais”, em que a Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 313/2002 corrobora esta caracterização no Art. 2º, afirmando que se classifica como resíduo sólido industrial todo descarte oriundo de atividades industriais nos estados sólido, semi-sólido, gasoso e líquido, de forma que estejam contidos e não seja possível o seu direcionamento por vias de esgoto público. Requerendo soluções alternativas de destinação final.

A norma técnica 10004 (2004), assim como a lei 12.305/2010 classifica os resíduos sólidos industriais quanto a periculosidade em:

Tabela 1- Classificação dos resíduos sólidos industriais.

CLASSE	DEFINIÇÃO
I	Perigosos: resíduos que apresentam periculosidade, como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.
II A	Não perigosos (Não Inertes): os resíduos podem ter propriedades, como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
II B	Não perigosos (Inertes): resíduos que, segundo a ABNT NBR 10007, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Fonte: NBR 10004 (2004).

As cinzas de algaroba, como resíduo, se encaixam na classe II B da classificação de resíduos sólidos, como consta na NBR 10004 (2004), e, portanto, são materiais inertes por não apresentar contaminantes que podem causar toxicidade e demonstrar variação química, física e biológica, não representando riscos significativos para o meio ambiente ou a saúde humana.

A destinação correta dos resíduos sólidos industriais é de responsabilidade compartilhada entre o governo, os geradores do resíduo e a população que utiliza de seus produtos, devido ao fato que o resíduo em algum momento de sua vida útil foi direcionado de forma individualizada em suas mãos. O desenvolvimento das atividades industriais faz com que o volume de resíduos fabricados seja ampliado com base no aumento da população ou do mercado de atuação. Desta maneira, a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece por meio de suas diretrizes e orientações gerais que seja realizado o aproveitamento dos resíduos sólidos, de forma que sejam reaproveitados na sua cadeia produtiva ou implementados em outros materiais, como método alternativa do descarte de resíduos (PNRS 12.305, 2010).

A lei PNRS 12.305/2010 no Art. 3º apresenta por meio disso o conceito do gerenciamento de resíduos sólidos, como “conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”, seguindo as exigências do plano de gerenciamento de resíduos sólidos existente no município.

A fim de que o gerenciamento de resíduos ocorra de maneira que garanta a redução de danos ao meio ambiente, a empresa responsável pela destinação final do resíduo deve assegurar a integridade da área de descarte. Transportando os resíduos com tecnologia que ofereça segurança até o aterro sanitário. O município de Caruaru possui um aterro sanitário licenciado Classe II A, sendo encarregado de acomodar os resíduos sólidos da população e de algumas cidades próximas como Santa Cruz do Capibaribe, o aterro recebia aproximadamente um volume de 330 toneladas/dia de resíduos tipo II. Localiza-se a 10,8 km do centro da cidade, no sítio Juriti S/N, zona rural da cidade, próximo ao Polo Comercial e ao Autódromo Ayrton Senna, no limite da BR 104. O aterro se encontra com suas atividades estagnadas devido a estudos de ampliação, durante este período, os resíduos sólidos tem sido redirecionados a CTR Caruaru, um empreendimento privado construído na cidade (Bello *et al.*, 2023).

Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2022) o aterro é utilizado como método de disposição final afim de evitar que lixiviações e gases tóxicos causem agressões as demais áreas. Todavia, antes que isso venha a ocorrer, deve ser realizada um processamento de triagem que separe os resíduos que ainda possam ser utilizados como matérias-primas na indústria da reciclagem.

Segundo informações de empresa local, no momento, as cinzas de algaroba produzidas em lavanderias na região de Caruaru são ensacadas e armazenadas a fim de posteriormente serem direcionadas ao aterro devido ao fato de serem considerados como rejeitos, ou seja, um produto o qual não restam mais possibilidades viáveis de reutilização. Em razão da disseminação do mercado de reutilização de resíduos, há possibilidades amplas de uso e geração de produtos que variem em áreas como artesanato (fabricação de móveis), setor alimentício (novas embalagens de garrafas pet), setor industrial (embalagens de papelão ou papel) e construção civil (resíduos como matéria-prima construtiva).

A lei PNRS 12.305/2010 no Art. 42º propõe que haja o desenvolvimento de pesquisas utilizando-se de tecnologias limpas relacionadas aos resíduos sólidos, que trabalharia com a ideia da incorporação de resíduos que previamente não haveria valor para reutilização dentro de materiais construtivos, as tecnologias se enquadrariam dentro da linha de estudo de materiais sustentáveis relacionados a construção civil, englobando incentivos de desenvolvimento de gestão ambiental por meio de reaproveitamento e materiais construtivos de fonte limpa com melhorias de desempenho.

Dentro desta linha de pesquisa foram encontradas pesquisas nacionais que utilizam cinzas como resíduos sólidos dentro da construção civil, os temas mais analisados neste meio variam entre a utilização do resíduo de cinza de casca de arroz, cinza de biomassa, resíduos de palha de arroz, cinzas de engaço de dendê e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (Azevedo *et al.*, 2019; Ferreira, *et al.*, 2018; Ferreira, *et al.*, 2019). Assim como pesquisas desenvolvidas internacionalmente (A. *et al.*, 2015; Coelho, *et al.*, 2019; Faria; Holanda, 2013).

### **3.3 CINZAS DE ALGAROBA**

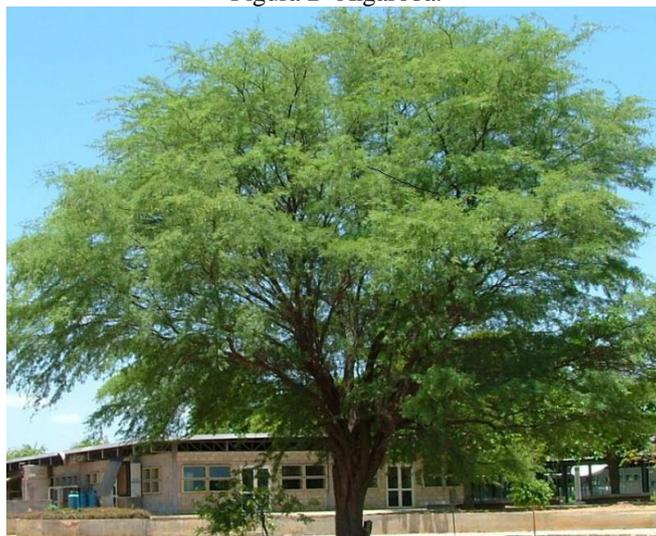
#### **3.3.1 Algaroba (*Prosopis juliflora*)**

A cidade de Serra Talhada, localizada no Sertão Pernambucano, foi escolhida no ano de 1942 como a primeira receptora brasileira de cultivo da planta de algaroba (*Prosopis juliflora*) devido às condições da região semiárida proporcionarem um ambiente similar o qual a localidade nativa da planta fornecia (LIMA, 1984). Ela começou a ser cultivada no Nordeste pela algaroba apresentar como característica um alto índice de reprodução, se tornando uma espécie ideal a ser utilizada em reflorestamento, além disso, de acordo com Ribaski (2000, p. 17) a algaroba supre “a deficiência nutricional de suas pastagens, têm motivado o plantio dessa leguminosa, principalmente para produção de vagens, visando a suplementação alimentar dos animais no período seco”.

Dentre as mais de 40 espécies conhecidas da algaroba, é possível se encontrar categorias que variam desde árvores, arbustos, espécies com e sem a presença de espinhos. Segundo Ribaski et al. (2009) o gênero *Prosopis*, são distribuídas em três continentes: América, Ásia e África. No continente americano estão as maiores concentrações dessas espécies, ocorrendo nas regiões ocidentais mais secas, desde o Sudeste dos Estados Unidos até a Patagônia. Na América do Sul, são encontradas aproximadamente 70 % das espécies do gênero e, dessas, 93% são nativas da Argentina.

A algaroba da espécie *prosopis juliflora*, como ilustrada na Figura 2, é caracterizada por Ribaski et al. (2009) como uma árvore que apresenta caule tortuoso, tronco ramificado, que em sua maior parte das vezes possui espinhos e demonstra uma casca rugosa. Em relação a sua copa possui certa de 8 a 12 metros de diâmetro, com folhas bipinadas, seus folíolos são pequenos, alongados e suas ramificações podem ser peciolados.

Figura 2- Algaroba.



Fonte: Ribaski et al. (2009).

A planta tem um índice de propagação muito alta nas áreas que é introduzida, um dos principais motivos citados por Lima e Pasiecznik (2006) são os animais que se alimentam das vagens geradas pela algaroba, no momento da alimentação as sementes são espalhadas na terra ou posteriormente, por meio da liberação de excremento. Fazendo o processo de dispersão de sementes ocorrer de forma natural, e a germinação ter a possibilidade de ocorrer no mesmo local de consumo ou em uma localidade distante.

A partir do momento em que CPRH, Agência Estadual de Meio Ambiente do Estado de Pernambuco, entendeu que a lenha de algaroba como apresentada na Figura 3 poderia ser utilizada pelas lavanderias em pequena escala como lenha para acender as caldeiras devido ser uma planta que tem facilidade em se propagar, segundo Mota (2014) possuindo um alto desempenho calorífico. Além disso, a algaroba possui alta resistência às condições climáticas e vegetativas da região do Nordeste, o que faz a espécie se sobressair as plantas da região. A algaroba é uma espécie não-nativa, e por isso não interfere na fauna regional. Foi publicado a Instrução Normativa CPRH N° 007 (2006, p. 2), que de acordo com o Art. 2° §5° afirma que “nas florestas plantadas com espécies exóticas, as atividades florestais, a colheita e a comercialização de produtos e subprodutos florestais ficam isentas da aprovação da CPRH, desta forma, comunicando previamente o CPRH da realização das atividades”.

Figura 3- Lenha da algaroba



Fonte: A Autora (2024).

### 3.3.2 Produção da Cinza de Algaroba

No APL de confecções têxtis localizado no município de Caruaru, é utilizada a lenha da algaroba para o sistema de tingimento das peças de tecido. A queima da planta é utilizada como alternativa das indústrias para evitar o custo com energia elétrica e o gás natural, devido a algaroba ser uma das espécies com livre acesso à comercialização da região. Segundo informações de empresa local, a lenha utilizada nesta lavanderia é obtida no sertão, nas cidades de Floresta e em Sertânia.

Além da lenha de algaroba, de acordo com informações da empresa local, a lavanderia utiliza resíduos de madeira de mobiliário (RMM) como sofá, guarda-roupa e outros móveis para realizar o aquecimento da água na caldeira. A indústria de móveis faz uso exclusivamente da parte central da tora para a produção de mobiliário de madeira. Os restantes materiais resultantes desse processo são categorizados em três grupos distintos: serragem, cavacos e lenha, sendo estes os maiores subprodutos gerados na maioria das empresas do setor madeireiro (Sebrae, 2015).

A porcentagem utilizada varia de acordo com a época do ano, nos períodos de verão são utilizadas 70% da lenha da algaroba e 30% do RMM no momento de aquecimento da água da caldeira, enquanto nas épocas de inverno esta porcentagem muda para 50% de cada item. O uso da lenha de algaroba decai neste período devido a dificuldade de se obter a lenha, resultando no aumento do preço da lenha de algaroba. As cinzas de algaroba foram obtidas durante o período de inverno na lavanderia local.

Devido ao contexto econômico da região ter uma base solidificada em volta da venda e produção das peças de tecidos por meio das lavanderias, e todas as lojas que compõem o polo têxtil de Caruaru, se torna indispensável a utilização de uma fonte de matéria-prima para que seja realizado o aquecimento da caldeira (Melo, 2012), desta maneira, não se pode evitar a geração de cinzas sem desestabilizar toda uma cadeia produtiva.

De acordo com informações de empresa local, para todo esse conjunto de atividades ser possível de ocorrer, é necessário que haja o aquecimento de água pela caldeira, onde a lenha é introduzida na fornalha como é apresentada na Figura 4 enquanto as peças são colocadas nos maquinários existentes na lavanderia. Durante toda a metodologia, sempre que for necessário é repetido o processo de introdução de lenha dentro da caldeira.

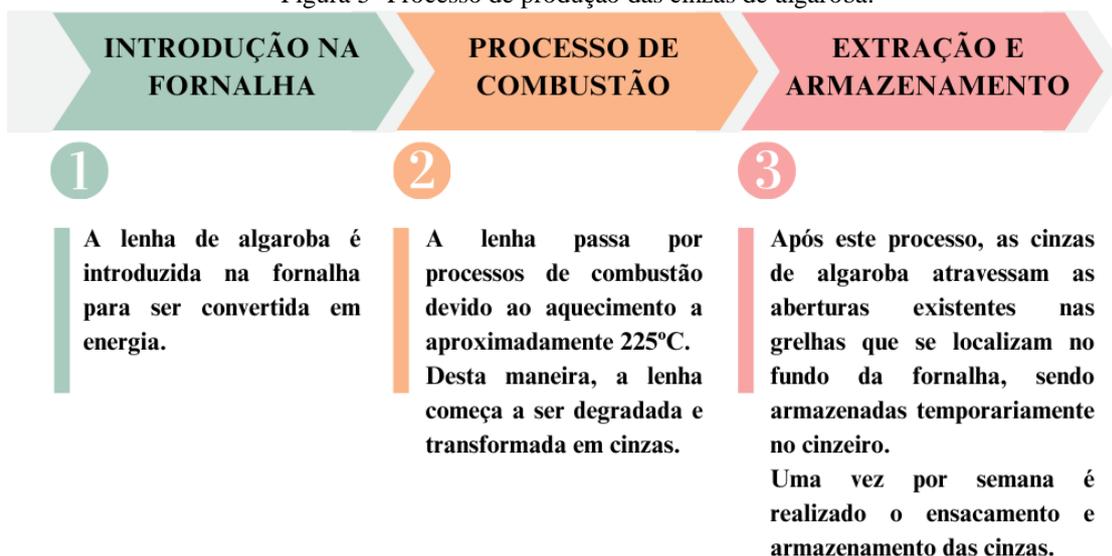
Figura 4- Sistema de aquecimento de água em lavanderia de jeans, onde é possível observar a caldeira e a fornalha de alimentação de lenha.



Fonte: A Autora (2024).

O processo de produção da cinza de algaroba depende da realização de três etapas, envolvendo a introdução das cinzas na fornalha, do seu processo de combustão e a extração das cinzas da fornalha e seu armazenamento. Analisado por meio de um fluxograma na Figura 5.

Figura 5- Processo de produção das cinzas de algaroba.



Fonte: A Autora (2024).

A cada mês, a lavanderia estudada adquire um caminhão com cerca de 40 metros cúbicos de lenha de algaroba para ser utilizado na fornalha. Estimasse que nesta empresa mensalmente são tingidas 50.000 peças de jeans, resultando na geração de 4.800 kg de cinza. De acordo com o Portal G1 (2024), considerando-se que existem mais de 800 lavanderias na região que também utilizam a algaroba para aquecer as caldeiras, fica evidente o enorme volume de resíduo gerado mensalmente.

### 3.3.3 Destinação da Cinza de Algaroba

De acordo com informações obtidas de empresa local as cinzas de algarobas geradas na lavanderia são recolhidas uma vez na semana, logo após a última remessa de material esfriar, o resíduo é extraído e armazenado em sacos na área externa com coberta, para que as cinzas não recebam impurezas nem se espalhem causando danos ao meio ambiente.

Neste caso a responsabilidade de direcionamento do resíduo gerado compartilhada entre a lavanderia que trabalha com a matéria-prima e a prefeitura, de acordo com a lei PNRS 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, de forma que há o direcionamento do material gerado ao aterro sanitário localizado no município de Caruaru, percorrendo aproximadamente 8,2 km de distância entre os dois pontos. No aterro, as cinzas de algaroba passam pelo processo de triagem antes de ser aterrado com outros rejeitos descartados.

Apesar do aterro sanitário ser uma destinação adequada para resíduos como a cinza de algaroba de acordo com o PNRS (2010) e a resolução CONAMA n° 313/2002, o aterro sanitário possui limite de capacidade em quantidade de rejeitos recebidos, sendo que o aterro de Caruaru não suporta apenas a capacidade do seu município pois atua recebendo de cidades próximas como Santa Cruz do Capibaribe e Toritama. Além do fato de existir a presença do descarte incorreto das cinzas de algaroba, sem haver o direcionamento ao aterro, que não pode ser computado em quantidade.

Desta maneira, haver a possibilidade de direcionar o resíduo da cinza de algaroba para área da construção civil, na qual, além de ser incorporado e ser transformado em subproduto rentável, como o tijolo solo-cimento. Garantindo que este material apresente uma destinação adequada em sua totalidade e minimize a quantidade de material recebido pelo aterro sanitário.

### 3.3.4 Características Físico-químicas da Cinza de Algaroba

As cinzas de algaroba obtidas na lavanderia se encontram *in natura*, ou seja, sem nenhum tratamento e apresentando partículas com diversas granulometrias em sua composição. Para haver a caracterização das cinzas de algaroba em seus ensaios e técnicas deve-se ser realizado o seu beneficiamento.

As características físicas e químicas da algaroba são responsáveis por suas propriedades, definindo a finalidade dos resíduos. Ferreira *et al.* (2019, p. 1) descrevem as cinzas como materiais “ricos em compostos de base cálcio, silicosos ou sílico-aluminosos”.

Na área da construção civil resíduos inertes podem ser incorporados como agregados em materiais de construção como concretos, cimentos e argamassas ou utilizados como matéria-prima para tijolos (Cincotto, 1988). Santos (2007) em sua pesquisa, estudou a utilização de resíduos como material de aterro em obras de solo reforçado, apresentando que em alguns casos os resíduos podem ser usados compactados junto a outros materiais para aterrar áreas e preenchimentos de vazios, fornecendo estabilidade e suporte em terrenos ou estruturas.

Em sua pesquisa a respeito da adição de cinza de lenha de algaroba em massa cerâmica para revestimento, Santos (2014) verificou os níveis de lixiviação e solubilização das cinzas de algaroba apresentados na Tabela 2. Ele constatou que em ambas as comparações realizadas, as concentrações se apresentaram inferiores aos VMP,

que seriam os valores máximos permitidos, desta maneira, a cinza de algaroba se apresenta como um material sem toxidez, sendo classificada como um resíduo inerte – II B de acordo com a Tabela 1.

Tabela 2- Parâmetros químicos e físico-químicos de cinzas de algaroba determinados no extrato lixiviado, segundo NBR 10005 (2004), e extrato solubilizado, segundo NBR 10006 (2004).

Parâmetros	Lixiviação			Solubilização		
	C	VMP	Md	C	VMP	Md
Alumínio	Nd	Nd	Nd	0,300	0,200	0,160
Bário	Nd	70,000	0,130	Nd	0,700	0,450
Cádmio	Nd	0,500	0,050	Nd	0,005	0,004
Chumbo	0,100	1,000	0,010	0,100	0,010	0,002
Cloreto	Nd	Nd	Nd	Nd	250,000	92,500
Cobre	Nd	Nd	Nd	Nd	2,000	0,740
Cromo total	Nd	5,000	0,295	0,020	0,050	0,050
Manganês	Nd	Nd	Nd	0,050	0,100	0,022
Mercurio	Nd	0,100	0,020	Nd	0,001	<0,001
Zinco	Nd	Nd	Nd	Nd	5,000	0,286
pH inicial	9,9			9,0		
pH final	4,5			8,1		

Os valores de VMP (valor máximo permitido, em mg/l), Md (mínimo detectável em mg/l), Nd (não detectável) e C (concentração em mg/l) demonstram que em ambos os ensaios a concentração se demonstrou menor que o valor máximo permitido.

Fonte: Santos (2014).

De acordo com Kumar e Chandrashekan (2016), as cinzas de algaroba apresentam uma composição química variada na Tabela 3, na qual o óxido de cálcio e óxido de potássio são componentes predominantes, representando 68,0% e 15,5%, respectivamente. Além disso, as cinzas de algaroba também costumam apresentar trióxido de enxofre, óxido de magnésio, pentóxido de fósforo e dióxido de silício, em baixas concentrações.

Tabela 3- Composição química (% em massa) das cinzas de algaroba.

Caracterização	CaO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Outros
Algaroba	68,0	15,5	4,5	2,9	2,8	1,0	1,3

Fonte: Kumar e Chandrashekan (2016).

Na pesquisa de Ferreira *et al.* (2019) a cinza de algaroba apresentou composição similar, com a predominância do composto de CaO em 77,31%, enquanto os percentuais de K<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> encontrados foram 8,57%, 3,39% e 1,55%, respectivamente. O

caráter básico das cinzas é atribuído à alta concentração de cálcio, o que motivou seu uso em argamassas de cal (Melo, 2012) e blocos de solo-cal (Melo, 2018). A presença das cinzas de algaroba influencia as propriedades físicas de materiais construtivos, modificando a resistência mecânica, resistência a cloretos, durabilidade de argamassa e concreto, permeabilidade ao ar e carbonatação (Ferreira *et al.*, 2019). Este efeito tem sido acompanhado de melhora na microestrutura devido a efeito *filler* atribuído aos materiais muito finos como as cinzas de algaroba (Cordeiro *et al.*, 2008).

Além disso, de acordo com Pires (2016), as cinzas de algaroba apresentam uma capacidade moderada de absorção de água, essa propriedade pode ser benéfica em materiais como tijolos e argamassas, pois ajuda a regular a umidade, reduzindo problemas relacionados à expansão e retração. A cinza de algaroba também tem a capacidade de estabilizar solos argilosos ou expansivos, podendo melhorar a resistência e a durabilidade do solo, tornando-o mais adequado para a construção de estradas, fundações e outros projetos (Cavalcanti, 2016).

As análises físicas das cinzas são realizadas a partir dos ensaios de massa específica e granulometria. O ensaio granulométrico é uma análise, que tem como objetivo determinar a distribuição granulométrica das partículas presentes. Essa distribuição é fundamental para a caracterização das propriedades físicas do material, uma vez que a forma e o tamanho das partículas influenciam diretamente nas propriedades mecânicas, como a resistência e a permeabilidade (ABNT NBR 7181, 1984). A granulometria das cinzas de algaroba pode apresentar diferentes tamanhos de partículas, dependendo do processo de queima e da forma como as cinzas são coletadas e armazenadas, para gerar efeito *filler* no sistema, suas partículas deveriam ser menores do que 75  $\mu\text{m}$ .

Cavalcanti (2016) afirma que a cinza de algaroba tem a função de preencher os vazios entre os grãos de cimento e solo durante a mistura do tijolo solo-cimento. Desta forma, melhorando a resistência à compressão e absorção de água do tijolo solo-cimento.

### 3.3.5 Principais Pesquisas Sobre Cinzas de Algarobas

As cinzas provenientes da queima da lenha de algaroba já foram tema de estudo em algumas pesquisas na área da construção civil. A Tabela 4 foi elaborada com o intuito de reunir pesquisas com relação na incorporação das cinzas de algaroba em diferentes materiais da construção civil, incluindo seu uso em argamassas, tijolos e concretos, por

meio da adição ou substituição parcial. Estas pesquisas destacam o potencial e os benefícios dessa incorporação, contribuindo para o avanço do conhecimento na área da construção civil e destacando a importância dessa matéria-prima alternativa e sustentável.

Tabela 4- Principais pesquisas com a utilização das cinzas de algaroba

Autor	Título	Material de Construção	Resultados
Melo (2012)	Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano	Argamassas com traço de 1:2:9 (cimento, cal, areia), com adição de 10%, 20%, 30% e 40% de cinzas de algaroba em relação à massa de cimento	Argamassas com adição de cinzas tiveram desempenho superior, tanto no estado fresco quanto no endurecido. Porém, os percentuais de melhora foram pouco expressivos, resultando na classificação de todos os percentuais na mesma classe da argamassa padrão
Mota (2014)	Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de algaroba ( <i>prosopis juliflora</i> ) moldado sob pressão	Foi utilizado traço de 1:4:0,4 (cimento, areia, brita), com a incorporação de 5%, 10%, 20%, 30% e 40% de cinzas em relação à massa de cimento	O concreto com incorporação de 20% de cinza de algaroba foi mais efetivo. Para esse traço, adotando relação a/c 0,4 e cura úmida, resistência à compressão da ordem de 18 MPa foram obtidas

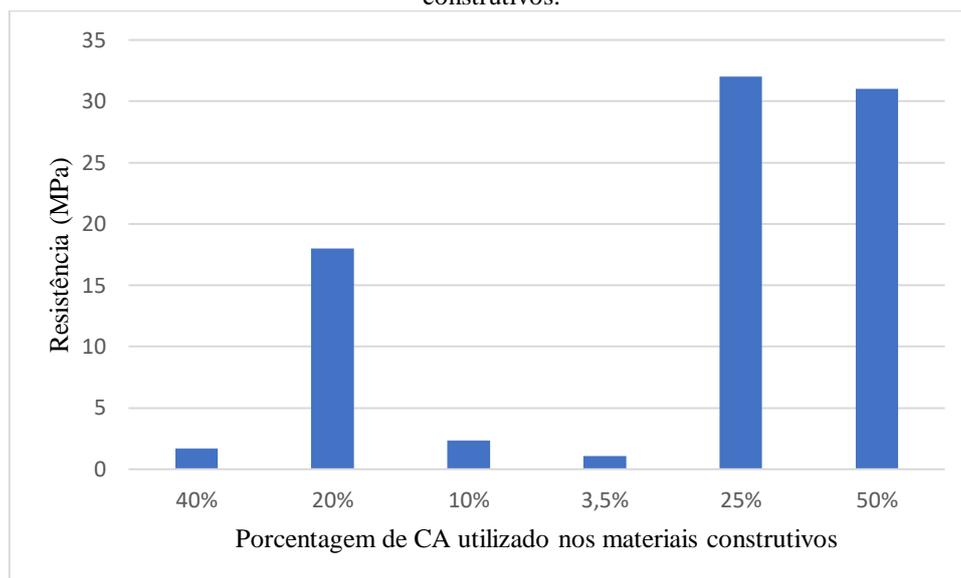
<p>Cavalcanti (2016)</p>	<p>Avaliação da resistência a compressão simples e absorção de água de tijolos vazados de solo-cimento produzidos a partir da substituição parcial do cimento pela cinza da lenha de algaroba</p>	<p>Substituição parcial do cimento pelas cinzas de algaroba em 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%</p>	<p>Os tijolos fabricados com 10% de cinza apresentaram maior resistência à compressão. A absorção de água indicou que todas as amostras obtiveram valores médios menores que 20% e valores individuais menores que 22%</p>
<p>Moura (2017)</p>	<p>Incorporação de cinzas de algaroba geradas no APL de confecções do agreste pernambucano em concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ</p>	<p>Concreto betuminoso com adição das cinzas de algaroba em 3,0%, 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%</p>	<p>Os resultados apontam que a incorporação de 3,5 a 4,0% de cinza na composição CBUQ apresentou melhorias nas propriedades mecânicas de resistência à tração, módulo de resiliência, fadiga e dano a água</p>
<p>Lima (2019)</p>	<p>Concretos auto-adensáveis com incorporação de cinza de madeira da algaroba como fíler alternativo</p>	<p>Concreto auto-adensáveis com substituição parcial das cinzas de algaroba em 0%, 25%, 50%, 75%</p>	<p>Os resultados confirmaram que a cinza da lenha de algaroba é um material viável para incorporação no CAA em até 50%</p>

<p>Lima <i>et al.</i>, (2022)</p>	<p>Concretos autoadensáveis com cinzas ricas em cálcio como <i>fíler</i> alternativo e materiais secos aquecidos para simular mistura sob clima quente</p>	<p>Substituição parcial de 50% do <i>fíler</i> calcário por cinzas de algaroba no concreto autoadensável</p>	<p>A substituição parcial de 50% do <i>fíler</i> calcário pelas cinzas de algaroba preservou as resistências à compressão e permeabilidade das misturas com 100% de <i>fíler</i> calcário. O uso de 50% de cinzas também demandou menos água e superplastificante em condição simulada de mistura sob clima quente</p>
---------------------------------------	--	--	--

Fonte: A Autora (2024).

Através da Tabela 4, é destacado que a incorporação de cinzas de algaroba tem mostrado efeitos positivos em vários materiais de construção, incluindo argamassas, concretos, tijolos de solo-cimento e concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). As propriedades que costumam ser afetadas em materiais cimentícios pela incorporação de cinzas de algaroba incluem a resistência à compressão, a absorção de água, a resistência à tração, o módulo de resiliência, a resistência à fadiga e a permeabilidade. O Gráfico 1 apresenta a resistência à compressão com a utilização de cinzas de algaroba nos materiais construtivos apresentados da Tabela 4.

Gráfico 1 – Resistência à compressão com a utilização de cinzas de algaroba em diversos materiais construtivos.



Fonte: A Autora (2024).

Os efeitos nas propriedades variam dependendo do material construtivo. Por exemplo, a resistência à compressão do concreto e dos tijolos de solo-cimento tende a melhorar com a incorporação de cinzas de algaroba, enquanto a absorção de água dos tijolos de solo-cimento tende a diminuir. Os percentuais de incorporação de cinzas de algaroba que costumam ser adequados nos sistemas estudados variam de 5% a 50%, dependendo do material e da propriedade desejada. Quanto à durabilidade, os estudos indicam que a incorporação de cinzas de algaroba pode melhorar a durabilidade dos materiais de construção, mas é necessária a execução de novas pesquisas para confirmar esses resultados.

No entanto, é importante destacar que ainda há materiais construtivos que não foram estudados com a incorporação de cinzas de algaroba, como tijolos cerâmicos e tijolos solo-cimento com a substituição parcial do solo. Cavalcanti (2016) executou uma pesquisa a respeito da incorporação de cinzas de algaroba no tijolo solo-cimento, porém realizando a substituição parcial do cimento.

### 3.4 TIJOLO SOLO-CIMENTO

#### 3.4.1 Tijolo Solo-Cimento como Método Construtivo

O setor da construção civil é um dos causadores pelos danos ambientais existentes, devido a quantidade de recursos naturais que são consumidos diariamente nas etapas das

obras, através da produção de materiais construtivos pelo recolhimento de matérias-primas, a execução ou demolição de estruturas (Callejas *et al.*, 2021).

O tijolo de solo-cimento é um material de construção que possui raízes antigas e é conhecido por suas características duráveis e sustentáveis. Sua história remonta a civilizações antigas em várias partes do mundo, onde versões primitivas desse material eram utilizadas para a construção de estruturas. Guillaud (2007) descreve em sua pesquisa, foram consultados os registros do corpus enciclopédico de atlas de arqueologia, história, geografia e arquitetura. Através dessa fonte, foram identificadas as primeiras evidências históricas da produção de tijolos de terra na região do Oriente Médio e no Levante, assim como na Anatólia, Grécia, Balcãs e Egito. Além disso, a pesquisa revelou a presença de arquiteturas construídas com tijolos crus e taipa em terras do Norte da África, influenciadas pelas culturas cartaginesa e romana, na Península Ibérica, com influência da cultura moura, na Itália, com influências do Levante, Anatólia e cultura greco-romana, e nas terras da Europa continental e setentrional, onde foram identificadas arquiteturas de madeira e taipa, construídas sobre uma base cultural que remonta às eras danubianas e vikings, em territórios de culturas nórdicas e anglo-saxãs.

