



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS PARA O
DESENVOLVIMENTO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO A PARTIR DO
APROVEITAMENTO DO RESÍDUO AGROINDUSTRIAL DO CAROÇO DE AÇAÍ

ALINE ARAÚJO DA SILVA

MANAUS – AM

2021

ALINE ARAÚJO DA SILVA

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS PARA O
DESENVOLVIMENTO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO A PARTIR DO
APROVEITAMENTO DO RESÍDUO AGROINDUSTRIAL DO CAROÇO DE AÇAÍ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Linha de pesquisa: Propriedades físicas mecânicas e modelagem de materiais.

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade

MANAUS – AM

2021

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S586e Silva, Aline Araújo da
Estudo e caracterização de matérias-primas para o desenvolvimento de tijolo solo-cimento a partir do aproveitamento do resíduo agroindustrial do caroço de açaí / Aline Araújo da Silva, Jean Carlos Andrade. 2021
77 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Jean Carlos Silva Andrade
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Tijolo. 2. Solo-cimento. 3. Compósito. 4. Euterpe. 5. Açaí. I. Andrade, Jean Carlos. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

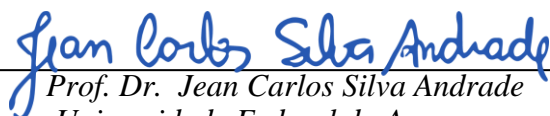
ALINE ARAÚJO DA SILVA

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS PARA O
DESENVOLVIMENTO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO A PARTIR DO
APROVEITAMENTO DO RESÍDUO AGROINDUSTRIAL DO CAROÇO DE AÇAÍ

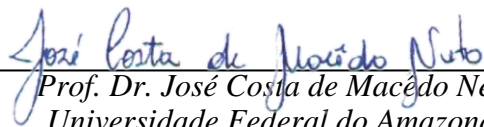
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Linha de pesquisa: Propriedades físicas mecânicas e modelagem de materiais.

BANCA EXAMINADORA



*Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade
Universidade Federal do Amazonas
Presidente*



*Prof. Dr. José Costa de Macêdo Neto
Universidade Federal do Amazonas*



*Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima
Universidade Federal do Amazonas
Membro*

AGRADECIMENTOS

Agradeço infinitamente Deus por permitir que muitos milagres aconteçam em minha vida, incluindo esta dissertação;

Eu sou fruto de programas como o Bolsa família, Programa universidade para todos (PROUNI) que permitiu-me ter acesso ao conhecimento, agradeço aos envolvidos;

Agradeço à Professora Doutora Luciane Ribas que sempre acreditou no meu potencial e evolução;

Ao meu orientador Doutor Jean Carlos Silva Andrade, pela paciência, incentivo, conselhos e por sempre acreditar que eu tinha potencial;

Agradeço ao movimento Parent in Science, Programa Amanhã incentivando jovens mães na ciência, que me ajudou com uma bolsa sem burocracia que serviu de luz no fim do túnel. Se puder doe um pix: parentinscience@gmail.com;

Ao Programa SisNANO, MCTIC, CNPq pelo apoio financeiro e ao Laboratório Temático de Microscopia e Nanotecnologia (LTMN) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), carinhosamente Doutora Maria Oneide Silva de Moraes e Orlando Cruz.

Ao professor Doutor Nilton Campelo por deixar a minha disposição toda a estrutura do Laboratório de Pavimentação da UFAM durante a quarentena;

Ao meu amigo Darbens, um ser maravilhoso, simples e cheio de luz que apareceu no meu caminho;

Ao meu amigo de turma e de vida Benjamin Batista, pela cumplicidade, sinceridade, carinho, afeto e suporte;

Ao grupinho de amigas que sempre mandam pix para ajudar nas pesquisas Ana Neves, Polliany Nunes, Aulimar Amarin.

Aos meus pais, Karla Sylvana e Antônio Aguiar que nunca cessaram forças para me ver feliz e formada, se sacrificam até hoje para que eu possa sonhar. Amo vocês.

Aos meus príncipes encantados, André Luiz e Arthur Gabriel que vieram ao mundo para dar sentido para a minha trajetória. Sem eles eu não seria ninguém.

RESUMO

O objetivo dessa pesquisa consiste em analisar as propriedades de matérias primas para confecção de corpos de prova para confecção de tijolos feitos de solo-cimento com adição de resíduos de caroços do fruto de açaí oriundos da agroindústria local. Inicialmente, coletou-se os resíduos agroindustriais de feiras da cidade ao qual foram lavados, secos em estufa, limpos de impurezas e moídos em um moinho de facas. Posteriormente, foram coletadas duas amostras de solos de Manaus para realizar análise laboratorial para definir qual amostra apresenta melhor resultado para a confecção dos corpos de provas. Após a análise granulométrica por peneiramento e limites de consistência das amostras selecionou-se a amostra ideal para fabricação dos tijolos. Então, progrediu-se com a caracterização por microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X e estudo para determinação do traço mais adequado. Foram preparadas cinco misturas com adição dos resíduos, 1%, 3%, 5%, 7% e 10% além de uma mistura padrão sem adição de resíduos para comparação. Para cada mistura serão confeccionados 19 corpos de provas totalizando 95 unidades com realização dos ensaios de análise dimensional, absorção de água e resistência em diferentes períodos de idade. Os resultados mostraram que é possível confeccionar tijolos de solo-cimento com adições de partículas de caroços de açaí. A análise dimensional mostrou-se satisfatória visto que não aconteceu variação de mais de 1mm para todas misturas. Os resultados de absorção de água nos traços 1%, 3%, 5% e 7% foram satisfatórios enquanto os corpos de prova com 10% de adições de resíduos absorveram mais de 20% de água. Os resultados de resistência à compressão em todas as idades mostraram-se satisfatórios para os traços 1%, 3%, 5%, 7%, exceto para o traço com 10% de resíduos.

Palavras-chave: tijolo; solo-cimento; açaí; compósito; agroindústria; euterpe oleracea.

ABSTRACT

The objective of this research is to analyze the properties of a brick made of soil-cement with the addition of residues of açai fruit kernels from the local agroindustry. Initially, agro-industrial waste from farms in the city was collected and washed, dried in an oven, cleaned of impurities and ground in a knife mill. Subsequently, two samples of soils from Manaus were collected to carry out laboratory analysis to define which sample presents the best result for making the bodies of evidence. After the granulometric analysis by sieving and consistency limits of the samples, the ideal sample for the manufacture of bricks was selected. Then, the characterization by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and study to determine the most adequate trace was progressed. Five mixtures were prepared with addition of residues, 1%, 3%, 5%, 7% and 10% in addition to a standard mixture without addition of residues for comparison. For each mixture, 19 specimens will be made, totaling 95 units, with dimensional analysis, water absorption and resistance tests carried out at different age periods. The results showed that it is possible to make soil-cement bricks with the addition of açai stone particles. The dimensional analysis was satisfactory since there was no variation of more than 1mm for all mixtures. The results of water absorption in the 1%, 3%, 5% and 7% mixes were satisfactory while the specimens with 10% of residue additions absorbed more than 20% of water. The results of compressive strength at all ages were satisfactory for the 1%, 3%, 5%, 7% mixes, except for the mix with 10% residues.

Keywords: brick; soil-cement; açai; composite; agribusiness; euterpe oleracea.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Açazeiros Ilha de Marajó.....	14
Figura 2 - Palmeiras de açazeiro: a) touceira; b) solteiro.....	15
Figura 3 - Comercialização do fruto no estado do Pará.....	16
Figura 4 - Caroços de açai descartados	16
Figura 5 - Produção do fruto de açai nos últimos anos	18
Figura 6 - Habitação feita de solo	20
Figura 7 - Fases existente no solo: (a) solo com baixa umidade; (b) solo com umidade ideal.	22
Figura 8 - Prensa manual que produz três blocos ao mesmo tempo.....	24
Figura 9 - Esquema de classificação dos compósitos	32
Figura 10 - Tipos de compósitos	33
Figura 11 - Diagrama metodológico do desenvolvimento da pesquisa.	36
Figura 12 – Etapas de preparação dos caroços para moagem: (a) resíduos após primeira lavagem (b) secagem em estufa por 24 horas (c) resíduos totalmente secos.	37
Figura 13 - Etapa no tratamento de resíduo: (a) moinho de facas (b) caroços moídos.....	38
Figura 14 - Local de extração de S1	39
Figura 15 - Local de extração de S2	39
Figura 16 - Etapas do ensaio de granulometria dos solos (a) pesagem da amostra (b) diferença das granulometrias após ensaio.....	41
Figura 17 - Ensaio de Plasticidade dos solos	42
Figura 18 - Microscópio Eletrônico de Varredura	43
Figura 19 - Processo de preparo da amostra para o MEV: (a) porta amostra; (b) metalização (c) cobertura de ouro.	44
Figura 20 - Molde para confecção dos corpos de prova em escala laboratorial	46
Figura 21 - Equipamento utilizado para obter a resistência à compressão.....	47
Figura 22 - Preparação dos corpos de prova para ensaio de absorção de água.....	48
Figura 23 - Corpos de prova imersos em água por 24 horas	49
Figura 24 – Resultado do ensaio de granulometria de S1	50
Figura 25 - Resultado do ensaio de granulometria S2.....	51
Figura 26 - Curva de umidade ótima da amostra S1	53
Figura 27 - Micrografia com EDS da amostra S1 (a) micrografia eletrônica; (b) coloração em camadas elementar	54
Figura 28 - Tonalidades em camadas para S1.....	55
Figura 29 - Análise microestrutural com EDS dos resíduos triturados: (a) protusões globulares na superfície externa; (b) coloração em camadas de EDS; (c)	56
Figura 30 - Comparação da cristalinidade de S1 e S2	57
Figura 31 - Difratoograma da amostra S1	58
Figura 32 - Resultados de absorção de água.....	61
Figura 33 - Valores médios de resistência à compressão em função dos resíduos aplicados nos corpos de prova com desvio padrão.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição mais comum do cimento Portland.....	28
Tabela 2 - Normas brasileiras acerca do tijolo solo-cimento	31
Tabela 3 - Ensaio em solo-cimento de acordo com ABNT.....	31
Tabela 4 - Relação das peneiras normatizadas utilizadas para ensaios da pesquisa.....	40
Tabela 5 - Relação das formulações dos corpos de provas	45
Tabela 6 - Análise granulométrica das amostras de solo	51
Tabela 7 - Índice de plasticidade das amostras	52
Tabela 8 - Composição química das amostras S1 e S2	55
Tabela 9 - Característica microestrutural de S1	59
Tabela 10 - Dosagem de material da pesquisa	60
Tabela 11 - Resultados da análise dimensional para cada formulação	62
Tabela 12 - Resultados de resistência média à compressão dos corpos de prova nas idades 7,14 e 28 dias	63
Tabela 13 - Resultados encontrados na literatura para a resistência à compressão de tijolos de solo-cimento com substituição parcial do cimento por resíduo vegetal.....	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo Geral	13
1.2 Objetivos Específicos	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 O Açai	14
2.1.1 Produção do açai.....	17
2.2 Solo para a construção civil.....	19
2.2.1 Tijolo solo-cimento.....	23
2.2.2 Critérios para seleção do solo	26
2.2.3 Cimento Portland.....	27
2.2.4 Dosagem.....	30
2.2.5 Normas consultadas da ABNT.....	30
2.3 Materiais compósitos.....	31
2.2 Tipos de compósitos.....	33
2.2.1 Compósitos particulados	33
2.2.3.1 Compósitos reforçados por dispersão	34
2.2.3.2 Compósitos com partículas grandes.....	34
3 METODOLOGIA	35
3.1 Coleta de materiais.....	36
3.1.1 Cimento	36
3.1.2 Resíduos agroindustriais: caroços de açai.....	36
3.1.3 Solo	38
3.2 Procedimentos experimentais	40
3.2.1 Preparação das amostras de solo	40
3.2.2 Análise granulométrica	41
3.2.3 Análise da plasticidade	41
3.2.4 Ensaio de compactação normal.....	42
3.2.5 Microscopia eletrônica de varredura com detector de energia (MEV/EDS)	43
3.2.6 Difração de raios X (DRX)	44
3.3 Formulação e composição dos corpos de prova.....	45
3.4 Ensaio físicos e mecânicos.....	47
3.4.1 Análise dimensional.....	47
3.4.2 Resistência à compressão simples.....	47

3.4.3	Ensaio de absorção de água	48
3.5.4	Período de cura	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Caracterização dos materiais	50
4.1.1	Granulometria.....	50
4.1.2	Índices de Plasticidade dos solos	52
4.1.3	Ensaio de compactação normal.....	53
4.1.4	Micrografia da amostra de solo.....	54
4.1.5	Micrografia dos resíduos.....	55
4.1.6	Difratograma da amostra de solo	57
4.1.7	Determinação do traço.....	59
4.2	Caracterizações física dos corpos de prova	60
4.2.1	Absorção de água.....	60
4.2.2	Análise dimensional.....	62
4.2.3	Resistência à compressão.....	63
	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

A região norte do Brasil, especialmente os estados do Amazonas e Pará, é destaque no extrativismo vegetal de forma específica na extração do fruto que produz o “vinho” de açaí [1], como não se tem destinação adequada dos caroços desse fruto, conseqüentemente acontece expressivo descarte de resíduos no meio ambiente.

Nas últimas décadas, o consumo do suco de açaí cresceu exponencialmente pois se difundiu em todo o Brasil principalmente pela sua aceitação na região sudeste e também por todo o mundo [2], [3], [4]. Portanto passa a ser a principal atividade socioeconômica de pequenos produtores nos estados do Amazonas e Pará [5].

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas [1] o fruto do açaí foi o produto alimentício que apresentou maior valor no extrativismo não madeireiro com 46,3% no valor total em 2018 somando um valor de R\$ 592,0 milhões.

Tendo em vista que aproximadamente a polpa do açaí representa apenas 15% do seu volume e os caroços o restante, o volume de produção ao dia é muito grande sendo descartados os resíduos ilegalmente após serem batidos [6], [7].

Vale ressaltar que atualmente no Estado do Amazonas a produção de polpa de açaí é estimada entre 28 a 70 mil toneladas por ano, sendo o índice de reaproveitamento do caroço do Açaí muito baixo, fazendo com que grande parte dos resíduos sejam descartados inadequadamente em rios, igarapés, estradas e terrenos baldios [8], [9].

Como alternativa, o fruto do açaí e seus rejeitos são usados nos mais diversos campos das pesquisas como por exemplo, em tratamentos identificador de placas baseados no pigmento do açaí, exames de ressonância magnética do aparelho digestivo com o produto contraste derivado do açaí, pesquisas de combate a células cancerígenas de próstata, sua capacidade de proteger a pele, retardar o envelhecimento e também o seu importante valor nutricional [10].

Tendo em vista que a construção civil é também uma das maiores causadoras de impactos ambientais por consumir recursos naturais desde o processo de fabricação de materiais até a execução de serviços, existe o tijolo de solo-cimento que possui diversas vantagens ao se fabricar, além de não precisar de mão de obra especializada e não necessitar ser queimado (emissão de gases poluentes), tem

simplicidade no processo de produção e garante resistência à compressão semelhante ao tijolo convencional [11], [12].

No Brasil, e em outros países, a mistura solo-cimento foi motivada pela possibilidade de redução de custos e a influência de aspectos relacionados à preservação ambiental fator contribuinte para o interesse de construções feitas de tijolos solo-cimento modulares [13].

O interesse em analisar esse resíduo agroindustrial (caroços do açaí) partiu do grande volume de descarte de resíduos no meio ambiente, caso seja empregado como reforço em matriz de solo-cimento (fabricação de tijolos) promovendo a melhora das propriedades técnicas, principalmente a resistência mecânica. Para realizar esta pesquisa, foi definido então os objetivos, objetivo geral e objetivos específicos.

1.1 Objetivo Geral

Avaliação de propriedades físico-mecânicas do composto solo-cimento com incorporação de caroço de açaí provenientes de descarte.

1.2 Objetivos Específicos

- I. Estudar as características físicas de dois solos, através de ensaios de análise granulométrica, de limite de liquidez, e limite de plasticidade;
- II. Estudar as características químicas, mineralógicas e microestrutural de dois solos através de difração de raios x (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- III. Determinar as características dos solos visando escolher o mais adequado que atende os requisitos para produção de tijolo solo-cimento;
- IV. Formular o traço mais adequado para a adição de porcentagens de resíduos;
- V. Produzir corpos de prova em formato retangular de tijolo solo-cimento sem e com a adição de partículas de caroços de açaí;
- VI. Avaliar a influência da adição de partículas de caroços de açaí moídos através de ensaios físicos e mecânico dos corpos de provas de tijolos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O Açaí

O fruto do açaí é proveniente de uma palmeira chamada *Arecaceae*, apresentado na figura 1, esta espécie possui grande distribuição geográfica na América Latina porém a maior quantidade está contida na Amazônia, onde através do consumo alimentício, obtenção do suco e do palmito, se torna principal fonte de renda de muitas famílias [4], [10], [14].