O tijolo solo-cimento é utilizado como um método construtivo não-estrutural alternativo na construção civil, pois em sua composição a quantidade de cimento é reduzida. Este método construtivo utiliza uma mistura de matérias-primas essenciais, tais como solo, cimento, água e, quando necessário, aditivos e pigmentos, para criar um material de construção versátil e econômico (ABNT NBR 10833, 2012).

Por usar matéria-prima de baixo consumo de energia e baixa quantidade de cimento Portland, é um material mais sustentável e com menor nível de agressão ao meio ambiente. A ABNT NBR 8491 (2012) fornece uma descrição do tijolo de solo-cimento, referindo-se como elemento de alvenaria resultante de uma mistura homogeneizada, compactada em prensa hidráulica e endurecida, na qual tem como exigência que sua altura (H) seja menor que a largura (L).

A moldagem do tijolo é retangular, porém suas dimensões podem variar, além do modelo da prensa, que pode proporcionar tijolo maciço ou vazado como demonstra a Figura 6, o que influencia no peso final do produto. Com sua finalização, os tijolos são mantidos em local protegido e úmido durante um período de cura, geralmente por 14 dias, tempo necessário para que o cimento possa hidratar e os tijolos ganhem resistência, podendo começar a serem utilizados (Cherdhirunkorn *et al.*, 2020).

Figura 6- Tijolo solo-cimento de dois furos.



Fonte: A Autora (2024).

No mercado são utilizadas prensas de compactação manuais ou hidráulicas. As prensas diferem em custo de maquinário, capacidade de fabricação de tijolos por remessa, características operacionais e a pressão que pode ser exercida durante a disposição da energia de compactação. No caso da prensa hidráulica, é permitido que haja uma produção automatizada de tijolos solo-cimento (Pariz e Pires, 2005). Quanto à aparência, os tijolos solo-cimento como apresentado na Figura 6 podem ter uma textura rústica e uma cor que varia de acordo com o solo utilizado.

### 3.4.2 Características Físico-químicas do Tijolo Solo-Cimento

O tijolo solo-cimento possui variáveis que influenciam na sua fabricação e resultado. A seleção do solo é um ponto principal. Sua composição afeta diretamente as propriedades físicas e químicas do tijolo. O solo deve apresentar baixo teor de matéria orgânica. Morais e Queiroz (2021) descrevem o solo como “uma camada material de consistência variável encontrada acima da litosfera e abaixo da atmosfera contendo minerais, matéria orgânica, água, soluções aquosas e outros componentes”, no qual os componentes vão se modificar dependendo da localização e clima de onde forem recolhidos. Estes componentes químicos que caracterizam o solo são os responsáveis pela forma de sua utilização, podendo ser em uso agrônomo, na área da construção civil ou até medicinal.

O solo, também chamado de terra crua, devido ao fato de ser encontrado com facilidade e possuir um baixo custo relacionado a outros tipos de materiais construtivos,

se tornou uma matéria-prima excelente para ser utilizada em produtos da área da construção civil associada ao cimento ou outros aditivos (Cunha *et al.*, 2008).

Segundo Silva (2016), as propriedades físicas responsáveis por caracterizar o tijolo solo-cimento trabalhado para que adquira desempenho são a resistência à compressão, granulometria, teor de umidade, absorção de água, energia de compactação, densidade, processo de cura e durabilidade. A resistência à compressão do tijolo solo-cimento pode variar na faixa de 2,5 a 10 MPa, devendo apresentar resistência mínima de 2 MPa, conforme NBR 8491 (2012) para uso em alvenaria sem função estrutural em obras de construção civil. A cura adequada e a proporção correta de solo e cimento são essenciais para alcançar esta resistência mecânica requerida.

Outro ponto a ser observado é a granulometria do solo, para obter uma mistura homogênea. Uma distribuição adequada de partículas de diferentes tamanhos contribui para uma boa compactação e resistência do tijolo, com a finalidade de que o solo apresente uma granulometria adequada, seu material deve passar na peneira com abertura de 4,8 mm (ABNT NBR 6508, 1984).

O teor de umidade do solo é um fator crítico durante a fabricação do tijolo solo-cimento. A umidade adequada permite a formação de uma mistura coesa e facilita a compactação. Se o solo estiver muito seco, a mistura pode não aderir adequadamente e o tijolo resultante pode apresentar baixa resistência. Se o solo estiver muito úmido, pode dificultar a compactação e levar a problemas de estabilidade e secagem excessiva. O tipo e a qualidade do solo utilizado no tijolo solo-cimento também podem influenciar sua estabilidade e durabilidade a longo prazo. Solos com alta plasticidade ou teor excessivo de argila podem resultar em tijolos mais suscetíveis a deformações e rachaduras, especialmente durante a secagem (Baia, 2019).

O tijolo solo-cimento pode ter uma absorção de água relativamente baixa, geralmente variando de 5% a 15%, não excedendo a de absorção de água máxima de 20%, isso indica sua capacidade de resistir à penetração de água e umidade. Quando fabricados e utilizados corretamente, apresentam durabilidade, podendo resistir ao desgaste e à deterioração causados pelo clima e pelo uso ao longo do tempo (ABNT NBR 8491, 2012).

A energia de compactação é a propriedade física crucial ao tijolo solo-cimento, refere-se à quantidade de energia aplicada durante o processo de compactação da mistura de solo e cimento para formar o tijolo. É um fator crítico para garantir a qualidade e as propriedades desejadas do tijolo solo-cimento, influenciando diretamente todas as outras

propriedades do tijolo, uma compactação inadequada pode resultar em tijolos frágeis e com baixa resistência (Pecoriello, 2003).

Silva (2016) explica que a compactação tem como objetivo remover vazios e aumentar a densidade aparente do tijolo, denominada umidade ótima, melhorando sua resistência e durabilidade. Isso é alcançado pela reorganização das partículas do solo e pela aglomeração das partículas por meio do cimento. No entanto, pressões excessivas podem levar a deformações ou rachaduras indesejadas no tijolo. A compactação pode ser realizada por meio de prensas hidráulicas ou mecânicas. A escolha do método depende do volume de produção, da disponibilidade de equipamentos e das características específicas do projeto.

Segundo Essigmann *et al.* (1978) vários parâmetros influenciam a energia de compactação do solo, como o método de compactação, a quantidade de energia, a natureza do solo e o seu teor de umidade, podendo-se obter resultados diferentes ao se utilizar mesmo método e material. No caso do tijolo de solo-cimento, a fabricação executada através da prensa hidráulica mantém uma energia constante, ao contrário da prensa manual, onde não é possível garantir precisão na aplicação de energia ou pressão. O ideal é que seja compactada apenas com uma camada de material para evitar o surgimento de fissuras.

O tempo de cura pós-compactação, é necessário para permitir que o cimento hidrate e desenvolva sua resistência máxima. De acordo com a NBR 8491 (2012), os tijolos de solo-cimento requerem um período de cura úmida de 7 dias, dessa forma, a partir de 14 dias de fabricação já se torna possível a sua utilização em obras. Esse tempo garante que as reações químicas de endurecimento ocorram de forma adequada.

Souza (2005) expressa que em relação a duração da aplicação da pressão e sua forma de execução, é importante manter a pressão por tempo suficiente para permitir que as partículas do solo se acomodem adequadamente e que ocorra uma boa interação entre as partículas e os outros materiais, como cimento. Desta forma, a compactação dos tijolos solo-cimento deve ser realizada em um período de tempo mais constante possível para que não haja variações entre as amostras.

Em relação as propriedades químicas que influenciam na fabricação do tijolo solo-cimento se encontram os componentes como o comportamento em relação a umidade, composição química, estabilidade química, ligações químicas e hidratação do cimento. Devido aos seus componentes o tijolo de solo-cimento é quimicamente estável, ou seja, não sofre degradação significativa quando exposto a ambientes comuns, garantindo sua

durabilidade do material ao longo do tempo (Houben; Guillaud, 1994). A estabilização química é o resultado obtido através das misturas das matérias-primas utilizadas, o cimento quando entra em contato com a água garante resistência ao tijolo por meio de sua estabilização (Carvalho *et al.*, 2023).

A composição química do solo utilizado influencia na capacidade de compactação, permeabilidade e resistência do tijolo. O teor de argila proporciona maior coesão e resistência, enquanto solos arenosos possuem a capacidade de apresentar melhor índice de permeabilidade e estabilidade com o cimento. A mistura ideal de solo para fabricação do tijolo solo-cimento geralmente inclui uma combinação de areia, silte e argila, na qual a areia deve ter predominância variando entre 50% a 70% da composição, enquanto o silte e argila presente entre 10% a 20% devido a necessidade de coesão para que haja a incorporação entre as matérias-primas utilizadas (Barbosa *et al.*, 2016).

O tijolo de solo-cimento possui uma capacidade moderada de absorção e liberação de umidade. Essa propriedade é influenciada pela porosidade do material e pode ser ajustada durante o processo de fabricação para atender a diferentes requisitos. O solo apresenta vulnerabilidade a umidade, podendo sofrer erosão como resultado do intemperismo, desta forma o cimento oferece estabilidade e resistência a umidade que o solo necessita (Presa, 2011).

Em função das ligações químicas a hidratação do cimento gera compostos químicos que atuam como agentes de ligação, unindo as partículas de solo e formando uma matriz sólida. Essa ligação química que se desenvolvem entre a superfície de grãos de cimento e as partículas do solo é responsável pela resistência do tijolo e sua capacidade de suportar cargas (Limprasert, 1995).

A principal reação química que ocorre no tijolo de solo-cimento é a hidratação do cimento. Durante esse processo, o cimento reage com a água, formando compostos hidratados que conferem resistência e durabilidade ao material. De acordo com Folgueras *et al.* (2005) a velocidade de hidratação do cimento irá depender da finura do clínquer, sua composição química e a relação do fator água/cimento que será adotado na mistura.

Nascimento (2022) explica que durante a hidratação do cimento, ocorre a dissolução dos componentes químicos presentes no cimento, como o silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato bicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3S$ ) e ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ). Esses componentes se combinam com a água, resultando na formação de compostos hidratados.

Essa reação acontece em quatro estágios: o primeiro ocorre em minutos, onde há a liberação de calor após o primeiro contato do cimento com a água, ocorrendo uma hidratação rápida e exotérmica; o segundo é conhecido como estágio de indução, no qual as reações ocorrem de forma lenta em volta das partículas de cimento, pode durar entre um intervalo de minutos a horas. No terceiro estágio, começa a ser desenvolvido hidróxido de cálcio; no quarto e último estágio a formação das moléculas continuam ocorrendo de maneira mais lenta, promovendo o endurecimento completo do material (Cincotto *et al.*, 2016). Durante a hidratação, os compostos hidratados se desenvolvem e se interconectam, formando uma estrutura sólida e cristalina. Essa estrutura em rede confere ao cimento suas propriedades de resistência mecânica e durabilidade.

Após a mistura dos ingredientes (solo, cimento e água) e a moldagem dos tijolos, eles são deixados para curar em condições adequadas de umidade e temperatura. Durante esse período de cura, a umidade presente no ambiente é absorvida pelo tijolo, permitindo que haja reação de hidratação do cimento.

### 3.4.3 Custo-benefício Relacionado a Fabricação do Tijolo Solo-Cimento

Cherdhirunkorn *et al.* (2020) explicam que o tijolo solo-cimento apresenta vantagens em relação à sustentabilidade, promovendo a utilização do solo como matéria-prima, que se encontra em abundância no planeta, economia na fabricação e no acabamento. Além disso, possui metodologia de fabricação simples, levando menos tempo para ser executado. Observa-se também que, as instalações elétricas e hidráulicas são realizadas sem ser necessário corte de paredes (por causa dos dois furos no tijolo solo-cimento), passando pela parte interna do tijolo.

A fabricação dos tijolos solo-cimento requer menos consumo de energia e reduz a extração de recursos naturais, pois utiliza uma quantidade menor de cimento em comparação com os tijolos tradicionais. Devido ao fato de não ser necessário o tijolo ser direcionado ao forno no final de sua fabricação, Chakartnarodom *et al.* (2020) afirma que a não execução da etapa da queima resulta na diminuição dos custos quando se compara com o tijolo cerâmico.

Além dos materiais necessários para a fabricação dos tijolos solo-cimento serem relativamente baratos e amplamente disponíveis, tornando essa técnica uma opção econômica, Lafayette e Souza (2022) desenvolveram uma pesquisa relacionada ao custo do metro quadrado dos tijolos solo-cimento em comparação ao tijolo cerâmico

convencional, como é apresentado na Tabela 5, sendo perceptível uma redução de 35,32% na utilização do método com solo-cimento.

Tabela 5- Comparação do custo por metro quadrado dos tijolos de solo-cimento e cerâmico convencional.

Categoria	Custo
Tijolo solo-cimento	R\$ 114,89/m <sup>2</sup>
Tijolo cerâmico convencional	R\$ 177,64/m <sup>2</sup>

Fonte: Lafayette e Souza (2022).

O valor apresentado no tijolo solo-cimento de R\$ 114,89 por m<sup>2</sup> compõe a alvenaria e aplicação manual de resina em paredes com duas demãos. Enquanto o tijolo cerâmico convencional de R\$ 177,64 por m<sup>2</sup> dispõe da alvenaria de vedação, além dos revestimentos necessários, como o rejunte, chapisco, emboço, reboco/massa, textura, pintura e impermeabilizante. O custo isolado da unidade do tijolo solo-cimento pode se apresentar maior, porém isso é justificado por não apresentar necessidade de acabamentos em sua utilização como o tijolo cerâmico convencional.

#### 3.4.4 Principais Pesquisas Sobre Tijolo Solo-Cimento

O tijolo solo-cimento é uma técnica antiga de construção, devido a busca de soluções sustentáveis é utilizado na atualidade por todo o mundo, Abbas *et al.* (2016) realizam um estudo voltado à utilização do tijolo solo-cimento com incorporação de cinzas silicosas produzidas pela queima de bagaço de cana-de-açúcar (CBA) e cinzas de casca de arroz (CCA) no Paquistão, enquanto Charkartnarodom, *et al.* (2020) fizeram uma pesquisa similar, sobre a confecção de tijolos de solo-cimento a partir de resíduos locais de tijolos de argila e lodo macio da produção de fibrocimento, nos Estados Unidos da América. Abbas *et al.* (2016) perceberam que a resistência à compressão dos tijolos com 5% de CBA e CCA atendeu aos requisitos do código de construção do Paquistão, que define 5 MPa como a resistência mínima aceitável. Enquanto isso, Charkartnarodom, *et al.* (2020) notaram que os resultados da sua pesquisa mostraram que a resistência máxima foi alcançada com 10% da substituição do solo por resíduos de tijolo de argila.

Sua constituição faz com que este tipo de material de construção seja uma alternativa econômica e ecológica, sendo empregado em continentes como Europa e Ásia em diversos tipos de construções com função não estrutural como residências, muros e

cercas, edificações comerciais e industriais, e infraestrutura pública (Charkartnarodom, *et al.*, 2020).

No Brasil há uma vasta gama de pesquisas referentes da produção do tijolo solo-cimento com incorporação de materiais, contudo, ainda não há muitos estudos se tratando da utilização das cinzas de algaroba neste material de construção. Cavalcanti (2016) realizou uma pesquisa através da fabricação de tijolos solo-cimento com a substituição parcial do cimento pelas cinzas de algaroba, em que a porcentagem de substituição desta substituição variava entre 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Em sua pesquisa realizou a caracterização química, granulométrica e morfológica das cinzas de algaroba, e avaliou a resistência à compressão e absorção de água dos tijolos solo-cimento com 7 dias de idade.

Na Tabela 6, é possível observar metodologias e resultados referentes a pesquisas envolvendo o tijolo solo-cimento, com a utilização de materiais como fibrocimento, tereftalato de polietileno (PET), rejeitos de mineração, lodo mole e argila, cascas de arroz e *brachiaria brizantha* cv. Marandu.

Tabela 6- Principais pesquisas com a fabricação dos tijolos solo-cimento

Autor	Título	Materiais	Resultados
ABBAS <i>et al.</i> (2016)	Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes	Substituição parcial do solo pelas CCA e CBA em 5%, 10%, 15%	Os tijolos de solo-cimento com 5% de CCA/CBA apresentavam uma resistência à compressão que satisfazia os requisitos do Código de Construção do Paquistão (ou seja, >5 MPa).

<p>Cavalcanti (2016)</p>	<p>Avaliação da resistência a compressão simples e absorção de água de tijolos vazados de solo-cimento produzidos a partir da substituição parcial do cimento pela cinza da lenha de algaroba</p>	<p>Substituição parcial do cimento pelas cinzas de algaroba em 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%</p>	<p>Os tijolos fabricados com 10% de cinza apresentaram maior resistência à compressão. A absorção de água indicou que todas as amostras obtiveram valores médios menores que 20% e valores individuais menores que 22%</p>
<p>Cunha; Ferreira (2017)</p>	<p>Quality evaluation of soil-cement-plant residue bricks by the combination of destructive and non-destructive tests</p>	<p>Solo predominantemente argiloso, cimento Portland e resíduos de cascas de arroz e <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu (0, 10, 20, 30 e 40%, em massa, em substituição ao teor de 10% de cimento)</p>	<p>A adição que promoveu melhor qualidade técnica foi de 10% de resíduo, independentemente do tipo de resíduo. Demonstrando menores teores de absorção de água e resistência à compressão</p>
<p>Charkartnarodom <i>et al.</i> (2020)</p>	<p>Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production</p>	<p>A fórmula de controle para produzir tijolos de solo-cimento é 15% em de cimento Portland, 15% em de areia e 70% em de laterita. Resíduos de tijolos de argila (CBW) foram adicionados com valores de 10 e 50 % do peso da laterita na fórmula de controle, para lodo mole (SS), 5 e 10% foram usados na fabricação dos tijolos solo-cimento</p>	<p>Os resultados mostraram que a resistência à compressão de todos os tijolos excedeu os padrões da indústria. A resistência à compressão máxima foi alcançada para 10% de substituição de laterita por CBW, com cerca de 13 MPa, enquanto a norma da NBR fornece uma média de 2 MPa de resistência para tijolos solo-cimento</p>

<p>Alexandre <i>et al.</i> (2021)</p>	<p>Technological Characterization of PET— Polyethylene Terephthalate— Added Soil-Cement Bricks</p>	<p>Tijolos moldados à temperatura ambiente de 300 × 150 × 70 mm foram fabricados com misturas de solo argiloso e cimento Portland comum adicionado de até 30% em peso de partículas de resíduos de tereftalato de polietileno (PET), com solo arenoso e cimento Portland comum</p>	<p>Testes padrão mostraram um aumento na resistência à compressão de 0,83 MPa para o solo-cimento simples para 1,80 MPa para os tijolos com 20% em peso de PET. Quanto à absorção de água, todos os tijolos apresentaram valores entre 15% e 16%.</p>
<p>Callejas <i>et al.</i> (2022)</p>	<p>Thermal characterization of soil-cement bricks using mining tailings</p>	<p>Os tijolos solo-cimento foram fabricados utilizando cimento Portland CII-Z 32, solo (silte-argila) e rejeitos de mineração (cascalho laterítico), na proporção de 1:5:5</p>	<p>As propriedades físicas e mecânicas dos tijolos atingiram densidade aparente (1800 kg/m<sup>3</sup>), absorção de água (17,9%) e resistência à compressão satisfatórias (3,1 MPa), atendendo a norma brasileira de fabricação de tijolo solo-cimento.</p>

Carvalho <i>et al.</i> (2023)	Passive of CRFS Technology in Soil-Cement Application	Este estudo realizou corpos de prova com percentuais de 8%, 10% e 12% de cimento, enquanto os percentuais de fibrocimento foram fixados em 0%, 20% e 30%. A argila completa as formulações com a porcentagem restante	As formulações com 10% de cimento e 20% e 30% de pó de fibrocimento são indicadas para uso em tijolos de solo-cimento, pois apresentam percentuais de retração volumétrica de 2% a 2,5%, absorção de água variando de 18,66% a 19,39% e compressões de 4,25 Mpa a 6,88 Mpa, atendendo aos requisitos das normas brasileiras para aplicações solo-cimento
-------------------------------	---	---	--

Fonte: A Autora (2024).

Com a metodologia e resultados das sete pesquisas destacadas na Tabela 6, realizadas entre os anos 2016 a 2023, sobre o estudo da incorporação de diversos resíduos dentro do tijolo solo-cimento, destaca-se que os autores trabalham em suas pesquisas com a substituição ou adição de resíduos no tijolo solo-cimento. Abbas *et al.* (2016) realizaram o estudo da substituição do solo por cinzas de cana-de-açúcar e casca de arroz e observaram que os tijolos de solo-cimento com 5% de substituição apresentaram melhor desempenho. Cunha e Ferreira (2017) utilizaram resíduos de plantas em sua pesquisa, obtendo como TSC de melhor desempenho com a adição de 10% de resíduos. Charkartnarodom (2020) concluiu que os TSC que apresentaram melhores resultados foram através da substituição da laterita por resíduos de tijolos de argila e lodo mole em 10%. Alexandre *et al.* (2021) realizaram estudos a respeito da substituição do cimento por resíduos de PET em 20%. Callejas *et al.* (2021) utilizaram a rejeitos de mineração em 50% de substituição ao solo no TSC; Carvalho *et al.* (2023) conseguiram obter como resultado de melhor desempenho de sua pesquisa tijolo solo-cimento com adição de 20% e 30% de fibrocimento.

Cavalcanti (2016) estudou o tijolo solo-cimento com a substituição do cimento pelas cinzas de algaroba nas porcentagens 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. O tijolo com melhor desempenho em sua pesquisa apresentou de 10% de substituição. Foi realizado análises de caracterização da cinza de algaroba e solo pelos ensaios de granulometria a laser, FRX, DRX, TG/TGA e TA. Análises dos tijolos solo-cimentos: análise dimensional, resistência à compressão simples e absorção de água.

Corroborando com a pesquisa desenvolvida por Cavalcanti (2016), este trabalho tem o intuito de abordar e realizar ensaios que não foram explorados. Para isso, foram realizados alguns experimentos: a caracterização do solo por ensaios de teor de umidade, ensaio de compactação, determinação do limite de liquidez e plasticidade; a caracterização das cinzas de algaroba por medidas de área específica, FTIR e MEV/EDS; as análises de desempenho dos tijolos produzidos; a análise microestrutural dos tijolos: DRX, TGA/DTA, FTIR e MEV/EDS; e o estudo de durabilidade dos tijolos solo-cimento.

As cinzas de algaroba não possuem a presença de sílica em sua composição, todavia, algumas cinzas podem apresentar sílica em sua composição como cinzas de cana-de-açúcar, resíduos de plantas, resíduos de PET, rejeitos de mineração e fibrocimento. A presença de sílica nas cinzas pode influenciar a atividade pozolânica do tijolo solo-cimento. A atividade pozolânica se refere à capacidade de um material de reagir com o cálcio hidratado em presença de água para formar compostos com propriedades cimentícias, quanto maior a quantidade de sílica na composição, maior será a sua atividade pozolânica.

Em relação aos percentuais trabalhados nas pesquisas, os quatro primeiros autores obtiveram os melhores desempenhos de TSC com até 10% de substituição em relação ao cimento ou solo, utilizando o resíduo escolhido em sua pesquisa. A partir de 2021 os ensaios realizados em resistência à compressão e absorção de água começaram a ser explorados com maiores índices de resíduos durante a substituição na fabricação do tijolo solo-cimento, estas pesquisas possibilitaram que os resíduos fossem investigados a fundo dentro do TSC, com a trabalhabilidade de melhor desempenho em maiores porcentagens.

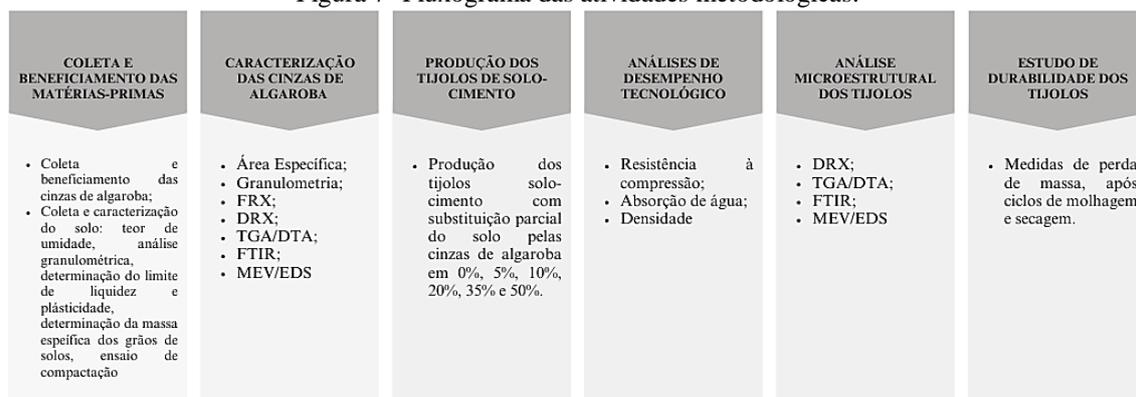
Esta pesquisa tem o intuito de corroborar e dar continuidade com o estudo de Cavalcanti (2016), a respeito da substituição de uma das matérias-primas do tijolo solo-cimento pelas cinzas de algaroba, no caso desta pesquisa a substituição executada foi do solo pelas cinzas de algaroba. Que teve como objetivo explorar e realizar ensaios não abordados anteriormente. A caracterização do solo inclui ensaios de teor de umidade, compactação, determinação dos limites de liquidez e plasticidade. A caracterização das

cinzas de algaroba abrange a área específica, FTIR e MEV/EDS. As análises de desempenho focam na densidade. A análise microestrutural dos tijolos envolve DRX, TGA/DTA, FTIR e MEV/EDS. Além disso, o estudo avalia a durabilidade dos tijolos de solo-cimento.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia experimental foi estruturada com base no fluxograma apresentado na Figura 7. Os experimentos foram agrupados em seis etapas: coleta e beneficiamento das cinzas de algaroba; caracterização físico-química e microestrutural dos materiais da matéria-prima; produção dos tijolos de solo-cimento; análises de desempenho tecnológico e análises microestrutural; estudo de durabilidade do resíduo.

Figura 7- Fluxograma das atividades metodológicas.



Fonte: A Autora (2024).

A execução dos procedimentos previstos nesta proposta foi realizada em diferentes laboratórios, de acordo com disponibilidade dos equipamentos descritos em cada etapa. Os ensaios de caracterização da matéria-prima e as extrações descritas nos ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados no Laboratório de Química da UFPE Caruaru, que dispõe de equipamentos para realizar análises de FTIR, Difração de Raios X, Fluorescência de raios X e Sistema de análise térmica simultâneo TG/DTA. No Laboratório de Geotecnia da UFPE Caruaru, foram realizados os ensaios para caracterização física do solo. No laboratório de Construção Civil, UFPE Recife, foi realizada a confecção e cura dos tijolos de solo-cimento, bem como os ensaios de desempenho. A análise da microestrutura por MEV foi realizada no CETENE, financiada por recursos do projeto APLCAPE APQ FACEPE/2020.

## 4.1 COLETA E BENEFICIAMENTO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

### 4.1.1 Coleta das cinzas de algarobas

As cinzas de algaroba foram coletadas *in natura* (Figura 8), sendo retiradas do topo e da base da caldeira, onde o material é ensacado e armazenado na área externa com cobertura até o momento de realizar sua transferência. No momento da coleta, as cinzas apresentam impurezas, como lascas de madeira que não foram totalmente queimadas na caldeira, requerendo seu beneficiamento para homogeneizar as propriedades do resíduo.

Figura 8- Cinza de Algaroba coletada na lavanderia *in natura*.



Fonte: A Autora (2024).

O ideal seria utilizar as cinzas obtidas *in natura* devido a sua praticidade e custo irrisório, porém o tamanho das partículas proporciona interferências nas características que o material demonstra, o que acarretaria que a sua utilização resultaria em um material com baixo índice de desempenho em suas propriedades e que não se adeque as normas exigidas. Desta maneira, para viabilizar a interação das cinzas entre o cimento e o solo, que são as matérias-primas do tijolo solo-cimento, torna-se essencial submeter as cinzas de algaroba ao processo de beneficiamento.

#### 4.1.2 Beneficiamento das cinzas de algaroba

Foi realizado um peneiramento prévio, ainda na lavanderia, de forma manual usando as peneiras de N° 10 (1,7 mm) e N° 38 (600  $\mu$ m) caso ainda seja visível até que a presença de impurezas não fosse mais visível. Após a finalização deste procedimento o material foi inserido no moinho de bolas (Figura 9), o recipiente e a tampa do equipamento foram produzidos com aço, devido a necessidade de uma estrutura que apresentasse durabilidade e resistência ao impacto submetido pelas esferas de alumina. Sua tampa é rosqueada com 6 parafusos, e o recipiente foi conectado ao motor elétrico. Foram utilizados 5 kg de esferas de alumina com três diâmetros divergentes, sendo elas: 50 bolas grandes com diâmetro de 4 cm, 140 bolas médias demonstrando diâmetro de 2,5 cm e 300 bolas pequenas com diâmetro de 1,2 cm.

Figura 9- Moinho de bolas



Fonte: A Autora (2024).

Para determinar o tempo ideal de moagem, foram realizadas moagens sucessivas a cada 10 minutos e observado a fração passante na peneira N° 200 (75  $\mu$ m), seguindo as normas da ABNT NBR 11579 (1991). Os resultados dos testes foram apresentados na Tabela 7, foi observado que o melhor tempo foi 60 minutos, quando a fração passante atingiu o valor de 1 Kg, sem apresentar material excedente na peneira.

Tabela 7- Determinação do tempo de moagem a seco.

Tempo (min)	20	30	40	50	60
Resíduo (kg)	0,38	0,45	0,66	0,82	1

Fonte: A Autora (2024).

Depois da verificação do tempo de moagem ideal, foi realizada a moagem em moinho de bolas, utilizando-se o intervalo de 60 min com 1 kg de cinzas de algaroba, com as mesmas condições adotadas no teste anterior. É necessário um intervalo de 15 minutos para utilizar o moinho, devido à alta temperatura que o maquinário apresenta após a sua atividade. Depois de retirar o resíduo do moinho, as cinzas foram peneiradas novamente, a ABNT NBR 11579 (1991) manuseia a peneira N° 200 (75  $\mu$ m) para estabelecer a finura do resíduo, o resíduo deve apresentar granulometria similar ao cimento para que os materiais sejam bem incorporados. A peneira é fixada acima do fundo de forma que não se torne possível a perda de partículas. Foi utilizado um pincel N° 1 com cerdas macias para auxiliar na fricção e o material deslocar-se com mais facilidade.