Figura 1 - Açaizeiros Ilha de Marajó
Fonte: [10].

Linhares afirma que o açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart) é uma palmeira que pertence à família *Arecaceae*. Pode atingir de 25 m a 30 m de altura e são encontradas em alguns estados da região Norte do Brasil com maior prevalência no estado do Pará. O fruto mede de 1 cm a 2 cm de diâmetro com o peso médio de 1,5 gramas [15].

Corroborando isto, outros autores afirmam que esta árvore é capaz de apresentar até 25 brotações (perfilhos) por touceira, podendo atingir até 20 m de altura; apresenta uma inflorescência do tipo cacho com frutos esféricos, roxos quando maduros, de aproximadamente 1,5 gramas cada, sendo esta, juntamente com o palmito, as partes comerciais da planta destinadas à alimentação humana [4], [10].

A infrutescência ou cacho, varia de 3 a 8 por estipe em diferentes estágios de desenvolvimento. É constituída por centenas de frutos tipo drupa globosa com leve depressão, pesando de 0,5 a 2,8 g e diâmetro de 1 a 2 cm, verde-brilhante quando imaturo e violáceo ou verde-opaco quando maduro [14].

O açazeiro, independentemente da espécie, pode ser encontrado em terra firme (inundáveis ou não), em solos de várzea (baixa ou alta) e em igapós [16]. Na figura 2 pode-se observar os dois tipos mais comuns encontrados na Amazônia: *Euterpe oleracea* (o açai de touceira) e *Euterpe precatória* (o açai solteiro).



Figura 2 - Palmeiras de açazeiro: a) touceira; b) solteiro
Fonte: [17].

Em relação ao fruto existem diversas espécies catalogadas como: açai-roxo, o açai-branco, o açai-Açu, o açai-espada, o açai-sangue-de-boi, o açai-tinga e o açai-chumbinho. Porém o açai-roxo é o mais comumente encontrado nas populações nativas. A figura 3 mostra a feira do açai na cidade de Belém onde é a cidade com maior comércio.

A espécie *Euterpe precatória* está difundida na bacia do Solimões em terrenos de terra firme, em áreas de baixio e em pequenas propriedades produtoras. Sendo frutíferas o ano inteiro porém o período de mais abundância a estação menos chuvosa produzindo em média de 3 a cada cachos com variação de peso de 3 a 6 quilos [18].

Os frutos possuem forma arredondada de diâmetro variável de 1 a 2cm de massa entre 0,8 a 2,3g, o epicarpo é a casca bem fina, mesocarpo com espessura de 1 a 2mm. A poupa representa até 15% do volume do fruto e o caroço envolvido por um feixe de fibras. Em um estudo observou-se, a partir de micrografias que o epicarpo é delgado em relação a polpa e as fibras recobrem o caroço de forma compacta em

algumas regiões alinhadas sendo o caroço maior responsável pelo volume do fruto [10], [14], [19].



Figura 3 - Comercialização do fruto no estado do Pará
Fonte: [20].

O caroço do açaí (figura 4), é um material rico em carboidratos complexos sendo sua composição maior feita de lignina, um dos polímeros mais abundantes na natureza, é considerado heteropolímero tridimensional amorfo, composto por várias unidades de álcoois fenilpropílicos. Possui uma estrutura não homogênea podendo, as vezes, apresentar regiões amorfas e outras globulares [21], [22]. Em alguns estudos onde foram caracterizados mostrou sendo compostos principalmente por celulose (32-45%), hemicelulose (19-25%) e lignina (14-26%); embora dependendo da região, esses níveis possam variar consideravelmente [9].



Figura 4 - Caroços de açaí descartados

O caroço de açaí tem sido uma fonte de estudos em diversas áreas, devido ao interesse no desenvolvimento de tratamentos adequados para descarte e reutilização deste resíduo.

Neste contexto pode-se citar diversas pesquisas que estão sendo realizadas nos últimos anos com a finalidade de aproveitar os resíduos, como a caracterização das cinzas do caroço de açaí para adição no preparo do concreto [11], recentemente um estudo avaliou o comportamento do solo argiloso reforçado com as fibras [23], outro fez a avaliação do desempenho térmico painéis poliméricos produzidos com resíduos do açaí [24], também realizou-se a substituição parcial do agregado graúdo [25], uma pesquisa utilizou as fibras das sementes para reforçar o processamento de madeira plástica junto ao poliestireno reciclado [26], também foi desenvolvido um compósito com adição de teores de 5% e 1% de fibras na produção de placas cimentícias [27], desenvolveu-se um estudo dos efeitos térmicos em compósitos poliméricos [28] e muitas outras.

2.1.1 Produção do açaí

O consumo do açaí começou a ser ampliado no final da década de 1990, com a industrialização e congelamento da polpa vendida ao mercado nacional, principalmente nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, e também ao mercado internacional. A procura crescente pelo produto deve-se ao seu poder antioxidante, que combate os radicais livres, responsáveis pelo envelhecimento das células. Esse aumento da demanda trouxe também a necessidade de criação de métodos de monitoramento da qualidade do produto [15].

Em 2018 foram comercializados pelo estado do Pará mais de 788,4 milhões de reais em produtos originados do beneficiamento do açaí, destinados aos mercados nacional e internacional, que adquiriram cerca de 76.800 toneladas de polpa, mixes e açaí liofilizado [29].

Entretanto, no ano de 2019 a produção foi de 222.706 toneladas, cerca de 8% a mais no volume que no ano de 2014, ou seja, o consumo desse fruto está crescendo exponencialmente, como mostra a figura 5.

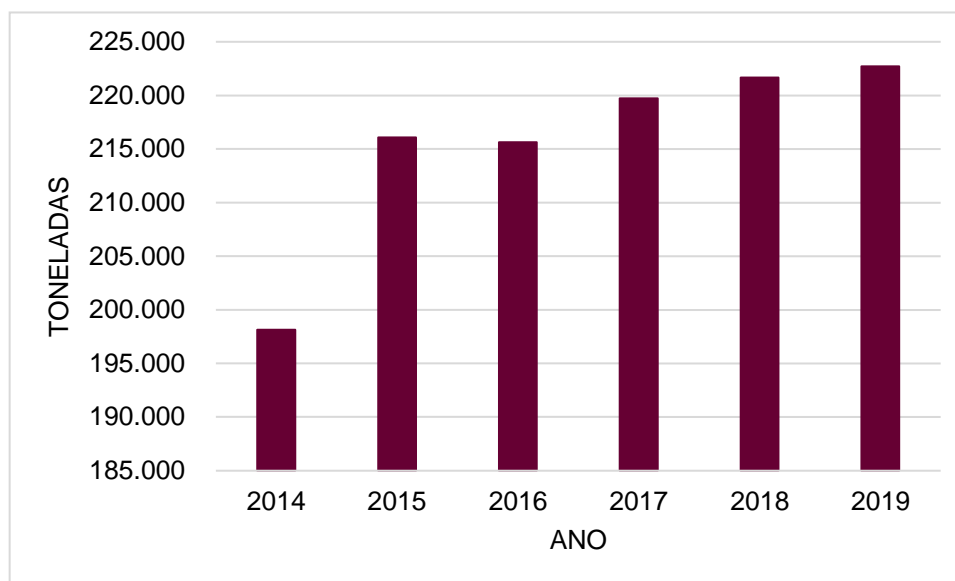


Figura 5 - Produção do fruto de açaí nos últimos anos
Fonte: [30].

Apesar da importância econômica da polpa do açaí, que representa apenas 10% da massa total do fruto, sendo o restante descartado pela indústria no processo de produção de polpa e usado como resíduo industrial atualmente. A semente única, que representa 87% do fruto possui composição [31].

A produção de açaí somente no estado do Amazonas está próxima de 70 mil toneladas/ano, ou seja, cerca de 191.780 toneladas ao dia [8]. Visto que os caroços são responsáveis por 87% do volume do fruto, pode-se quantificar o número expressivo de resíduos agroindustrial que é gerado para o qual poucas tecnologias de aproveitamento foram desenvolvidas, tornando-o uma problemática ambiental.

Diante de dados levantados, pode-se quantificar o número expressivo de resíduos agroindustrial que é gerado visto que os caroços são responsáveis por maior parte do volume da produção, para o qual poucas tecnologias de aproveitamento foram desenvolvidas, tornando-o um aspecto ambiental para o manejo florestal, com relação de ganho socioeconômico ambiental para as comunidades que trabalha com o fruto de açaí.

2.2 Solo para a construção civil

A terra crua, nome dado por algumas pessoas ao solo, vem sendo utilizada pelo homem há milênios, visando resolver o problema de habitação da humanidade. A mesma está presente em qualquer parte do mundo [32]. Desse ponto de vista, pode-se afirmar que qualquer indivíduo tem a capacidade de desenvolver tijolo feito de solo-cimento artesanalmente.

A utilização da terra crua na construção civil não é apenas por se mostrar um valor abaixo do mercado que favoreça a população de baixa renda, mas tem a finalidade de redução de impactos gerados pela construção civil, tendo em vista que a quantidade de solo é abrangente para o processo de fabricação [33].

Os primeiros materiais de construção usados foram aqueles que são ofertados pela natureza, como palha, pedra, galhos e troncos de árvores e sem dúvida a terra crua, em seu estado natural, sem ter sido queimada que é utilizada, desde muito tempo na construção de estradas e barragens [13].

Em países asiáticos, africanos e do oriente médio existem até hoje cidades construídas inteiramente desse material. No continente americano, a terra como material de construção civil foi utilizada pelos incas, maias e até mesmo pelos índios norte-americanos. No Brasil, essa técnica foi introduzida pelos portugueses com construções coloniais de qualidade [13], [32].

A tradição milenar agora é revivida quando problemas ambientais vieram a surgir, um exemplo é a fabricação de tijolos cerâmicos pois grande parte da indústria utiliza a vegetação local como combustível [13]. A utilização de fabricação de tijolos de terra crua apresenta muitas vantagens que serão listadas a seguir:

- ✓ Disponibilidade;
- ✓ Propriedades térmicas superiores;
- ✓ Absorção e liberação de umidade mantendo o ambiente saudável;
- ✓ Mínimo de poluição e baixo consumo energético;
- ✓ Fácil de reincorporação na natureza;
- ✓ Tecnologia fácil.

Sendo a indústria da construção civil maior responsável pela extração de grande parte dos recursos naturais, atualmente existe a preocupação em construir edificações com menor impacto negativo possível, ou seja, que usem materiais com

potencial de reincorporação na natureza e tenham baixo conteúdo energético, portanto a terra pode ser uma alternativa para atingir esses objetivos [34].

O uso do solo-cimento é considerado como um material alternativo para atingir os objetivos sustentáveis de novas tecnologias implementadas em edificações. O produto é formado em maior proporção por solo, seguido de uma parcela de cimento e água. O principal destaque dessa tecnologia é a dispensa de queima, como aplicada na fabricação da cerâmica vermelha, e a abundância do solo como matéria-prima principal. O solo-cimento pode ser aplicado na fabricação de blocos e tijolos, sendo produzidos exclusivamente a partir da prensagem, podendo ser manual ou hidráulica, e cura do produto, recebendo a denominação de tijolos ecológicos [35].

Por questões ecológicas a arquitetura de terra, nos dias atuais, tem sido procurada não apenas por pessoas desfavorecidas como também pelas pessoas da alta sociedade [13].



Figura 6 - Habitação feita de solo

Fonte: [13].

Existem mais de vinte técnicas de construção com terra crua, além de sua variante peculiar a cada local, entretanto elas podem ser divididas em três grupos classificadas de acordo com a maneira de se levantar as paredes: alvenaria, monolítica e mista [34], [13].

Na alvenaria são empregados elementos individuais (blocos ou tijolos) que são unidos entre si colados por argamassa, no Brasil se utilizam os tijolos de adobe e blocos de terra comprimidos. No método monolítico são feitas paredes monoliticamente com a terra compactada entre duas formas e na mista a terra serve de enchimento a uma estrutura geralmente feita de madeira que não tem função

estrutural. No entanto vale ressaltar que é preciso conhecer as propriedades da terra para se dar uma boa aplicação [13].

É importante o conhecimento das dimensões das partículas que compõem a terra pois o seu comportamento mecânico depende do tamanho das partículas. Por isso existe uma classificação quanto ao diâmetro médio das partículas que são [13]:

- Pedregulho – dimensões entre 4,8 e 5,0mm;
- Areia – dimensões entre 50 μ m e 4,8mm;
- Silte – partículas finas entre 5 μ m e 50 μ m;
- Argila – partículas finíssimas com dimensões \leq 5 μ m.

Os componentes do solo de maior dimensão, pedregulho e areia (grossa, média e fina) podem ser obtidos por ensaio de peneiramento normatizado no Brasil pela ABNT e a porcentagem de silte e de argilas são determinadas pelo ensaio de sedimentação também normatizado pela ABNT.

Antes de iniciar uma construção com terra, é conveniente se proceder a ensaios de caracterização do material, inclusive com a determinação dos tipos de argilas presentes, por meio da difratometria de raios X [13].

Os solos devem ter componentes reativos disponíveis para as reações pozolânicas. Esses componentes são os alumino-silicatos, apresentados na forma de minerais do tipo 1:1 ou 1:2. Os argilominerais do tipo 1:1 são representados pela caulinita sendo muito abundantes em solos tropicais. As duas unidades básicas, compostas a base de Si e do Al, dispõem-se solidarias, de forma que o empacotamento seja maior e a superfície de exposição seja mínima e praticamente não se manifeste a presença de cargas não satisfeitas. Por essa razão, esses solos são bastantes estáveis do ponto físico-químico. Os solos tropicais apresentam também riqueza de óxido-hidróxidos de Fe e Al [62].

Os minerais 1:1 são formados pelo empilhamento de uma lâmina tetraédrica de Si e uma lâmina octaédrica de Al (uma no topo da outra). A ligação entre essas duas lâminas é uma ligação iônica entre o oxigênio orbital da lâmina tetraédrica e o Al da lâmina octaédrica. As unidades 1:1 são seguras por pontes hidrogeniônicas entre oxigênios da camada tetraédrica e hidroxilas da camada octaédrica [62].

Essas pontes hidrogeniônicas promovem uma forte ligação entre as unidades 1:1 que confere a esse tipo de mineral característica de não expansividade e também da inexistência de troca de materiais entre as unidades 1:1 [62]. Supõe-se que as

triclônicas estariam sendo formadas atualmente em sítios com baixo teor de Fe, o que conduziria a uma melhor organização estrutural [88].

A quantidade de água no solo influi diretamente no produto final. Geralmente o solo é composto por três fases: sólida, líquida e gasosa. Os grãos que o constituem sempre representam uma fase independente, mas dependendo da quantidade relativa de água e ar dentro dos poros do solo as fases, líquida e gasosa, podem constituir uma fase única.

Em outras palavras, a estabilização do solo consiste em modificar as características do sistema solo-água-ar com a finalidade de obter propriedades de longa duração compatíveis com uma aplicação particular [36]. A grande vantagem é a melhoria na resistência e permeabilidade do solo com a adição do cimento Portland.

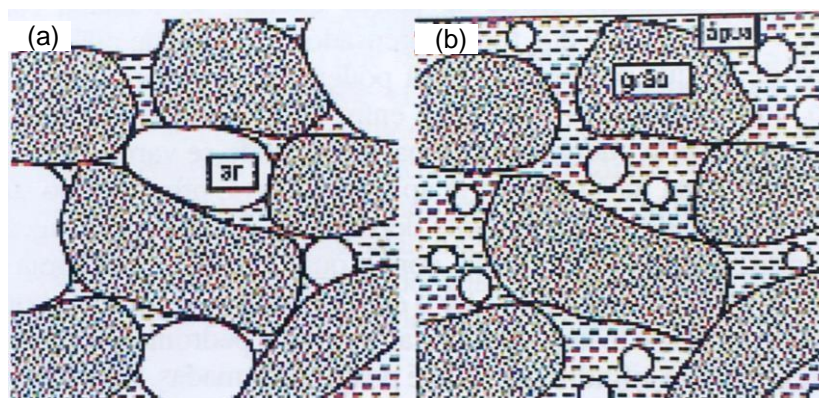


Figura 7 - Fases existente no solo: (a) solo com baixa umidade; (b) solo com umidade ideal.

Fonte: [13].

Na figura 7 (a) o solo está com baixa umidade, a fase gasosa é diferenciada da fase líquida, os grãos tem dificuldade de deslizarem uns sobre os outros e de se moldar em elementos construtivos. Na figura 7 (b) os grãos tem mobilidade facilitada pela água que contem e pequenas bolhas de ar no interior formando apenas uma fase única, evidencia que torna a água fundamental para a construção com o solo.

A densidade seca, também chamada de peso específico aparente, corresponde a fração sólida dividida pelo volume total em questão, ou seja, a densidade da água toda eliminada.

A umidade ótima na fabricação de tijolos compactados com solo, as bolhas de ar existentes no solo são expulsas na compactação, diminuindo o índice de vazios com essa diminuição a densidade seca do material varia promovendo a sua redução

de volume e esse fator depende da quantidade de água presente. Existe um ensaio para se quantificar a umidade ótima de um solo conhecido como ensaio de compactação ou ensaio de Proctor [13].

Os limites de plasticidade e de liquidez do solo recebem o nome de limite de Attenberg, a determinação desses valores é feita através de ensaios normatizados no Brasil pela ABNT. Através da determinação desses parâmetros é possível ter uma primeira noção se o solo pode ser usado na construção.

A estabilização de um solo para aplicação consiste em modificar as propriedades do sistema terra-água-ar para se obter qualidades permanentes compatíveis com uma aplicação particular. Nos casos da construção com solos poderá ser necessário melhorar a: resistência mecânica; desempenho sob ação da água; trabalhabilidade e ductilidade [13].

Enfim, a estabilização do solo nada mais é que modificar as características do sistema solo-água-ar com a finalidade de se obter propriedades necessárias a uma aplicação particular. Agentes estabilizadores como o cimento, a cal, aditivos químicos, fibras vegetais ou mesmo a estabilização granulométrica, vêm sendo utilizados para pesquisas em larga escala para aquela finalidade [37], [38], [39].

2.2.1 Tijolo solo-cimento

O tijolo solo-cimento tem se destacado na construção civil atualmente, por ser uma alternativa que ajuda a suprir a carência habitacional, por apresentar custo reduzido da construção, além de valorizar os recursos naturais. O tijolo solo cimento é a mistura de solo, cimento Portland e água em proporções adequadas (umidade ótima), que após preparada a mistura desses materiais é levada para prensagem, dando o formato e tamanho desejado, mostrando ótimas propriedades físicas e mecânicas [40].

Foi inventado nos anos 50 do século XX com o desenvolvimento da primeira prensa manual pelo pesquisador colombiano G. Ramires. No ano de 1930, o tijolo solo-cimento surgiu na construção civil após ser regulamentado pela Associação Brasileira de Cimento Portland como a possibilidade de ser uma alternativa para construções sustentáveis [41], [42].

Os blocos de solo cimento, são também conhecidos como BTC (bloco de terra comprimida), ou também como Tijolos Ecológicos, são fabricados com solo adensado em molde por meio de compactação ou prensagem, depois seu desmolde imediato.

Os blocos não passam pelo processo de queima durante sua fabricação, e são uma das alternativas de menor custo e menor agressão ao meio ambiente na construção de alvenarias estruturais [34], [43].

O tijolo ecológico ou de solo-cimento é feito de uma mistura de solo e cimento, que depois são prensados; seu processo de fabricação não exige queima em forno à lenha, o que evita desmatamentos e não polui o ar, pois não lança resíduos tóxicos no meio ambiente. Para o assentamento, no lugar de argamassa comum é utilizada uma cola especial [44].

Em outro conceito, é o resultado da mistura intrínseca do solo, cimento Portland e água que após compactação na umidade ótima obtém resistência proveniente da reação de hidratação do cimento. Atualmente existem prensas hidráulicas de grande porte as quais produzem blocos de resistência que podem chegar de 6MPa a 8MPa [13].

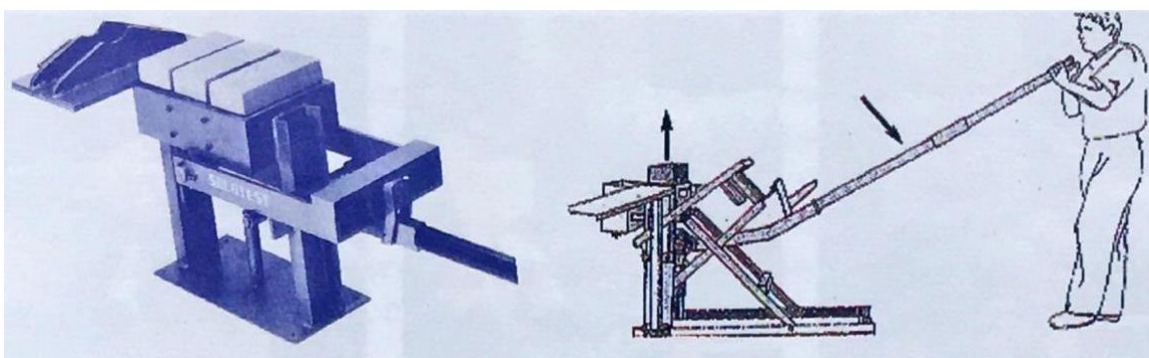


Figura 8 - Prensa manual que produz três blocos ao mesmo tempo
Fonte: [13].

Os principais fatores que interferem nas propriedades do solo-cimento são o tipo de solo, porcentagem de cimento aplicada, teor de umidade, compactação e homogeneidade da mistura além de outros fatores ligados a idade e tempo de cura da mistura [34], [13].

O tijolo deve ter arestas vivas e não pode apresentar fissuras, fraturas ou outros defeitos que possam comprometer o assentamento, a resistência e a durabilidade da alvenaria.

Para a Norma Brasileira, o tijolo de solo-cimento é um componente de alvenaria constituído de uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento

Portland, água e, eventualmente, aditivos e/ou pigmentos em proporções que permitam atender aos requisitos, cuja altura (H) seja menor que sua largura (L) [45].

Quando executada a cura e a escolha do solo corretamente, os blocos de solo cimento concedem ao seu emprego na obra a mesma segurança e estabilidade que os tijolos maciços e blocos cerâmicos queimados convencionais, mantendo uma boa resistência à compressão simples [13], [42], [43], [46].

Na literatura, os autores geralmente citam as mesmas vantagens em relação ao tijolo solo-cimento. As mais apresentadas estão listadas a seguir: [13], [32], [42], [43], [46]:

- ✓ Alta resistência a compressão e umidade
- ✓ Não é poluente, apresenta excelentes propriedades térmicas e baixo consumo energético
- ✓ Facilidade de produção
- ✓ Menos dependência de matéria prima importada
- ✓ Alto conforto acústico e é impermeável
- ✓ A regularidade, finura e planeza de suas faces requerem mínimas quantidades de argamassa de assentamento e permite melhores acabamentos
- ✓ Dispensa o uso de revestimento, desde que as paredes estejam protegidas das águas da chuva
- ✓ Baixo custo, podendo ser produzidas moradias para populações de baixa renda
- ✓ Reduz até 40% os custos em relação aos sistemas construtivos tradicionais
- ✓ Adequa-se a muitos tipos de solo
- ✓ Mais facilidade para se fazer as instalações elétricas e hidráulicas prediais

O tijolo de solo-cimento apresenta-se como uma excelente alternativa na construção civil urbana ou rural por apresentar inúmeras vantagens em seu emprego na alvenaria e por permitir ainda, facilidades para a incorporação de resíduos [42].

Algumas pesquisas buscaram a incorporação de algum tipo de resíduo na fabricação de tijolos solo-cimento, vale a pena citar: tijolos solo-cimento com porcentagens de cal [12], fibras de coco babaçu como reforço [47], utilização das

cinzas da palha do arroz [48], incorporação de resíduos sólidos de tornearias mecânicas [42], lodo de estação de tratamento [49], [50], adição de Grits [51], resíduos de demolição da construção civil [52], montículo do cupim [53], casca de arroz e de braquiária [54], resíduos de concreto [46], resíduos de argamassa de assentamento [55], e sílica ativa [55].

2.2.2 Critérios para seleção do solo

Existem três propriedades que a terra pode adquirir em contato com a água e que são fundamentais para a produção de tijolos solo-cimento [43]: plasticidade, coesão e compressibilidade.

O tipo de solo é o fator que exerce maior influência na qualidade da mistura solo-cimento, e por isso deve ser estudado cautelosamente quanto à granulometria dos solos, os arenosos são considerados os mais adequados para a mistura solo-cimento. A existência de areia grossa e pedregulho é favorável, pois favorece a liberação de quantidades maiores de cimento para aglomerar os grãos menores. No entanto, para a mistura de solo-cimento, os solos devem possuir também um teor mínimo da fração fina, parcela responsável pela coesão da mistura solo-cimento quando umedecida e compactada [46], [52].

O solo é responsável por maior quantidade na mistura entretanto deve ser selecionado de modo que permita a economia no consumo de cimento, os solos que melhor atendem os requisitos devem possuir as seguintes características [56] [13]:

- 100% dos grãos passando na peneira de 4,8mm ou a nº 04;
- 10% a 50% dos grãos passando na peneira 0,075mm ou nº200;
- Limite de liquidez $\leq 45\%$;
- Índice de plasticidade $\leq 18\%$.

O solo não pode conter matéria orgânica em quantidade que prejudique a hidratação do cimento devendo-se, portanto, evitar o uso de solos pretos ou cinza-escuros por serem prejudiciais às propriedades do produto final, os tijolos [32]. Torrões, pedregulhos e raízes devem ser retirados do solo uma vez que reduzem as qualidades do tijolo. Recomenda-se utilizar o solo que atenda à ABNT NBR NM 49, a solução obtida no ensaio deve ter coloração mais clara do que a solução-padrão [56].

É necessário conhecer-se o argilomineral constituinte ou predominante na fração argilosa pois das características e propriedades do argilomineral vão depender as propriedades finais do tijolo [32].

A utilização do solo na construção pode ser tanto na forma o solo natural, ou então após a correção de algumas características e propriedades que podem ser feitas através da adição de composto químicos ou por correção granulométrica, mais propriamente dito a estabilização [57].

O sistema de produção do solo cimento possibilita a inserção de resíduos em sua composição, como por exemplo, de material lignocelulósico, seja com a função de correção do solo, como substituição parcial do cimento ou do solo ou como reforço da matriz [40].

2.2.3 Cimento Portland

O cimento Portland, é um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, composto basicamente por silicatos de cálcios hidráulicos com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição [58]. O CP's tipo II são os mais usados na fabricação de solo-cimento por serem facilmente encontrados no mercado e responderem por aproximadamente 75% da produção industrial [13].

De acordo com a norma CP é um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, no qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais em teores pré-estabelecidos [59].

Os clínqueres são nódulos de 5 a 25mm de diâmetro de um material sintetizados, produzido pelo cozimento, até fusão incipiente ($\pm 30\%$ de fase líquida), de uma mistura de calcário de argila, que é dosada e homogeneizada, de tal forma que toda a cal se combine com os compostos argilosos, sem que após o cozimento resulte cal livre em quantidade prejudicial [58].

As matérias primas básicas do CP são a Cal (CaO), sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃), que são reunidas em frações apropriadas aos vários tipos de CP fabricados. São selecionadas, trituradas, moídas e pesadas para obter-se a composição desejada depois são misturadas e levadas ao forno rotativo com temperaturas entre 1.400°C e 1.650°C onde se converte em clínquer de cimento,

depois desse processo é resfriado e reduzido a pó e adicionado pequena dosagem de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como controle do tempo de cura [60].

Os compostos do CP são resultados de reações químicas a altas temperaturas, desequilibradas, por estarem em um estado de energia elevado. Por isso quando o cimento é misturado junto a água, fica hidratado, os compostos reagem para atingir estados estáveis de baixas energias liberando energia em forma de calor [58]. Os tipos de cimento são apresentados na tabela 1.

O uso de adições minerais no CP pode ser vantajoso de diversos aspectos principalmente financeiros. A seguir são apresentadas as principais adições minerais do CP [61]:

- *Gesso*: utilizado para regular o tempo de pega, permite que o cimento permaneça trabalhável por mais tempo.
- *Calcário*: a utilização do calcário na composição permite a diminuição da porcentagem de vazios, melhorando a trabalhabilidade da massa e pode auxiliar na elevação da resistência inicial do cimento.
- *Pozolana*: resultado da combustão do carvão, a pozolana auxilia na maior resistência do cimento em meios agressivos, diminui o calor da hidratação e permite concretagens de grandes volumes.
- *Escória de alto-forno*: de acordo com as adições e dosagens na moagem do clínquer permite que se tenham cimentos com diversas características e que podem ser aplicados em diferentes argamassas e concretos.

Tabela 1 - Composição mais comum do cimento Portland

Composição dos tipos mais comuns de cimento Portland

<i>Composição (% em massa)</i>						
Tipos	Sigla	Clínquer + Gesso	Escória granulada de alto forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	Norma Brasileira
Comum	CP I	100%				NRB 5732
	CP I - S	99 - 95%		1 - 5%		
Composto	CP II - E	94 - 56%	6 - 34%		0 - 10%	NBR 11578
	CP II - Z	94 - 76%			0 - 10%	
	CP II - F	94 - 90%			06 - 10%	

Alto-Forno	CP III	65 - 25%	35 - 70%	0 - 5%	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85 - 45%	15 - 50%	0 - 5%	NRB 5736

Fonte: [62].

Com a adição de pozolana no cimento ocorre o aumento a densidade da mistura devido à baixa granulometria da pozolana, preenchendo vazios presentes no composto formado. Também, acontece o refinamento da estrutura de poros devido aos pontos de nucleação para os produtos de hidratação e alteração de microestrutura da zona de transição entre o agregado e a pasta formada pelo cimento, ou seja, melhora na impermeabilidade do cimento [35].

A pozolana é uma substância aluminossilícica ou silícica, em baixa granulometria e na presença de água, reage quimicamente com hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ou cal hidratada, formando um composto com características de aglomerante. O hidróxido de cálcio ao carbonatar lentamente com o ar, pode formar a calcita (CaCO_3) [35].

O cimento é utilizado para estabilizar o solo não só para uso em tijolos-ecológicos como para outros usos por acontecer reações de hidratação nos silicatos e aluminatos presentes na mistura entre o solo e cimento gerando um fluido (gel) que preenche boa parte dos vazios na massa, acontecendo a união dos grãos proporcionando ótima resistência [63].

Os materiais pozolânicos naturais são compostos por micas, quartzo, feldspato e vidro de aluminossilicato. Entretanto, as pozolanas artificiais são formadas em tratamentos térmicos ou como subprodutos de atividades industriais. Em adição, as artificiais são divididas em cinzas volantes, argilas calcinadas, escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral, dentre outros. Com a adição de materiais pozolânicos no cimento, é possível aumentar a impermeabilidade [35].

No processo de estabilização do solo-cimento com adições pozolânicas, este sofre reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento que dão origem a um “gel” com a função de preencher partes dos vazios da massa e unir os grãos adjacentes do solo, conferindo-lhe a resistência inicial [72].

De acordo com Linhares Júnior [73], o CP-II-Z (tipo mais disponibilizado no mercado), é do tipo composto pois possui adições de pozolana (6 a 14%) caracterizado positivamente por um tempo de pega mais baixo devido a adição de

gesso. Ou seja, a hidratação do cimento é uma reação endotérmica e libera muito calor, a adição de pozolana ao cimento confere certa resistência nos riscos de álcali-agregado e eflorescência por percolação.

Na pesquisa de Carvalho [47], foi utilizado o mesmo tipo de cimento escolhido nessa pesquisa, o resultado apontou que as reações pozolânica do solo resultante da hidratação são melhoradas devido a presença de silicatos que favorece a “pega” (perda da consistência) do material com o cimento.

Entretanto, Vilela [72] utilizou na sua mistura solo-cimento o cimento tipo CP-V-ARI devido ao desempenho de resistência inicial e na facilidade de desforma porém, este tipo de cimento é mais escasso no mercado além de ser mais oneroso, nesse caso iria tornar essa pesquisa mais cara.

2.2.4 Dosagem

A dosagem da mistura compactada geralmente varia em torno de três aspectos: quantidade de cimento, quantidade de água e a massa específica aparente seca máxima [13].

A quantidade de cimento para a mistura é decidido em função da qualidade da terra, em que quanto melhor, menos cimento se utilizará, e também pelo uso especial do bloco, como para alicerces, que devem ser muito resistentes à umidade [43].

Segundo a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) os procedimentos da mistura de solo e cimento para a confecção de blocos, tijolos e canaletas devem ser: preparação do solo (destorroamento, pulverização e peneiramento); preparação da mistura (homogeneização seca e homogeneização da umidade) e moldagem.

Para dosagem correta é necessário saber a umidade ótima do solo através do ensaio de Proctor que geralmente é realizada por meios mecânicos. Proctor (1933) estudou os princípios da Mecânica dos Solos e verificou que a densidade de um solo compactado é função do teor de umidade no momento da compactação [64].

Dessa forma a quantidade de cada material na mistura de tijolos solo cimento é definida de acordo com a umidade ótima e a densidade seca máxima da mistura encontrada através desse ensaio realizado em laboratório de acordo com as normas.

2.2.5 Normas consultadas da ABNT

As normas que devem ser obedecidas na fabricação de tijolos feitos de solo-cimento são listadas na tabela 2 e os ensaios a serem realizados na mistura solo-cimento são descritos na tabela 3.

Tabela 2 - Normas brasileiras acerca do tijolo solo-cimento.