Depois do peneiramento, o material sobressalente encontrado na malha foi descartado. Com o uso do moinho a porcentagem de material perdido durante a peneiração foi mínima. Com a execução do beneficiamento, a moagem das cinzas de algaroba resultou na produção de resíduo fino passante na peneira N° 200 (75  $\mu$ m) ideal para incorporação na mistura de solo-cimento (Figura 10).

Figura 10- Cinza de Algaroba após beneficiamento



Fonte: A Autora (2024).

As cinzas de algaroba são muito finas e possuem capacidade de se aglutinar facilmente, formando grumos. O tamanho muito fino das partículas pode favorecer efeito físico de preenchimento dos vazios, sendo um aspecto positivo para seu uso em materiais

cimentícios. No entanto, a capacidade de se aglutinar pode ser um fator limitante para sua adequada dispersão na mistura dos pós, principalmente com percentuais mais elevados de substituição.

#### 4.1.3 Coleta do solo

O solo escolhido como matéria-prima para a fabricação do tijolo solo-cimento foi recolhido em frente à UFPE, campus Caruaru, localizado na Av. Marielle Franco, S/N - Nova Caruaru, Pernambuco, Brasil. A empresa Unique Construtora responsável pela execução do condomínio Oásis Home Park, forneceu o solo extraído a partir das etapas iniciais da obra, referentes à terraplanagem e fundação. Na Figura 11 pode se observar o ponto de coleta do solo, mostrando que a distância aproximada é de 550 metros, sendo situada com as coordenadas  $8^{\circ}13'26''S$   $35^{\circ}58'48''W$ . O solo foi recolhido a profundidade média de dois metros da superfície.

Figura 11- Mapa físico da região de coleta do Solo



Fonte: A Autora (2024).

#### 4.1.4 Caracterização do solo

O solo coletado, apresentado na Figura 12, foi caracterizado conforme recomendado pela ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland (2000), pelos ensaios: ensaio de compactação; determinação da massa específica dos grãos de solos; determinação do limite de liquidez; determinação do limite de plasticidade e análise granulométrica. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UFPE, Campus Caruaru.

Figura 12- Solo do município de Caruaru – PE.



Fonte: A Autora (2024).

A realização da caracterização do solo é essencial para garantir que o tijolo solo-cimento produzido atenda aos requisitos de qualidade e desempenho desejados. As propriedades do solo podem ser alteradas de acordo com sua localidade de obtenção, podendo apresentar teores de areia e argila divergentes, afetando várias propriedades dos tijolos, como resistência, absorção de água e estabilidade.

##### 4.1.4.1 Preparo do solo para ensaios

De acordo com a norma ABNT NBR 6457 (1986), que trata das técnicas utilizadas ao preparo do solo para realização de ensaios, a caracterização do solo deve usar amostra

beneficiada por secagem prévia, destorroamento do solo e o peneiramento. Para executar a preparação do solo para ensaio foram recolhidos 21 kg de solo do município de Caruaru.

Dentro das três possibilidades de métodos para a preparação das amostras, foi escolhido trabalhar com a preparação com secagem prévia até a umidade higroscópica. A amostra foi disposta em um ambiente higienizado e seca ao ar até atingir o limite do teor de umidade. Na etapa seguinte foi executado o destorroamento do solo, com a intenção de desagregar os grãos e reduzir o tamanho das partículas. A amostra foi movimentada com a mão de gral recoberta com borracha até os grãos desmancharem e passarem na peneira 4,8 mm, onde apresentará homogeneização das partículas. Durante o processo não se deve bater no solo ao invés de mexer para não haja repartição ou modificação da estrutura dos grãos de solo.

Com o solo preparado para se trabalhar, utiliza-se o repartidor de amostras para realizar o quarteamo, dividindo o solo proporcionalmente na quantidade exata em que se deseja trabalhar, obtendo uma amostra representativa a realização dos ensaios.

Caso a amostra apresente material sobressalente após o peneiramento na peneira de 4,8 mm, deve-se passar este material na peneira de 19,1 mm para que estes torrões tenham seus grãos reduzidos e sejam aproveitados.

Tabela 8- Procedimento após peneiramento do solo

Peneira (mm)	Material retido (% em peso)	Cilindro a ser utilizado no ensaio	Observação
4,8	menor que 7	grande ou pequeno	desprezar o material retido
19,1	menor que 10	grande	desprezar o material retido
19,1	maior que 10	grande	ver nota abaixo
19,1	maior que 30	-	recomenda-se não ensaiar de acordo com o método de ensaio de compactação de solos (NBR 7182).

Fonte: ABNT NBR 6457 (1986).

Durante o procedimento, o material retido na peneira 4,8 mm foi inferior a 7%, enquanto a 19,1 mm foi desconsiderada. De acordo com a Tabela 8 o material restante desse procedimento deve ser desprezado e o cilindro a ser utilizado no ensaio deve ser pequeno. A Tabela 9 apresenta a quantidade de amostra a ser tomada para a realização

dos ensaios, em que o método contará com o reuso de material. Devido as classificações da Tabela 8, a quantidade de amostra (em massa seca) a ser tomada será de 3 kg.

Tabela 9- Quantidade de amostra a ser tomada para realização dos ensaios de caracterização do solo.

Ensaio de Compactação	A amostra preparada integralmente na peneira (mm)	Cilindro a ser utilizado no ensaio	Quantidade de amostra (em massa seca) a ser tomada (kg)
Com reuso de material	4,8	pequeno grande	3 7
	19,1	grande	7
Sem reuso de material	4,8	pequeno grande	15 35
	19,1	grande	35

Fonte: ABNT NBR 6457 (1986).

A amostra para análise granulométrica deve ser a partir da fração passante na peneira 76 mm, descartando qualquer solo sobressalente. A quantidade mínima de em quilos que se deveria tomar de solo para análise granulométrica é obtida usando a Tabela 10.

Tabela 10- Quantidade de amostra do solo para análise granulométrica

Dimensões dos grãos maiores contidos na amostra, determinada por observação visual (mm)	Quantidade mínima a tomar (kg)
< 5	1
5 a 25	4
> 25	8

Fonte: ABNT NBR 6457 (1986).

A norma técnica não faz menção a uma especificação extra da metodologia da obtenção do material da compactação, portanto, após a preparação da amostra de solo são reservados 4 kg para serem utilizados neste ensaio. Na obtenção da amostra dos limites de liquidez e plasticidade, é realizado o peneiramento utilizando a peneira de 0,42 mm, descartando o material retido e extraído 200 gramas para análise de material passado. Por último, foi realizada a retirada da amostra para a determinação da massa específica dos grãos de solos, separando 500 gramas de material passado através da peneira 4,8 mm.

#### 4.1.4.2 Teor de umidade

A norma técnica utilizada durante o ensaio da determinação do teor de umidade de solos é a ABNT NBR 6457 (1986). O material será separado de acordo com o tamanho dos grãos maiores, como é descrito na Tabela 11, desta forma, percebe-se que as dimensões variam entre 2 a 20 mm, em consequência a quantidade de material em massa seca a ser retirada precisa variar entre 30 a 300 gramas, utilizando-se uma balança com capacidade nominal de 1500 gramas e resolução de 0,1 gramas.

Tabela 11- Quantidade de amostra do solo utilizada em função da dimensão dos grãos maiores.

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, determinada visualmente (mm)	Quantidade de material (em massa seca) a tomar (g)	Balança a ser utilizada	
		Capacidade nominal (g)	Resolução (g)
< 2	30	200	0,01
2 a 20	30 a 300	1500	0,1
20 a 76	300 a 3000	5000	0,5

Fonte: ABNT NBR 6457 (1986).

O solo é introduzido em três cápsulas metálicas com tampa. Esta etapa deve ser pesada e descrita como  $M_1$ . Na segunda etapa é retirada a tampa da cápsula e direcionando-a à estufa, com a temperatura de 105°C a 110°C, até apresentar constância em sua massa, em um intervalo variando entre 16 a 24 horas. Após o processo da secagem as cápsulas são encaminhadas ao dessecador com uma pinça metálica como mostrado na Figura 13, onde mantém-se em um período de tempo de dez minutos.

Figura 13- Amostras no dessecador.



Fonte: a Autora (2024).

Após retirar as amostras do dessecador, realiza-se a pesagem do solo seco, denominado de  $M_2$ . A massa do recipiente com a tampa é pesada e anotada como  $M_3$ .

O cálculo do teor de umidade é determinado a partir da Equação 1:

$$h = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100$$

O resultado final é obtido através da média entre os três teores encontrados.

#### 4.1.4.3 Análise granulométrica

A norma técnica empregue durante o método de análise granulométrica é a ABNT NBR 7181 (1984), realizada por meio de uma convergência entre as técnicas de sedimentação e peneiramento. A partir da Tabela 12 é denominada a massa da amostra seca ao ar  $M_t$ . Foi observado que a dimensão dos maiores grãos da amostra variava entre 5 e 25 mm, onde foi realizada a pesagem do material em uma balança com capacidade nominal de 5 kg e resolução de 0,5 gramas.

Tabela 12- Determinação da massa seca de solo ao ar.

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra (mm)	Balança a ser utilizada	
	Capacidade nominal (kg)	Resolução (g)
> 25	10	1
5 a 25	5	0,5
< 5	1,5	0,1

Fonte: ABNT NBR 7181 (1984).

Peneirar a amostra utilizando o aparelho de nº 2,0 mm, anotada como N, o material não passante deve ser lavado para que o material fino seja extraído da amostra, após a lavagem o solo é direcionado a estufa, executando a secagem em temperatura variante de 105°C a 110°C, até expressar constância em sua massa.

Na sedimentação é separado 70 gramas da amostra para execução do ensaio de peneiramento final, denominado  $M_h$ . Para determinar a umidade higroscópica  $h$  é separado 100 gramas do material. Direcionar a amostra à um béquer de 250 cm<sup>3</sup>, introduzir defloculante, 125 cm<sup>3</sup> de solução hexametáfosfato de sódio com concentração

de 45,7 g do sal por 1000 cm<sup>3</sup> de solução. Mexer o béquer até que a amostra aparente estar toda imersa, colocando-a em repouso por no mínimo 12 horas.

Após o repouso, direcionar a mistura ao copo de dispersão, a massa específica dos grãos e no meio dispersor são chamados de  $\delta$  e  $\delta_d$ , respectivamente. Água destilada é inserida até o limite de 5 cm abaixo da borda do copo, executando a ação do aparelho por um intervalo de 15 minutos, a massa específica da água é denominada  $\delta_c$ . Transferir a dispersão para proveta, retirando a água destilada com uma bisnaga, agitar de maneira constante a proveta em um intervalo de um minuto, a proveta é levada para uma mesa e o horário em que a sedimentação do material ocorre é anotado, em seguida mergulhando-o em um densímetro com temperatura constante, efetuando as leituras do material, denominado L, enquanto a leitura do densímetro no meio dispersor é nomeado de Ld. Deve-se executar novamente nos intervalos de 4, 8, 15 e 30 minutos, dando continuidade em 1, 2, 4, 8 e 24 horas. O volume da suspensão é anotado como V, e a altura de queda das partículas é denominada A.

O material deve ser secado na estufa para realizar o peneiramento fino, com temperatura entre 105°C e 110°C, até a perda de massa ser estagnada. A amostra será direcionada a um agitador mecânico como demonstra a Figura 14 com as peneiras 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm. Cada peneira é colocada em ordem decrescente de abertura e o material é agitado sobre ela, permitindo que as partículas de tamanho igual ou menor passem pela malha e sejam retidas pela peneira subsequente. Após a finalização do processo anotar as massas retidas, denominadas  $M_i$ , e sua porcentagem  $Q_f$ .

Figura 14- Execução do ensaio de granulometria.



Fonte: a Autora (2024).

O peneiramento grosso é feito com o mesmo processo, a amostra é direcionada a um agitador mecânico 50; 38; 25; 19; 9,5 e 4,8 mm. O material que não passou na peneira 2,0 mm é denominado  $M_g$ .

Após a peneiração, é feita a determinação do peso retido em cada peneira e a porcentagem acumulada em cada uma delas, permitindo a construção da curva granulométrica do material. A curva é obtida a partir do gráfico da porcentagem acumulada em cada peneira em função do tamanho da abertura da malha. Com a curva granulométrica é possível determinar a distribuição de tamanhos das partículas presentes no material, bem como o diâmetro médio e a uniformidade da distribuição.

As porcentagens de solo em suspensão são calculadas a partir da Equação 2:

$$Q_s = Nx \frac{\delta}{(\delta - \delta_d)} \times \frac{V\delta_c(L - L_d)}{\frac{M_h}{(100 + h)} \times 100}$$

Calcula-se o diâmetro das partículas em suspensão por meio da Equação 3:

$$d = \sqrt{\frac{1800\mu}{\delta - \delta_d} \times \frac{a}{t}}$$

Calcula-se a porcentagem de materiais que passam nas peneiras de 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm a partir a Equação 4:

$$Q_f = \frac{M_h \times 100 - M_i(100 + h)}{M_h \times 100} \times N$$

Com os resultados obtidos é gerada a curva de granulometria, as abscissas e ordenadas são denominadas de diâmetros das partículas e porcentagens das partículas.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006), conhecido pela sigla DNIT, os solos são classificados em sete grupos com base na granulometria e nos limites de consistência. Eles se dividem em dois grupos principais: solos grossos, com menos de 35% passando na peneira nº 200, e solos finos, com mais de 35% passando na mesma peneira. A classificação dos solos HRB-AASHO é apresentada conforme a Tabela 15.

Tabela 13- Classificação dos Solos HRB-AASH.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT (2006).

Esta classificação dos solos vai ser utilizada para averiguar o limite de perda de massa que será aplicado no ensaio de durabilidade dos tijolos de solo-cimento.

#### 4.1.4.4. Determinação do limite de liquidez

A ABNT NBR 6459 (1984) é a norma técnica responsável pela execução da metodologia do ensaio de determinação do limite de liquidez do solo. Uma fração da amostra é colocada na cápsula de porcelana inserindo água destilada, misturando os materiais até apresentar homogeneidade, com um intervalo de 15 a 30 minutos. Insere-se a mistura na concha traçando um risco no meio do aparelho com o cinzel, dividindo o material em dois, de modo que seja perceptível a visualização do fundo da concha.

Golpear a concha contra a base, fazendo a mistura retornar até cobrir o fundo totalmente, no momento do ensaio é necessário que o solo suporte aproximadamente 35 golpes para que a ranhura seja fechada, como a Figura 15 demonstra, anotar a quantidade final. Uma pequena parte desta mistura deve ser retirada instantaneamente para execução

do teste de umidade, detalhada na ANBT NBR 6457 (1986). O ensaio deve ser repetido três vezes.

Figura 15- Aparelho de determinação do ensaio de liquidez.



Fonte: A Autora (2024).

Para determinar o limite de liquidez do solo, em porcentagem, é necessário plotar um gráfico com escala logarítmica nas ordenadas e escala aritmética nas abcissas. O gráfico deve detalhar o número de golpes e os teores de umidade obtidos. A reta do teor de umidade que corresponde a 25 golpes.

#### *4.1.4.5. Determinação do limite de plasticidade*

A ABNT NBR 7180 (2016) é responsável pela metodologia do ensaio de determinação do limite de plasticidade do solo. A amostra é misturada com água destilada e moldada uma pequena bola, rolando a massa até atingir de 3 mm de diâmetro e comprimento próximo a 100 mm sem fragmentar a amostra como descrito na Figura 16. A execução do ensaio deve ocorrer em um intervalo de 15 a 30 minutos.

Figura 16- Amostras do ensaio de plasticidade.



Fonte: A Autora (2024).

Chegando ao formato mais próximo do gabarito, levar as partes para realizar o ensaio de umidade da amostra. Repetir o ensaio três vezes. O resultado final do limite de plasticidade (LP) deve ser expressado em porcentagem. O índice de plasticidade (IP) é calculado utilizando o limite de liquidez (LL) e de plasticidade, a partir da Equação 5:

$$IP = LL - LP$$

Caputo et al. (2015) classifica o índice de plasticidade da seguinte maneira:

- $1 < IP < 7$ : solos fracamente plásticos;
- $7 < IP < 15$ : solos medianamente plásticos;
- $IP > 15$ : solos altamente plásticos.

A partir disso, encontra-se o índice de consistência, que é responsável por classificar o solo em relação as suas características. Obtido através da Equação 6:

$$IC = \frac{LL - h}{IP}$$

Com o valor do IC obtido, deve-se observar a Tabela 13, para realizar a sua classificação.

Tabela 14- Classificação do solo através do IC

IC	Classificação	Característica
IC<0	Muito mole	Argilas no estado líquido, que escorrem com facilidade entre os dedos.
0<IC<0,50	Mole	No estado plástico, facilmente moldadas pelos dedos.
0,50<IC<0,75	Média	Também no estado plástico, mas apresentam mais resistência para serem moldadas.
0,75<IC<1,0	Rija	Ainda no estado plásticos, mas requerem muito esforço para serem moldadas.
IC>1,0	Dura	Não podem ser moldadas, não apresentando comportamento plástico.

Fonte: Caputo, *et. al.* (2015).

#### 4.1.4.6. Determinação da massa específica dos grãos de solos

O ensaio de determinação da massa específica dos grãos de solos, nomeado de  $\delta$ , é descrito pela norma técnica ANBT NBR 6508 (1984). Separar 250 gramas na primeira fase do ensaio, homogeneíze o material e pese na balança com resolução de 0,01 gramas. A massa no picnômetro é denominada de  $M_1$  quando for empregada no aparelho de 500 cm<sup>3</sup>, sendo aproximadamente o dobro desta medida quando for utilizado o picnômetro de 1000 cm<sup>3</sup>. O volume de trabalho é de 50 gramas para solos argilosos e siltosos, aumentando para 60 g no caso de se utilizar um solo arenoso.

Inserir a amostra em água destilada no intervalo de no mínimo 12 horas, utilizando o restante do material na realização do ensaio de umidade. A massa específica da água é denominada  $\delta T$ . Esta amostra será transferida ao copo de dispersão, limpando a cápsula com água destilada até que demonstre a retirada completa da amostra, evitando perda de aparelhagem.

Introduza água destilada aproximadamente na metade do volume do aparelho e disperse em um intervalo de 15 minutos. Transfira o material ao picnômetro e adicione água destilada, aplicando vácuo a partir de 88 kPa (66 cm de Hg a 0°C), em um intervalo de 15 minutos. Utilize um conta-gotas para inserir água destilada fazendo a base do menisco chegar à marca de referência. Pese a amostra englobando picnômetro, solo e água, denominada  $M_2$ . Por fim determina-se a temperatura T da amostra e o  $M_3$ , que como é apresentada na Figura 17, descreve a massa do picnômetro cheio de água destilada atingindo a marca de referência na temperatura T padrão demonstrada no ensaio.

Figura 17- Ensaio da determinação da massa específica



Fonte: a Autora (2024).

Desta maneira, será utilizada a Equação 7 na determinação da massa específica dos grãos do solo:

$$\delta = \frac{M_1 \times 100 / (100 + h)}{\left[ \frac{M_1 \times 100}{100 + h} \right] + M_3 - M_2} \times \delta_T$$

#### 4.1.4.7. Ensaio de compactação

O ensaio de compactação de solo segue os procedimentos abordados na ABNT NBR 7182 (2016). A norma técnica fornece três modos de energias de compactação, dependendo do tamanho do cilindro utilizado, como apresentado na Tabela 14. Para o ensaio, o modelo pequeno do cilindro foi escolhido, seu volume útil é denominado V, com 3 camadas, energia intermediária e soquete grande, com 21 golpes por camada, executados com o mesmo padrão de força.

Tabela 15- Energias de compactação.

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: ABNT NBR 7182 (2016).

O maquinário do ensaio de compactação se encontra montado no laboratório, pronto para utilização como demonstrado na Figura 18. Realizar a mistura de solo e água destilada na bandeja, inserindo a água aos poucos, até a amostra apresentar homogeneidade, desta maneira, é alcançado um teor de umidade em torno de 5%.

Figura 18- Execução do ensaio de compactação do solo



Fonte: a Autora (2024).

Após a amostra apresentar uniformidade, ela é direcionada ao cilindro pequeno, onde serão aplicados 21 golpes de maneira que toda a região da amostra receba energia, este processo é repetido três vezes até que o corpo de prova esteja moldado, retirando todo o material excedente. O cilindro é retirado da forma, transferido e pesado,

encontrando a massa úmida do solo compactado  $M_u$ . Uma amostra é removida para a realização da determinação de umidade  $w$ . Para determinar a massa específica aparente seca ( $\rho_d$ ) é utilizada a Equação 8:

$$\rho_d = \frac{M_u \times 100}{V(100 + w)}$$

A partir disto, determina-se a curva de saturação com a Equação 9, em que o grau de saturação é denominado (S):

$$\rho_d = \frac{S}{\frac{w}{\rho_w} + \frac{S}{\rho_s}}$$

Com os resultados obtidos deve-se gerar uma curva de compactação, em que as abscissas e ordenadas são denominadas de teores de umidade ( $w$ ) e massas específicas aparentes secas ( $\rho_d$ ).

## **4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MICROESTRUTURAL DAS CINZAS DE ALGAROBA**

As matérias primas foram caracterizadas por área específica, granulometria a laser, determinação de umidade e matéria orgânica, FRX, DRX de pó, TG/DTA, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

### **4.2.1 Área Específica**

A determinação de massa específica das cinzas de algaroba foi realizada pela técnica de BET. A teoria foi nomeada com as iniciais de seus criadores, Brunauer, Emmet e Teller. O método BET é usado para determinar área superficial específica, porosidade das partículas e diâmetro médio das partículas (Lima, 2007). Este método tem como princípio a capacidade do material em adsorver gases.

O ensaio foi realizado no Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE). A análise é realizada em duas etapas, a primeira é a desgaseificação da

amostra. Em que a amostra é submetida a vácuo e aquecida para remover possíveis moléculas de água e outras substâncias fisicamente ligadas à amostra. A segunda etapa é a adsorção do gás, onde a amostra será exposta à presença de um gás inerte, geralmente nitrogênio. A quantidade de gás adsorvida é medida através da queda de pressão e usada para calcular a área superficial da amostra.

#### 4.2.2 Granulometria

O ensaio de granulometria é realizado seguindo a ISO 13320 (2020). Ela aborda o método de ensaio da análise granulométrica com métodos de difração a laser. O ensaio tem o intuito de determinar as dimensões das partículas do material através de feixes de laser, sendo executado através da teoria de Mie. O ensaio foi realizado no Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE).

O material utilizado deve-se encontrar homogêneo e estável para realização do ensaio. A difração laser é utilizada no ensaio para registrar o padrão de dispersão das partículas apresentado pela amostra. Esse padrão é convertido para obter a distribuição das dimensões de esferas que são compatíveis à difração laser. O feixe de luz monocromático gerado pelo laser atravessa a zona de medição do sistema ótico. Toda essa análise é realizada, medida e controlada através de um computador, para que os dados obtidos sejam processados e armazenados. As condições ambientais de temperatura e umidade utilizadas ao decorrer do ensaio foram 22°C e 50,1%, respectivamente.

#### 4.2.3 Fluorescência de Raios-X

Neste trabalho, a técnica de FRX foi usada para caracterizar quimicamente as cinzas de algaroba. A amostra foi analisada na forma de pó prensado, utilizando o equipamento Rigaku Primini, do Laboratório de Química da UFPE, Campus Caruaru.

#### 4.2.4 Difratometria de Raios-X

Esta técnica foi realizada para caracterizar as cinzas de algaroba e os tijolos de solo-cimento. As amostras foram analisadas na forma de pó, usando o equipamento Rigaku MiniFlex 600, do Laboratório de Química da UFPE, campus Caruaru. As condições operacionais utilizadas no momento da análise foram: Radiação  $\text{CuK}\alpha$  (40

kV/30 mA), velocidade do goniômetro de  $0,02^\circ 2\theta$  por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo e coletados de  $10$  a  $80^\circ 2\theta$ .

Os dados obtidos foram interpretados utilizando o software OriginPro8.5 ou X'PertHighScore Plus, através deles pode ser realizada a identificação de uma única fase ou dos principais materiais cristalinos de uma amostra polifásica, executando em seguida a detecção de picos.

#### 4.2.5 Termogravimetria / Análise Térmica Diferencial

Os ensaios de termogravimetria (TGA) e análise térmica diferencial (DTA) realizados de forma simultânea usando para analisar termicamente as cinzas de algaroba. As análises térmicas foram realizadas no Laboratório de Química da UFPE, Campus Caruaru, usando o equipamento STA simultâneo da Netzch, modelo Regulus 2500, com aquecimento da amostra da temperatura ambiente até  $900^\circ\text{C}$ , razão de aquecimento  $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  em atmosfera de  $\text{N}_2$ , com fluxo de  $50\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ .

#### 4.2.6 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

A espectroscopia de infravermelho é utilizada para análise da presença dos grupos funcionais pertencentes à estrutura química dos materiais. Foi utilizada neste trabalho para caracterizar as cinzas de algaroba e os tijolos de solo-cimento na forma de pastilhas prensadas com KBr. Os espectros foram coletados usando um espectrofotômetro Prestige Shimadzu, na região espectral de  $4000$  a  $400\text{ cm}^{-1}$ , resolução  $2\text{cm}^{-1}$ , disponível no Laboratório de Química da UFPE, Campus Caruaru.

#### 4.2.7 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de Varredura é uma técnica analítica que permite identificação de imagens de alta ampliação (até  $300.000\times$ ) e resolução das matérias-primas, com base em topografia ou divergência entre composições químicas de mesma amostra, seu intuito é analisar a morfologia dos materiais. O ensaio foi realizado no Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE), utilizando o equipamento MEV Quanta 200FEG 30kV (FEI).

A amostra é inserida na câmara de vácuo, onde um feixe de elétrons é direcionado a cinza de algaroba. No momento em que há o contato entre o material e os elétrons, o software responsável pela análise realiza a detecção desta interação, ele capta os dados e transforma em uma imagem 3D.

### 4.3 PRODUÇÃO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Segundo a ABNT NBR 8491 (2012), a fabricação do tijolo deve seguir os padrões de procedimentos pré-estabelecidos pela ABNT NBR 10833 (2012). A norma técnica trata dos procedimentos realizados durante a fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica.

Foi utilizada no momento da produção dos tijolos de solo-cimento a prensa manual de dois furos, disponibilizada no Laboratório de Construção Civil da UFPE, no campus Recife. Como apresentada na Figura 19, a prensa manual produz dois tijolos por vez, o maquinário não segue os dois modelos propostos pela ABNT NBR 8491 (2012), fornecendo tijolos com as dimensões 230 mm de comprimento, 110 mm de largura e 55 mm de altura. Porém as suas medidas são similares, mantendo o padrão do comprimento demonstrar aproximadamente o dobro do valor da largura, mostrando parâmetros adequados à sua utilização. Nesta prensa, não é possível controlar a velocidade ou carga aplicadas. No entanto, a produção dos tijolos foi realizada pelo mesmo operador minimizar variações.

Figura 19- Prensa manual do laboratório da UFPE.



Fonte: A Autora (2024).

Os tijolos de solo-cimento foram produzidos por prensagem uniaxial da mistura dos componentes da formulação (solo, cimento, água e cinzas de algaroba), variando-se o percentual do resíduo na mistura. A norma NBR 8491 (2012) requer que seja executado três traços durante o procedimento de dosagem, onde cada lote precisa conter vinte tijolos, dos quais dez serão escolhidos de forma aleatória para realizar os ensaios de resistência e absorção de água.

Realizou-se a pesagem da tiragem em quilos ou litros que foi necessária para cada matéria-prima introduzida na betoneira ou argamassadeira, dependendo da quantidade fabricada, como a Tabela 16 demonstra, trabalhando-se com o traço de 1:6 de cimento: solo, inserindo 10% de água da quantidade do seu volume total da mistura de solo-cimento. Foi realizada a substituição de parte da massa do solo pela cinza de algaroba nos percentuais 0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50%.

O cálculo de estimativa de materiais foi realizado para a execução de 40 tijolos de cada traço, sabendo que cada tijolo apresenta em média de 2 quilos e adiciona-se 10% de taxa de perda de mistura do solo-cimento.

Tabela 16- Quantidade de materiais para fabricação de tijolos solo-cimento.

Porcentagem	Solo	Cimento	Cinzas	Água
0%	68,57 Kg	11,43 Kg	0 Kg	8 L
5%	65,14 Kg	11,43 Kg	3,43 Kg	8 L
10%	61,71 Kg	11,43 Kg	6,86 Kg	8 L
20%	54,86 Kg	11,43 Kg	13,71 Kg	8 L
35%	44,57 Kg	11,43 Kg	24,00 Kg	8 L
50%	34,28 Kg	11,43 Kg	34,28 Kg	8 L

Fonte: A Autora (2024).

As substituições foram estabelecidas com o objetivo de averiguar como o tijolo solo-cimento se comporta quando o seu solo é substituído pelas cinzas de algaroba, bem como determinar a porcentagem máxima de substituição que ele suporta sem demonstrar declínio de suas propriedades.

O solo, cimento e as cinzas de algaroba são introduzidos dentro da betoneira (seca e limpa, para que impurezas não afetem os resultados do procedimento). Logo em seguida, o maquinário é ligado por cerca de um minuto para as matérias-primas sejam previamente misturadas e uniformizadas até obter uma coloração padrão, antes de receber

a água, com o intuito das reações da incorporação dos materiais não ocorra de forma antecipada. Após este processo ser realizado, a água é inserida gradativamente e a betoneira é ligada novamente por mais cinco minutos, onde a mistura será movimentada com uma espátula para averiguar se a massa de solo-cimento se encontra com total homogeneidade, caso contrário continuará sendo misturada na betoneira até que atinja a umidade necessária de trabalho.

Após realizar a mistura de solo-cimento, deve-se transferir imediatamente para a prensa devido ter o intervalo de 45 minutos para ser utilizada, caso contrário o material deve ser descartado e refeito com o mesmo procedimento. A mistura de solo-cimento é inserida dentro da prensa, encaixa-se a tampa de forma que seja possível efetuar a movimentação da barra de aço até a parte inferior, prensando-a, e retornando acima logo em seguida.

A compactação é executada com aproximadamente 6 toneladas de pressão quando realizada em uma prensa hidráulica. No entanto, na prensa manual, não é possível garantir a quantidade precisa de força aplicada. Assim, para manter um padrão nos tijolos solo-cimento, é essencial atentar para o tempo e a forma de execução, buscando fabricar cada remessa de tijolos de maneira mais similar possível. No caso desta pesquisa, cada remessa de dois tijolos solo-cimento levou em média um minuto e meio para ser produzido.