Solo-cimento de acordo com ABNT		
NBR 16174	Determinação do teor de cimento em misturas fresca de solo-cimento — Método de ensaio	2013
NBR 10833	Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento	2012
NBR 10834	Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos	2016
NBR 10835	Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Forma e Dimensões.	2012
NBR 10836	Bloco de solo-cimento sem função estrutural — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio.	2016

Tabela 3 - Ensaio em solo-cimento de acordo com ABNT.

Ensaio em solo-cimento de acordo com ABNT		
NBR 6457	Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização - Método de ensaio	2016
NBR 6458	Solo Determinação do Limite de Liquidez.	2016
NBR 6459	Solo – Determinação do limite de liquidez - Método de ensaio	2016
NBR 12023	Solo-Cimento – Ensaio de Compactação	2016
NBR 7181	Solo - Análise granulométrica	2016

2.3 Materiais compósitos

Os materiais compósitos surgiram para atender à necessidade humana desde os primórdios da existência humana. Porém, no ramo da construção civil, a história relata que os primeiros trabalhos com compósitos foram desenvolvidos na idade antiga pelos egípcios nas suas grandes obras [28].

Um material compósito é composto de dois ou mais materiais, ou fases constituintes integrados de modo a formar um novo material de forma que os constituintes continuam com suas propriedades mas o material compósito resultante que surge a partir deste terá propriedades diferentes [60].

Os compósitos são materiais com ações de propriedades combinadas, que podem ser metais, cerâmicas e polímeros, ou seja, qualquer material multifásico que mostra uma proporção significativa das propriedades das fases que o constituem de maneira que se obtém uma melhor combinação das propriedades especificamente o princípio da ação combinada [65], [66].

A meta de projeto de um compósito consiste em se atingir uma combinação de propriedades que não é exibida por qualquer material isolado e, também, incorporar características de cada um dos materiais componentes [65].

Estes materiais podem ser constituídos por diversos tipos de composições no qual um poderá agir como matriz e outro como reforço podem ser oriundos de materiais sintéticos e/ou naturais [65]–[67]. Na figura 8 mostra-se a classificação dos diversos tipos de compósitos.

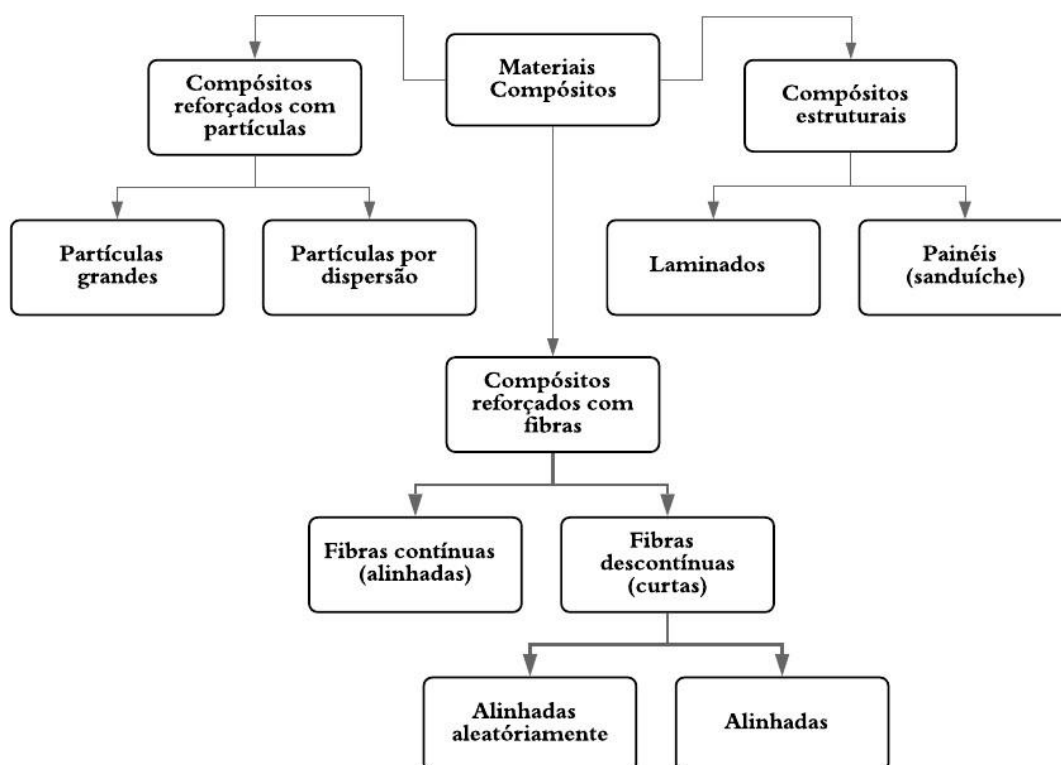


Figura 9 - Esquema de classificação dos compósitos
Fonte: Adaptado [68].

São consideradas duas categorias de materiais compósitos: os reforçados com fibras (sintéticas e/ou naturais) e os compósitos agregados, como por exemplo o concreto. Um material estrutural semelhante à fibra de vidro é a madeira, um compósito reforçado com fibras naturais com características alongadas e matriz com depósito de lignina e hemicelulose [66].

2.2 Tipos de compósitos

Existe a classificação baseada na natureza da matriz, sendo: Matriz polimérica, matriz metálica e matriz cerâmica. Outra forma de classificar é de acordo com a natureza e a distribuição de reforço utilizado ilustrado na figura 9, pode-se afirmar que os compósitos são divididos nos seguintes tipos [69]:

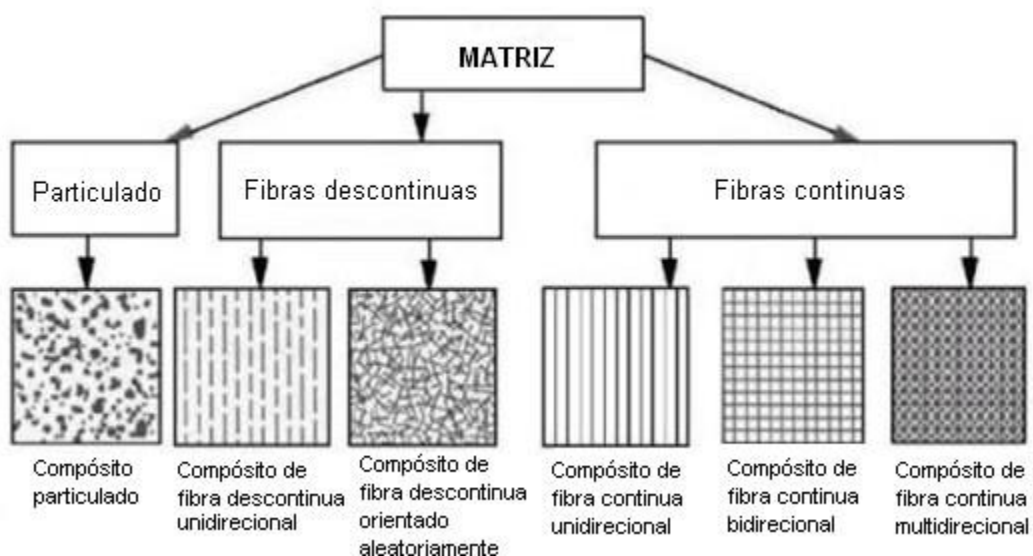


Figura 10 - Tipos de compósitos
Fonte: [70]

2.2.1 Compósitos particulados

Os materiais utilizados como reforço são equiaxiais, podendo em alguns casos ter a forma esférica [69]. Existem os compósitos reforçados com partículas grandes e reforçados por dispersão [65].

2.2.3.1 Compósitos reforçados por dispersão

Os metais e as ligas metálicas podem ter sua resistência aumentada por dispersão uniforme de diversas porcentagens volumétricas de partículas finas de um material inerte e muito duro, a fase dispersa pode ser metálica ou não, o mecanismo de aumento de resistência envolve interação entre as partículas e as discordâncias na matriz, como ocorre o endurecimento por precipitação. O efeito do aumento de resistência é tão pronunciado quanto o do endurecimento por precipitação, entretanto, o aumento da resistência é mantido em temperaturas elevadas e por períodos de tempo prolongados pois as partículas dispersas são escolhidas de modo a não serem reativas com a fase matriz [65].

2.2.3.2 Compósitos com partículas grandes

O termo grande é usado para indicar que as interações matriz-partículas não podem ser tratadas em nível atômico ou molecular, mas sim a mecânica do contínuo deve ser empregada. Na maioria desses compósitos a fase particulada é mais rígida que a matriz [65].

Essas partículas de reforço tendem a restringir o movimento da fase matriz da vizinhança de cada partícula, ou seja, a matriz transfere parte da tensão aplicada para as partículas que suportam uma fração da carga. O grau de reforço ou de melhoria do comportamento mecânico depende de uma ligação forte nas interfaces matriz-partícula [65].

As partículas podem apresentar uma grande variedade de geometrias, mas devem possuir aproximadamente as mesmas dimensões em todas as direções, ou seja, equiaxiais. Para que o reforço seja efetivo, as partículas devem ser pequenas e estar distribuídas de forma homogênea por toda a matriz [65].

A fração volumétrica das duas fases influencia o comportamento, as propriedades mecânicas são melhoradas com o aumento do teor do material particulado [65].

Os compósitos com partículas grandes são utilizados com todos os três tipos de materiais. Um grande exemplo na construção civil é o concreto de CP, onde as fases matriz e dispersas são materiais cerâmicos, os componentes são o cimento Portland, um agregado fino e um agregado grosseiro e água [65].

As propriedades dos materiais compósitos dependem do tipo da matriz, das propriedades das partículas utilizadas e interação interfacial entre a matriz com o reforço, que nesse caso é um desafio. Entretanto, é necessário identificar as melhores e mais viáveis proporções a serem utilizadas no produto final, bem como o melhor tipo de resíduo, objetivando além de permitir uma destinação adequada ao material e agregação de valor ao mesmo [40].

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão exibidas a metodologia necessária para a confecção dos corpos de prova, equipamentos utilizados e técnicas de caracterização empregadas.

Os ensaios para caracterização dos índices físicos dos solos foram realizados no Laboratório de Pavimentação – LabPav da UFAM, As análises de difração de raios x foram feitas no LabMat - Laboratório de Materiais na UFAM e moagem dos resíduos provenientes dos caroços de açaí no Laboratório de Preparação de Amostras – PPGEC da UFAM.

As análises mineralógicas e microestruturais dos solos foram realizadas no Laboratório Temático de Microscopia e Nanotecnologia (LTMN) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

Para melhor entendimento dos procedimentos realizados nessa pesquisa, elaborou-se um diagrama apresentado na figura 11.

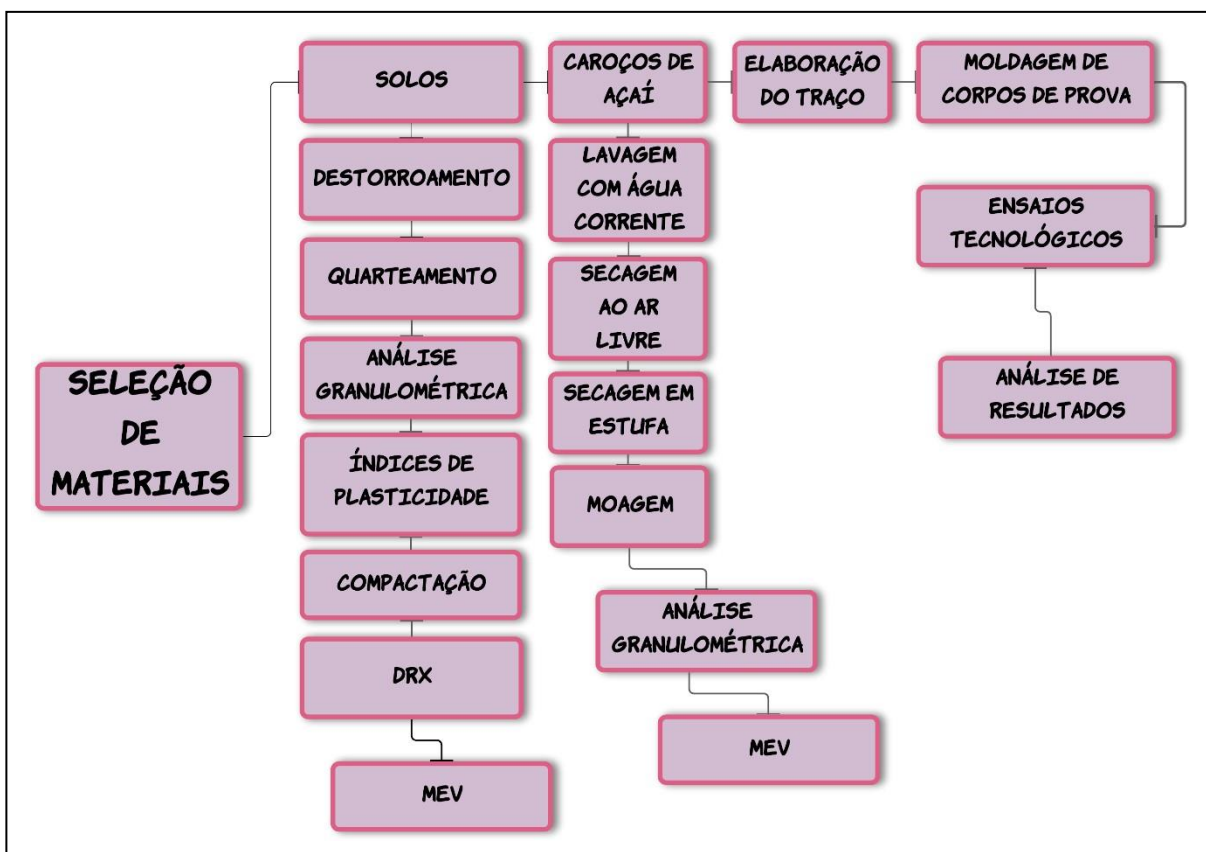


Figura 11 - Diagrama metodológico do desenvolvimento da pesquisa.

3.1 Coleta de materiais

3.1.1 Cimento

O cimento usado nas misturas dos corpos de prova foi adquirido no comércio local. Por indicar propriedades adequadas à fabricação do tijolo solo cimento. Os corpos de prova serão a base de cimento tipo CP IV-32 da marca Mizu com adições pozolanas, indicado para todos os tipos de obras além de não conter adições que alteram a hidratação do cimento que possam degradar os resíduos de açaí.

Foi o mesmo cimento utilizado por Pereira [71] para a produção da matriz cimentícia, em desenvolvimento de painéis com núcleo de concreto leve com caroços de açaí e laminados cimentícios reforçados com fibra de juta, a autora informa que o CP IV 32-RS da Mizu que tem resistência de 32 MPa (28 dias).

3.1.2 Resíduos agroindustriais: caroços de açaí

Selecionou-se uma amostra de determinada quantidade de caroços de açaí descartados no meio ambiente, na cidade de Manaus.

Após a coleta foram lavados em água corrente, houve uma pré-secagem onde os caroços foram expostos ao sol, por três dias, para evaporação natural da água em excesso contida nos caroços (figura 12a). Em seguida foi colocado em estufa a 100° C por 24 horas para secagem total de umidade (figura 12b) , retirada de sedimentos, impurezas e fibras de acordo com Barbosa (figura 12c) [74] e Azevedo [75].



Figura 12 – Etapas de preparação dos caroços para moagem: (a) resíduos após primeira lavagem (b) secagem em estufa por 24 horas (c) resíduos totalmente secos.

Após a retirada do material da estufa, um novo peneiramento foi realizado, visto que ainda existiam impurezas no material [28]. Posteriormente os caroços foram inseridos no moinho de facas (Figura 13a), com uma massa aproximada de 300 g para evitar o travamento das facas, e melhor trituração do material. Após a trituração, o material particulado foi reservado.

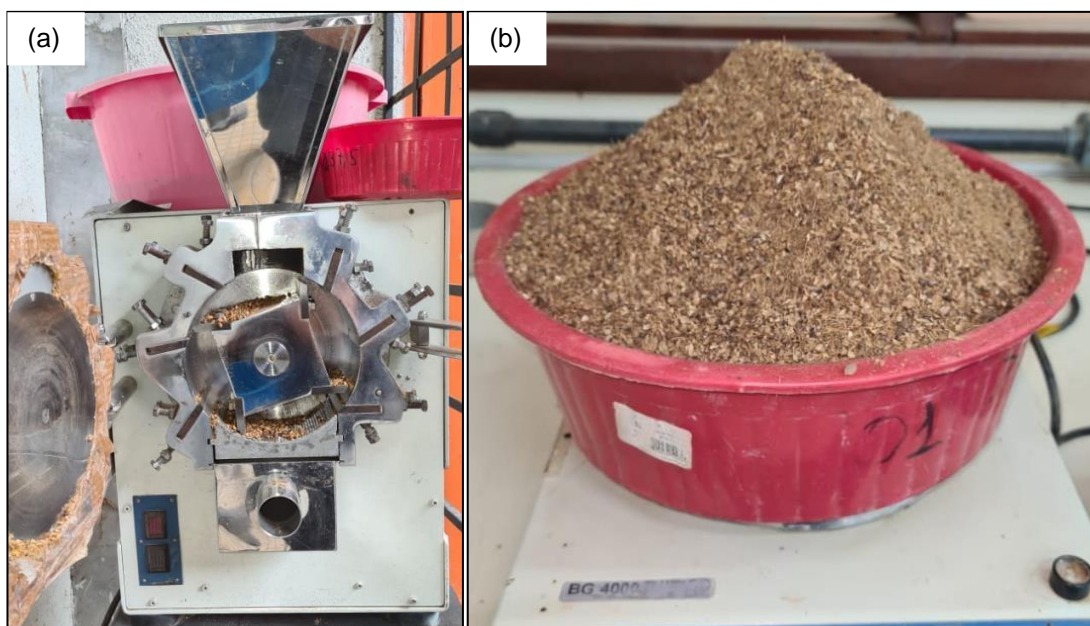


Figura 13 - Etapa no tratamento de resíduo: (a) moinho de facas (b) caroços moídos

3.1.3 Solo

Foram selecionados dois tipos de solo de origem distinta um de origem mais arenosa e outro mais argiloso, para realizar os ensaios de caracterização. O primeiro foi recolhido na zona norte de Manaus, bairro Cidade Nova, perímetro urbano com as coordenadas de Lat $-3^{\circ}1'19,62186''S$ e Long $-59^{\circ}58'27,58868''O$. O segundo solo foi recolhido em uma área carente e em contínua expansão na área do Conjunto Habitacional Viver melhor, onde foram alocadas centenas de famílias carentes com a referência de Lat $-2^{\circ}57'44,25''S$ Long $59^{\circ}58'59,09''O$. Localização com coordenadas geográficas da extração das matérias-primas estão nas figuras 14 e 15, solo 01 e solo 02 respectivamente.

Diante dos resultados, foi escolhido o que apresentou melhores resultados (granulometria e índice de plasticidade) para a confecção dos corpos de prova de solo-cimento e adição de porcentagens de resíduos. Assim as amostras foram identificadas como S1 e S2.

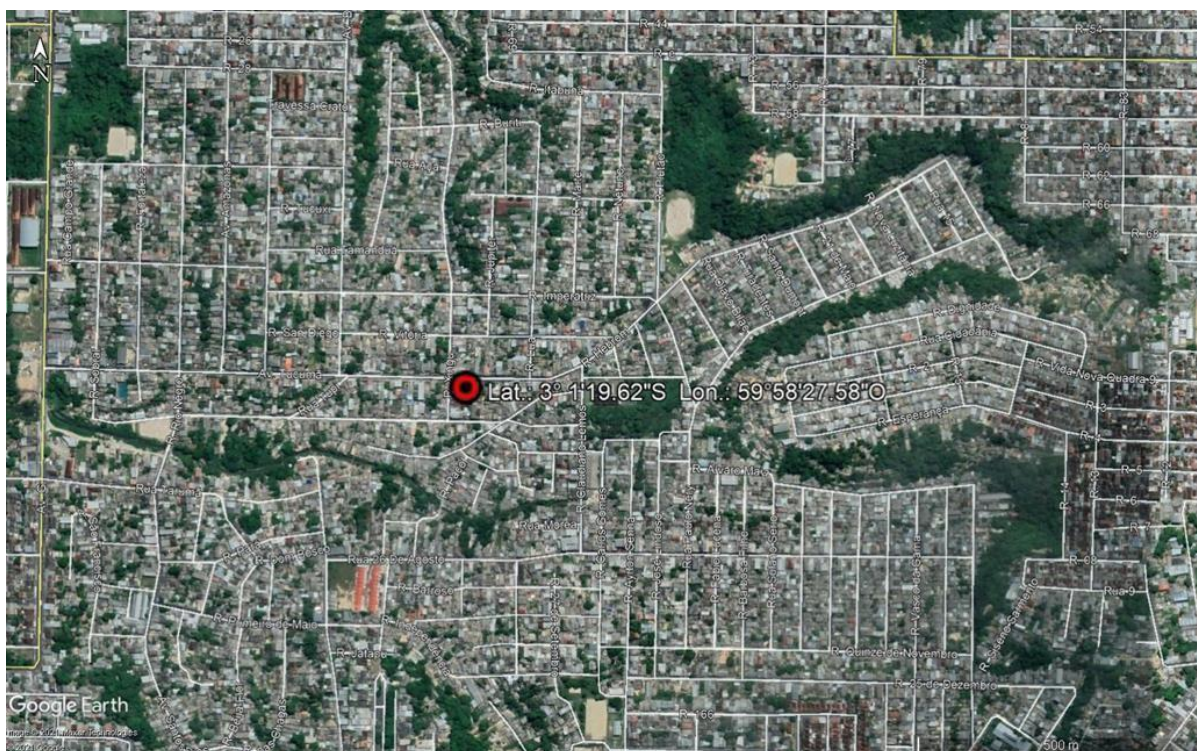


Figura 14 - Local de extração de S1.
Fonte: Google Maps.

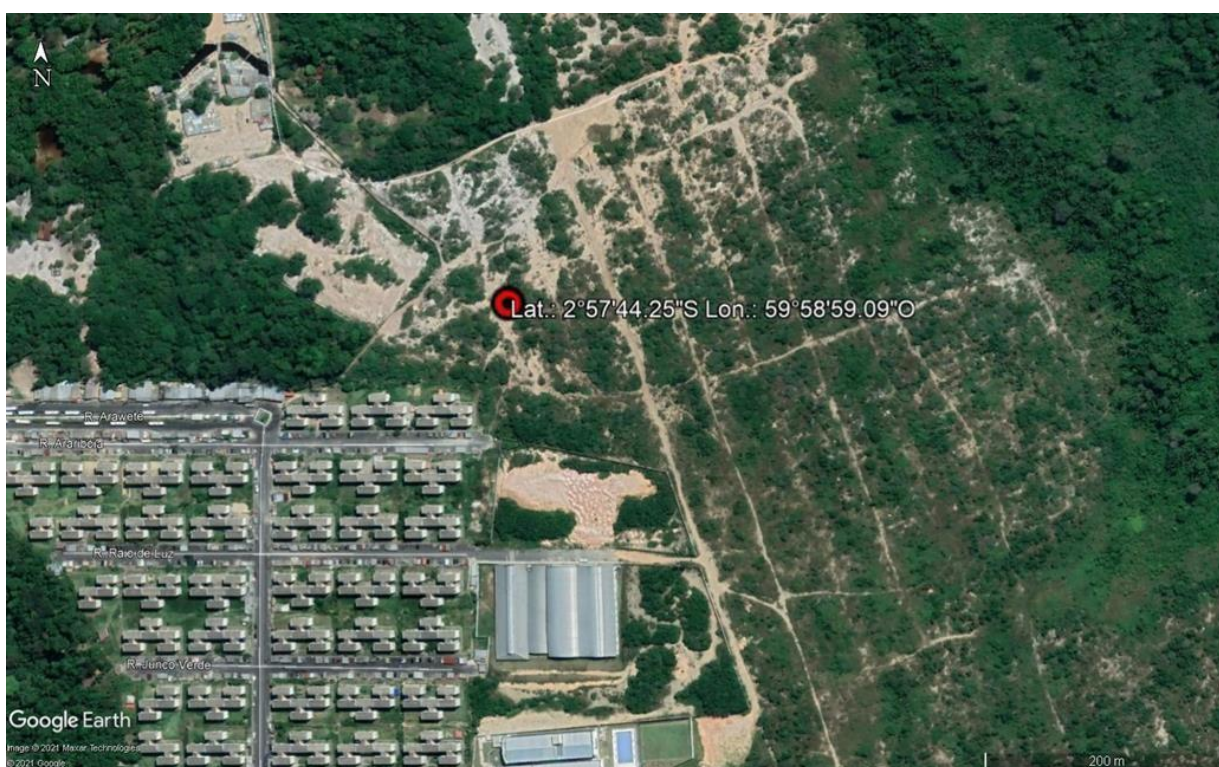


Figura 15 - Local de extração de S2.
Fonte: Google Maps.

De acordo com Milani [37] o ideal é trabalhar com um tipo de solo que atenda às condições ideais para a confecção de tijolos prensados, ou seja, um solo com

distribuição contínua de diâmetros com ampla faixa de tamanho de partículas (curva de granulometria), com teores de silte mais argila variando de 10% a 35%.

3.2 Procedimentos experimentais

3.2.1 Preparação das amostras de solo

Após efetuar a coleta da argila foi necessário fazer a secagem preliminar com exposição ao céu aberto, com o objetivo de reduzir a umidade por evaporação. Em seguida será realizado o destorroamento cuja a função é desmanchar os grandes torrões de argila deixando-a uniforme granulometricamente [76].

O destorroamento tem como finalidade desagregar as partículas menores das partículas maiores do solo. A amostra é colocada no almofariz de porcelana (figura 14), e aos poucos, com auxílio do pistilo, pressiona-se a amostra, fazendo-se movimentos circulares até se conseguir uma total desagregação das partículas do solo. O destorroamento deve ser feito de maneira que não reduza o tamanho natural das partículas. Para isso a mão de gral deve ter seu recobrimento em perfeito estado.

Após isso foi feito um processo chamado quarteamento com a finalidade de obter uma amostra mais homogênea. O quarteamento é o processo pelo qual se extrai da amostra total, uma amostra menor, homogênea e representativa da amostra ensaiada. O quarteamento se faz com a amostra destorroada, podendo ser auxiliado por um repartidor de amostras.

Tabela 4 - Relação das peneiras normatizadas utilizadas para ensaios da pesquisa

ABNT 7181/2016		
Malha	Diâmetro (mm)	Ensaio
Nº 4	1,18	
Nº 10	0,85	Determinação os índices de plasticidade
Nº 20	0,42	
Nº 40	0,30	
Nº 100	0,15	
Nº 200	0,075	Análise química e mineralógica

No quarteamento direto, a amostra é colocada sobre uma superfície plana e limpa, misturada intensamente colher e arrumada numa pilha cônica, a amostra é

dividida em quatro partes. Descartam-se duas partes, misturando-se o material restante e repetindo-se com ele o processo de quarteamento, até obter-se uma amostra homogênea, com o peso necessário aos ensaios.

O peneiramento [77] é a última etapa do processo de preparação da amostra e nele o material é separado para os diferentes ensaios. Após todos esses processos, será possível coletar uma amostra leva-la para estufa por 24 horas e após isso tritura-la através do almofariz e pistilo, passando pelas peneiras de malha mostradas na tabela 4, conforme [73], [37], [47], [40], [35].

3.2.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica (figura 16) da matéria-prima foi realizada a partir do método de peneiramento de acordo com a norma técnica ABNT NBR 7181 [77].



Figura 16 - Etapas do ensaio de granulometria dos solos (a) pesagem da amostra (b) diferença das granulometrias após ensaio

3.2.3 Análise da plasticidade

A obtenção do índice de plasticidade da mistura permite estimar suas propriedades, principalmente no que se refere à granulometria e compressibilidade.

Nesta pesquisa o índice de plasticidade (figura 17), foi determinado de acordo com a metodologia proposta pela norma técnica NBR-6459/2016 e NBR 7180/2016

da ABNT [78], [79]. Para o tijolo solo cimento a norma estabelece que o índice de plasticidade deva ser menor ou igual a 18%.

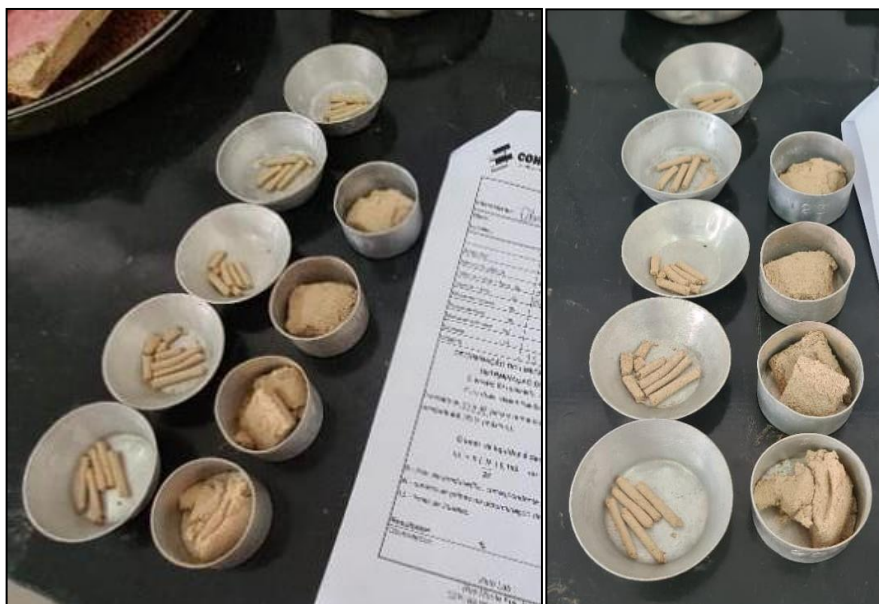


Figura 17 - Ensaio de Plasticidade dos solos

3.2.4 Ensaio de compactação normal

Miller [80], define compactação como processo de redução de vazios existentes entre as partículas de um solo (nesse caso solo-cimento) realizada através da prensagem. Corroboando isso, Vilela [72] apud Bueno e Vilar (1999), afirma que o grau de compactação, ou seja, a relação entre a massa específica seca aparente máxima e umidade ótima obtida pelo ensaio de Proctor normal, é um índice muito importante para determinar a qualidade da mistura solo-cimento.

O teor de umidade do solo é um parâmetro que implica nas características finais dos tijolos produzidos, quando é muito alto o tijolo pode sofrer alta retração no processo de secagem, favorecendo o surgimento de fissuras e quando é demasiado baixo, a terra não se une de forma homogênea e não se adequa ao molde.

Enfim, este ensaio tem a finalidade de obter vários valores de massa específica aparente seca em relação a variação de umidade, que através de projeção do gráfico é possível visualizar no topo do vértice a chamada umidade ótima da mistura. O ensaio é normatizado e foi realizado de acordo com a NBR 7182/2016 e NBR 12023.

3.2.5 Microscopia eletrônica de varredura com detector de energia (MEV/EDS)

Para a microscopia eletrônica a área a ser analisada é irradiada por um fino feixe de elétrons ao invés da radiação da luz, então o resultado da interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra, uma série de radiações são emitidas como: elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios-X característicos, elétrons Auger, fótons, etc. Estas radiações quando captadas corretamente irão fornecer informações características sobre a amostra (topografia da superfície, composição, cristalografia) [81].

A Microscopia eletrônica de varredura foi executada, nos solos S1, S2 e nas partículas de caroços de açaí trituradas (resíduos), a partir Microscópio Eletrônico LEO 435VP (figura 18), com um emissor de tungstênio. Resolução de até 2nm, tensão de aceleração até 30kv, ampliação de 50x até 50.000x, com modo de detecção é através de elétrons secundário, equipado com software de processamento de imagem. Para realização da análise, a matéria-prima utilizada será moída até a granulometria do material passante na peneira de 0,075mm. Essa análise é essencial para identificar os elementos presentes no solo e nos resíduos.



Figura 18 - Microscópio Eletrônico de Varredura

A preparação das amostras consiste em limpar bem o porta amostras do microscópio (stub), manipulando com uma pinça o adesivo de carbono, após essa etapa com as amostras em pó recobriu com uma fina camada sobre o adesivo e como as partículas dos caroços são de dimensões maiores colocou-se com a pinça (figura).

Em seguida, através do processo de metalização no equipamento BAL-TEC SCD 050 (figura 19a), depositou-se uma camada de ouro suficiente fina com o processo de metalização (figura 19b) para não interferir na resolução da imagem, entretanto com espessura para garantir para uma boa produção de elétrons secundários que são usados para formar a imagem. Na figura 19(c) mostra as partículas de açaí recobertas pela fina camada. Após esse processo seguiu para o microscópio.

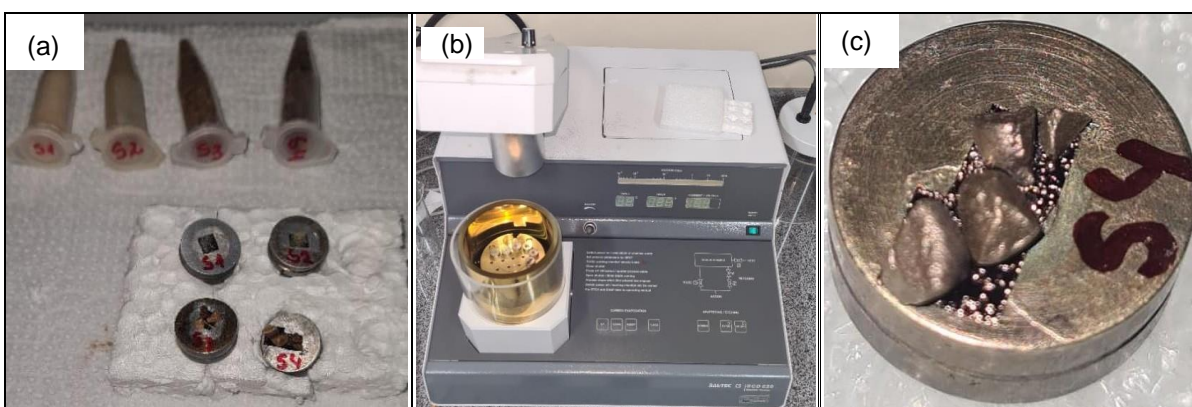


Figura 19 - Processo de preparo da amostra para o MEV: (a) porta amostra; (b) metalização (c) cobertura de ouro.