Durante a fabricação dos tijolos solo-cimentos, devem ser tomadas algumas precauções em relação ao processo operacional. Caso a fabricação seja manual, é necessário que o mesmo operador realize a prensagem dos tijolos solo-cimento, para que seja aplicada uma força similar em todos os produtos, além disso, deve-se colocar a mesma quantidade de material em todas as rodadas e produzir em um mesmo intervalo de tempo.

Com a finalização dos tijolos solo-cimento, deve-se direcioná-los a paletes ou uma superfície plana e lisa como exibido na Figura 20, para o armazenamento seguro e sem degradação do material, não permitindo que os produtos mantenham contato com o chão, podendo ser empilhados até uma altura de 1,5 metros.

Figura 20- Tijolos de solo-cimento com cinza de algaroba após fabricação.



Fonte: A Autora (2024).

Os tijolos foram cobertos por uma lona para que a umidade óptima do ar não interfira na cura dos tijolos. É necessário que a cura seja realizada nos sete primeiros dias, borrifando água por toda a superfície do material, a cada 24 horas. Com 14 dias de fabricação o tijolo já pode ser direcionado a serem utilizados como materiais de construção não estrutural, o transporte também pode ser realizado em cima de paletes.

#### **4.4 ANÁLISES DE DESEMPENHO TECNOLÓGICO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

##### **4.4.1 Resistência à compressão**

A norma técnica responsável por definir a metodologia da resistência à compressão do tijolo solo-cimento é a ABNT NBR 8492 (2012). O ensaio foi realizado no Laboratório de Construção Civil da UFPE, no Campus Recife. Antes de ser realizado o ensaio, os sete corpos de prova fabricados permaneceram seis horas sobre imersão em um tanque de água a temperatura ambiente constante, deve ser localizado em uma câmara de umidade para garantir que não haja uma alteração substancial. Os corpos de prova devem permanecer imersos até o momento do rompimento, onde serão retirados do local e secados superficialmente com um pano e colocados na máquina de compressão.

O equipamento de ensaio à compressão deve conter dois apoios, responsáveis pela distribuição a toda superfície de contato da amostra que será rompida. Para o ensaio ser

realizado de forma correta é necessário que ambas as faces superior e inferior do corpo-de-prova estejam totalmente cobertas como é apresentado na Figura 21.

Figura 21- Ensaio de Resistência à compressão.



Fonte: A Autora (2024).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em 7 e 28 dias com seis tipos diferentes de proporções, em que foram fabricados e rompidos sete corpos-de-prova com 0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50% de resíduo de cinza de algaroba. A máquina de compressão é interligada com o software TRAPEZIUM X, que é um sistema operacional integrado ao computador que oferece condições de execução de um ensaio simples até com padrões complexos, permitindo que seja inserido nas configurações todas as informações e dados da metodologia conforme as normas exigem. Onde em relação com a norma deve ser atribuído uma carga de 500 N/s (50 kgf/s).

#### 4.4.2 Absorção de água

O tijolo solo-cimento, assim como outros materiais construtivos, tem como propriedade a permeabilidade, que define a sensibilidade à presença de água ou o quanto de água vai ser introduzido ou transpassado em um sistema que contém a presença de cimento. Esta característica está diretamente relacionada a durabilidade do material, a partir disso, grandes quantidades de fluídos ou agentes agressivos podem vir causar danos ao sistema do material.

Para o ensaio de absorção de água é utilizada a norma ABNT NBR 8492 (2012), o ensaio foi realizado no Laboratório de Construção Civil da UFPE, no campus Recife.

Foram fabricados três tijolos de cada proporção e utilizados com sete dias de idade, primeiramente deve-se colocar os tijolos na estufa com a temperatura variante entre 105 °C a 110 °C, onde após os dias de cura realizados no material ele exibiu perda de peso até apresentar constância, neste momento após ser realizado a pesagem obtém-se a massa do corpo de prova seco, denominada  $m_1$ , atribuída em gramas (g).

A obtenção da massa de corpo de prova saturada é realizada após a estagnação da perca de temperatura, onde os corpos de prova são inseridos em um tanque durante o período de 24 horas a temperatura ambiente, onde foi utilizada uma câmara de umidade para manter esta temperatura padrão. Após o período de imersão, cada tijolo é retirado, enxugado superficialmente e pesado, denominada  $m_2$ , atribuída em gramas (g). Este processo deve ser finalizado antes que passe o período de três minutos, caso contrário, a amostra deve ser descartada.

Com a obtenção dos dados é realizado o cálculo do ensaio de absorção de água, onde é utilizada a Equação 8:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

Em que A é o valor da absorção de água, designada em porcentagem (%);  $m_1$  se refere a massa do corpo de prova seco em estufa, expressa em gramas (g) e  $m_2$  é a massa do corpo de prova saturado, determinada em gramas (g). Após obter os valores de todos os tijolos deve-se encontrar a média de cada proporção como resultado final.

#### 4.4.3 Densidade

A densidade pode ser definida a partir da relação entre as massas de um corpo sólido e líquido de um mesmo volume. Esta característica é influenciada através da composição química e a sua organização dentro de um material construtivo. Mazali (2005) apresenta a execução do ensaio de densidade a partir do princípio de Arquimedes.

Durante a execução do ensaio, baseado no estudo de Mazali (2005), o tijolo solocimento é imerso parcialmente ou totalmente em um líquido, de forma que receberá uma força de empuxo vertical para cima, igual ao peso do fluído deslocado pelo tijolo. Desta maneira, o corpo-de-prova irá reter uma quantidade de fluído equivalente ao seu próximo volume.

Com a obtenção dos dados é realizado o cálculo de densidade, onde é utilizada a Equação 9:

$$d = \left( \frac{m_s}{m_u - p_{ap}} \right) * d_l$$

Onde:

$m_s$  = é a massa seca do tijolo solo-cimento, expressa em gramas (g);

$m_u$  = é a massa úmida do tijolo solo-cimento, expressa em gramas (g);

$p_{ap}$  = é o peso aparente do tijolo solo-cimento, expressa em gramas (g);

$d_l$  = é a densidade do líquido, expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm<sup>3</sup>).

#### **4.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL**

Após atingir a idade de 28 dias de cura, os tijolos de solo-cimento com 0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50% de cinzas de algaroba foram analisados por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), difração de raio-X (DRX), termogravimetria (TGA) e análise térmica diferencial (DTA) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para os ensaios de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e difração de raio-X (DRX), fragmentos das amostras de tijolo foram trituradas com almofariz e pistilo e peneiradas em malha de N°200 (75 μm). Para observar as amostras por MEV/EDS, foram utilizados pequenos fragmentos das amostras que foram coladas em suporte adequado (“stub”) e recobertas com ouro. Os equipamentos utilizados foram os mesmos descritos acima para caracterização microestrutural das cinzas de algaroba.

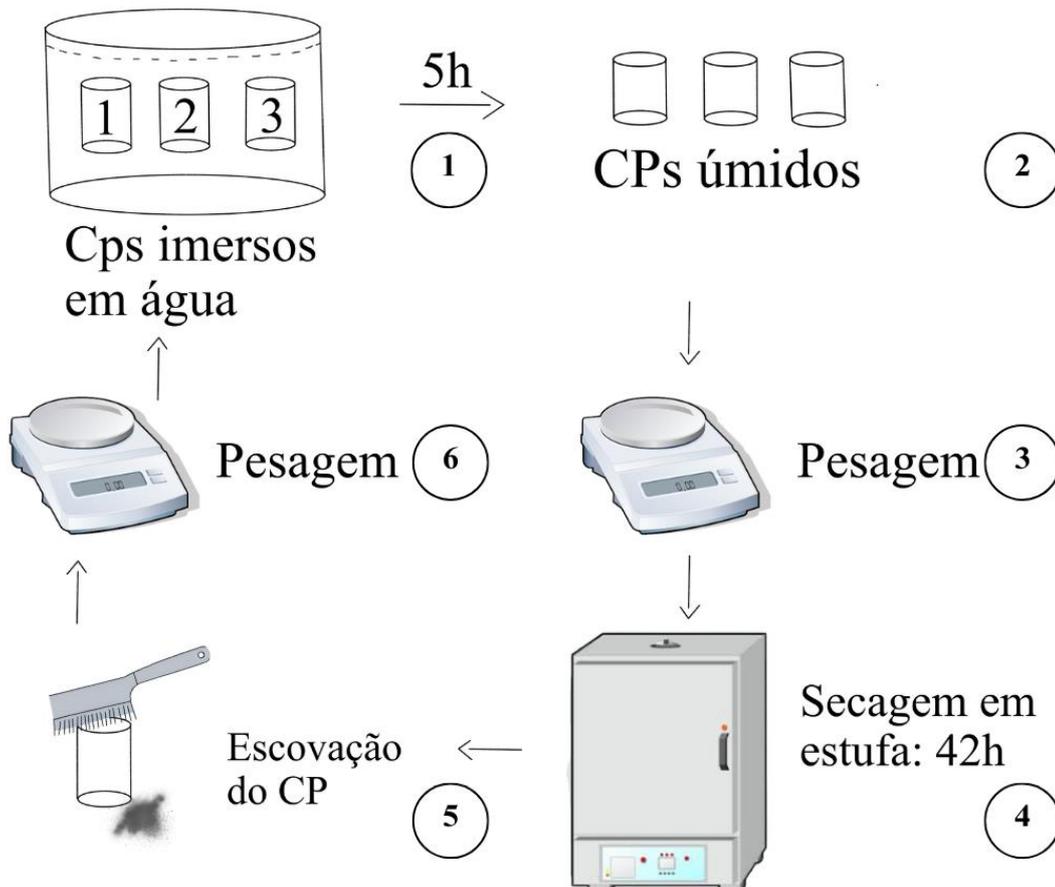
#### **4.6 ESTUDO DE DURABILIDADE DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Os tijolos de solo-cimento com incorporação das cinzas de algaroba foram submetidos ao ensaio de durabilidade. Este ensaio avalia a durabilidade dos tijolos através da determinação de perda de massa, variação de umidade e variação de volume produzidas por ciclos sucessivos de molhagem e secagem de corpos-de-prova de solo-

cimento. Desta forma, este ensaio permite analisar como a presença de cinza de algaroba influencia a estabilidade do tijolo de solo-cimento. O ensaio de durabilidade é realizado através da NBR 13554 (1996) e foi realizado no Laboratório de Construção Civil da UFPE, no Campus Recife. O fluxograma da Figura 22 descreve as atividades realizadas durante este ensaio.

Foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos com o Proctor, para cada porcentagem de substituição de solo por cinza de algaroba (0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50%), realizando o preenchimento dos moldes em 3 camadas com 26 golpes cada, e deixados em repouso por durante 24 horas, como apresentado na Figura 22. Logo em seguida, é realizada a pesagem inicial e a cura durante o período de sete dias. Os corpos-de-prova foram identificados de 1 a 3 para determinar a variação de umidade (corpo de prova 1) e a perda de massa (corpos de prova 2 e 3). A variação de volume do corpo-de-prova nº 1 em cada etapa, é obtida em % e denominada  $V_n$ , e o volume inicial do corpo-de-prova nº 1 é nomeado de  $V_i$ .

Figura 22 – Fluxograma do ensaio de durabilidade e análise da qualidade da água de imersão dos TSC.



Fonte: A Autora (2024).

Depois do período de cura, as amostras foram pesadas novamente e os dados são anotados, sendo iniciado o processo de imersão e secagem, onde os corpos-de-prova foram imersos em recipientes separados com 2 litros de água cada, pelo período de 5 horas, secados previamente, pesados, e redirecionados à estufa, onde permaneceram em um período de 42 horas em uma temperatura próxima à 71 °C, antes de terem sido pesados novamente. A massa seca final do corpo-de-prova nº 1 após atingir massa constante, é obtida em g e denominada  $M_f$  e massa seca inicial calculada, do corpo-de-prova nº 1, também calculada em gramas e nomeada de  $M_i$ .

Este processo foi repetido seis vezes, antes de começar uma nova rodada de molhagem e secagem foi realizada a escovação dos corpos-de-prova. Com a obtenção final dos dados foi realizado o cálculo da variação de volume e umidade, onde foi utilizada a Equação 10:

$$v = \frac{(v_i - v_n)}{v_i} \times 100$$

A partir disto, foi calculada a perda de massa, onde foi utilizada a Equação 11:

$$A = \frac{(M_f - M_i)}{M_f}$$

Segundo o DNIT (2006), o limite de perda de massa será adotado em relação a classificação dos solos apresentada na Tabela 15. Os solos classificados como A1, A2-4, A2-5 e A3 podem apresentar o limite de perda de massa até 14%, solos como A2-6, A2-7, A4 e A5 com a perda de massa até 10% e solos A6 e A7 até 7%.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

#### 5.1.1 Teor de Umidade do solo

O teor de umidade é um dos fatores determinantes na fabricação de tijolos de solo-cimento e deve ser considerada para calcular a quantidade de água a ser introduzida na mistura. A água é importante para garantir a hidratação do cimento e molhar as partículas dos pós a fim de garantir uma eficiente compactação e obtenção de resistência e durabilidade no tijolo. De acordo com os valores encontrados no ensaio de umidade realizado em triplicata (Tabela 17) o solo utilizado para neste estudo apresentou peso médio úmido igual a 33,25 gramas, peso seco médio 32,50 gramas, peso médio da água 0,75 gramas, apresentando teor de 2,31% de umidade presente no solo.

Tabela 17 – Resultados do teor de umidade do solo utilizado.

Medida	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Valor médio
Peso do solo úmido (g)	32,03	34,68	33,03	33,25
Peso do solo seco (g)	31,31	33,91	32,27	32,50
Peso da água (g)	0,72	0,77	0,76	0,75
% de umidade	2,3	2,27	2,36	2,31

Fonte: A Autora (2024).

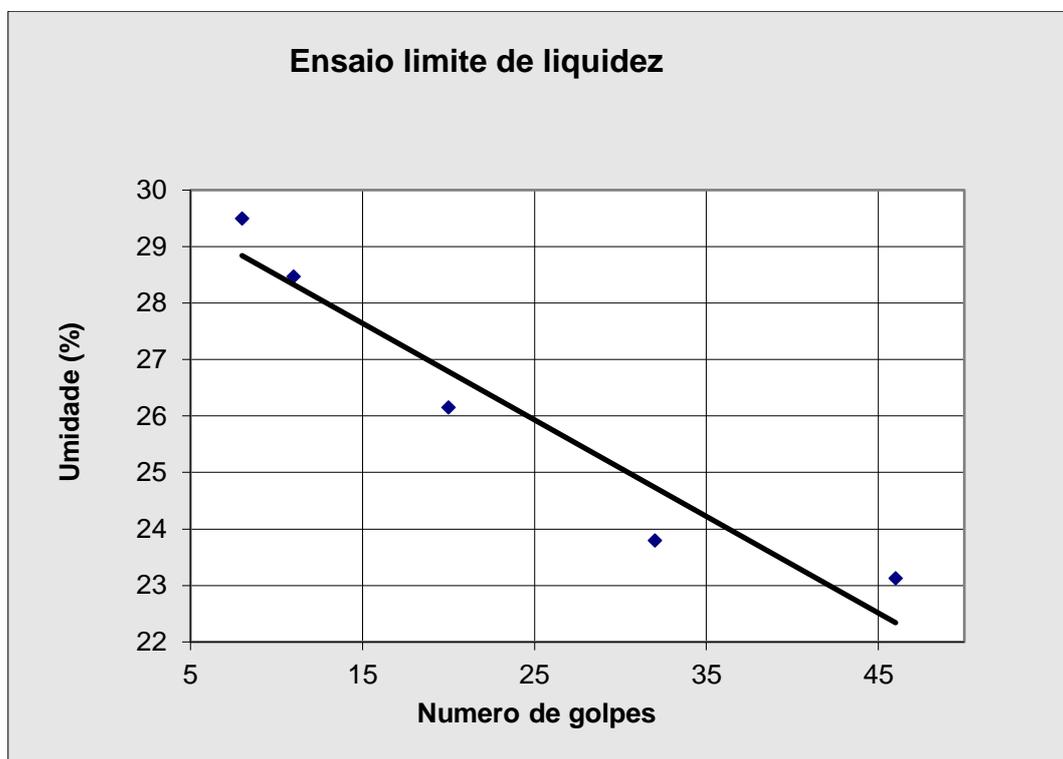
No momento da confecção dos tijolos solo-cimento, deve-se inserir 10% de água em relação ao fator solo/cimento/cinzas, como o solo utilizado apresenta umidade de 2,31%, deve ser introduzido 7,69% de água à mistura dos componentes. Desta maneira, o percentual exigido pela NBR 10833 (2012) não é alterado, e evita o risco de produzir tijolos com mistura seca com difícil compactação e baixa resistência, ou produto com alta umidade a ponto de dificultar a compactação adequada, resultando em tijolos deformados ou que apresentem rachaduras durante o processo de secagem e cura.

#### 5.1.2 Determinação do limite de liquidez e limite de plasticidade

O ensaio da determinação do limite de liquidez foi realizado com cinco amostras de solo, submetidas ao impacto de 25 golpes cada. Por meio disto, a umidade apresentou variação entre as amostras de 23,13%, 23,79%, 26,15%, 28,47% e 29,49%. Após a

obtenção das umidades das amostras trabalhadas, foi plotado o gráfico com os dados de número de golpes e porcentagem da umidade.

Gráfico 2 - Resultados do ensaio de limite de liquidez realizado na amostra de solo utilizado para fabricação dos tijolos de solo-cimento.



Fonte: A Autora (2024).

Por meio do Gráfico 2 é obtida a reta do teor de umidade que corresponde a 25 golpes. O resultado é fornecido em porcentagem, determinando o limite de liquidez do solo para 25 golpes sendo 25,99%. Este valor representa o limite de umidade em que o solo transita do estado líquido para o estado plástico.

Na pesquisa de Lima et al. (2019), foi realizada a caracterização do solo do município de Caruaru, extraído de uma jazida localizada no bairro Luiz Gonzaga, em uma distância de aproximadamente 8,7 km do ponto de coleta do solo estudado aqui. O limite de liquidez encontrado por Lima et al (2019) foi 24,60%, apresentando o índice de divergência em 1,39% do limite de liquidez encontrado no ensaio realizado. As diferenças observadas nas amostras não são significativas e podem ser atribuídas à distância entre os locais de coleta do solo. Isso ocorre porque cada solo tem uma composição mineralógica única e os elementos de sua estrutura podem variar.

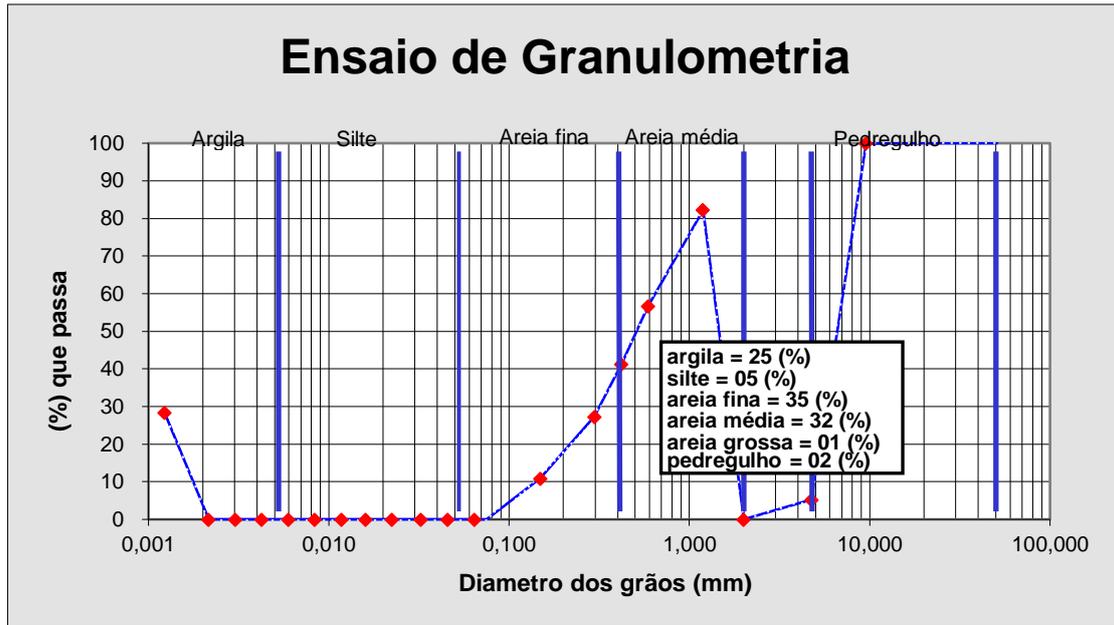
O limite de plasticidade por sua vez, demonstra o máximo de umidade que o solo suporta antes de passar do estar plástico ao estado semi-sólido. A umidade necessária para o solo adquirir plasticidade variou entre as amostras (19,33%; 19,81%; 19,83%, 20,97% e 20,44%), resultando no valor médio de 20,08%. De acordo com a classificação de Caputo et al. (2015) este solo é altamente plástico, apresentando facilidade para ser convertido em um solo semi-sólido. Lima *et al.* (2019) estabeleceu em seu ensaio o limite de plasticidade em 22,34%, apresentando uma divergência em 2,26%, não sendo uma diferença significativa.

Obtido os valores dos limites de plasticidade e liquidez é encontrado o índice de consistência, conhecido mais comumente pela sigla IC, que apresenta a característica do solo. Neste caso, o IC encontrado foi de 9,21%. De acordo com a Tabela 11 de classificação dos solos, o solo utilizado nesta dissertação está no intervalo  $0 < IC < 0,50$ , classificado como solo mole, que apresenta como características a propriedade de ser facilmente moldadas pelos dedos quando se encontra no estado plástico. A classificação foi a mesma encontrada no estudo de Lima et al (2019) que encontrou o IC de 9,80%.

### 5.1.3 Ensaio de granulometria e sedimentação do solo

O ensaio da massa específica do solo coletado foi realizado em triplicata e encontrou os valores 2,709; 2,709 e 2,712 g/m<sup>3</sup>, o que resulta em densidade média dos grãos 2,710 g/m<sup>3</sup>. A partir da realização do ensaio de determinação de massa específica, são realizados os ensaios de sedimentação e granulometria, visualizados nos Gráficos 3 e 4. Por meio da curva granulométrica, apresentada no Gráfico 3, nota-se que o solo de Caruaru, usados nesta pesquisa, passa 100% nas peneiras de abertura 19,10; 25,40; 38,10 e 50,80 mm, 82,27% na peneira de abertura 1,190 mm. Enquanto a porcentagem que passa nas peneiras de 0,590 e 0,420 mm começa a apresentar um declínio, chegando a 0% de material passante na peneira 0,075 mm.

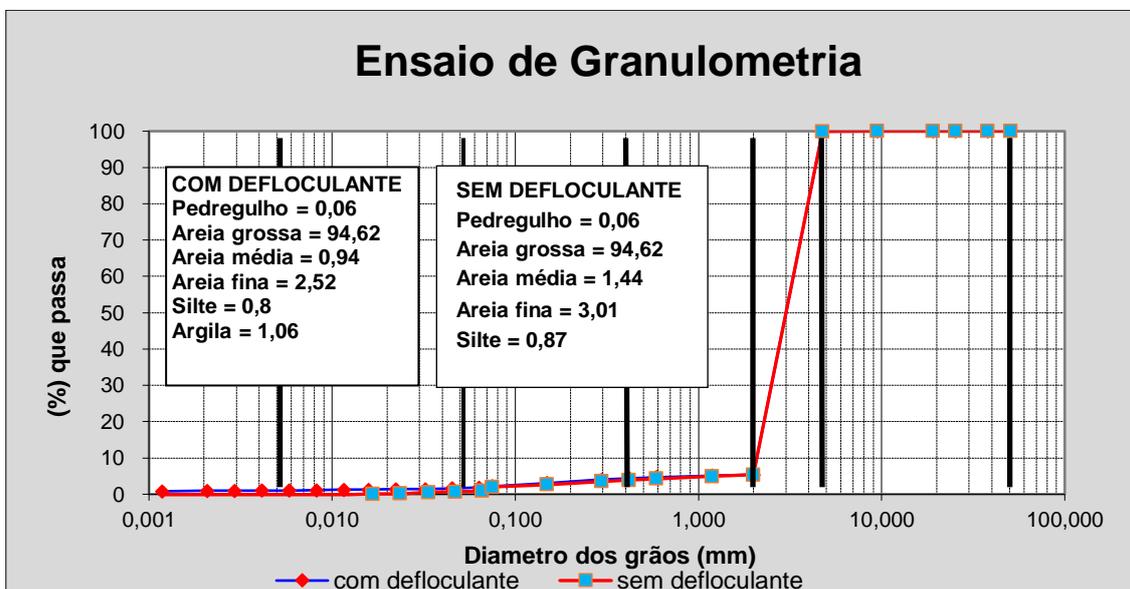
Gráfico 3 - Curva granulométrica do solo coletado.



Fonte: A Autora (2024).

A curva granulométrica por sedimentação, apresentada através do Gráfico 4 apresenta a mesma percepção a respeito do comportamento do solo do Município de Caruaru. Nota-se que o material passante é de 100% nas peneiras de abertura 9,52; 19,10; 25,40; 38,10 e 50,80 mm. Chegando até a peneira de abertura de número 4,76, tendo um declínio mínimo, passando 99,94%; já na última peneira de solo graúdo houve um alto declínio na porcentagem, a abertura de número 2 mm, passou 5,32% de amostra de solo.

Gráfico 4 - Curva granulométrica do solo coletado obtida por sedimentação.



Fonte: A Autora (2024).

O peneiramento do solo miúdo executado com a presença do defloculante apresentou porcentagem passante superior quando comparadas ao peneiramento sem o uso de defloculante como pode ser observado no Gráfico 4, enquanto na peneira de abertura de número 1,190 foi passado 5,12% com o uso do defloculante, sem sua utilização passou 4,92%, o mesmo ocorreu com a peneira de abertura 0,075, que apresentou a passagem de solo em 2,23% e 1,95% com e sem a utilização do defloculante, respectivamente.

Foi escolhido trabalhar com a granulometria a laser para determinar a distribuição de tamanhos de partículas finas do solo (não determináveis por peneiras), executando a corroboração dos dados obtidos e a obtenção de dados complementares. É possível determinar que o solo obtido em Caruaru possui 25% de solo coesivo, 5% de solo siltoso, que não apresenta um índice de coesão satisfatório e 67% de solo não-coesivo, onde 3% do volume total do material foi identificado como areia grossa e pedregulho. Demonstrando umidade média de sedimentação de 2,30%.

Os dados descritivos obtidos através do ensaio de granulometria apresentam similaridade com a mistura de solo ideal para fabricação do tijolo solo-cimento de acordo com Barbosa *et al.* (2016), na qual a areia deve ter predominância variando entre 50% a 70% da composição, enquanto o silte e argila presente entre 10% a 20% devido a necessidade de coesão para que haja a incorporação entre as matérias-primas utilizadas. Lima *et al.* (2019) classifica seu solo como solo siltoso, com a presença de argila e areia fina, de acordo com sua curva granulométrica seu solo possui índice de 42% de silte e 40% de areia fina, apresentando divergências com a classificação encontrada ao solo utilizado na confecção dos tijolos solo-cimento.

O potencial de moldar-se do solo trabalhado nesta pesquisa fica a cargo dos 25% de argila presente em sua composição, enquanto o de Lima *et al.* (2019) fica em função do silte, que é uma mistura de composição em argila e areia. A diferença entre a composição obtida pelo ensaio de granulometria deve-se ao fato da mudança de localização da obtenção dos solos trabalhados nas duas pesquisas, visto que pode haver divergências de resultados em extrações com metragens de distâncias.

Na trabalhabilidade do tijolo solo-cimento é necessário utilizar como matéria-prima solos que apresentem uma boa resistência à compressão e ao mesmo tempo tenham a possibilidade de incorporação, oferecendo consistência ao tijolo de forma que após sua fabricação ele não segregue ou rompa. Em consequência do solo obtido no município de

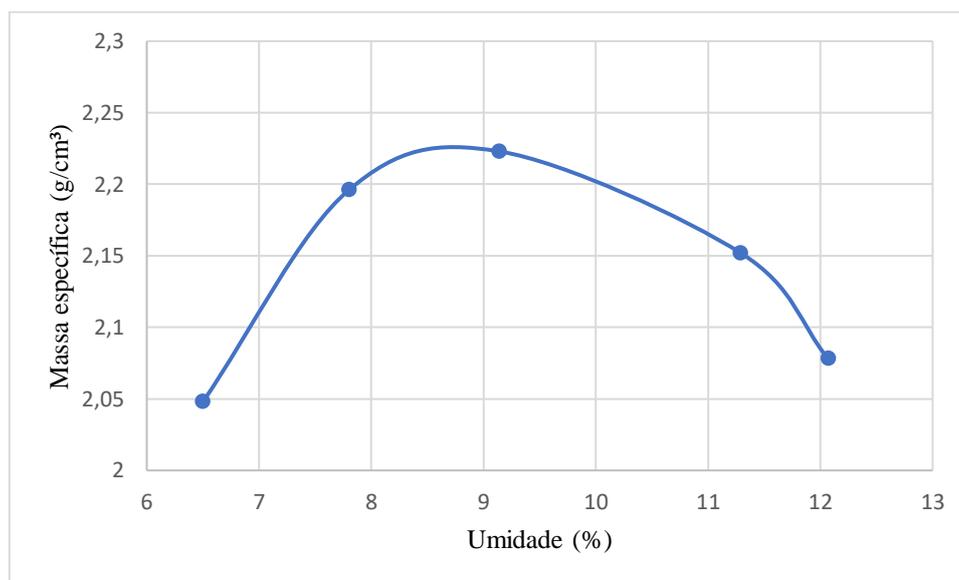
Caruaru possuir areia, argila e silte dentro de sua composição, apresentando predominância da areia, o solo se mostra adequado na fabricação dos tijolos solo-cimento.

De acordo a Tabela 15 de classificação dos solos HRB-AASHO e com os resultados obtidos com o ensaio de granulometria no Gráfico 5, o solo recolhido no município de Caruaru, no agreste do estado Pernambucano é classificado como solo A1-a, devido a de combinação de areia areia fina e média na amostra com defloculante, que somam 4,38%. De acordo com o DNIT (2006) a amostra de solo que precisa passar na peneira n° 200 (0,075 mm) é menor que 35%, enquanto o solo estudado teve 0% de amostra passada.

#### 5.1.4 Ensaio de compactação

A partir dos dados obtidos durante o ensaio de compactação de solo, foi gerada a curva de compactação (Gráfico 5). Foram realizados com cinco amostras diferentes, fazendo a verificação da densidade máxima do solo, que apresentou a média de 2,14 g/cm<sup>3</sup>, e a identificação da umidade ótima, exibindo 9,36%, um resultado similar ao apresentado no teor de umidade do solo trabalhado.