3.2.6 Difração de raios X (DRX)

A Difração de raios X é uma técnica de caracterização na qual se analisa a estrutura cristalina de materiais e estimar seu parâmetro de rede, que consiste em emitir feixes sobre uma amostra causando um padrão de interferência no receptor e por isso trata-se de um ensaio não destrutivo.

A técnica de difração de raios X é de suma importância na caracterização de materiais pois a partir da determinação da estrutura de um material pode-se definir suas propriedades intrínsecas para poder aplicar ao cotidiano.

Trata-se de um instrumento conhecido como difratômetro da marca Panalytical, modelo empyrean (The University of Western Australia, 2018), com tensão de 40 kV

(quilovolt), corrente de 40mA (miliampère), comprimento de onda Cu (1,541 Å) e medida 2θ (graus).

O tubo de raios-X gera um feixe policromático que passa pelos colimadores (fendas) deixando-o mais estreito além de orientar o feixe de forma paralela. Em seguida, ele incide sobre a amostra que está alinhada ao goniômetro (medidor de ângulos que fica localizado no centro do equipamento) e sofre difração em vários ângulos (varredura), nesse caso é 0,02.

Um sistema de controle por computador opera o instrumento com software de nome Crystallographica Search-Match fornece os dados para análise.

Através da Lei de Bragg é possível associar o comprimento de onda da radiação que incide e o ângulo de reflexão, através da posição do detector do equipamento a um ângulo θ a partir da amostra.

Através do método de Difração de raios X, com os dados fornecidos pelo ensaio pode se começar a composição de fase do material em estudo, índices de reflexões de Bragg, ou seja, intensidade integradas e parâmetros de rede.

3.3 Formulação e composição dos corpos de prova

O planejamento se refere ao total de 60 corpos de provas de acordo com a relação na tabela 5, cada corpo de prova precisa de aproximadamente 250g de material, a mistura feita através de almofariz com o auxílio de espátula até homogeneização seguindo a recomendação normativa [82].

Segundo a ABCP [83], para dosagem com solo cimento é necessário analisar diversos ensaios seguido por entendimentos baseados no cotidiano de geotecnia com a finalidade de atingir valores mínimos de resistência a compressão de acordo com o que especifica a norma.

Tabela 5 - Relação das formulações dos corpos de provas

FORMULAÇÕES		
ITEM	%	Quantidade
TP	0	10
T1%	1	10
T3%	3	10
T5%	5	10
T7%	7	10

T10%	10	10
TOTAL		60

A forma de compactação está em escala laboratorial, tem as dimensões de 10cm x 5 cm x 2,5 cm (figura 20), consiste em um molde matriz metálico com o fundo removível, os corpos de prova foram compactados em uma prensa hidráulica, marca Bovenau modelo P30000 com capacidade de 30 toneladas, no Laboratório de Pavimentação da UFAM.

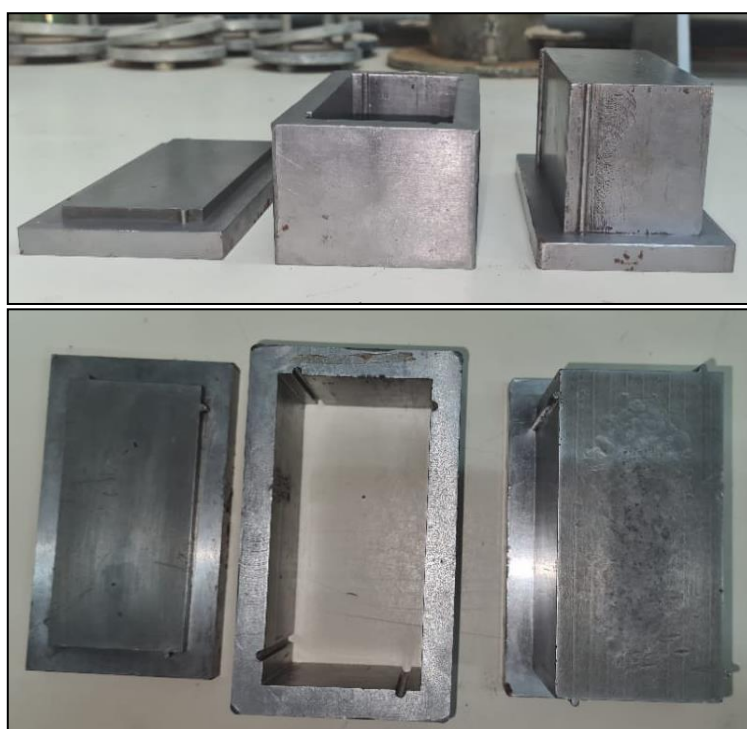


Figura 20 - Molde para confecção dos corpos de prova em escala laboratorial.

Para a fabricação dos corpos de prova, após a preparação do solo, que consiste no destorroamento e peneiramento, procedeu-se com a identificação da umidade de conformação dos corpos de prova. Nessa etapa foram moldados 10 (dez) corpos de prova para cada composição, com a amostra de solo padrão (solo, cimento e água) e 10 corpos de prova da amostra com adição de caroços de açaí moídos para cada percentual (1%, 3%, 5%, 7%, 10%). Totalizando 60 (sessenta) tijolos maciços de solo cimento.

Após o processo de moldagem e durante os sete primeiros dias, os corpos de prova foram mantidos úmidos, a fim de garantir a cura necessária. A cura ocorreu em

local coberto com proteção da chuva, sol e do vento excessivo, para que a umidade não evapore prematuramente.

3.4 Ensaios físicos e mecânicos

Após a realização do procedimento de cura, foram realizados os ensaios de análise dimensional, absorção de água e compressão uniaxial em conformidade com os procedimentos técnicos.

3.4.1 Análise dimensional

De acordo com a norma ABNT NBR 8491/2016 [56] o tijolo vazado de solo cimento deve possuir a forma externa de um paralelepípedo retangular:

3.4.2 Resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no laboratório de materiais de construção civil do departamento de engenharia civil da Universidade do Estado do Amazonas. O equipamento utilizado para romper os corpos de prova foi a prensa manual hidráulica mostrada na figura 21, com capacidade de pressão de até 24000 kgf.



Figura 21 - Equipamento utilizado para obter a resistência à compressão

Os cálculos são realizados pela razão entre a superfície de contato com a pressão utilizada no momento de ruptura. Os resultados serão apresentados em tabelas nos resultados e discussão.

3.4.3 Ensaio de absorção de água

Após a cura de 07 (sete) dias, três corpos de prova de cada composição foram colocados em estufa para secar, entre 105 °C a 110 °C (figura 22), até atingir a constância da massa, obtendo-se o tijolo seco, M1, em gramas (g). Após atingirem a temperatura ambiente, os tijolos foram imersos em um tanque com água por 24 horas (figura23). Ao serem retirados da água, foram enxutos superficialmente com um pano levemente umedecido e, antes de encerrar 3 minutos, pesados, para obter a massa do tijolo saturado, M2, em gramas (g) [84].



Figura 22 - Preparação dos corpos de prova para ensaio de absorção de água



Figura 23 - Corpos de prova imersos em água por 24 horas

Os valores individuais de absorção de água, devem ser expressos em porcentagem, são obtidos pela seguinte expressão:

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

Onde:

A é a absorção de água;

M1 é a massa do corpo de prova seco em estufa;

M2 é a massa do corpo de prova saturado.

A amostra ensaiada não poderá média de absorção de água maior do que 20% quanto menos os valores individuais maiores que 22% na idade mínima de sete dias.

3.5.4 Período de cura

Após a moldagem e durante os sete primeiros dias, manter os elementos úmidos, a fim de garantir a cura necessária. Os tijolos ou blocos devem ser utilizados após 14 dias de sua fabricação [82].

Estes corpos de prova serão submetidos a um tempo de cura maior, respectivamente, 14, 21 e 28 dias de cura. Os corpos de prova serão submetidos a ensaio de absorção de água e ensaio de compressão, com o objetivo de avaliar a propriedade física e mecânica, respectivamente. Ao final será feita uma comparação entre os corpos de prova com adição de caroços de açaí e sem adição.

Após a cura, recomenda-se o uso de paletes para armazenamento e transporte dos tijolos ou blocos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Granulometria

De acordo com o item 4.1.1 da norma ABNT 10833/2012 o tipo de solo ideal para fabricação de tijolos solo-cimento deve atender ao requisito de passar a porcentagem de 10 a 50% na peneira com abertura de malha 0,075mm [82].

Os solos mais adequados para a confecção do solo-cimento compactados são os que possuem 100% dos grãos passando na peneira de 4,8mm de 10 a 50% passando na peneira 0,075mm; limite de liquidez $\leq 45\%$ e índice de plasticidade ≤ 18 [62]. As figuras 24 e 25 apresentam os resultados obtidos através da curva granulométrica dos solos S1 e S2 respectivamente.

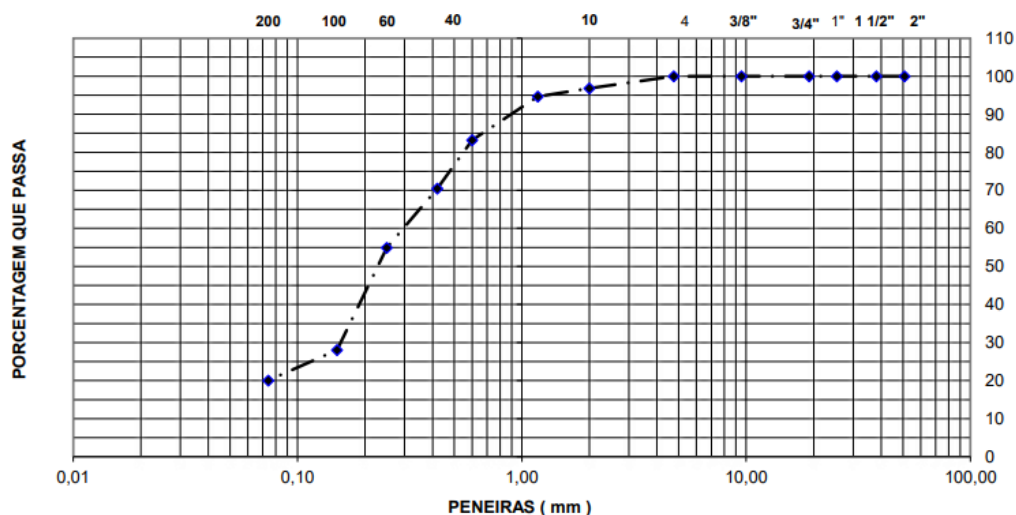


Figura 24 – Resultado do ensaio de granulometria de S1

Através da construção da curva de granulometria da figura 24, é possível observar que S1 é um solo bem graduado, ou seja, suas partículas possuem uma ampla faixa de tamanhos o que confere poucos espaços vazios, as partículas menores ocupam os vazios deixado pelas maiores, resultando num bom entrosamento com melhores condições de compactação e resistência a mistura.

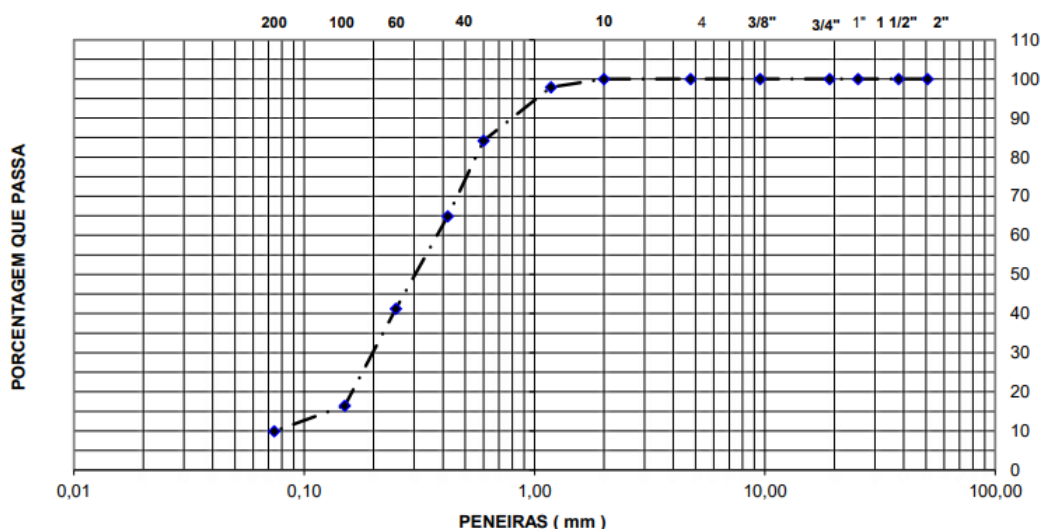


Figura 25 - Resultado do ensaio de granulometria S2.

Na figura 25, pode-se observar a curva de S2, nota-se que 100% dos grãos estão passando na peneira de número 4 e que assim como S1 também possui boa graduação. O solo ideal para a mistura solo-cimento deve conter aproximadamente 15% de silte e argila, sendo os solos arenosos e bem graduados com um baixo consumo de cimento [57].

Com base na análise da fração passante em cada peneira normalizada, é possível identificar que o S2 possui baixa fração argilosa apesar de ser bem graduado, com pequena quantidade de silte mais argila, sendo menos indicado, pois precisará de um alto consumo de cimento para estabilizar a mistura. Podemos analisar na tabela 6 a granulometria os resultados mostraram que S2 não atendeu ao requisito normativo com menos de 10% na peneira de 0,075mm.

Tabela 6 - Análise granulométrica das amostras de solo

Peneira (mm)	Nº da peneira	Fração	% passante	
			S1	S2
4,8	4	areia grossa	0,00	0,00
2	10			
1,2	16	areia média	27,24	35,13
0,6	30			
0,42	40	areia fina	52,07	54,98
0,3	50			
0,15	100			
0,074	200	Silte + argila	20,69	9,89

A amostra S1 é considerada areia fina média silto argilosa, a amostra S2 também é uma areia média, porém com quantidade insuficiente de silte e argila. Então sabe-se que S1 possui a granulometria mais fina com razoável quantidade de argila, sendo mais adequada para a confecção de tijolos de solo-cimento, pois tem uma superfície específica menor que a de solos argilosos, proporcionando economia de cimento.

4.1.2 Índices de Plasticidade dos solos

Nos dois solos analisados, S1 e S2, em apenas um caso atendeu os requisitos de limites de liquidez, plasticidade e granulometria. Os resultados estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Índice de plasticidade das amostras

Amostra	IP (%)	Classificação
S1	4,69	Mediamente plástico
S2	0,00	Não plástico

A amostra S1 teve o limite de liquidez determinado em 16,15% e limite de plasticidade em 11,46%, resultando no índice de plasticidade de 4,69. Na avaliação da fabricação de tijolos solo-cimento e solo-cal com porcentagens de casca de arroz, Milani [37] apontou que o índice de plasticidade elevado requer altas quantidades de cimento para estabilização além dos corpos de prova ficarem sujeitos a variações dimensionais devido ao inchamento do solo quando úmido e retração quando seco.

Entretanto a amostra S2, teve o comportamento não plástico no ensaio, esfarelado-se na presença de umidade, ou seja, tem um alto teor de silte com fração de argila insuficiente para o emprego em tijolos solo-cimento. Esse comportamento se explica devido ao fato de a argila ser insuficiente no solo para exercer a função de dar liga na mistura, porém solos muito argilosos (com grande quantidade de finos) exigiria maiores quantidade de aditivos para se estabilizar [37].

Dos solos estudados, optou-se por fazer a mistura de resíduo somente no S1, pois este apresentou melhores resultados que o S2. Diante desses resultados optou-se em utilizar apenas S1 para a confecção dos corpos de prova.

4.1.3 Ensaio de compactação normal

Na pesquisa de Milani [37], a metodologia adotada foi um tratamento estatístico através da análise de variância de diversas dosagens experimentais solo-aglomerante-casca de arroz correlacionando valores médios da massa específica aparente e de umidade ótima. Porém nessa pesquisa será adotada apenas os valores de referência do ensaio de compactação de Proctor Normal.

Este ensaio tem a finalidade de obter vários valores de massa específica aparente seca em relação a variação de umidade, que através de projeção do gráfico é possível visualizar no topo do vértice a chamada umidade ótima da mistura. O ensaio é normatizado e foi realizado de acordo com a NBR 7182/2016 e NBR 12023. Foi realizado apenas na amostra S1, os resultados do ensaio estão apresentados no gráfico 2.

Uma compactação adequada para fabricação de tijolos solo-cimento de acordo com Miller [80], é essencial para obtenção de um produto satisfatório quanto as normas vigentes pois permite que o material atinja o peso específico mais adequado em consequência atinja melhor resistência mecânica.

Em consonância a isso, Vilela [72] em sua pesquisa sobre tijolos solo-cimento com adição de vegetais, afirma que a umidade ótima é um parâmetro muito importante devido ao fato de oferecer as condições exatas de tratabilidade em relação a máxima compactação do material, ou seja, maiores valores de densidade, resistência e durabilidade.

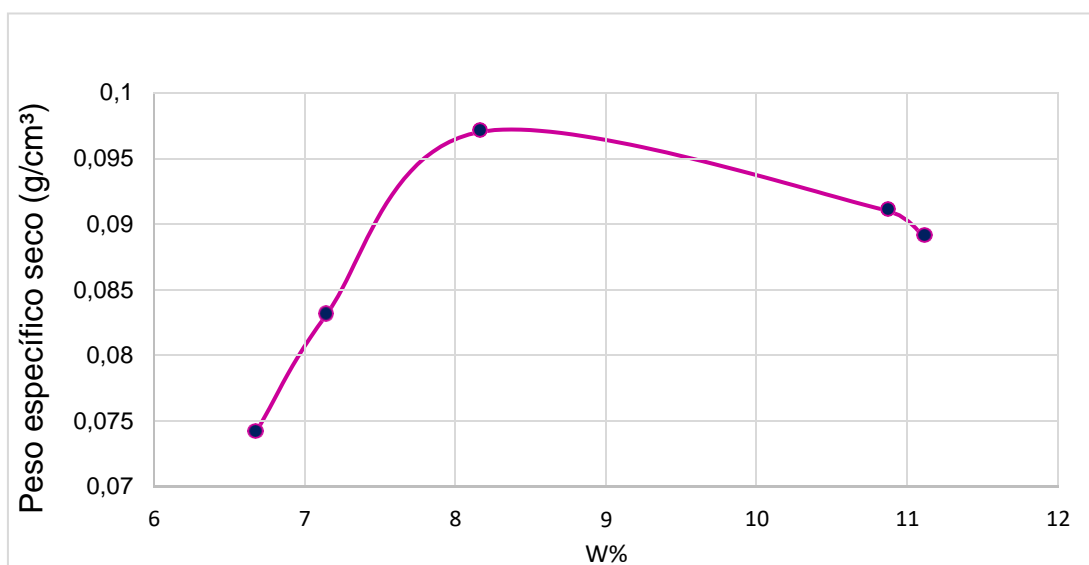


Figura 26 - Curva de umidade ótima da amostra S1

O gráfico de curva de compactação (figura 26) faz referência aos três estados físicos do solo, ar, água e sólidos. Nesse caso, o teor de umidade ótima se encontra em aproximadamente 8,16%, onde o peso específico seco (γ_d) em 0,098 também é o mais adequado para se realizar misturas, ou seja, os grãos deslizam entre si com mais facilidade.

No ensaio após, determinar a umidade ótima ao adicionar mais umidade para os dois pontos seguintes notou-se que o solo não estava mais se compactando, apresentou um comportamento muito plástico sem conformação no molde. Assim finalizou o ensaio.

4.1.4 Micrografia da amostra de solo

O objetivo principal do MEV com EDS é detectar os elementos presentes nos materiais. A Figura 27(a) evidencia as regiões para S1, nessas regiões foram encontrados os elementos relacionados na tabela 8 consolidando os resultados da análise mineralógica de DRX.

Na micrografia da figura 27(b) é mostrada a figura em camadas de acordo com a análise elementar por EDS, entretanto a coloração de acordo com cada elemento na figura 28, onde: (a) está na tonalidade verde representa Si, (b) tonalidade vermelha para Al, (c) tonalidade azul para Fe, (d) tonalidade para púrpura O; (e) tonalidade roxo para Ti e, (f) verde musgo para Ca.

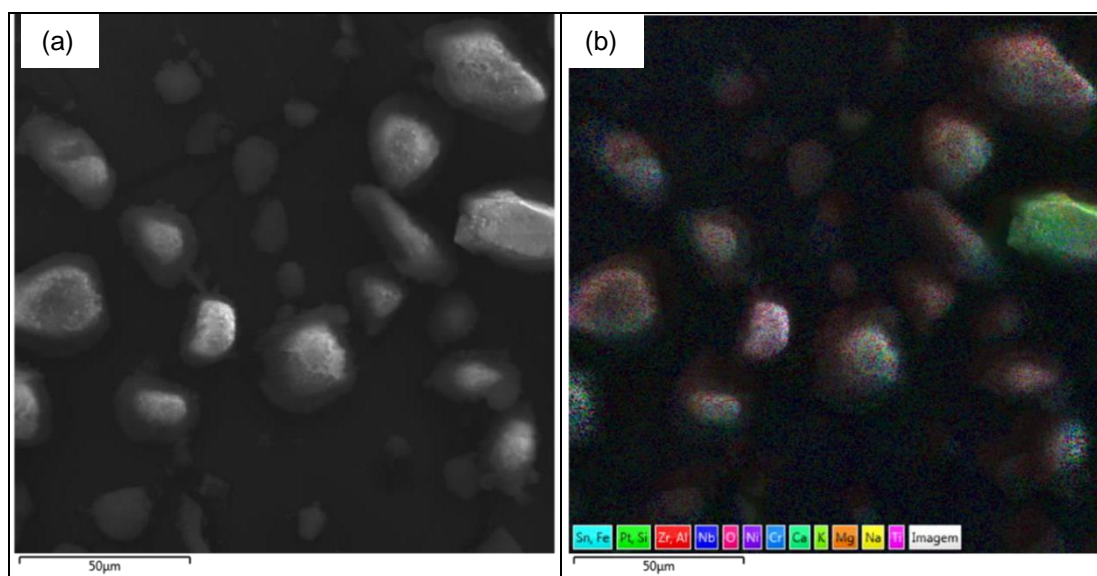


Figura 27 - Micrografia com EDS da amostra S1 (a) micrografia eletrônica; (b) coloração em camadas elementar.

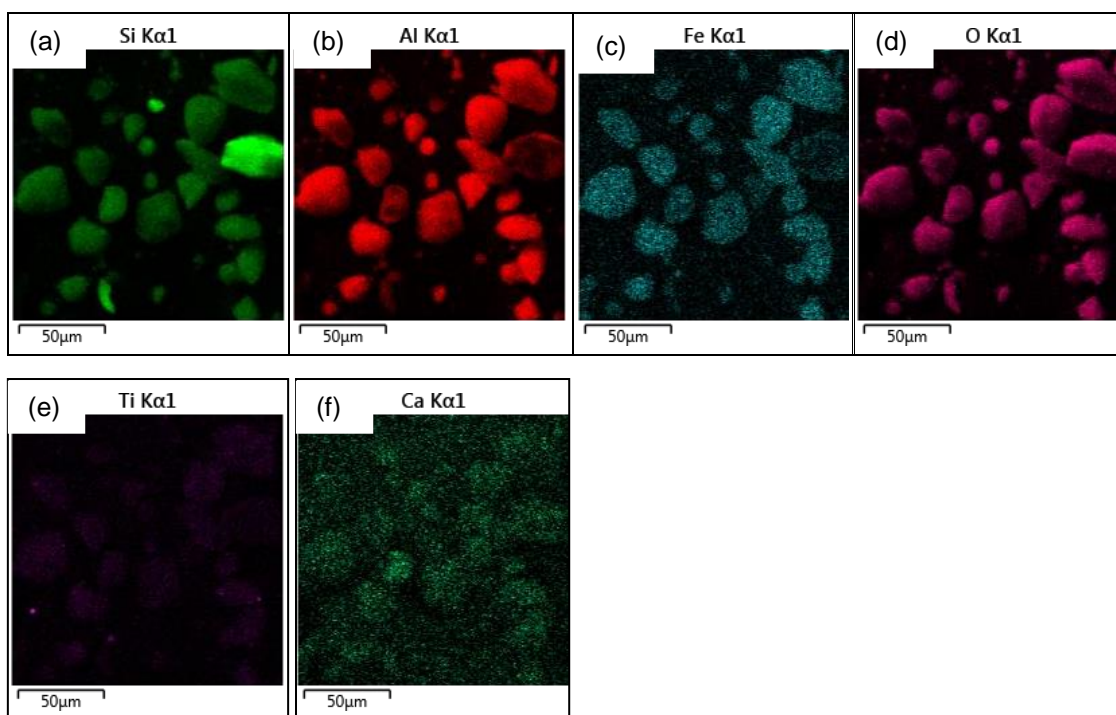


Figura 28 - Tonalidades em camadas para S1

Tabela 8 - Composição química das amostras S1 e S2

(%) Óxidos				
Amostra	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	TiO ₂
S1	39,04	56,76	2,76	1,44

4.1.5 Micrografia dos resíduos

A figura 29(a) mostra cristais de sílica presentes na parte externa do endocarpo do caroço, compostas na maior parte da porção por carbono e oxigênio, com a presença de grupos funcionais de celulose [(C₆H₁₀O₅)_n] e sacarose [(C₁₂H₂₂O₁₁)] conforme mostrado por [85].

Conforme mostra a figura 29(b), os elementos químicos presentes são silício, nitrogênio, potássio e cálcio, em pequenas concentrações. Entretanto o estudo de Reis mostra também concentrações de enxofre [85].

Em alguns estudos por camadas por EDS, mostrou que o caroço do açaí possui uma composição química com elementos diversos a esse estudo como cloro e magnésio também em pequenas concentrações [87].

Pode-se perceber na figura 29(c) que a superfície do endocarpo possui deformações irregulares não sendo classificadas nem esféricas e nem elípticas conforme observado por [19], [87].

Barbosa analisou os resíduos após o processamento no moinho de facas e também notou uma superfície irregular, e atribuiu à deformação sofrida durante o corte e trituração no moinho e ao atrito entre partículas conforme destacado na figura 29(c) e na figura 29(d) [28], [74].

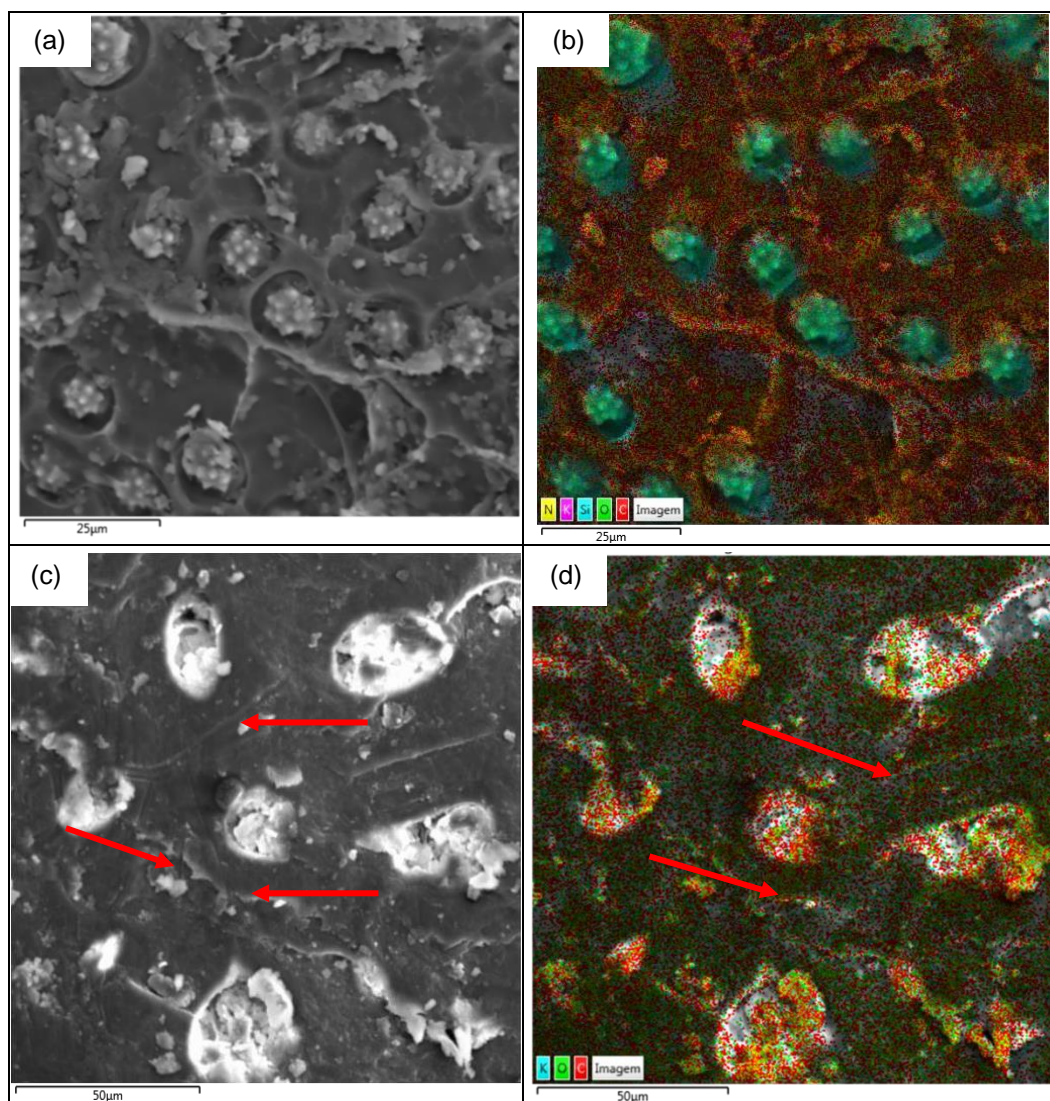


Figura 29 - Análise microestrutural com EDS dos resíduos triturados: (a) protusões globulares na superfície externa; (b) coloração em camadas de EDS; (c)

De acordo com Martins e Mattoso, pode-se observar que o epicarpo é delgado em relação à polpa e que as fibras recobrem o caroço de forma compacta e, em algumas regiões alinhadas, sendo que o maior volume dos frutos é constituído pelo caroço [19].

4.1.6 Difratoograma da amostra de solo

As amostras S1 e S2 analisadas por DRX, foram comparadas entre si e também de forma individual, quando foram identificadas as fases cristalógraficas de cada uma das amostras.

No difratograma apresentado na figura 30, é possível verificar que ambas as amostras são cristalinas, uma vez que possuem picos estreitos e longos, além de não possuírem elevação na linha de base nas curvas apresentadas. Percebemos que a amostra S1 (curva preta) é a que possui maior cristalinidade, pois possui picos com maior intensidade, conforme podemos observar nos intervalos de entre 18° - 26° e 34° - 43° de 2θ .

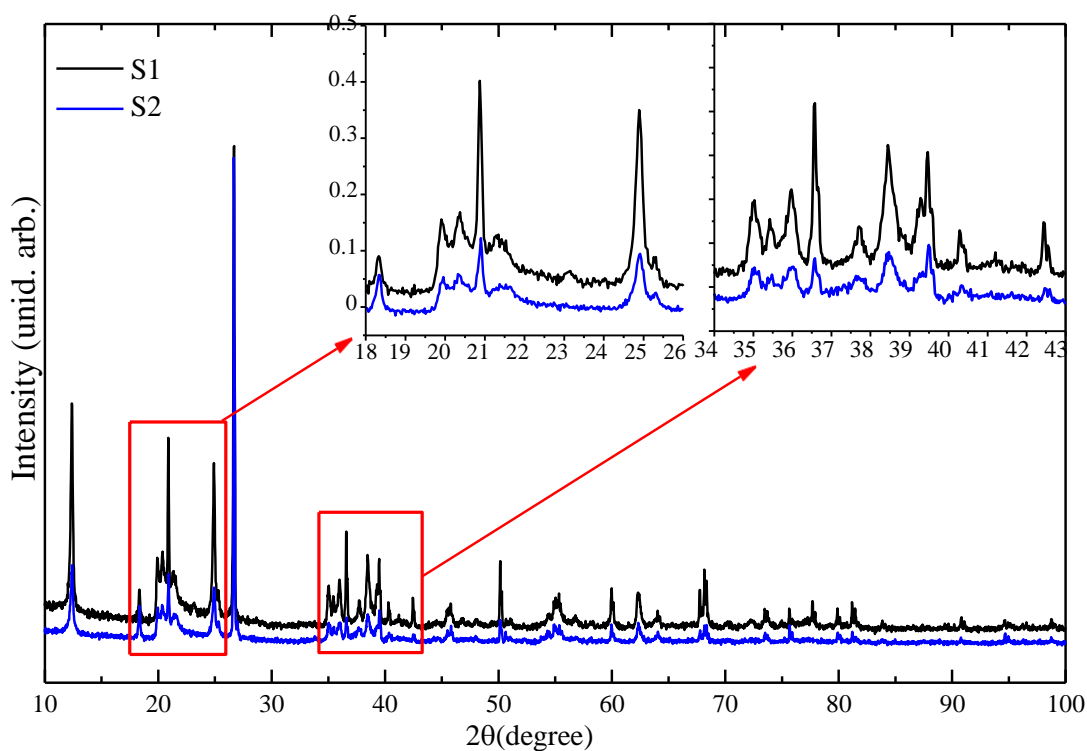


Figura 30 - Comparação da cristalinidade de S1 e S2

As fases cristalinas da amostra S1, foram identificadas através de padrões CIF (Crystallographic Information File) extraídos de duas bases de dados, ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) e COD (Crystallography Open Database). A figura 31 mostra a identificação das fases cristalinas que também são listadas na tabela 9, referente a caulinita $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$, quartzo SiO_2 , gibbsita $Al(OH)_3$ e anatase TiO_2 corroborando os resultados do EDS.