Gráfico 5 - Curva granulométrica do solo coletado obtida por sedimentação.



Fonte: A Autora (2024).

Lima *et al.* (2019) em sua pesquisa, encontraram valores similares de densidade máxima do solo e umidade ótima, de 1,96 g/cm<sup>3</sup> e 7,99%. A composição química do solo

utilizado influencia na capacidade de compactação, fazendo o resultado se alterar dependendo do local de coleta do solo, todavia, os resultados obtidos no ensaio de compactação dos solos indicam que não houve diferença significativa entre os valores de densidade máxima e umidade ótimo, corroborando com a pesquisa executada por Lima *et al.* (2019).

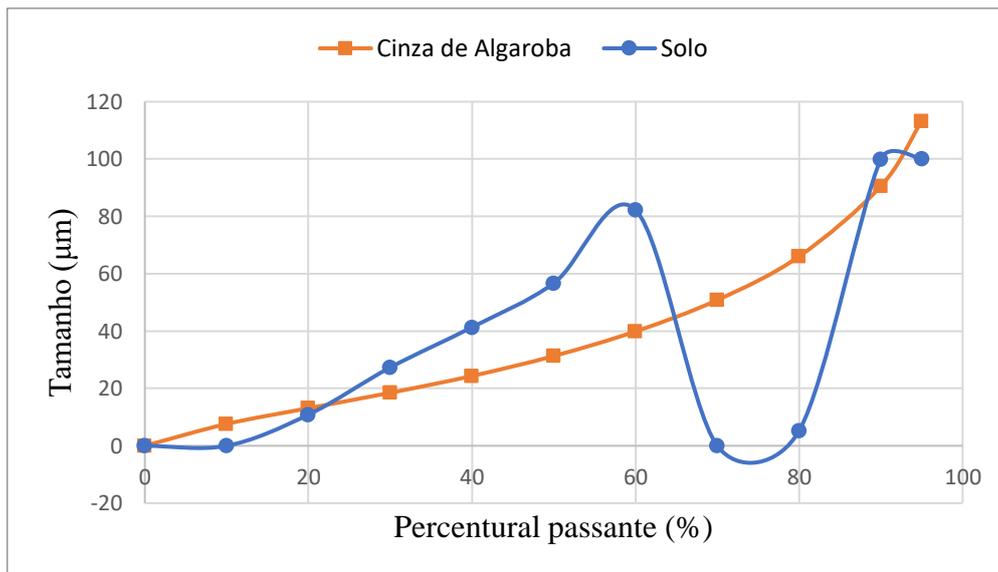
## **5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS DE ALGAROBA**

### **5.2.1 Área específica e granulometria**

O ensaio da área específica da cinza de algaroba realizada pelo método BET (Brunauer, Emmett, Teller), através da adsorção e dessorção de nitrogênio obteve como resultado 4,2469 m<sup>2</sup>/g. Essa medida representa a quantidade de área superficial disponível por grama da amostra.

Em termos práticos, quanto maior o valor da área específica, mais porosa é a cinza de algaroba. Isso pode influenciar na resistência à compressão, absorção de água, densidade e durabilidade quando a utilizamos na confecção de tijolos solo-cimento. O valor foi próximo ao encontrado no trabalho de Lima et al (2019) cuja área superficial específica foi 4,7142 m<sup>2</sup>/g, enquanto Leloup (2013) em sua dissertação encontrou como resultado 4 m<sup>2</sup>/g. Ao comparar esses valores, podemos observar que a área obtida nesta análise, permanece dentro da média das áreas específicas de cinza de algaroba encontradas anteriormente. A distribuição granulométrica foi realizada por difração a laser, seus dados expressos no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Tamanho das partículas por difração a laser da cinza de algaroba e do solo do município de Caruaru.

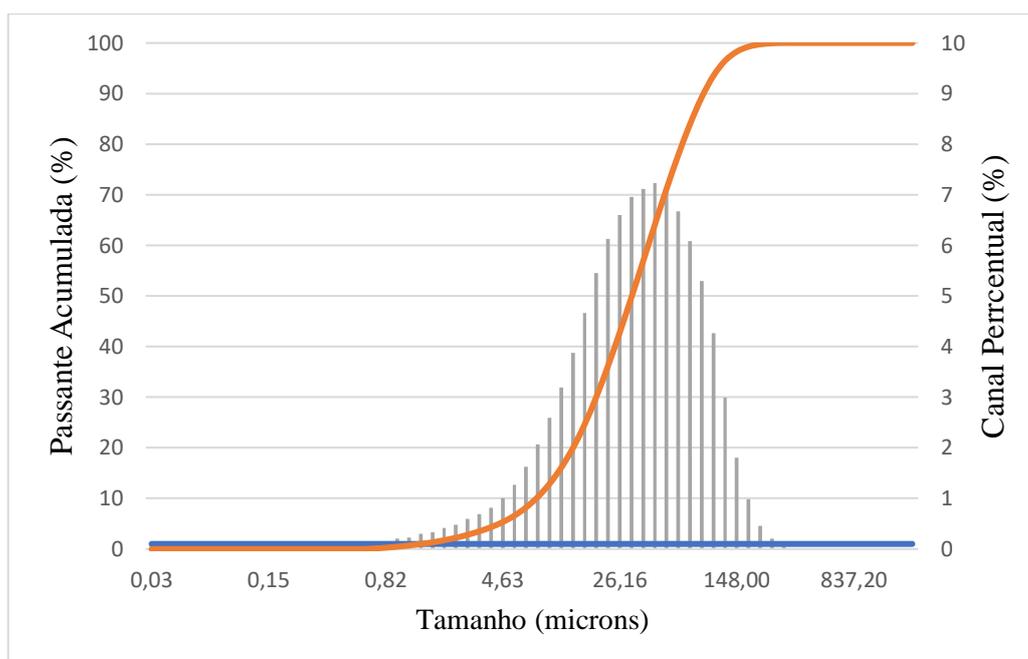


Fonte: A Autora (2024).

O tamanho das partículas foi averiguado na unidade de medida de  $\mu\text{m}$ , apresentando a variação de medições de 7,61  $\mu\text{m}$  a 113,2  $\mu\text{m}$ , sendo fornecidas em onze tamanhos divergentes. As porcentagens de correspondência variam de 10,00% a 95,00%, os valores D10, D50 e D90 das cinzas de algaroba são 7,61  $\mu\text{m}$ , 31,31  $\mu\text{m}$  e 90,53  $\mu\text{m}$ , enquanto os valores D10, D50 e D100 do solo obtido em Caruaru foram de 10,85  $\mu\text{m}$ , 56,68  $\mu\text{m}$  e 99,94  $\mu\text{m}$ . Enquanto as cinzas de algaroba apresentam uma distribuição mais uniforme em direção a 100  $\mu\text{m}$ , o solo apresenta dois picos em torno de 20  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ , apresentando duas quedas em 10  $\mu\text{m}$  e 70  $\mu\text{m}$ . Apesar da linha de distribuição dos materiais apresentar uma quantidade de picos divergente, o seu desenvolvimento apresenta similaridade, havendo pontos em que apresentam a mesma porcentagem nos tamanhos de partícula em 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 65  $\mu\text{m}$ , 88  $\mu\text{m}$  e 92  $\mu\text{m}$ .

A similaridade na granulometria entre as cinzas de algaroba e o solo é uma característica crucial para que a fabricação do tijolo solo-cimento seja possível. Quando há substituição de materiais, uma granulometria similar ajuda a preservar a coesão e facilitar a execução da mistura da mistura. Outro ponto importante é que a substituição do solo por cinza de algaroba, sem alterar muito a granulometria, auxilia na conservação das propriedades físicas e mecânicas desejadas ao tijolo solo-cimento, como a resistência à compressão e durabilidade.

Gráfico 7 - Curva granulométrica a laser da cinza de algaroba.



Fonte: A Autora (2024).

A cinza de algaroba apresentada na curva granulométrica do Gráfico 7, demonstrou diâmetros D10, D50 e D90 em 7,61  $\mu\text{m}$ , 31,31  $\mu\text{m}$  e 90,53  $\mu\text{m}$ . Na pesquisa de Leloup (2013), o ensaio granulométrico a laser da cinza de algaroba revelou partículas com tamanhos entre 0,3  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ . Essa faixa representa os índices mínimo e máximo de material passante. Os diâmetros D10, D50 e D90 apresentam aproximadamente os tamanhos de 8,50  $\mu\text{m}$ , 42,35  $\mu\text{m}$  e 85,10  $\mu\text{m}$ . Desta maneira, as cinzas de algaroba trabalhadas nesta pesquisa apresentaram uma menor porcentagem passante ao longo dos diâmetros apresentados de Leloup (2013). Isso influencia no quantitativo de cinza de algaroba consumido ao longo da produção dos tijolos de solo-cimento, que pode influenciar a porosidade, resistência e outras propriedades do material final.

### 5.2.2 Fluorescência de raios-x

Na Tabela 18, são apresentados os dados obtidos no ensaio de fluorescência de raios-x da cinza de algaroba, demonstrando que os componentes predominantes são o cálcio (CaO com 68,09%) e o potássio ( $\text{K}_2\text{O}$  com 7,88%), seguidos por magnésio (MgO 3,56%) e fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$  3,16%). Os percentuais de  $\text{SiO}_2$  (Dióxido de Silício) e  $\text{SO}_3$  (Trióxido de Enxofre) são baixos e somam aproximadamente 2,9%. Os óxidos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

(Óxido de Ferro), SrO (Óxido de Estrôncio), Cl (Cloreto) e  $Al_2O_3$  (Óxido de Alumínio) estão presentes na forma de traços. O percentual de perda ao fogo (12%) sugere que a queima da algaroba não foi completa, preservando resíduos de compostos orgânicos nas cinzas.

Tabela 18 - Fluorescência de Raios-X da cinza de algaroba

Componentes	Porcentagem (%)
CaO	68,0944
$K_2O$	7,8892
MgO	3,5657
$P_2O_5$	3,1636
$SiO_2$	1,5470
$SO_3$	1,3516
$Fe_2O_3$	0,6776
SrO	0,6248
Cl	0,5808
$Al_2O_3$	0,5033
Perda ao Fogo	12

Fonte: A Autora (2024).

Estes dados são cruciais para entender a composição química detalhada da cinza de algaroba. O CaO, por exemplo, é relevante para a resistência mecânica e durabilidade de materiais cimentícios. Já a presença de  $K_2O$  e MgO podem influenciar propriedades como a reatividade e a estabilidade do tijolo solo-cimento. Além disso, a cinza de algaroba, quando adequadamente tratada, pode ser utilizada como *filler* em materiais de construção. Leloup (2013) e Melo (2012) realizaram em suas pesquisas o ensaio de FRX da cinza de algaroba, os percentuais se encontram na Tabela 19. Ambos autores não realizaram o ensaio de perda ao fogo, foi atribuído 12% de perda ao fogo para realizar a comparação dos dados obtidos no ensaio de fluorescência de raios-X.

Tabela 19 - Fluorescência de Raios-X da cinza de algaroba de Leloup (2013) e Melo (2012), recalculados considerando os valores de perda ao fogo desta pesquisa.

Componentes	Leloup (%)	Melo (%)
CaO	68,11	68,58
$K_2O$	12,08	7,42
MgO	-	2,65
$P_2O_5$	-	3,45
$SiO_2$	3,57	1,45
$SO_3$	1,39	0,73
$Fe_2O_3$	1,87	0,28
SrO	-	0,85
Cl	-	1,36
$Al_2O_3$	-	0,64
Perda ao Fogo	12	12

Fonte: A Autora (2024).

Embora as pesquisas de Leloup (2013) e Melo (2012) tenham sido realizadas há mais de dez anos, percebe-se que a composição química da cinza de algaroba permanece estável, esta característica é crucial nos materiais da construção civil, devido a previsibilidade comportamental que o material irá passar a desempenhar. Desta maneira, quando a cinza de algaroba for utilizada em obra, engenheiros e arquitetos podem prever com maior precisão o comportamento do material em diferentes condições, devido a consistência dos seus elementos. Outra razão é a compatibilidade, materiais estáveis quimicamente são menos propensos a desempenharem reações indesejadas na presença de outros materiais presentes em uma construção.

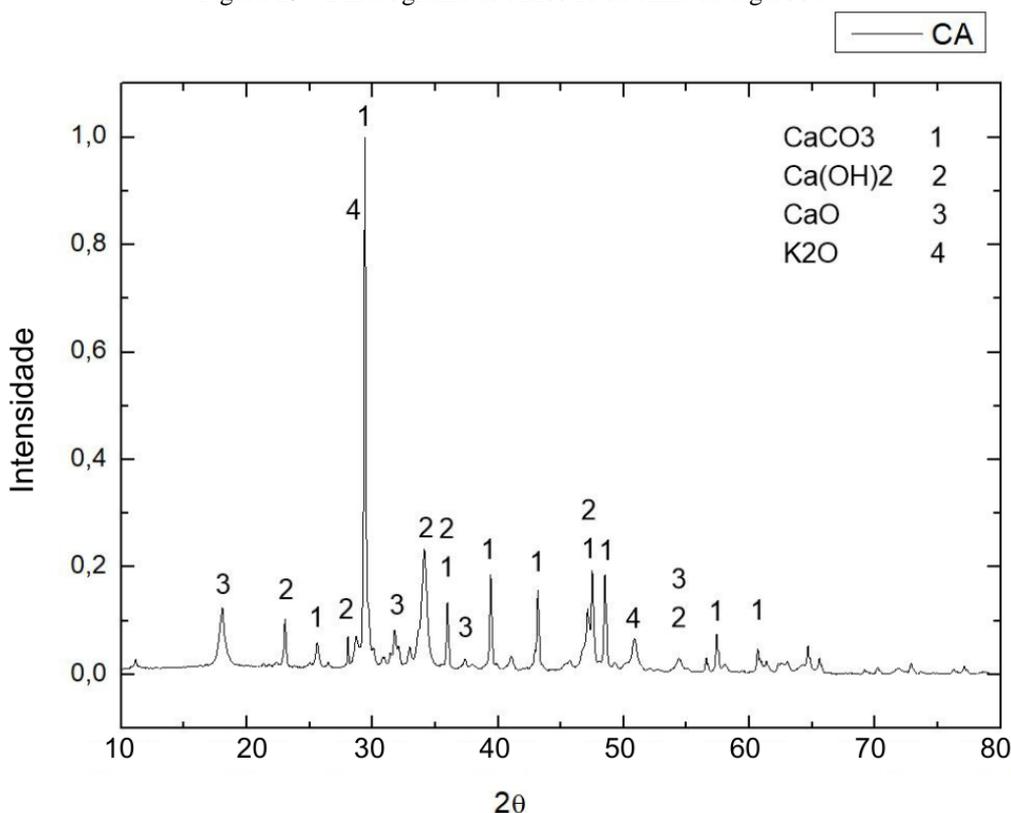
### 5.2.3 Difractometria de Raios-X

De acordo com o difratograma de Raios-X (Figura 25), as cinzas de algaroba contêm carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ), os picos em  $2\theta$  foram identificados em  $26,0^\circ$ ,  $30,0^\circ$ ,  $37,0^\circ$ ,  $39,5^\circ$ ,  $43,5^\circ$ ,  $47,5^\circ$ ,  $48,5^\circ$ ,  $58,0^\circ$  e  $61,0^\circ$ , com  $2\theta$  de maior intensidade localizado em  $30^\circ$ . Hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) também foi identificado no DRX, com picos em  $2\theta$  em  $23,5^\circ$ ,  $29,0^\circ$ ,  $34,5^\circ$ ,  $35,5^\circ$ ,  $48,5^\circ$  e  $55^\circ$ , com  $2\theta$  de maior intensidade localizado em  $34,5^\circ$ . Foram identificados quatro picos de óxido de cálcio (CaO) em  $2\theta$ , sua maior intensidade foi visualizada em  $18^\circ$ , os outros três picos foram identificados em  $32,0^\circ$ ,

37,5° e 55,0°. O composto de óxido de potássio foi localizado em dois picos no 2θ, 29,5° (seu pico de maior intensidade) e 51,0°.

Leloup (2013) e Cavalcanti (2016) também identificaram as mesmas fases nas cinzas de algaroba nos seus difratogramas. Os maiores picos de Leloup (2013) identificaram  $\text{CaCO}_3$  no 2θ em 30,0° e  $\text{K}_2\text{O}$  em 29,5°; o DRX de Cavalcanti (2016) localizou os maiores picos de  $\text{CaO}$  em 37,5° e  $\text{CaCO}_3$  em 30,0°. Corroborando com os componentes identificados na Figura 25.

Figura 23 - Difratograma de Raios-X da cinza de algaroba.

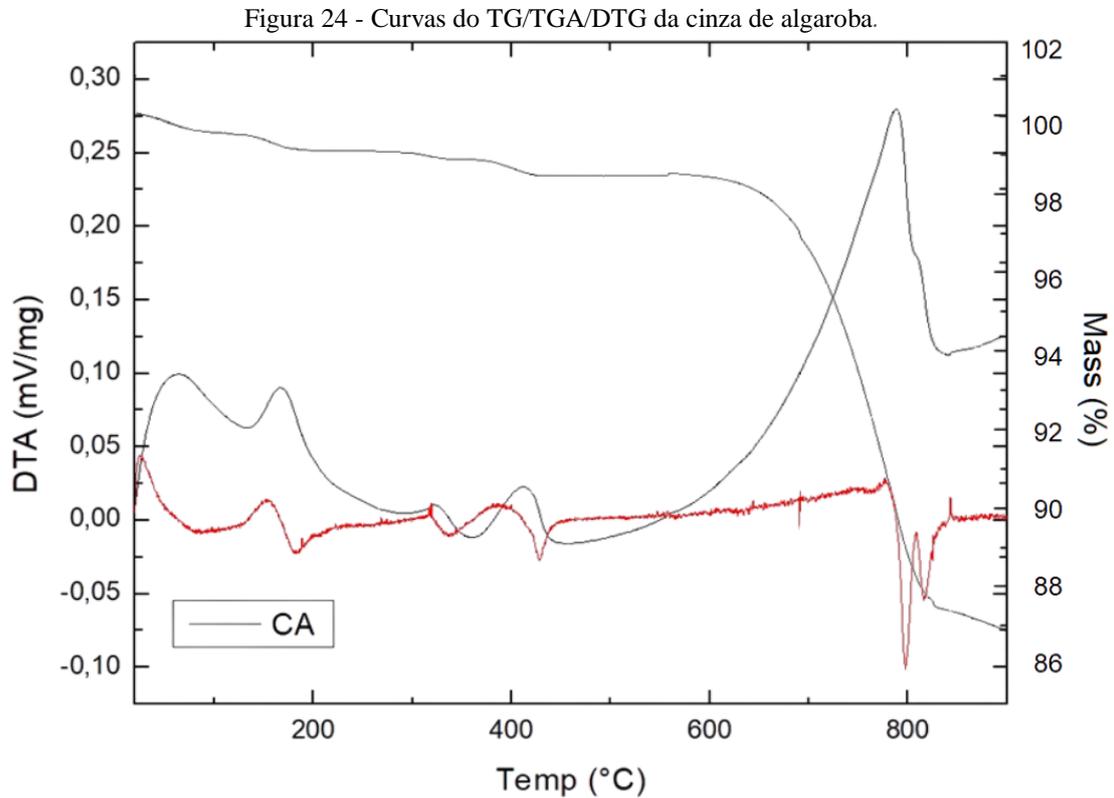


Fonte: A Autora (2024).

#### 5.2.4 Termogravimetria / Análise Térmica Diferencial

A Figura 26 apresenta os resultados de termogravimetria/análise térmica diferencial das cinzas de algaroba. Em relação ao comportamento térmico, é possível observar que ocorreram três perdas, as cinzas de algaroba perdem aproximadamente 1% da massa até 400°C, o que sugere que este resíduo tem baixa umidade ou resíduos de matéria orgânica. Entre o intervalo de temperatura de 400°C e 600°C o percentual de perda de massa é de 0,5%, onde é realizada a decomposição do Hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) no óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ). Após 600°C, ocorre a terceira perda de massa até

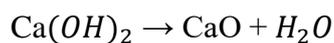
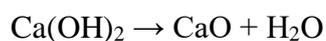
900°C, com 11,5% de perda, ocorrendo a decomposição do carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) no CaO. A perda total de massa observada no TG foi de 13% e é coerente com o valor de umidade de 1% e o resultado determinado no ensaio de perda ao fogo de 12% (Tabela 17).

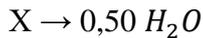
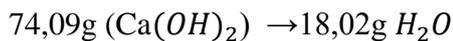
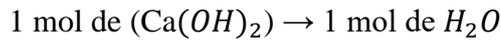


Fonte: A Autora (2024).

O perfil de decomposição térmica revela os resíduos são de carbonatos de cálcio, e não de compostos de lignina ou outras estruturas vegetais. Estas regiões de temperaturas identificadas são semelhantes as encontradas por Leloup (2013), apresentando como única diferença o percentual de perda de massa, Leloup (2013) em sua pesquisa identificou como perda total no TG 24,06%, com este dado é perceptível que as cinzas de algaroba conseguem suportar maior contato com altas temperaturas que há uma década.

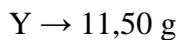
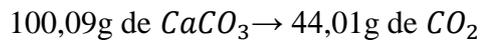
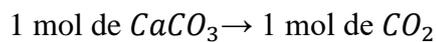
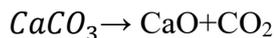
O cálculo do óxido de cálcio destrutada na amostra é obtida através da Equação 12:





Portanto, a massa de CaO formada é de 2,06 g ou 2,06% em relação à massa inicial de CaO.

O cálculo da quantidade do carbonato de cálcio na amostra é obtido através da Equação 13:



Portanto, a massa de  $\text{CaCO}_3$  formada é de 26,15g ou 26,15% em relação à massa inicial de  $\text{CaCO}_3$ .

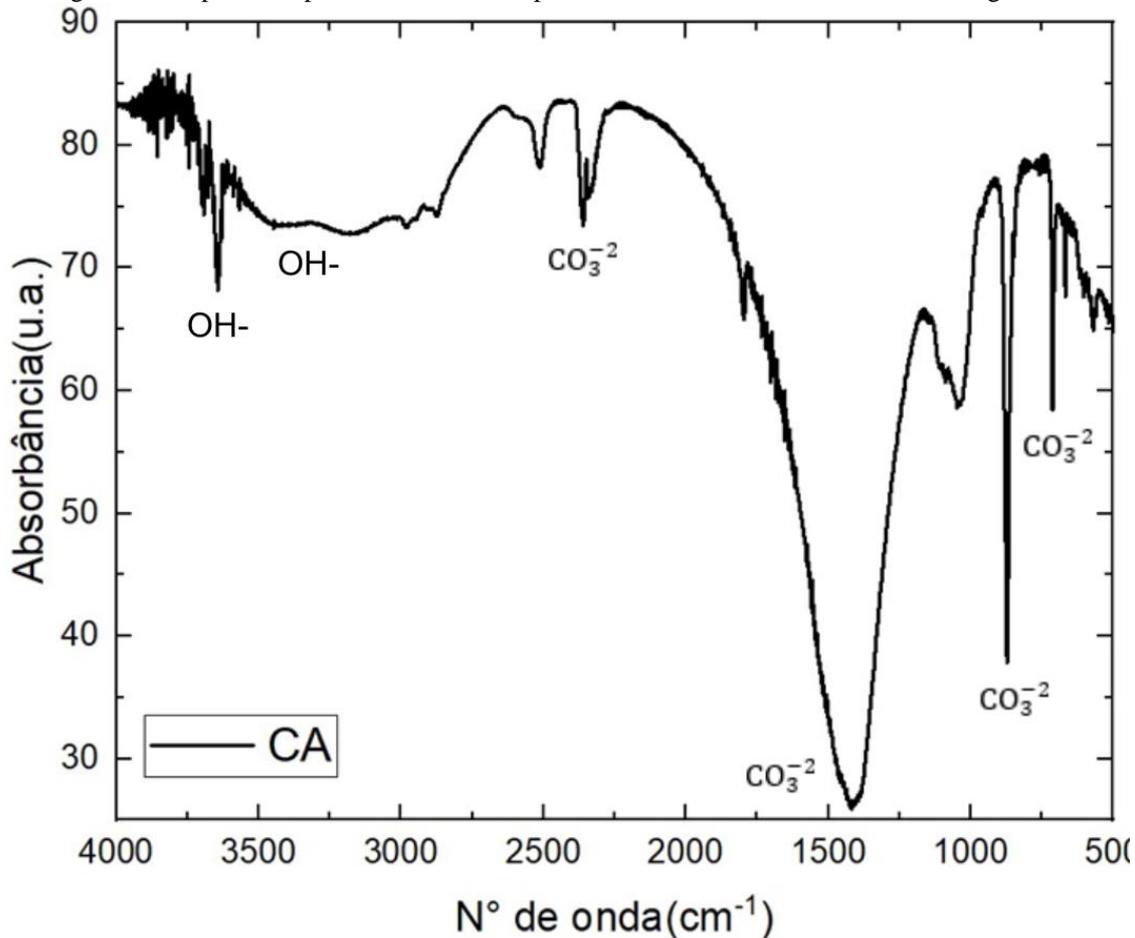
Observa-se a linha vermelha, denominada de primeira derivada da curva CA, segue o padrão apresentado pela curva CA, mas com detalhes mais finos nas transições, revelando informações sobre as fases exotérmicas e endotérmicas em sua curva. Os eventos endotérmicos são identificados nos picos 200 °C, 420 °C e 800 °C. Dentre elas, o gráfico possui o pico mais proeminente apresentado na temperatura de 800 °C, podendo indicar uma reação de decomposição. Os eventos exotérmicos ocorrem entre as temperaturas de 0°C a 50°C e 150°C, podendo estar relacionado à reação de cristalização. Os resultados obtidos através da análise da DTA corroboram com os resultados encontrados pelo TG e TGA.

### 5.2.5 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

A observação do espectro de FTIR (Figura 27) das cinzas de algaroba indica que foram identificadas bandas de absorção em  $3650 \text{ cm}^{-1}$  e  $3300 \text{ cm}^{-1}$ , apresentando o estiramento  $\text{OH}^-$  relacionado ao composto do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ); as bandas

localizadas em  $2250\text{ cm}^{-1}$ ,  $1400\text{ cm}^{-1}$ ,  $800\text{ cm}^{-1}$  e  $675\text{ cm}^{-1}$ , exibiram  $\text{CO}_3^{-2}$  como estiramento correspondente ao composto do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Figura 25 - Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier da cinza de algaroba.



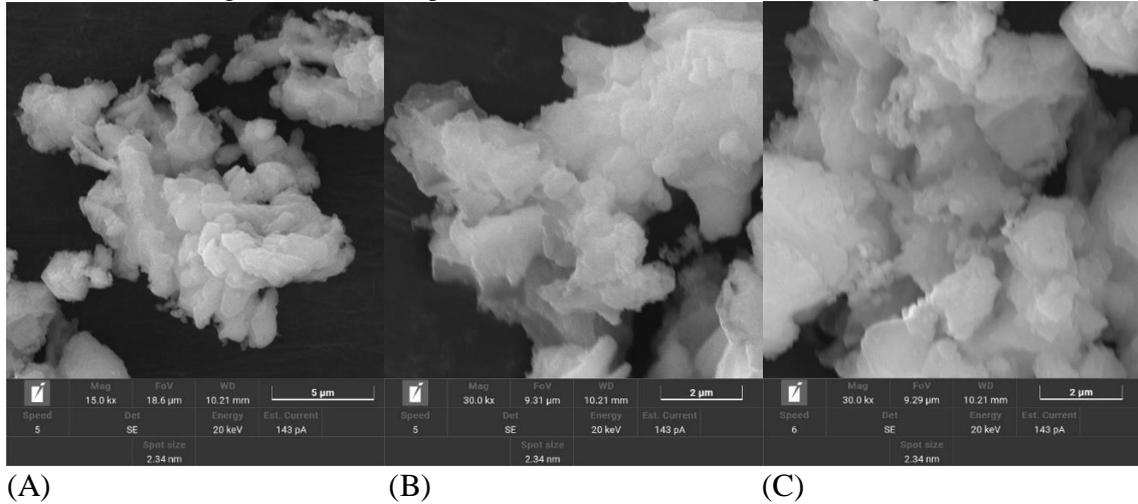
No trabalho de Leite (2018), o espectro de FTIR de lama de cal também apresentou as mesmas bandas de hidróxido de cálcio (bandas de  $3640\text{ cm}^{-1}$  a  $3642\text{ cm}^{-1}$ ,  $3419\text{ cm}^{-1}$  a  $3439\text{ cm}^{-1}$ ) e carbonato de cálcio ( $2400\text{ cm}^{-1}$ , entre  $1406\text{ cm}^{-1}$  a  $1411\text{ cm}^{-1}$  e  $841\text{ cm}^{-1}$  a  $897\text{ cm}^{-1}$ ).

#### 5.2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens de MEV, apresentadas na Figura 28, revelam detalhes sobre a morfologia da cinza de algaroba. A partir das imagens obtidas pelo MEV é possível perceber que a cinza de algaroba apresenta uma estrutura irregular, com ângulos levemente arredondados e pouco porosa. Isso pode ser atribuído aos processos térmicos

e químicos que ocorrem durante a combustão. As suas partículas são heterogêneas em termos de forma e tamanho, sendo possível observar variância no tamanho de grãos em torno de 5  $\mu\text{m}$  e 2  $\mu\text{m}$ .

Figura 26 - Microscópio eletrônico de varredura da cinza de algaroba.

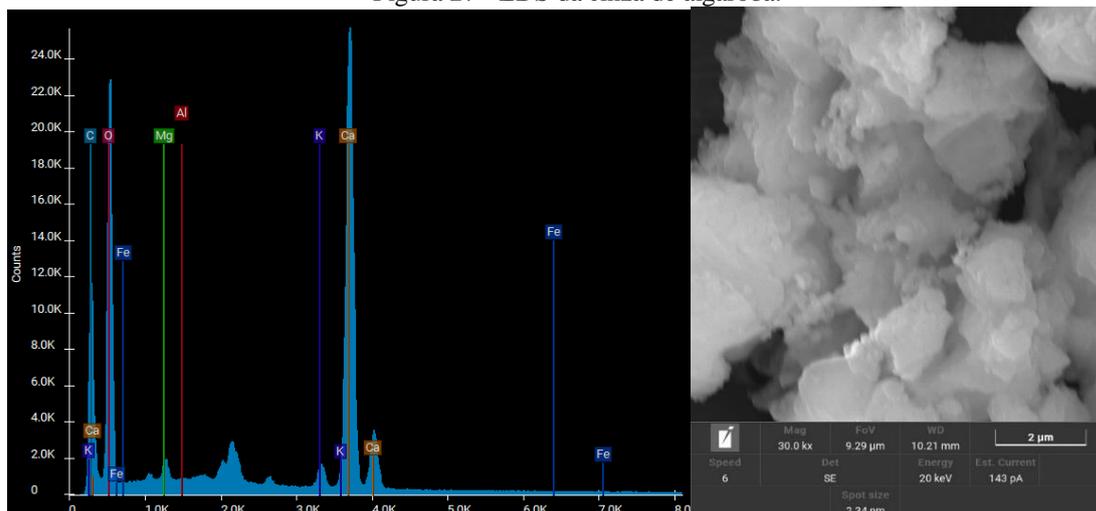


Fonte: A Autora (2024).

As partículas de cinza de algaroba têm capacidade de se aglomerar, formando estruturas maiores e mais complexas. A superfície rugosa das partículas de cinza pode aumentar a área de superfície disponível para reações químicas ou interações físicas. No EDS da Figura (29), captado pela imagem C da Figura 28, observa-se a presença dos elementos Ca, O, K, Mg, P, Si, Al e Fe presentes na composição química da amostra, corroborando com os resultados obtidos pela realização do FRX e DRX da cinza de algaroba.

Os resultados obtidos através do MEV e EDS realizados das cinzas de algaroba foram os mesmos encontrados durante a pesquisa de Leloup (2013), reforçando os dados obtidos ao longo desta pesquisa.

Figura 27 - EDS da cinza de algaroba.



Fonte: A Autora (2024).

### 5.3 ANÁLISES DE DESEMPENHO TECNOLÓGICO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

#### 5.3.1 Resistência à compressão

O resultado de resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento com a substituição parcial do solo pela cinza de algaroba com diferentes porcentagens (0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50%) são apresentados na Tabela 20. O tijolo de referência (TSC 0%) produzido com o cimento portland CPV – ARI, o solo de Caruaru e traço de 1:6 utilizados atenderam a norma NBR 8491 (2012), que define a resistência média mínima em 2 MPa, e a resistência individual mínima do tijolo solo-cimento em 1,7 MPa.

Foi observado um resultado crescente da resistência à compressão ao longo do aumento da porcentagem de substituição parcial da cinza de algaroba dentro do tijolo solo-cimento, este comportamento pode ser observado entre o TSC 0% até o TSC 20%, apresentando uma queda mínima ao TSC 35% na idade de 7 dias de cura. Os tijolos de TSC com 20% apresentaram maior resistência comparado aos outros tijolos aos sete dias de idade. No entanto, aos 28 dias, foi observada maior resistência nos TSC 35%.

Tabela 20- Resistência à compressão dos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba em MPa, aos 7 e 28 dias.

Porcentagem	TSC 0%	TSC 5%	TSC 10%	TSC 20%	TSC 35%	TSC 50%
7 dias						
CP1	2,273	2,110	2,408	2,743	2,578	1,960
CP2	1,969	2,077	2,466	2,376	2,265	1,814
CP3	2,046	2,173	2,817	2,127	2,890	2,389
CP4	2,304	1,938	2,097	2,769	2,486	1,78
CP5	2,182	2,435	2,266	2,659	2,334	2,567
CP6	2,002	2,372	2,389	2,871	2,714	2,089
CP7	2,123	2,433	2,198	2,251	2,697	1,974
28 dias						
CP1	2,272	2,544	2,531	2,201	2,611	2,001
CP2	2,113	1,989	2,030	2,763	2,269	2,358
CP3	2,085	2,274	2,783	2,397	2,358	1,939
CP4	2,220	2,410	2,868	2,954	2,774	2,262
CP5	1,973	2,586	2,132	2,789	2,488	1,814
CP6	2,456	2,362	2,399	2,577	2,704	2,561
CP7	2,279	2,609	2,436	2,832	2,831	1,799

Fonte: A Autora (2024).

O desempenho apresentado pelo TSC 50% atende à norma, apresentando 2,09 MPa como valor médio na Tabela 20, e valor individual mínimo 1,78 MPa na Tabela 19. Todavia, quando comparados com o tijolo de referência e os outros tipos de tijolos solo-cimento com incorporação de cinzas de algaroba, percebe-se que os resultados apresentados do TSC ficaram aquém das expectativas, tornando a sua utilização impraticável devido ao seu desempenho ser inferior ao do TSC 0%.

A análise estatística ANOVA (Tabela 21) dos resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão dos tijolos solo-cimento mostra que o TSC 20% apresentou a maior média de resistência, com 2,59 MPa, seguido pelo TSC 35% de 2,57 MPa. Observando a fonte da variação da ANOVA, percebe-se que como  $F = 2,1237$  e valor- $P = 0,1494$ , não há uma diferença significativa entre as amostras, pois o valor- $P$  é menor que 0,05, o mesmo ocorre entre as interações das variáveis estudadas.

Tabela 21 - Análise estatística ANOVA de resistência à compressão dos TSC.

Anova: fator duplo com repetição							
RESUMO	TSC 0%	TSC 5%	TSC 10%	TSC 20%	TSC 35%	TSC 50%	Total
7 dias							
Contagem	7	7	7	7	7	7	42
Soma	14,899	15,538	16,641	17,796	17,964	14,573	97,411
Média	2,1284	2,2197	2,3773	2,5423	2,5663	2,0819	2,31931
Variância	0,01714	0,03816	0,05423	0,08305	0,04917	0,08652	0,085057
28 dias							
Contagem	7	7	7	7	7	7	42
Soma	15,398	16,774	17,179	18,513	18,035	14,734	100,633
Média	2,19971	2,39629	2,45414	2,64471	2,57643	2,10486	2,396024
Variância	0,02495	0,04754	0,0954	0,0714	0,04523	0,08555	0,091901
Total							
Contagem	14	14	14	14	14	14	
Soma	30,297	32,312	33,82	36,309	35,999	29,307	
Média	2,16407	2,308	2,41571	2,5935	2,57136	2,09336	
Variância	0,02079	0,04795	0,07065	0,07411	0,04359	0,07956	
ANOVA							
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Amostra	0,1236	1	0,1236	2,1237	0,1494	3,9739	
Colunas	3,00238	5	0,60048	10,3186	1,7E-07	2,34183	
Interações	0,06293	5	0,01259	0,21627	0,95451	2,34183	
Dentro	4,18994	72	0,05819				
Total	7,37884	83					

Fonte: A Autora (2024).

Entre os TSC de 0%, 5% e 10% houve um aumento gradativo de 0,020 e 0,023 da variância apresentada entre os tijolos de solo-cimento, o que pode ser relacionado a presença da cinza de algaroba dentro do sistema do tijolo solo-cimento. Enquanto entre os TSC 10% e TSC 20% foi notado um aumento de variância entre 0,004. A partir deste ponto são observados os níveis de variância de resistência do TSC 20% e TSC 35% obteve-se uma diminuição de 0,031, enquanto de TSC 35% e TSC 50% houve um aumento de variância de 0,036.

A execução da variância nos resultados é essencial porque ela apresenta se há disparidade entre os valores obtidos individualmente de resistência à compressão. Quanto mais próximo do resultado 0, maior a confiabilidade dos resultados, em contrapartida,

quanto mais próximo do valor 1, menor sua confiabilidade. Nenhum dos tijolos de solo-cimento apresentou resultado próximo ao valor 1, o que significa que a divergência entre seus resultados individuais não é significativa e se demonstra confiável, os TSC que apresentação os menores índices de variância foram TSC 0%, TSC 5% e TSC 35%.

### 5.3.2 Absorção de água

A norma técnica 8491 (2012) referente ao ensaio de absorção de água do tijolo solo-cimento requer que o resultado em porcentagem não ultrapasse do limite máximo de 20% de absorção entre as médias e 22% de absorção unitária entre as amostras. De acordo com a Tabela 22 nenhuma das amostras apresentou absorção de água maior que 18%, a amostra de tijolo solo-cimento de referência (TSC 0%) apresentou maior absorção, aproximadamente 17,5% aos 7 dias e 17,5% aos 28 dias. Isso pode ser explicado pela falta de cinzas de algaroba no sistema do tijolo, visto que, as cinzas têm como propriedades preencher os vazios, minimizando a entrada de fluídos dentro do tijolo solo-cimento.

Tabela 22 - Absorção de água (%) dos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba aos 7 e 28 dias.

Porcentagem	TSC 0%	TSC 5%	TSC 10%	TSC 20%	TSC 35%	TSC 50%
7 dias						
CP1	17,523	15,468	15,077	15,061	15,812	16,273
CP2	16,775	15,56	14,766	15,813	15,292	15,804
CP3	16,339	16,127	15,978	14,027	15,175	15,353
28 dias						
CP1	17,504	14,441	14,335	14,096	14,589	15,818
CP2	16,822	15,771	13,159	14,423	14,697	15,368
CP3	16,177	14,900	14,640	13,659	14,276	14,685

Fonte: A Autora (2024).

A análise estatística ANOVA dos resultados de absorção de água é apresentada na Tabela 23. Os resultados obtidos a partir das amostras e obtendo a média de absorção de água em 7 dias de 16,879%, 15,7183%, 15,273%, 14,967%, 15,426% e 15,810% para o teor de resíduos de cinza de algaroba implementados nos tijolos solo-cimento em 0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50% respectivamente. Desta maneira, a substituição de solo por cinzas de algaroba de 5% até 20% resulta na diminuição da absorção de água do tijolo solo-cimento. A fonte da variação da ANOVA apresenta  $F = 4,2596$  e  $\text{valor-P} = 0,0011$ , demonstrando que não há uma diferença significativa entre as amostras e suas interações.

Tabela 23 - Análise estatística ANOVA da absorção de água dos TSC.

Anova: fator duplo com repetição							
RESUMO	TSC 0%	TSC 5%	TSC 10%	TSC 20%	TSC 35%	TSC 50%	Total
7 dias							
Contagem	3	3	3	3	3	3	18
Soma	50,637	47,155	45,821	44,901	46,279	47,43	282,223
Média	16,879	15,71833	15,27367	14,967	15,4263	15,81	15,6791
Variância	0,358576	0,127372	0,396244	0,804076	0,11498	0,21163	0,62395
28 dias							
Contagem	3	3	3	3	3	3	18
Soma	50,503	45,112	42,134	42,178	43,562	45,871	269,36
Média	16,83433	15,03733	14,04467	14,05933	14,5207	15,2903	14,9644
Variância	0,440346	0,45637	0,61156	0,146932	0,04781	0,32545	1,20397
Total							
Contagem	6	6	6	6	6	6	
Soma	101,14	92,267	87,955	87,079	89,841	93,301	
Média	16,85667	15,37783	14,65917	14,51317	14,9735	15,5502	
Variância	0,320167	0,372625	0,856254	0,627561	0,31119	0,29585	
ANOVA							
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Amostra	4,596021	1	4,596021	13,64702	0,00114	4,25968	
Colunas	21,75234	5	4,350469	12,9179	3,7E-06	2,62065	
Interações	1,239491	5	0,247898	0,736087	0,60371	2,62065	
Dentro	8,08268	24	0,336778				
Total	35,67053	35					

Fonte: A Autora (2024).

Variâncias menores que 1 indicam que os dados têm pouca dispersão em torno da média, mostrando estabilidade e consistência nos resultados. Desta maneira, os índices de absorção de água dos tijolos de solo-cimento não apresentaram uma variância significativa, os menores índices de variância de acordo com a Tabela 22 foram os TSC 0%, TSC 5%, TSC 35% e TSC 50%. O TSC 10% apresentou a maior variância, seguido pelo TSC 20%, os valores individuais de absorção de água não apresentam uma divergência significativa.

Segundo as tabelas que apresentaram os resultados de absorção de água dos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba, os TSC de 7 dias e 28 dias de cura apresentaram índices abaixo do limite de 20% de absorção de água. Desta maneira, entende-se que a

quando comparadas as amostras sem a presença das cinzas de algaroba com as amostras com incorporação do material, é perceptível que o índice de absorção de água não é prejudicado, mostrando que as cinzas têm a capacidade de ser incorporadas dentro dos tijolos solo-cimento até 35% do sistema em substituição ao solo, dispondo de porosidade e sendo capazes de absorver umidade em um índice que não corre o risco de causar danos estruturais a longo prazo.

### 5.3.3 Densidade

A Tabela 24 apresenta os resultados referente ao ensaio de densidade dos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba em percentagens de 0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50%. Os dados são apresentados em 7 dias e 28 dias de cura. Na Tabela 23 observa-se uma tendência geral de decréscimo na densidade da água à medida que a percentagem de cinza de algaroba aumenta. Isso sugere que a substituição de solo pela cinza de algaroba aos tijolos solo-cimento pode estar reduzindo a densidade dos tijolos devido a sua granulometria e peso.

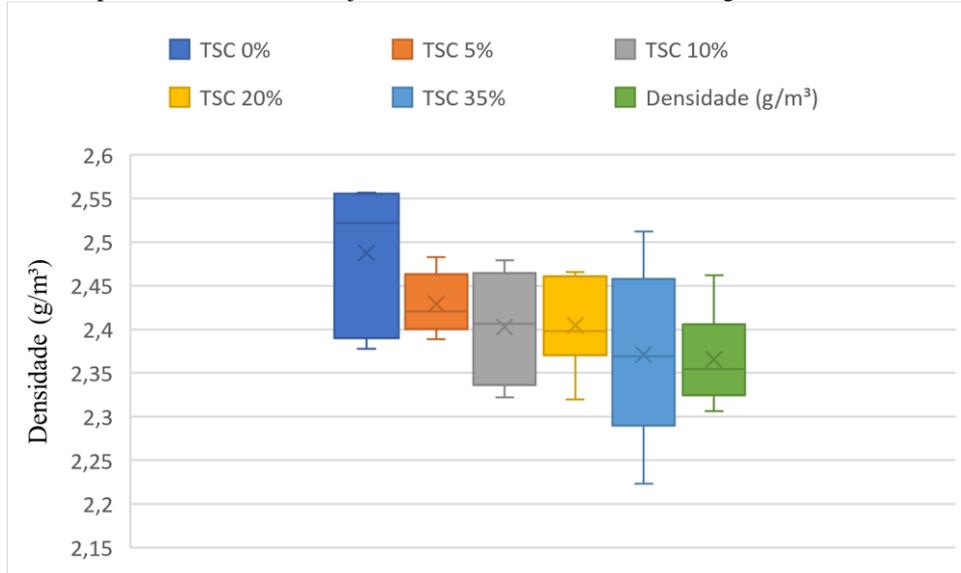
Tabela 24- Resultados de densidade dos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba em g/cm<sup>3</sup>.

Porcentagem	TSC 0%	TSC 5%	TSC 10%	TSC 20%	TSC 35%	TSC 50%
7 dias						
CP1	2,54	2,404	2,46	2,404	2,512	2,462
CP2	2,555	2,426	2,479	2,459	2,312	2,354
CP3	2,394	2,483	2,416	2,466	2,44	2,387
28 dias						
CP1	2,557	2,389	2,341	2,32	2,402	2,306
CP2	2,504	2,457	2,322	2,392	2,223	2,331
CP3	2,378	2,415	2,397	2,387	2,336	2,355

Fonte: A Autora (2024).

Ao comparar o TSC 0% e TSC 50% no Gráfico 8, Tabela 23 e 24, fica evidente que a substituição do solo pela cinza de algaroba teve impacto significativo na densidade dos tijolos. Isso se deve ao peso da matéria-prima utilizada. À medida que a porcentagem de substituição do solo, que é um material mais pesado, aumenta pela adição de cinza de algaroba, observa-se uma queda notável na densidade média. Isso sugere que a cinza de algaroba, sendo mais leve que o solo, reduz a densidade geral do tijolo quando usada em proporções maiores.

Gráfico 8 - Box plot de densidade dos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba aos 7 e 28 dias de cura.



Fonte: A Autora (2024).

A Tabela 25 apresenta a análise de variância dos resultados de densidade dos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba em  $\text{g/cm}^3$ . Observa-se que nenhum dos TSC apresentou um índice maior de variância maior que 0,015, estes resultados indicam que as densidades dos tijolos solo-cimento foram estabelecidas sem apresentar uma divergência significativa.

A fonte da variação da ANOVA apresenta  $F = 4,2596$  e valor- $P = 0,0055$ , observando-se que o valor do  $F$  crítico da amostra é menor que o  $F$ , estes dados demonstram que não há uma diferença significativa entre as amostras e suas interações.

Tabela 25 - Análise estatística ANOVA da densidade dos TSC.

Anova: fator duplo com repetição							
RESUMO	TSC 0%	TSC 5%	TSC 10%	TSC 20%	TSC 35%	TSC 50%	Total
7 dias							
Contagem	3	3	3	3	3	3	18
Soma	7,489	7,313	7,355	7,329	7,264	7,203	43,953
Média	2,496333	2,437667	2,451667	2,443	2,42133	2,401	2,44183
Variância	0,00791	0,001662	0,001044	0,001153	0,01026	0,00306	0,00387
28 dias							
Contagem	3	3	3	3	3	3	18
Soma	7,439	7,261	7,06	7,099	6,961	6,992	42,812
Média	2,479667	2,420333	2,353333	2,366333	2,32033	2,33067	2,37844
Variância	0,008454	0,001177	0,00152	0,001616	0,00819	0,0006	0,00579
Total							
Contagem	6	6	6	6	6	6	
Soma	14,928	14,574	14,415	14,428	14,225	14,195	
Média	2,488	2,429	2,4025	2,404667	2,37083	2,36583	
Variância	0,006629	0,001226	0,003927	0,002871	0,01044	0,00295	
ANOVA							
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Amostra	0,036163	1	0,036163	9,30101	0,00551	4,25968	
Colunas	0,060086	5	0,012017	3,090745	0,02713	2,62065	
Interações	0,010746	5	0,002149	0,552786	0,73473	2,62065	
Dentro	0,093315	24	0,003888				
Total	0,20031	35					

Fonte: A Autora (2024).

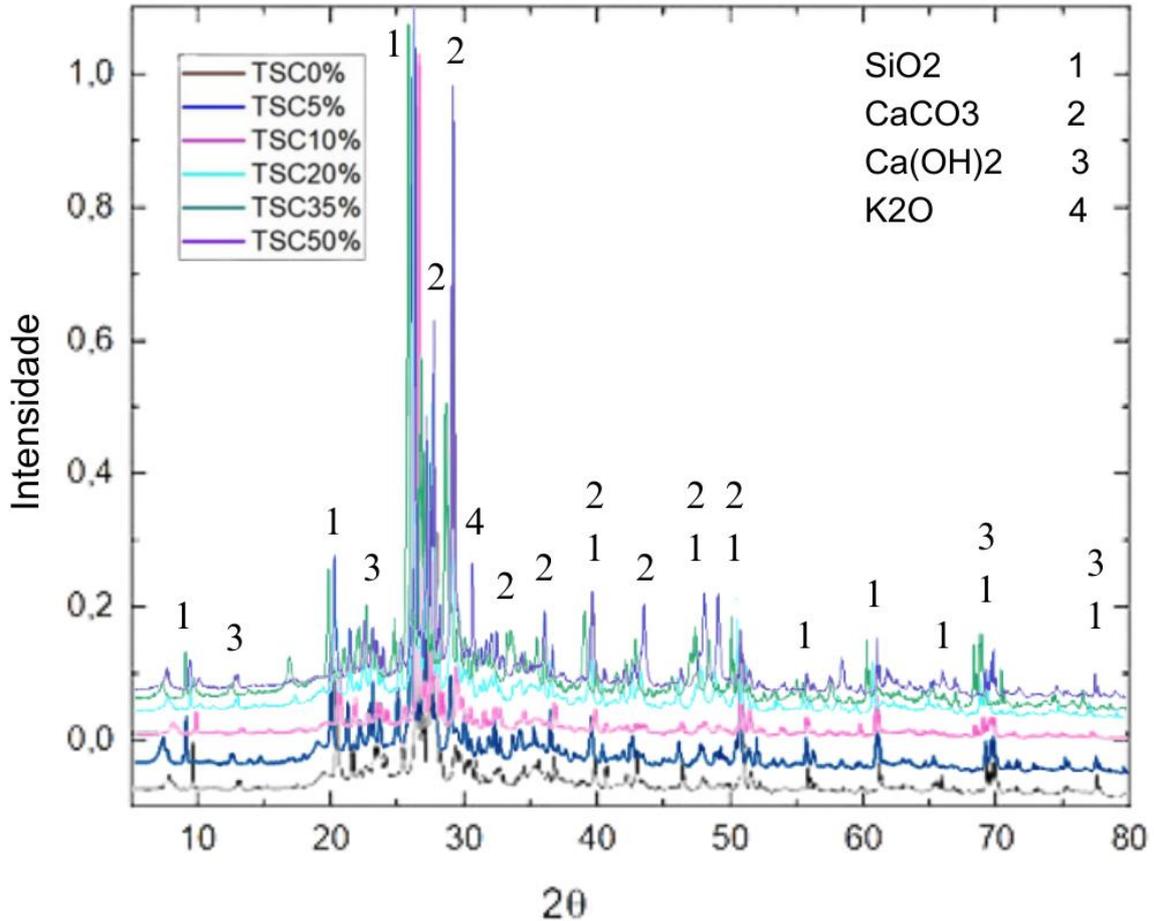
## 5.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

### 5.4.1 DRX dos tijolos solo-cimento

Os difratogramas dos tijolos de solo-cimento produzidos são apresentados na Figura 30. Em todas as amostras, é possível observar a presença de sílica na forma de hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ), seu maior pico no  $2\theta$  em  $27,0^\circ$ , também é identificada a presença de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ), apresentando maior pico no  $2\theta$  em  $28,0^\circ$ , devido à presença de solo usado na produção dos tijolos. A partir de TSC 5% é possível

observar a presença de  $K_2O$ , sendo observada no  $2\theta$  ente  $31,0^\circ$  e  $33,0^\circ$ , que está presente nas cinzas. A intensidade dos picos de carbonato de cálcio aumenta progressivamente com o percentual de substituição do solo nos tijolos de solo-cimento, uma vez que esta fase também faz parte da composição da cinza de algaroba.

Figura 28 - Difratometria de Raios-X (DRX) do tijolo solo-cimento com cinza de algaroba.



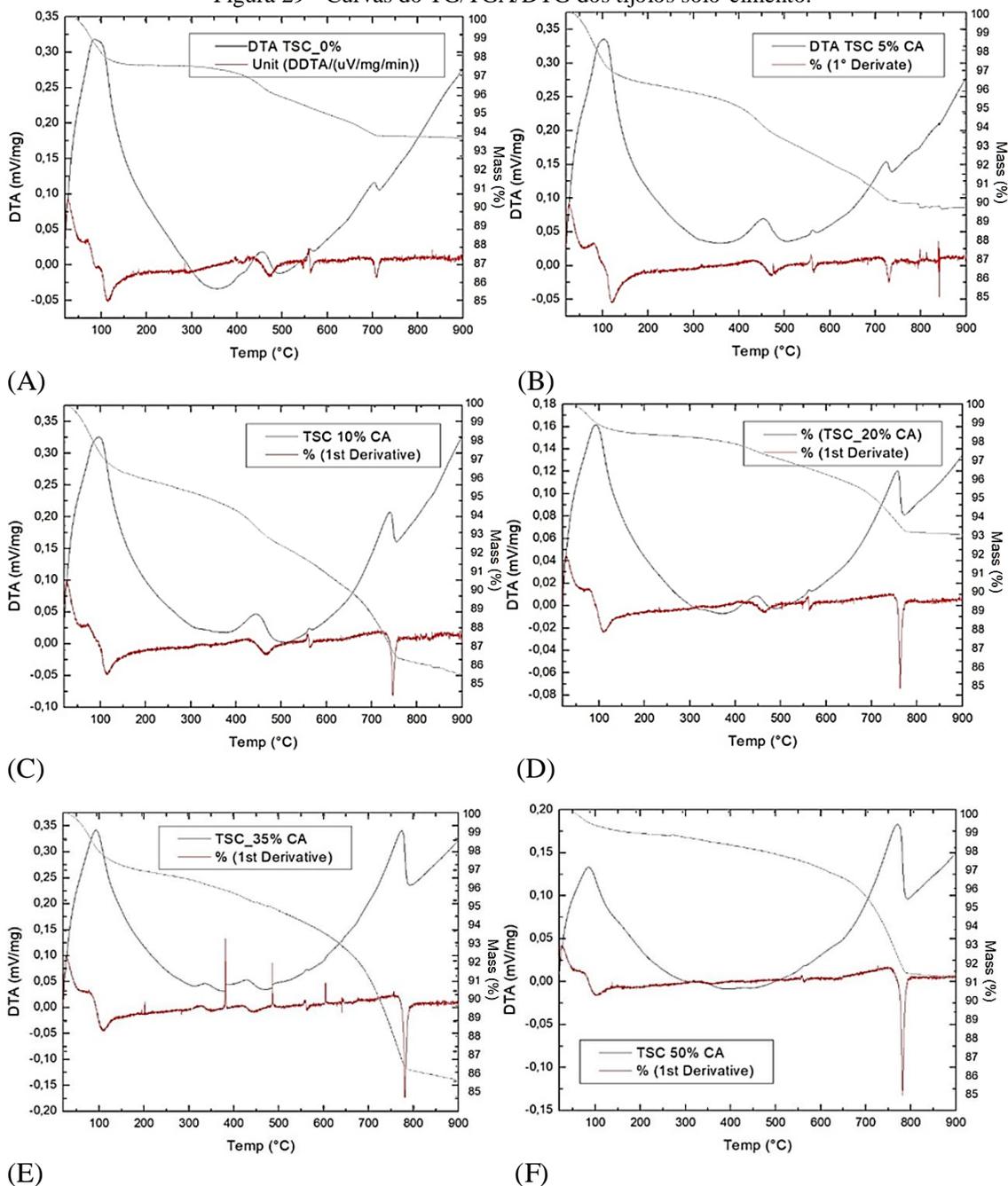
Fonte: A Autora (2024).

#### 5.4.2 Termogravimetria e análise térmica diferencial dos tijolos solo-cimento

A Figura 31 apresenta os resultados dos ensaios de termogravimetria e análise térmica diferencial dos tijolos solo-cimento. O comportamento térmico dos tijolos de solo-cimento com as cinzas de algaroba apresentou três perdas, ocorrendo entre os intervalos de temperaturas  $0^\circ\text{C}$  à  $120^\circ\text{C}$ ,  $120^\circ\text{C}$  à  $700^\circ\text{C}$  e  $700^\circ\text{C}$  à  $900^\circ\text{C}$ . Neste último intervalo ocorre a decomposição do carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) no  $CaO$ .

As perdas totais de massa observadas no TG dos tijolos solo-cimento com substituição das cinzas de algaroba em 0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50% foram de 6,0%, 13,2%, 6,5%, 18%, 9,15% e 18%.

Figura 29 - Curvas do TG/TGA/DTG dos tijolos solo-cimento.



Fonte: A Autora (2024).

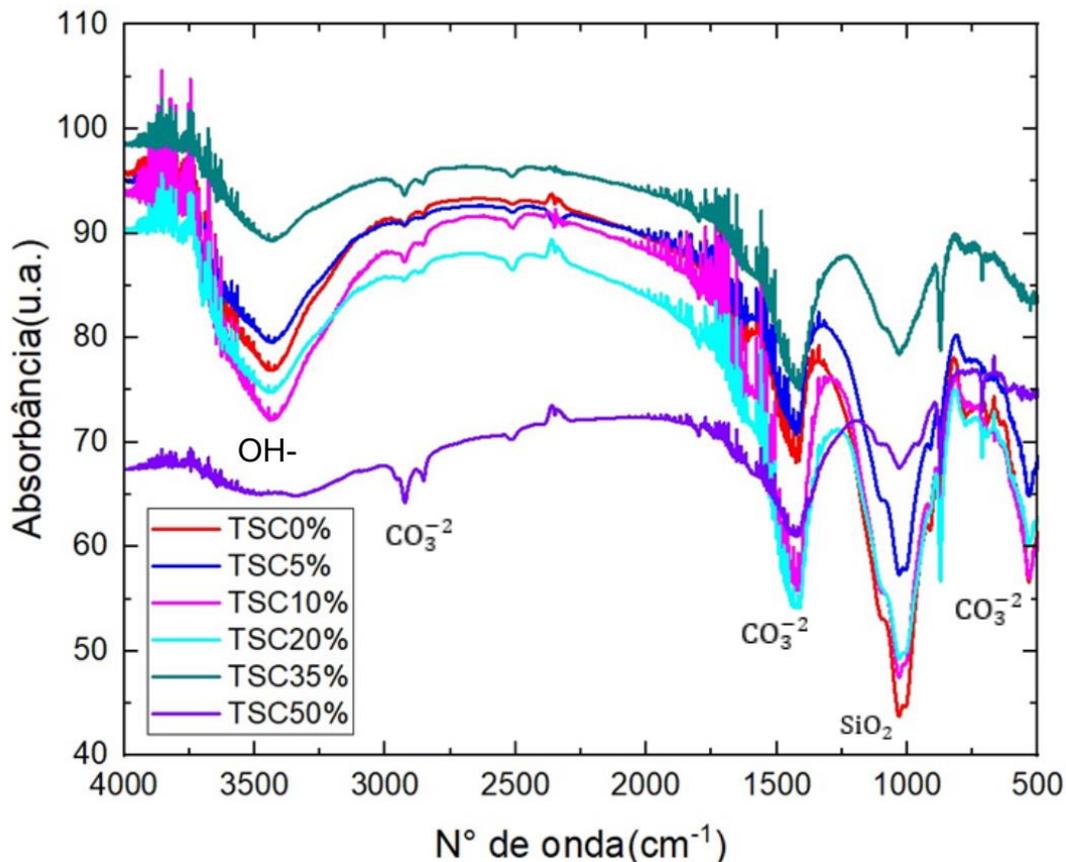
Comparando as perdas de massa apresentada por todos os tijolos de solo-cimento com cinza de algaroba percebemos que o TSC 0% e TSC 20% mostraram os melhores desempenhos em relação a resistência ao calor, demonstrando só 6% e 6,5% de perda de massa, respectivamente. Em contrapartida os TSC 10% e TSC 35% foram os que apresentaram maior perda de massa em relação as mesmas temperaturas, com 13,2% e 18% respectivamente. Através desta análise o tijolo de solo-cimento com 20% de cinza de algaroba apresenta o melhor desempenho em relação a resistência ao calor.

Os eventos endotérmicos são identificados nos picos 100°C, 480°C, o último variando entre 710°C e 780°C; entre estas condições, o pico mais notável ocorre entre 710°C e 780°C, indicando uma reação de decomposição. Os eventos exotérmicos ocorrem entre as temperaturas de 0°C, 75°C e 565°C, isso pode indicar uma reação de cristalização. Os resultados obtidos durante a análise de DTA são consistentes com os encontrados no TG e TGA.

#### 5.4.3 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier nos tijolos solo-cimento

A Figura 32 apresenta resultados da análise de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier nos tijolos solo-cimento com cinza de algaroba em diferentes porcentagens. As bandas localizadas em  $3300\text{ cm}^{-1}$  exibiram um estiramento  $OH^-$ , referente ao composto do hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ); as bandas  $2900\text{ cm}^{-1}$ ,  $1500\text{ cm}^{-1}$  e  $500\text{ cm}^{-1}$ , apresentaram estiramento de  $CO_3^{2-}$  relacionado ao composto do carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ); e a banda de  $1000\text{ cm}^{-1}$  apresentou  $SiO_2$  como estiramento, sendo o pico com intensidade mais elevada. Os tijolos solo-cimento apresentam uma ordem decrescente, quanto maior a quantidade de cinza presente, menor será a intensidade das bandas de sílica observados, isso ocorre devido à substituição de solo por cinza de algaroba em sua composição.

Figura 30 - Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier de TSC (0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50%).



Fonte: A Autora (2024).

#### 5.4.4 Microscopia eletrônica de varredura dos tijolos solo-cimento

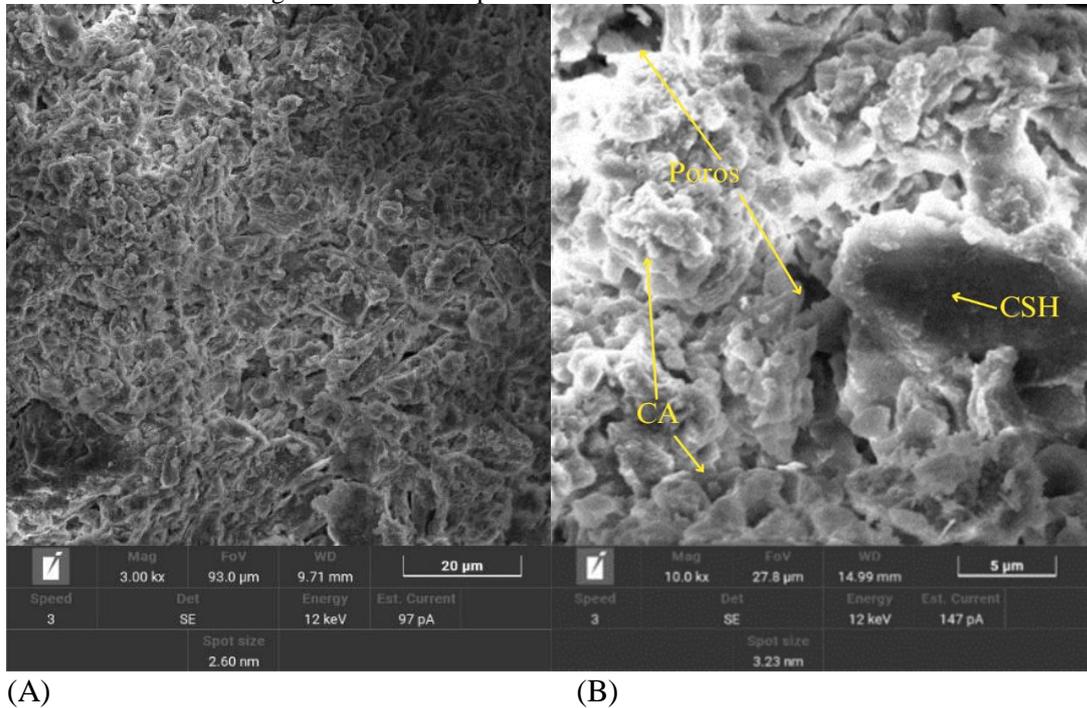
Nas Figuras 33 a 38, são apresentadas as imagens de MEV dos tijolos de solo-cimento. Que exibem detalhes sobre a morfologia do tijolo solo-cimento com 0%, 5%, 10%, 20%, 35% e 50% de cinza de algaroba.

O TSC 0% apresenta uma superfície com aspecto áspero e irregular, o que é típico para tijolos de solo-cimento devido aos seus componentes exibirem um conjunto de granulometrias distintas. Através das imagens na Figura 33, é possível notar a interação entre as partículas de cimento e solo, formando uma matriz coesa que oferta ao tijolo solo-cimento sua resistência e durabilidade, apresentando ordenação no arranjo das partículas, podendo ser resultado da mistura dos materiais, ou da similaridade das suas granulometrias, como é observado na Tabela 15.

Duan e Zhang (2019) em sua pesquisa a respeito de propriedades mecânicas, modo de falha e microestrutura de solo-cimento modificado com cinzas volantes e fibra de polipropileno, analisaram a microscopia eletrônica de varredura do solo-cimento de

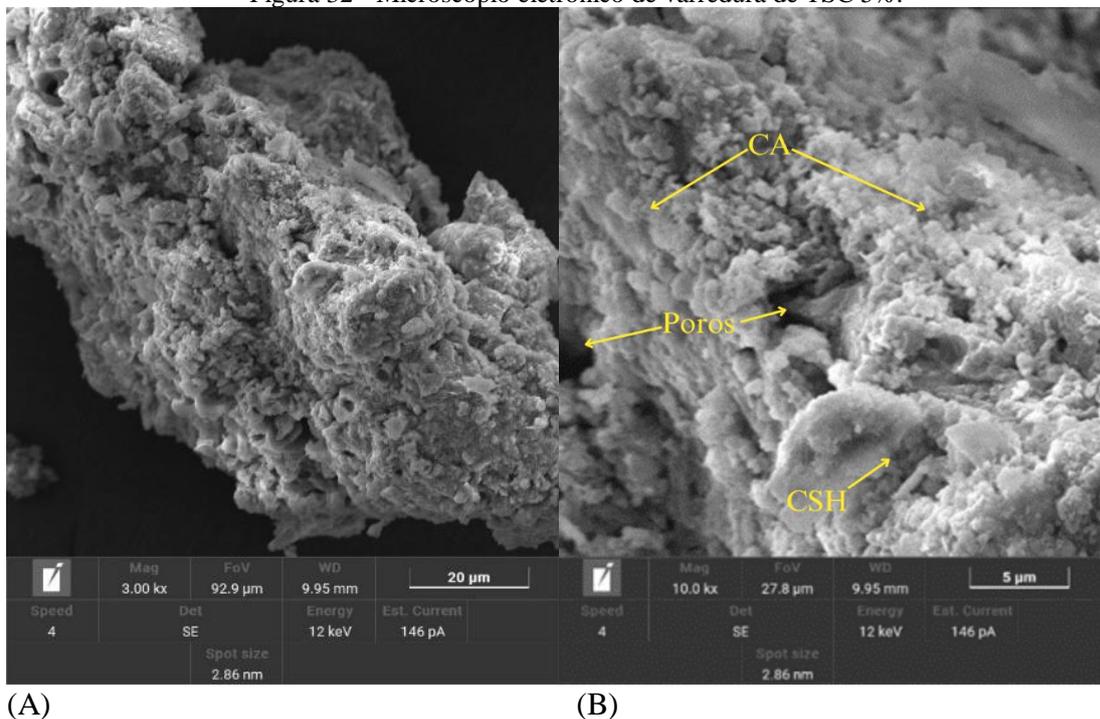
referência. A estrutura de solo-cimento de referência apresenta fissuras e poros, sua estrutura aparece de forma desordenada, o que pode ter ocorrido no momento da mistura. Silicato de cálcio hidratado é identificado em várias regiões da amostra, este composto pode contribuir com a resistência e durabilidade da matriz solo-cimento.

Figura 31 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 0%.



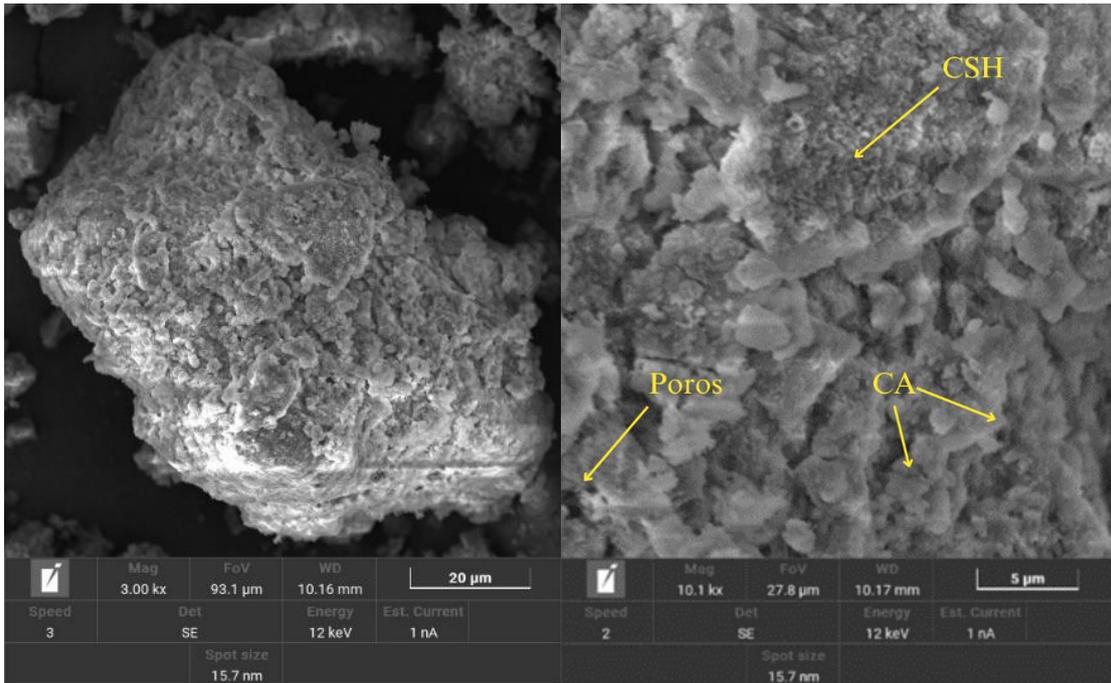
Fonte: A Autora (2024).

Figura 32 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 5%.



Fonte: A Autora (2024).

Figura 33 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 10%.

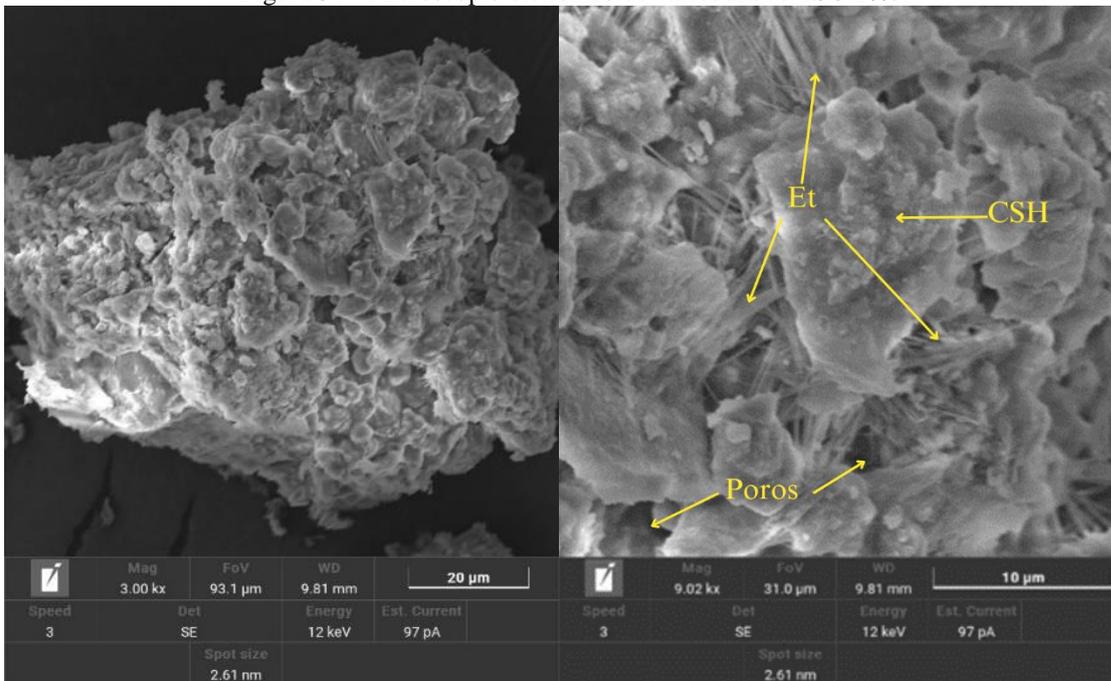


(A)

(B)

Fonte: A Autora (2024).

Figura 34 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 20%.

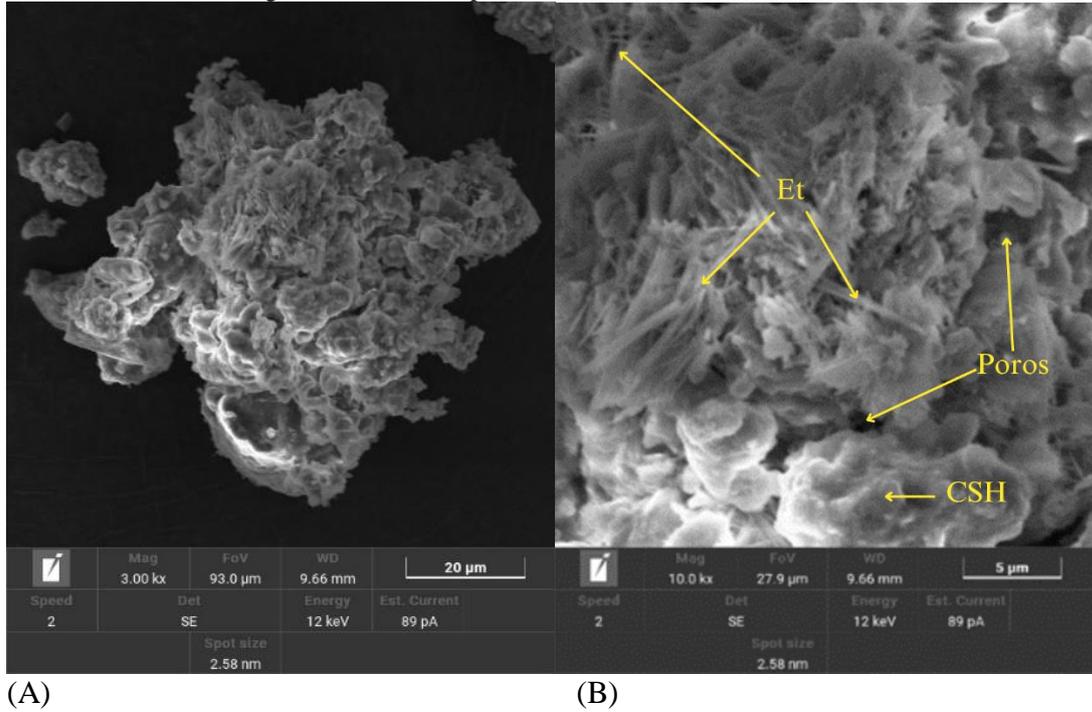


(A)

(B)

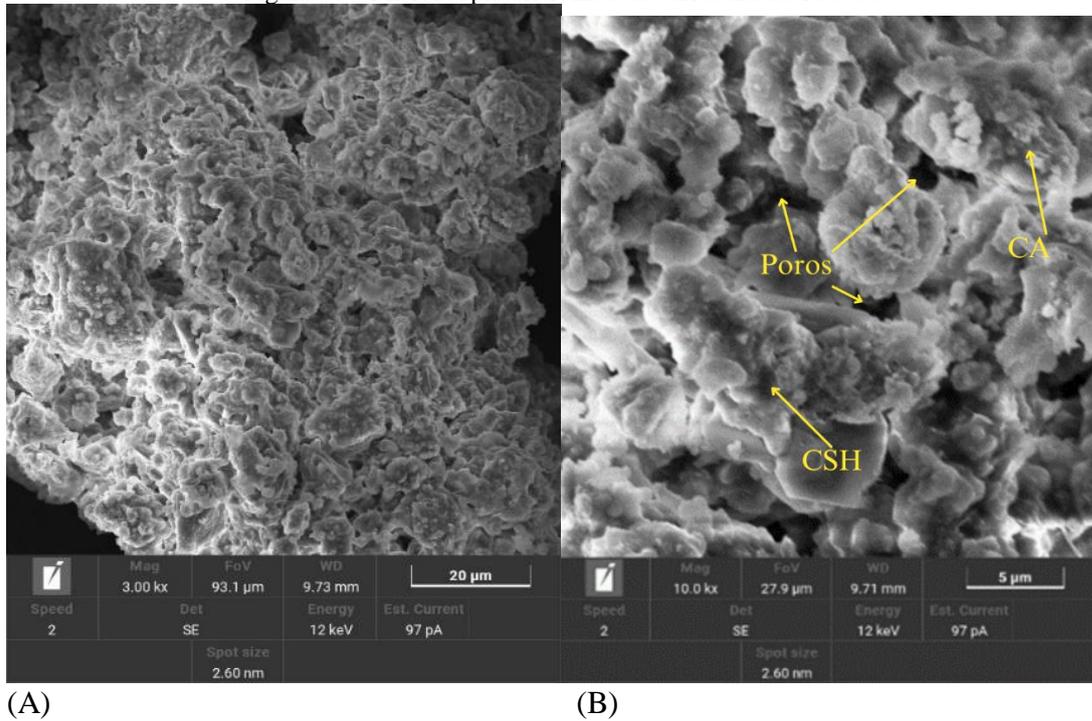
Fonte: A Autora (2024).

Figura 35 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 35%.



Fonte: A Autora (2024).

Figura 36 - Microscópio eletrônico de varredura de TSC 50%.



Fonte: A Autora (2024).

O aumento da substituição da porcentagem de solo pelas cinzas de algaroba na constituição dos tijolos solo-cimento resulta em mudanças na morfologia da matriz de

solo-cimento que explicam o aumento da resistência à compressão e a menor absorção de água até o TSC 35%, e perda de desempenho no TSC 50%.

Quando as cinzas são incorporadas nos percentuais 5% e 10%, observa-se redução de poros em relação ao TSC 0% e presença de partículas menores de cinzas aglutinadas na superfície da matriz solidificada. Nos tijolos solo-cimento com 20% e 35% de cinzas dentro da composição, foram observadas novas estruturas em formato de bastões/agulhas, denominadas Etringita. A análise do MEV/EDS revelou que essas agulhas possuem a mesma constituição química que o restante do tijolo, indicando que são formadas pelos mesmos elementos e materiais presentes na matriz do tijolo solo-cimento com as cinzas de algaroba.

De acordo com Lea (1998), a etringita é um mineral que se forma principalmente a partir da reação entre sulfatos (presentes em pequenas quantidades no cimento) e compostos de aluminato de cálcio, em um ambiente rico em água. Essa reação gera cristais de etringita, presentes nas Figuras 34 e 35, que se expandem e ocupam espaço dentro do material.

Ao longo desta pesquisa foi realizada a produção de tijolos solo-cimento em diferentes porcentagens (0%, 5%, 10%, 20%, 35%, 50%) com a cura úmida sendo realizada em um ambiente controlado e com os TSC cobertos por lona para que não houvesse a perda de umidade. Os ensaios realizados de resistência à compressão, absorção de água e durabilidade apresentaram os melhores desempenhos nos TSC 20% e TSC 35%, além do EDS dos TSC 20% e TSC 35% corroborarem com o DRX realizados. Além disso, a Etringita se apresentou como aglomerados de cristais finos, com uma aparência uniforme e bem distribuídos nos poros, pela sua articulação, a Etringita parece ligar as partículas do material contribuindo para tornar a microestrutura mais preenchida, o que explica a maior resistência à compressão e menor percentual de absorção de água para essa mistura, ao invés de apresentar sinais de expansão ou fissuras por meio de empurrar as partículas da mistura de tijolo solo-cimento com cinza de algaroba, como o comportamento demonstrada pela Etringita tardia. Devido as descrições realizadas por Lea (1998), a Etringita que aparece nos TSC 20% e TSC 35% apresenta os aspectos da Etringita inicial.

Lea (1998) retrata que a formação da etringita em fase inicial é uma etapa natural e desejável que ocorre durante o processo de hidratação do cimento logo após a mistura com água. Ocorrendo uma série de reações químicas entre os componentes do cimento, essas reações formam cristais de etringita ( $3CaO + Al_2O_3 + 3CaSO_4 + 32H_2O$ ) nas

primeiras horas de hidratação do cimento, ajudando a dar coesão inicial ao material, essa formação inicial é estável quando a cura é feita de forma adequada, sem grandes variações de umidade. Essa fase é diferente da etringita tardia, que se forma posteriormente e pode causar problemas estruturais se ocorrer em excesso.

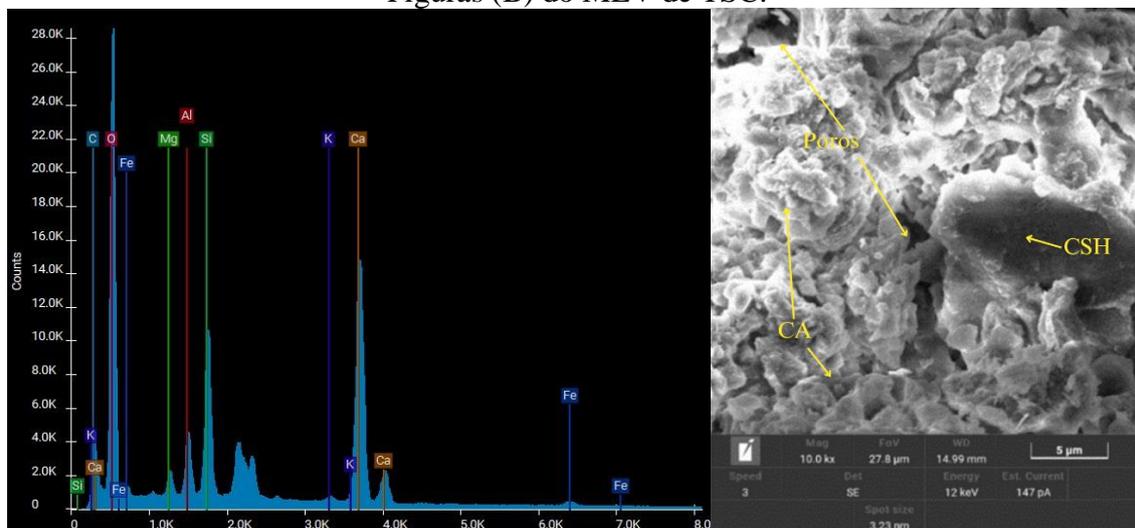
Na substituição de solo por 50% de cinzas de algaroba, não se observa a formação dessa estrutura em bastão que aparentemente liga as partículas no TSC 20%, e as partículas se aglutinam de forma menos eficiente deixando poros mais evidentes na microestrutura.

Estas mudanças em morfologia confirmam os dados de desempenho que sugerem um percentual máximo de substituição do solo, que quando ultrapassado compromete as propriedades do tijolo. Isso provavelmente acontece devido à dificuldade de dispersão de material fino quando mais cinzas são introduzidas na mistura.

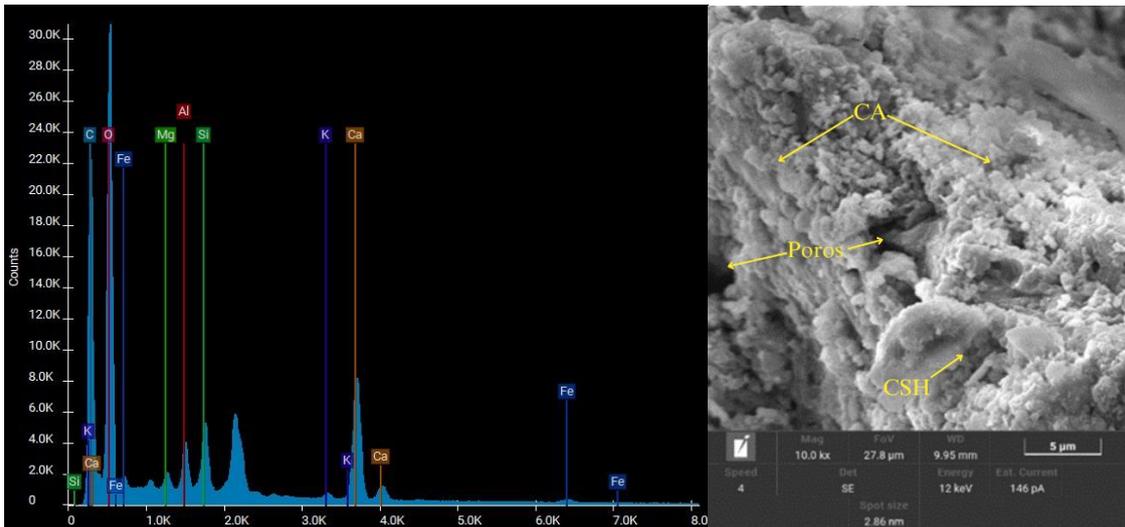
Através nas imagens B, nas Figuras 33 a 38 foram realizados os EDS dos tijolos solo-cimentos (Figura 39), foram escolhidos pontos que apresentassem a aderência da mistura dos materiais na matriz do tijolo solo-cimento, no caso dos TSC 20% e TSC 35% também foram executados nas regiões em formato de agulhas (Etringita inicial) para verificar que a composição química identificada não sofria alteração.

Foi possível visualizar alguns picos elevados como C, O, K, Si e CA, além de picos menores como K, Fe, Mg e Al. Através das análises de FRX e DRX realizados com os tijolos de solo-cimento foram encontrados três componentes, sendo  $SiO_2$ ,  $CaCO_3$  e  $K_2O$ , consolidando o resultado fornecido pelo EDS.

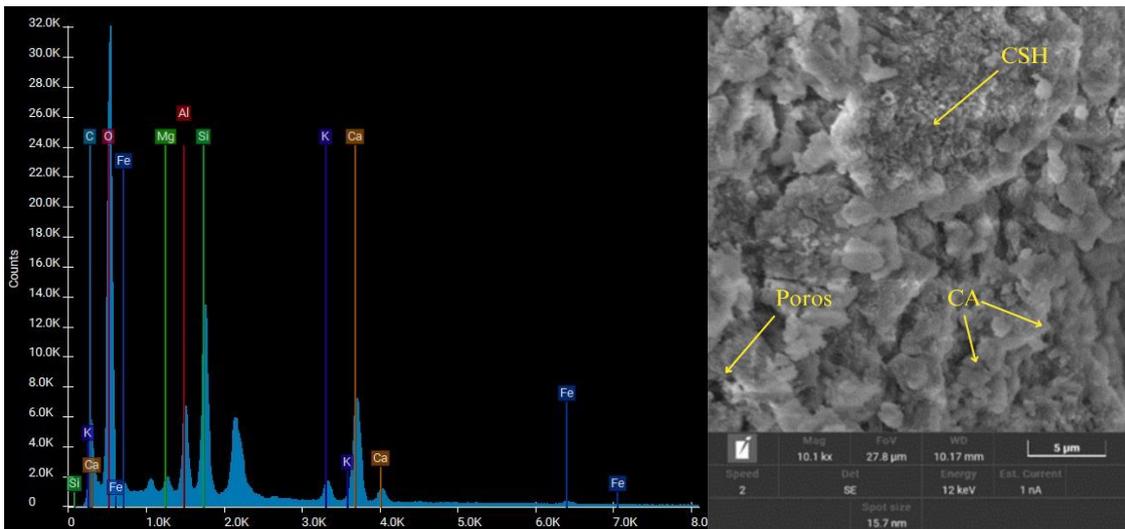
Figura 37 - EDS dos tijolos de solo-cimento com cinzas de algaroba, de acordo com as Figuras (B) do MEV de TSC.



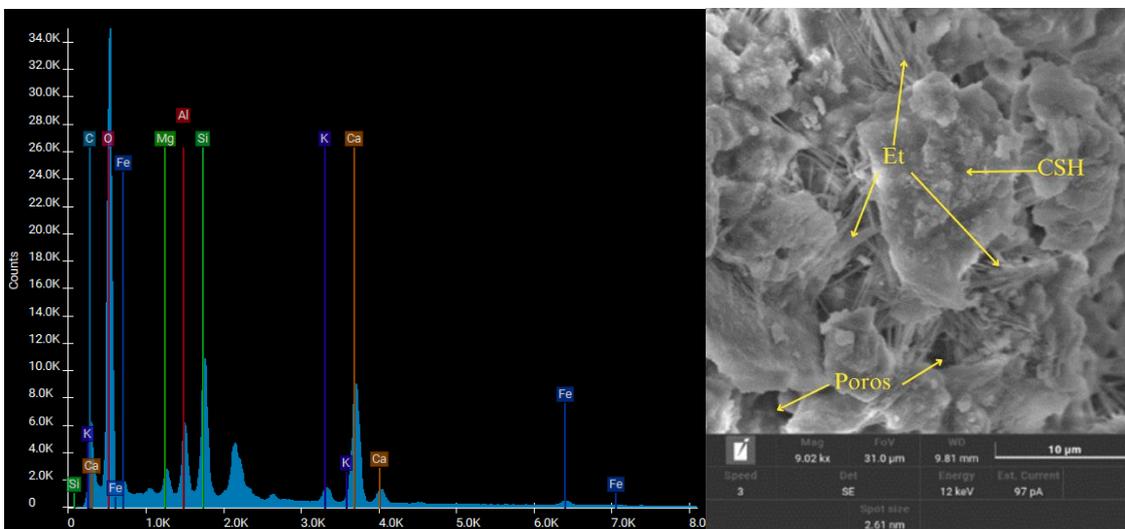
(A) TSC 0%



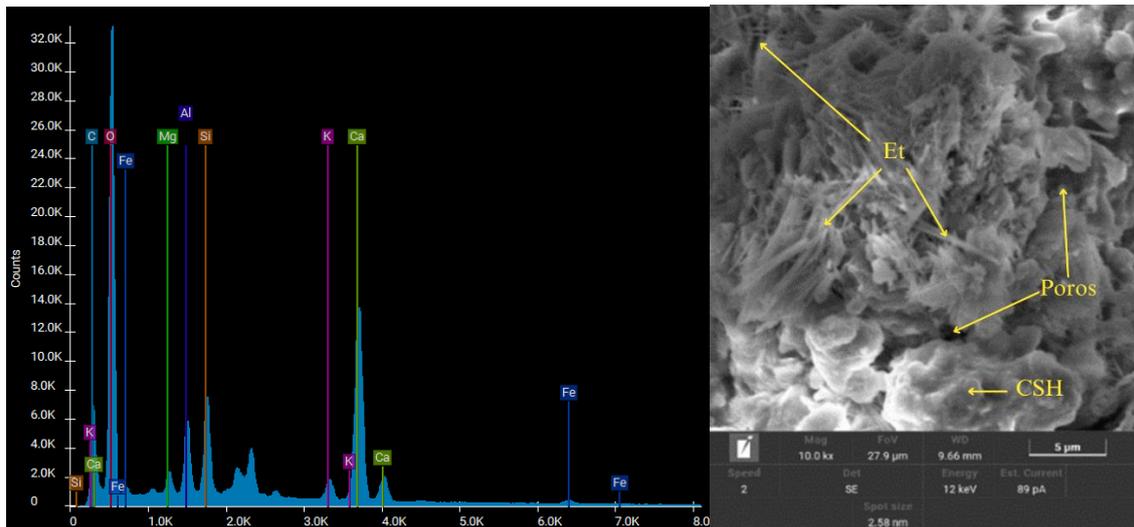
(B) TSC 5%



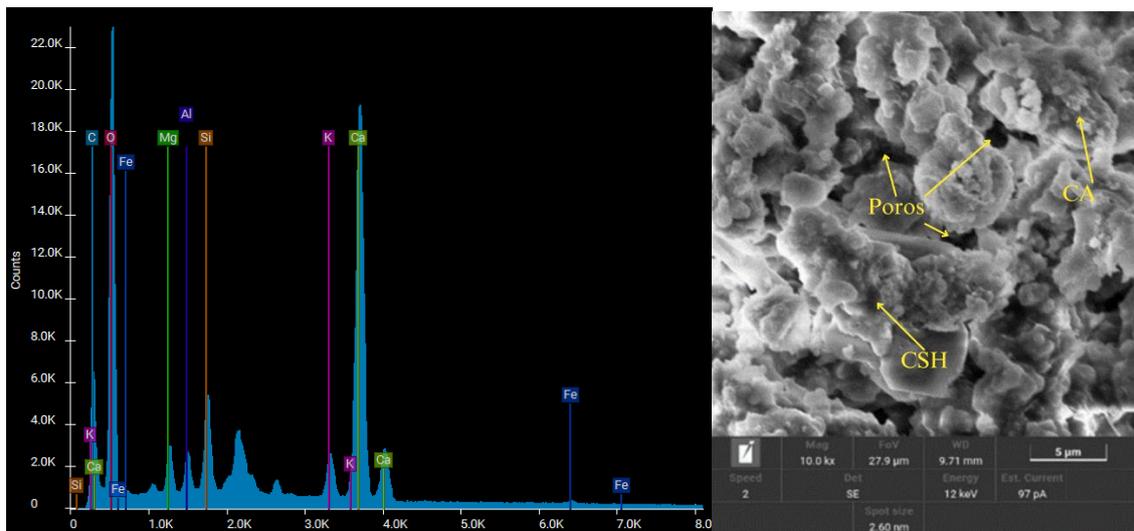
(C) TSC 10%



(D) TSC 20%



(E) TSC 35%



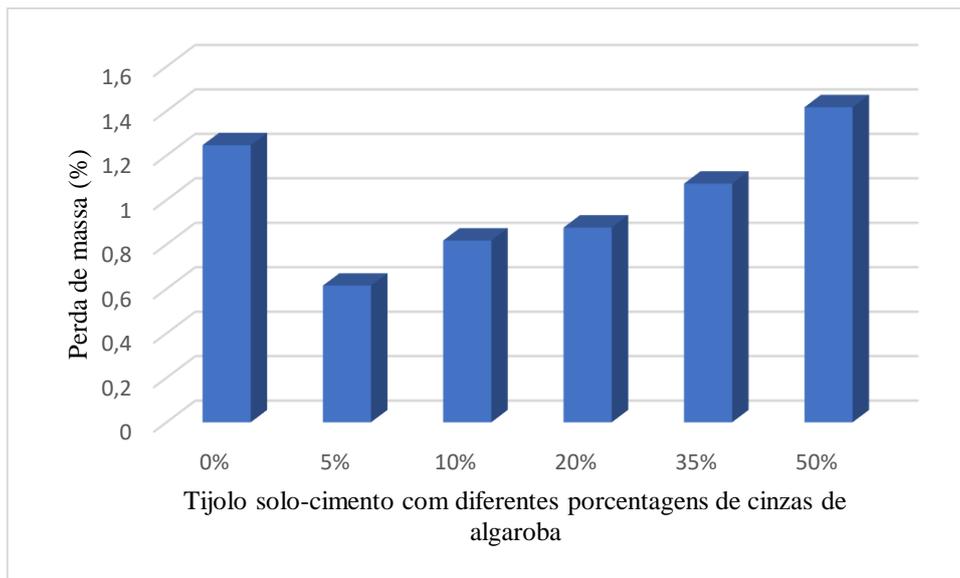
(F) TSC 50%

Fonte: A Autora (2024).

## 5.5 ESTUDO DE DURABILIDADE DOS TIJOLOS

No Gráfico 9, são apresentados os resultados das perdas de massa média dos tijolos de solo-cimento com cinza de algaroba após seis ciclos de molhagem e secagem. Durante o ensaio de durabilidade, o TSC 50% registou a maior perda de massa em comparação com os demais tijolos de solo-cimento, atingindo 1,41%. Os TSC de 5% a 35% apresentaram um comportamento linear crescente, exibindo 0,61%, 0,81%, 0,87% e 1,07%. O tijolo de referência, TSC 0% apresentou 1,24%, com a segunda maior perda de massa. A substituição de até 35% parece reduzir a perda de massa dos tijolos, sendo positivo para ganho de durabilidade.

Gráfico 9 - Perda de massa após o ensaio de durabilidade dos tijolos solo-cimento com cinzas de algaroba.



Fonte: A Autora (2024).

Como o solo utilizado na confecção dos tijolos solo-cimento foi classificado como A1-a, os índices obtidos durante o ensaio de durabilidade dos tijolos solo-cimento estão abaixo do limite de perda de massa recomendada de 14%, admitida como parâmetro pela ABCP (2004).

Assim como as outras propriedades avaliadas, a durabilidade dos tijolos de solo-cimento é influenciada pela presença de cinzas de algaroba. Percentuais de cinzas variando de 5 a 35% resultam em uma microestrutura mais densa e menos porosa, onde as partículas de cinzas de algaroba estão fortemente aderidas, prevenindo a absorção de água e o desgaste de material durante os ciclos de molhagem e secagem. Desta forma, a perda de massa nos tijolos com até 35% de cinzas é inferior à do tijolo de referência. Mostrando que as cinzas de algaroba dentro do sistema do tijolo solo-cimento oferta melhores desempenho que o TSC de referência. Em relação à durabilidade, novamente observa-se percentuais de incorporação de cinzas que podem comprometer o desempenho dos tijolos de solo-cimento.

## 6 CONCLUSÃO

Foi possível produzir tijolos de solo-cimento com cinzas de algaroba do APL de confecções de Pernambuco, utilizando o solo de Caruaru. Para isso, foi necessário utilizar um traço de 1:6 (cimento: solo) e cimento de CPV ARI devido à baixa qualidade do solo local. A substituição de solo por cinzas de algaroba foi realizada nos percentuais 5%, 10%, 20%, 35% e 50%, resultando em uma mistura moldável e compactável.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e densidade mostraram que os percentuais de 5%, 10%, 20% e 35% de substituição de solo por cinzas de algaroba resultam em tijolos com desempenho tecnológico que atendem a Norma 8492 (2012), superando o desempenho de tijolo de solo-cimento sem resíduo. Entretanto, substituições com 50% não alcançaram valores de desempenho exigidos. A análise estatística comprovou que os TSC 0%, 5%, 10%, 20% e 35% exibiram desempenhos em níveis crescentes de resistência à compressão e absorção de água, determinando o TSC 20% e TSC 35% como os tijolos solo-cimento com melhores desempenhos apresentados. A substituição do solo pelas cinzas de algaroba impacta significativamente a densidade dos tijolos. Isso ocorre porque a cinza de algaroba é mais leve que o solo. Assim, ao aumentar a porcentagem de cinza de algaroba, a densidade média dos tijolos diminui.

Os estudos microestruturais mostraram que a incorporação das cinzas é física, o que pode ser evidenciado pelos resultados de FTIR e DRX, nos quais é possível observar que as fases cristalinas das cinzas de algaroba, que identificaram carbonato de cálcio, hidróxido de cálcio, óxido de cálcio e óxido de potássio permanecem inalteradas. As imagens de MEV mostram que o aumento do percentual de cinzas resulta em uma microestrutura mais preenchida até 35% de substituição. Quando cinzas são adicionadas em proporções de 5% e 10%, observa-se uma diminuição dos poros e a presença de partículas menores aglutinadas na superfície da matriz solidificada. Com 20% e 35% de cinzas, surge uma estrutura em forma de agulha, Etringita inicial que se forma nas primeiras horas de hidratação do cimento, conectando as partículas, tornando a microestrutura mais densa, o que melhora a resistência à compressão e reduz a absorção de água. Com 50% de cinzas de algaroba, a Etringita inicial não se forma, resultando em partículas menos aglutinadas e mais poros. Essas alterações morfológicas confirmam que existe um limite máximo de substituição do solo, além do qual as propriedades do tijolo são prejudicadas devido à dificuldade de dispersão do material fino.

Os ensaios de durabilidade confirmam as observações sobre desempenho tecnológico e sugerem que não é seguro produzir tijolos de solo-cimento com 50% de cinzas. Percentuais de cinzas entre 5% e 35% resultam em uma microestrutura mais densa e menos porosa, com partículas de cinzas fortemente aderidas. Isso previne a absorção de água e o desgaste durante ciclos de molhagem e secagem, resultando em menor perda de massa comparado aos tijolos de referência. TSC 5% a TSC 35%, além de apresentar maior desempenho tecnológico, também são mais duráveis do que os tijolos sem resíduo, e atendem aos requisitos da norma vigente sobre produção de tijolos de solo-cimento.

Para futuros trabalhos, sugere-se a realização de tijolos solo-cimento com cinzas de algaroba e aditivos para otimizar as propriedades dos tijolos, observando o comportamento das cinzas de algaroba com diferentes aditivos. Investigar como as cinzas de algaroba afetam a resistência térmica dos tijolos solo-cimento. Avaliar a capacidade de isolamento acústico dos tijolos solo-cimento com cinzas de algaroba.

## REFERÊNCIAS

ABBAS, S.; KAZMI, S. M. S.; KHITAB, A.; MUNIR, M. J.; SALEEM, M. A. **Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes.** Elsevier, Amsterdã, v. 120, p. 29-41, Sep, 2016.

ABDEL-SHAIFY, H. I.; MANSOUR, M. S. M. **Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization.** Egyptian Journal of Petroleum, Egyptian, v. 27, p. 1275-1290, Jul, 2018.

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – CPRH. **Instrução Normativa CPRH nº 007/2006**, de 29 de dezembro de 2006.

ALEXANDRE, J.; AZEVEDO, A. R. G.; CECCHIN, D.; FILHO, F. G.; GUNASEKARAN, M.; MARVILA, M. T.; MONTEIRO, S. N.; SILVA, F. C.; SILVA, T. R.; VALADÃO, I. **Technological Characterization of PET-Polyethylene Terephthalate-Added Soil-Cement Bricks.** Journal Material, Basel, v. 14, Sep, 2021.

ALMEIDA, M. C. D. **Estudo da incorporação de cinza e chamote gerado pela cerâmica vermelha ao próprio processo industrial.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica): Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p. 89, 2015.

ALTSCHAEFFL, A. G.; LOVELL, C. W.; ESSIGMANN JR, M. F. **Method for specifying soil compaction.** Transportation Research Record, v. 690, p. 6, 1978.

ARJONA, S. D.; BASTIDA, Á. G.; LEÓN, E. S.; VÁZQUEZ, M. F. Q. **Valorization of rice straw waste: production of porcelain tiles.** Cerâmica, São Paulo, v. 61, p. 360, Oct-Dec, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais.** ABCP, v. 3, São Paulo, p. 16, Set, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaios.** ABCP, 3 ed, São Paulo, p. 63, Ago, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: **Amostras de solo - preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, v. 2, p. 9, Ago, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: **Solo – determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, v. 2, p. 6, Out, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, v. 2, p. 9, Out, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: **Solo - determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, v. 2, p. 7, Mar, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: **Solo - análise granulométrica.** Rio de Janeiro, v. 2, p. 13, Dez, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: **Solo – ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, v. 2, p. 13, Set, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8491: **Tijolo de solo-cimento – Requisitos.** Rio de Janeiro, v. 2, p. 9, Dez, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8492: **Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, v. 2, p. 16, Dez, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, v. 2, p. 77, Mai, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: **Procedimento para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, v. 2, p. 8, Dez, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006: **Procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, v. 2, p. 7, Mai, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10833: **Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento**. Rio de Janeiro, v. 2, p. 7, Dez, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: **Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. Rio de Janeiro, v. 2, p. 3, Jul, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13554: **Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem**. Rio de Janeiro, v. 2, p. 3, Jan, 2012.

AZEVEDO, C. M.; CORDEIRO, L. N. P.; PAES, I. N. L.; SOUZA, P. S. L. **Characterisation of residual açai stone ash for addition to concrete**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 19, p. 45-55, Jan-Mar, 2019.

BAIA, M. V. M. **Estabilização física de solos tropicais para base de pavimento de baixo custo na região metropolitana de Manaus-AM**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Amazonas: Manaus, p. 120, 2019.

BARBOSA, A. Q.; DORTAS, I. S.; FRAGA, Y. S. B.; MOTA, W. V.; SANTOS, L. H. P. **Tecnologia dos materiais: a utilização do tijolo de solo-cimento na construção civil**. Ciências exatas e tecnológicas: Aracaju, v. 3, n. 3, p. 11-24, outubro, 2016.

BARROS, M. M.; BASTOS, D. C.; OLIVEIRA, M. G.; OLIVEIRA, M. F. L.; RIBEIRO, R. C. C. **Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin**. Construction and Building Materials: United Kingdom, v. 232, Nov, 2020.

BHAIRAPPANAVAR, S.; LIU, R.; SHAKOOR, A. **Eco-friendly dredged material-cement bricks**. *Construction and Building Materials: United Kingdom*, v. 271, Feb, 2021.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 12 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: Seção 1, Brasília, DF*, 12 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Resolução CONAMA Nº 307, de 17/07/2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares [recurso eletrônico]**. Brasília, v. 2, p. 209, 2022.

BELLO, M. I. M. C. V.; LINS, E. A. M.; MARIANO, M. O. H.; SANTOS, G. G. **Aterro municipal de resíduos sólidos de caruaru: um caso de estudo sobre retenção de gases na camada de cobertura**. *Revista Aidis, São Paulo*, v. 16, p. 18, Ago, 2023.

CALLEJAS, I. J. A.; CORDEIRO, C. C. M.; GOMES, A. C. F.; ROCHA, S. D. F. **Thermal characterization of soil-cement bricks using mining tailings**. *International Engineering Journal, Ouro Preto*, v. 75, 19-26, Jan-Mar, 2022.

CAPUTO, A. N.; CAPUTO, H. P.; RODRIGUES, J. M. A. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. LTC, Rio de Janeiro, v. 7, p. 272, Ago, 2015.

CARTILHA ECO PRODUÇÃO. **Tijolo ecológico. Manual Prático**. Disponível em: <<https://www.sahara.com.br/pdf-sahara-tecnologia/cartilha-eco-producao.pdf>>. Acesso em: 21, mai, 2022.

CARVALHO, A. A.; LEITE, K. S.; MATOS, J. M. E. **Passive of CRFS Technology in Soil-Cement Application**. *Sustainability*: v. 15, 16, Mar, 2023.

CAVALCANTI FILHO, L. L. **Avaliação da resistência a compressão simples e absorção de água de tijolos vazados de solo-cimento produzidos a partir da substituição parcial do cimento pela cinza da lenha de algaroba.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Pernambuco: Caruaru, p. 96, 2016.

CAVALCANTI, I. L. R.; CRUZ, A. D.; LOPES, R. M. B. P.; ISAAC, A. A. S., MARTA, C. D. **Caracterização química do resíduo da biomassa da algaroba para fins de estudos energéticos.** Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, p. 872-881, jan. 2020.

CHAKARTNARODOM, P.; CHERDHIRUNKORN, B.; INEURE, P.; KONGKAJUN, N.; LAITILA, E. A.; PRAKAYPAN, W. **Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production.** Elsevier, Amsterdã, v. 13, p. 10, Dec, 2020.

CHANDRASHEKAR, N.; KUMAR, R. **Study on fuelwood and carbonization characteristics of prosopis juliflora.** Indian Acad Wood Sci, India, v.13, p.101-107, Dez, 2016.

CHEN, C.; WU, H. **Lightweight bricks manufactured from ground soil, textile sludge, and coal ash.** Environmental Technology, [S. l.], v. 39, n. 11, p. 1359–1367, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1329353>>. Acesso em: 20, nov, 2021.

CHERKAOUI, I.; LIMAMI, H.; KHALDOUN, A. **Recycled wastewater treatment plant sludge as a construction material additive to ecological lightweight earth bricks.** Cleaner Engineering and Technology, Amsterdã, v. 2, p. 27, Jan, 2021.

CINCOTTO, M. A. **Utilização dos subprodutos e Resíduos na Indústria da Construção Civil.** PINI, São Paulo, v. 1, p. 71-74, 1988.

CINCOTTO, M. A.; FUJII, A. L.; PILEGGI, R. G.; ROMANO, R. C. O.; SOUZA, R. C.; TAKEASHI, M. S. **Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita.** Cerâmica, São Paulo, v. 62, p. 215-223, Mai, 2016.

COELHO, V. A.; DOUTTO, G. G.; GUIMARÃES, C. C.; PEDRA, P. P. **Evaluation of mortar properties obtained through partial substitution of Portland cement by ashes of oil palm empty fruit bunch.** Cerâmica, São Paulo, v. 65, p. 359-365, Jul-Sep, 2019.

CUNHA, A. H. N.; FERREIRA, R. C. **Quality evaluation of soil-cement-plant residue bricks by the combination of destructive and non-destructive tests.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental: Campina Grande, v. 21, p. 543-549, Ago, 2017.

CUNHA, A. H. N.; FERREIRA, R. C.; GOBO, J. C. C. **Incorporação de casca de arroz e de braquiária e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas de tijolos de solo-cimento.** Construções Rurais e Ambientância, Brasil, v. 28, p.1-11, jan./mar. 2008.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual De Pavimentação.** Rio de Janeiro, 3 ed, p. 277, Mai, 2006.

DUAN, Xue-lei; ZHANG, Jing-shuang. **Mechanical Properties, Failure Mode, and Microstructure of Soil-Cement Modified with Fly Ash and Polypropylene Fiber.** Advances in Materials Science and Engineering, China, v. 19, p. 13, May, 2019.

ELICHE-QUESADA, J. A.; SANDALIO-PÉREZ, S.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, L.; PÉREZ-VILLAREJO, P. J.; SÁNCHEZ-SOTO, S. **Investigation of use of coal fly ash in eco-friendly construction materials: fired clay bricks and silica-calcareous non fired bricks.** Ceramics International, Amsterdã, v. 44, p. 4400-4412, Mar, 2018.

FARIA, K. C. P.; HOLANDA, J. N. F. **Incorporation of sugarcane bagasse ash waste as an alternative raw material for red ceramic.** Cerâmica, São Paulo, v. 59, p. 8, Sep, 2013.

FERREIRA, H. C.; NASCIMENTO, J. E. F.; NEVES; G. A.; NÓBREGA, A. C. V.; SANTANA, L. N. L. **Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland.** Cerâmica, São Paulo, v. 65, p. 7, Jan-Mar, 2019.

FERREIRA, H. C.; MARINHO, E. P.; MELO, M. C. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; NÓBREGA, A. C. V. **Cal produzida a partir de cinza de biomassa rica em cálcio**. Cerâmica, São Paulo, v. 64, p. 7, Jul-Sep, 2018.

FOLGUERAS, M.; HOTZA, D.; SENFF, L. **Hidratação do cimento CP V ARI – RS: Influência da água nas reações de hidratação**. Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Paulo, v. 49, p. 12, Jun, 2005.

FORTES, E. S. **Influência do capeamento e caracterização da resistência a compressão de alvenaria estrutural de blocos de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal de São Carlos: São Paulo, p. 303, 2012.

GIDARAKOS, E.; HAVAS, G.; NTZAMILIS, P. **Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete**. Waste Management, Amsterdã, v. 26, n. 6, p. 668-679, Oct, 2006.

GUILLAUD, H. **Architecture de terre: histoire, culture et Société**. Dissertation (Master in architecture): Universite Pierre Mendès France De Grenoble: Sciences sociales & humaines, France, v. 3, p. 244, Mai, 2007.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Earth construction: a compressive guide**. Intermediate Technology Publications, London, v.1, p. 362, Dez, 1994.

JORNAL DO COMMERCCIO. **Polo de Confecções do Agreste: da Sulanca à industrialização**. Pernambuco, 14, dez, 2014. Disponível em: <<https://jc.ne10.uol.com.br/canal/economia/pernambuco/noticia/2014/12/14/polo-de-confeccoes-do-agreste-da-sulanca-a-industrializacao-160371.php>>. Acesso em: 03, fev e 2023.

KUMAR, V. T. A.; RAJKUMAR, P. R. K.; RAVICHANDRAN, T. P. Use of Textile Effluent. **Treatment Plant Sludge as Sustainable Material in Brick Manufacturing BT**: International Conference on Intelligent Computing and Applications, Springer Singapore, p. 283-291, 2019.

LAFAYETTE, K. P. V.; SOUZA, J. M. S. R. **Utilização do tijolo de solo cimento: uma abordagem comparativa orçamentária com metodologias construtivas tradicionais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade de Pernambuco, Pernambuco, v. 8, p. 202, Fev, 2022.

LEA, F. M. **Chemistry of Cement and Concrete.** Butterworth-Heinemann: Oxford, v. 4, p. 1092, Jan, 1998.

LEITE, F. H. G. **Desenvolvimento de material de silicato de cálcio para isolamento térmica usando resíduo lama de cal.** Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais): Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos Dos Goytacazes, p. 123, Fev, 2018.

LIMA, G. F.; SILVA, C. P.; SILVA, T. M. T.; TABOSA, J. H. R. C. **Tratamento de solo com adição de cimento portland: análise de propriedades para aplicação em pavimentação de baixo custo.** Brazilian Journal of Development: Curitiba, v. 5, p. 17, Dez, 2019.

LIMA, P. C. F. **Algaroba: Uma das alternativas para o Nordeste.** Brasil Florestal, Pernambuco, v. 58, p. 8, Abr-Mai-Jun, 1984.

LIMA, P. C. F.; PASIECZNIK, N. M. **Algaroba - planta invasora ou recurso florestal valioso?** Embrapa, Petrolina, v. 1, p. 2, Abr, 2006.

LIMA, R. A. P.; MARINHO, J. F. V.; MARINHO, E. P.; NÓBREGA, A. C. V. **Self-compacting concrete using calcium-rich ashes as alternative fillers and heated dry materials to simulate hot weather mixing.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, p. 163-180, abr./jun, 2023.

LIMA, R. A. P.; MARINHO, E. P.; NÓBREGA, A. C. V. **Betões autocompactáveis utilizando cinzas ricas em cálcio como fíler alternativo.** In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO CONVENCIONAIS, Rio de Janeiro, v. 18, p. 19, Mai, 2006.

LIMA, R. M. F. **Ensaio de determinação de área superficial por adsorção de gás. Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais.** CETEM: MCT, Rio de Janeiro, v. 1, p. 450-470, Mai, 2007.

LIMPRASERT, T. **Behaviour of soil, soil-cement and soil-cement-fiber under multiaxial test.** Dissertation (Master in Civil Engineering): Faculty of the Russ College of Engineering and Technology, Ohio, v.1, p. 224, Dez, 1995.

LORENA, E. M. G.; SANTOS, I. G. S.; GABRIEL, F. A.; BEZERRA, A. P. X. G.; RODRIGUEZ, M. A. M.; MORAES, A. S. **Analysis of the procedural and wastewater treatment at a beverage bottling industry in the state of Pernambuco, Brazil.** Revista Geama, Pernambuco, v. 2, n. 4, p. 466-472, Out-Dez, 2016.

MACENA, J. A. S. Jr. **Concreto auto-adensável com uso do cimento CP III e cinza de algaroba como fíler alternativo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, p. 47, 2019.

MARIN, F. A. D. G.; SOBARZO, L. C. D. **Resíduos sólidos: representações, conceitos e metodologias: propostas de trabalho para o ensino fundamental.** R. Ens. Geogr., Uberlândia, v. 1, p. 3-14, Jul-Dez, 2010.

MARINHO, J. F. V. **Avaliação dos efeitos da temperatura em concretos auto - adensáveis produzidos com incorporação de cinzas de algaroba geradas no APL do agreste Pernambuco como fíler calcário alternativo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, p. 88, 2019.

MAZA-IGNACIO, O. T.; JIMÉNEZ-QUERO, V. G.; GUERRERO-PAZ, J.; MONTES-GARCÍA, P. **Recycling untreated sugarcane bagasse ash and industrial wastes for the preparation of resistant, lightweight and ecological fired bricks.** Construction and Building Materials, Amsterdã, v. 234, p. 11, Feb, 2020.

MAZALI, I. O. **Apostila: Determinação da densidade de sólidos pelo método de Arquimedes.** UNICAMP – Campinas. Disponível em:

<[https://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia\\_lqes\\_meotec\\_densidade\\_arquimedes.pdf](https://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia_lqes_meotec_densidade_arquimedes.pdf)>. Acesso em: 01, Out, 2023.

MELO, M. C. S. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do Agreste pernambucano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, p. 121, 2012.

MELO, M. C. S. **Utilização de cinza de algaroba como matéria-prima alternativa para uso em blocos de solo-cal**. 105f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, p. 105, 2018.

MENDES, R.; MENEZES, J. C. S. S.; ZANOTTI, R. A. R. **Produção de Solo-Cimento (Tijolo Ecológico) Utilizando Resíduo do Polimento de Grés de Porcelanato como Fonte de Sílica**. Revista de Engenharia Civil: IMED, Rio Grande do Sul, v.1, p. 50-55, Mai-Ago, 2014.

MORAIS, C. R. S.; QUEIROZ, A. J. P. **Soil characterisation used in ceramic industries and an analysis of its feasibility in ecological bricks**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, p. 111-123, out./dez. 2021.

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de algaroba (prosopis juliflora) moldado sob pressão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru/PE, p. 123, 2014.

NASCIMENTO, P. H. M. **Estudo da hidratação do cimento portland com adição de fíler calcário**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 70, 2022.

PAN, Z.; ZHANG, R.; ZICARI, S. **Integrated processing technologies for food and agricultural by-products**. Academic Press, London, v. 1, p. 452, Jul, 2019.

PARIZ, S. O.; PIRES, W. A. **Prensa hidráulica para fabricação de tijolos solo – cimento**. Universidade Federal Do Espírito Santo, Vitória, p. 117, 2005.

PARKER, I.; SIMBERLOFF, D.; LONSDALE, W.; GOODELL, K.; WONHAM, M.; KAREIVA, P.; WILLIAMSON, M.; VONHOLLE, B.; MOYLE, P.; BYRES, J.; GOLDWASSER, L. **Impact: toward a framework for understanding the ecological effects of invaders**. Kluwer Academic, Netherlands, v. 1, p. 3-19, Fev, 1999.

PECORIELLO, L. A. **Recomendações práticas para uso do tijolo furado de solo cimento na produção de alvenaria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, p. 75, 2003.

PISANI, M. A. J. **Um material de construção de baixo de baixo impacto ambiental: o tijolo de solo-cimento**. Sinergia, São Paulo, v. 6, p. 53-59, Jan, 2005.

PORTAL G1. **Agreste pernambucano tem mais de 800 lavanderias e nem 40% delas tratam a água da produção do jeans**. Disponível em: < <https://g1.globo.com/globo-reporter/noticia/2022/07/24/agreste-pernambucano-tem-mais-de-800-lavanderias-e-nem-40percent-delas-tratam-a-agua-da-producao-do-jeans.ghtml>>. Acesso em: 06, jun e 2023.

PRESA, M. B. **Resistência à compressão e absorção de água em tijolos de solo cimento**. Universidade de Brasília: Brasília, p. 51, 2011.

RIBASKI, J. **Influência da algaroba [Prosopis Juliflora (SW.) DC.] Sobre a disponibilidade e qualidade da forragem de capim-búfel /Cenchrus Ciliaris] na egião semi-árida brasileira**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal): Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, p. 179, 2000.

RIBASKI, J.; DRUMOND, M. A.; OLIVEIRA, V. R.; NASCIMENTO, C. E. S. **Algaroba (Prosopis juliflora): árvore de uso múltiplo para a região semiárida brasileira**. Embrapa, Colombo, v. 240, p. 8, Out, 2009.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. **Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento**. Cerâmica, São Paulo, v. 59, p. 6, Dez, 2013.

SANKOH, F. P.; YAN, X.; CONTEH, A. M. H. **A Situational Assessment of Socioeconomic Factors Affecting Solid Waste Generation and Composition in Freetown, Sierra Leone.** Journal of Environmental Protection: China, v. 03, p. 6, Jul, 2012.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade de São Paulo: São Carlos, p. 168, 2007.

SANTOS, G. G. D. **Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros.** Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético): Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 208, 2011.

SANTOS, L. L. **Adição de cinza de lenha de algaroba (*prosopis juliflora*) em massa cerâmica para revestimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal da Paraíba: João Pessoa, p. 154, 2014.

SEBRAE. **APL Arranjo Produtivo Local: Série Empreendimentos Coletivos.** Brasília: Sebrae, v. 1, p. 50, Dez, 2014.

SEBRAE. **Estudo Econômico Do Arranjo Produtivo Local De Confeções Do Agreste Pernambucano, 2012.** Brasília: Sebrae, v. 1, p. 151, Mai, 2013.

SEBRAE. **Gestão de resíduos sólidos: Oportunidade para a indústria moveleira.** Santa Catarina: Florianópolis, Sebrae, v. 1, p. 176, Dez, 2015.

SEGANTINI, A. A. S. S.; WADA, P. H. **Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Estadual de Maringá, Maringá, v. 33, p. 179-183, Abr, 2011.

SILVA, A. M. **Avaliação das propriedades dos tijolos ecológicos produzidos na região de feira de Santana.** Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Bahia, p. 40, 2016.

SOUZA, J. D. **O efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do estado do Ceará.** Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Transportes): Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, p. 229, 2005.

VELASCO; R. V. **Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações Volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, Físicas, mecânicas e térmicas.** Tese (Doutorado em Engenharia Florestal): Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 388, 2008.

VELUMANI, P.; SENTHILKUMAR, S.; PREMALATHA, P. V. **An Innovative Approach to Evaluate the Performance of Sludge-Incorporated Fly Ash Bricks.** Journal of Testing and Evaluation, West Conshohocken, v. 44, p. 2155–2163, Nov, 2016.

VIANA, M. A.; LIRA, E. B. S.; COELHO, C. P. G.; BEZERRA, A. P. X. G.; LORENA, E. M. G.; HOLANDA, R. M. **Pegada hídrica em indústria de beneficiamento de jeans no Agreste Pernambucano.** Journal of Environmental Analysis and Progress, Pernambuco, v. 03, p. 061-068, Jan, 2018.