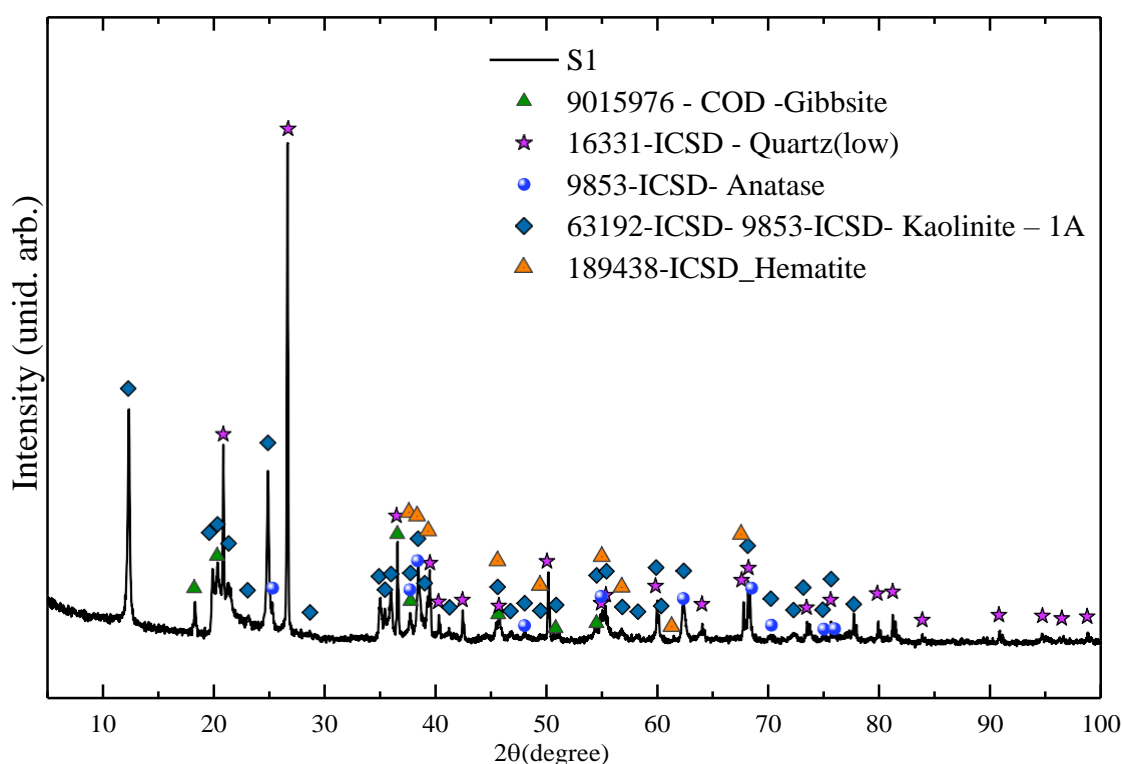


Figura 31 - Difratoograma da amostra S1

Os óxidos predominantes do solo aplicado a mistura solo-cimento de Carvalho [47], são óxidos de silício e alumínio, associados a caulinita, correspondendo a 98,3% dos óxidos presentes. Entretanto S1 apresentou alto teor de SiO_2 confirmando os resultados de granulometria com concentração de grãos maiores e resultado de baixa plasticidade. Foram caracterizados picos de baixa intensidade de hematita, Fe_2O_3 , característica que evidencia a cor vermelha do solo, enquanto in natura.

Dessa mesma forma, a amostra S1, apresentou a fase do argilomineral caulinita, que está presente nos solos tropicais da região amazônica e também é abundante em solos tropicais em todo país, e o quartzo está relacionado com a

quantidade de areia, a gibbsita representa a presença da própria caulinita, bem com a anatase representa pequenas quantidades de óxido de titânio encontrados na amostra.

De acordo com Carvalho [47], na análise racional a predominância de quartzo (SiO_2) juntamente com o resultado da granulometria justifica a predominância do aspecto arenoso de sua amostra. Portanto, a quantidade de sílica encontrada na sua amostra tem um papel fundamental nas características de endurecimento bem como a taxa de crescimento da resistência dos tijolos.

Tabela 9 - Característica microestrutural de S1

Fases de S1	CIF	Sistema Cristalino	$a(\text{Å})$	$b(\text{Å})$	$c(\text{Å})$	Volume (Å^3)	Ref.:
Kaolinite $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	63192 - ICSD	Triclínica	5.1554(1)	8.9448(2)	7.4048(2)	329.89	(Bish 1989)
Anatase (TiO_2)	9853 - ICSD	Tetragonal	3.7892(4)	3.7892(4)	9.537(1)	136.93	(Horn, Schwerdtfeger, and Meagher 1972)
Quartz(low) SiO_2	16331 - ICSD	Trigonal	4.921(1)	4.921(1)	5.400(4)	113.25	(d'Amour, Denner, and Schulz 1979)
Gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$)	9015976 - COD	Monoclínica	8.641	5.070	9.720	424.478	(Megaw 1934)
Hematite Fe_2O_3	189438 - ICSD	Monoclínica	4.588(3)	4.945(2)	6.679(7)	151.49	(Bykova et al. 2013)

4.1.7 Determinação do traço

Seguindo a recomendação da ABPC, [47] efetuou em sua pesquisa, sobre a viabilidade da utilização sobre a fibra do coco babaçu em formulações de tijolos solo-cimento, o teste táctil visual (proposto no capítulo anterior) na determinação da dosagem ideal com a queda da bola.

Para determinar o traço da mistura solo-cimento utilizou o método proposto por [80], no qual se mistura o cimento com determinada quantidade de solo até se obter

homogeneidade, então adiciona uma umidade desejada. Após a mistura, apertou-se energicamente um punhado entre os dedos como resultado apresentar um bolo com as marcas dos dedos. Em seguida, deixa-se o bolo cair de uma altura de aproximadamente um metro sobre uma superfície dura, devendo esfarelar-se pelo impacto. Caso isso ocorra, este é o ponto ideal, caso não, a mistura está muito úmida.

Para esta pesquisa além do método citado acima, utilizou-se o traço apresentado na tabela 10 junto com a massa de cada material na mistura para cada formulação (cada corpo de prova foi fabricado com aproximadamente 250g), visto que para solos que atendam a todos os requisitos da ABNT o traço padrão é de 1:10, nesse caso foi adotado um traço com um teor mais elevado de cimento por conta das adições de porcentagens de resíduos vegetais.

Tabela 10 - Dosagem de material da pesquisa

Traço		
1	8	10%
Massa (g)		
Cimento	Solo	Água
250	2000	200

4.2 Caracterizações física dos corpos de prova

4.2.1 Absorção de água

Na figura 32, podem ser verificados os valores de absorção de água. É possível observar que quanto maior a adição de partículas maior a absorção de água [45]. Os corpos de prova com adições até 7% de resíduos se enquadram ao requisito normativo que limita até 20% de absorção. Porém em nenhuma das idades (7, 14, e 2 dias) a formulação com 10% de adições atingiu o mínimo estabelecido.

A propriedade de absorção de água em tijolos solo-cimento está relacionada com a densificação e também com a matriz. Os valores de absorção de água dos diferentes tratamentos estão diretamente relacionados aos valores de massa específica aparente máxima, ou seja, quanto maior a massa específica aparente seca máxima, melhor será o empacotamento dos grãos nos tijolos, resultando em menores espaços vazios (poros), dificultando assim a penetração da água [72].

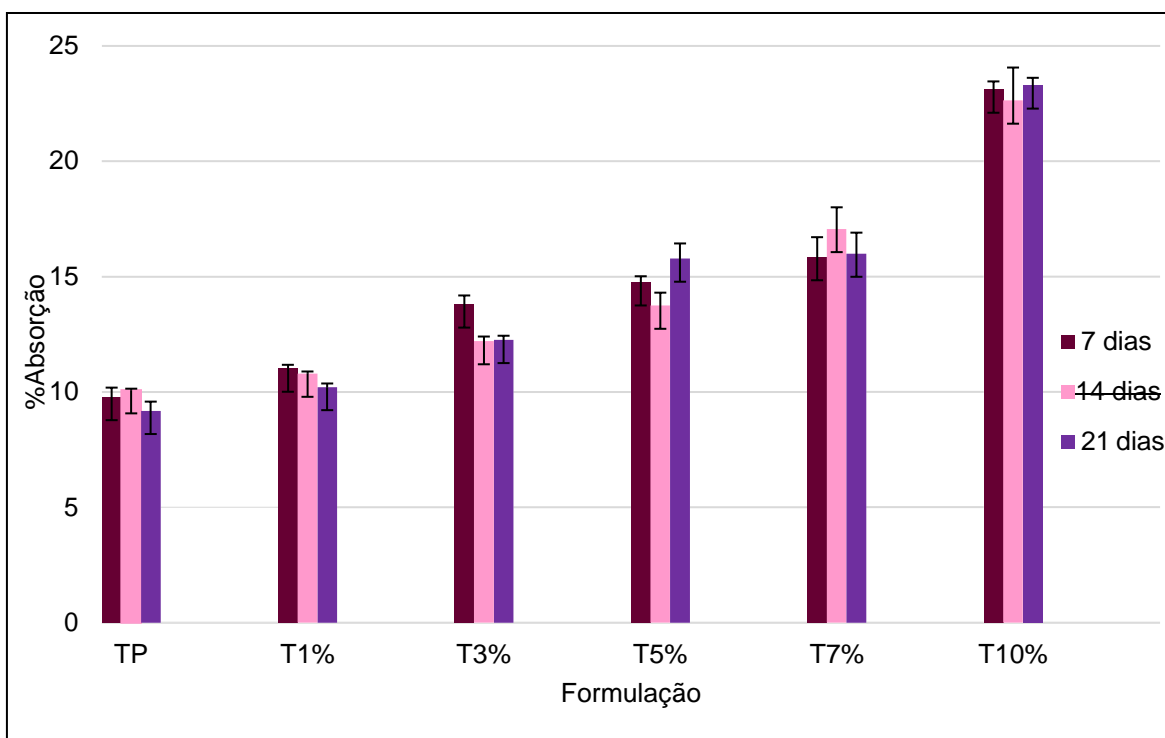


Figura 32 - Resultados de absorção de água

Como podemos perceber a absorção de água para o traço padrão, sem adições de partículas, teve o índice de absorção muito baixo, o que é favorável para a fabricação de tijolos solo-cimento pois significa que as partículas estão compactas deixando menos espaços vazios dificultando a penetração da água, como descrito também por Metzker [64].

Para T10%, houve um aumento significativo de absorção de água com 23.29% para 14 dias de idade, essa maior absorção de água é justificada pelo aumento da porosidade dos tijolos com a inclusão das partículas lignocelulósicas [40]. O aumento da absorção de água dos tijolos com adição de partículas vegetais, pode ser explicado pelo fato da higroscopicidade das partículas, além da baixa densidade das mesmas, que resultam na quantidade maior de partículas na mistura, dificultando o processo de compactação dos tijolos e, conseqüentemente, desenvolvimento de poros [72].

Para corroborar esse fato, Castro verificou em sua pesquisa sobre tijolos solo cimento com adições de café, que quanto maior o teor de casca de café empregado maior foi a capacidade de absorver água apresentada pelo material, ao comparar os resultados obtidos para o tratamento controle (0% de casca de café) e o tratamento com 20% de casca de café [89].

Os resultados dessa pesquisa estão com valores parecidos com o de Carvalho, que adicionou fibras vegetais de coco babaçu em tijolos solo-cimento. Tendo seu tratamento controle 10% de absorção e 2% de fibras com cerca de 16% [47].

A alta absorção de água de materiais lignocelulósicos é um obstáculo considerável, pois pode resultar em um inchamento das partículas e afetar a propriedades físicas e mecânicas dos compósitos [40].

O aumento de absorção de água nos tijolos podem ser explicados pela falta de interação entre o sistema solo-cimento e resíduo e também pela presença de componentes químicos, tais como lignina, extrativos, celulose, hemicelulose entre outros, presentes nos resíduos vegetais, que tendem a retardar ou até mesmo impedir o processo de hidratação do cimento, promovendo um acréscimo no volume de vazios, o resultado é um material mais poroso e com uma maior capacidade de absorver água, conforme o aumento no teor de partículas [89], [72].

4.2.2 Análise dimensional

Os resultados dessa análise para cada formulação TP, T1%, T3%, T5%, T7% e T10%, dessa pesquisa, estão expressos na tabela 11, bem como como média das medidas e seus respectivos desvio padrão para medida de cada aresta.

Tabela 11 - Resultados da análise dimensional para cada formulação

Análise dimensional (unidades em mm)						
Formulação	Comp.	Desvio Padrão	Larg	Desvio Padrão	Alt	Desvio Padrão
TP	100,16	0,13	50,18	0,12	22,94	0,19
T1%	100,42	0,19	50,23	0,09	23,26	0,63
T3%	100,54	0,37	50,36	0,17	24,67	0,53
T5%	100,17	0,30	50,05	0,03	25,33	0,88
T7%	100,84	0,38	50,25	0,37	25,43	0,78
T10%	101,24	0,58	50,35	0,44	27,72	0,89

As dimensões médias para os corpos de prova traço padrão foram 100,16 x 50,18 x 22,94 se adequando às exigências da NBR 8491/2012 principalmente no requisito da altura ser menor que a largura.

À medida que foi acrescido o percentual de resíduos, verificou-se que também aumentou o desvio padrão da variação dimensional, entretanto nota-se que ainda assim os valores de variação dimensional não ultrapassaram o limite de 1,00mm conforme cita a norma.

4.2.3 Resistência à compressão

A tabela 12 apresenta as médias encontradas para três unidades de corpo de prova para o traço padrão e os traços com adições de resíduos vegetais para resistência com 7 dias, 14 dias e 28 dias de idade.

Um dos requisitos mais importante da NBR 8491[90] é que o valor médio de resistência à compressão não seja menor que 2,0MPa e nenhum valor individual seja menor que 1,7MPa.

Os resultados para 7, 14 e 28 dias mostraram a resistência superior ao normativo, uma vez que S1 possui parâmetros ideais para moldagem dos corpos de prova e que o traço escolhido como padrão foi com a quantidade de cimento maior suficiente para matriz aderir ao reforço de resíduos vegetais. A exceção de resistência a compressão foi para a formulação de 10% aos 7 dias de idade que não atendeu ao normativo.

Tabela 12 - Resultados de resistência média à compressão dos corpos de prova nas idades 7,14 e 28 dias

Formulação	RC (MPa)					
	7 dias		14 dias		28 dias	
Tpadrão	16,93	±1,56	33,10	±2,08	30,74	±5,32
T1%	16,25	±0,96	17,87	±3,43	17,80	±5,27
T3%	9,56	±1,01	11,06	±2,26	12,75	±2,66
T5%	6,55	±2,19	11,20	±1,08	9,16	±2,88
T7%	3,63	±0,31	9,01	±1,28	11,22	±1,35
T10%	Não ensaiado		3,05	±2,22	7,68	±0,20

Para T10% não foi possível realizar o ensaio de resistência à compressão aos 7 dias de idade pois os corpos de prova estavam se desmanchando. Isso pode ser motivado ao período de cura de sete dias não ser suficiente para o aumento das reações pozolânicas, que é responsável por atribuir resistência ao produto final [91].

Dessa forma, os corpos de prova com o traço padrão atingiram média de 16,93MPa, valores superiores ao normativo devido ao fato de não conter o traço 1:8 (cimento/solo). Os resultados de resistência à compressão da pesquisa realizada por Brasileiro *et al* [75], para amostras de solo cimento com diferentes traços, mostrou que o mesmo traço adotado nessa pesquisa atingiu o valor de 10MPa sendo ensaiado até o traço 1:14 e mesmo assim atendeu a referência normativa.

A formulação T1% apresentou pouca variação na resistência apresentando média de 16,25MPa, supõe-se ao fato de ser uma incorporação de pequena porção. Entretanto, com a adição de T3% a resistência diminui significativamente para média de 9,56MPa cerca de 56,3% da resistência comparada com o tijolo padrão. Para T5% o valor médio de resistência à compressão foi de 6,55MPa e finalmente com T7% o valor médio de resistência à compressão foi de 3,63MPa, ou seja, 21,45% apenas da resistência do T.padrão, porém ainda assim atendendo os requisitos normativos para fabricação de tijolo solo-cimento.

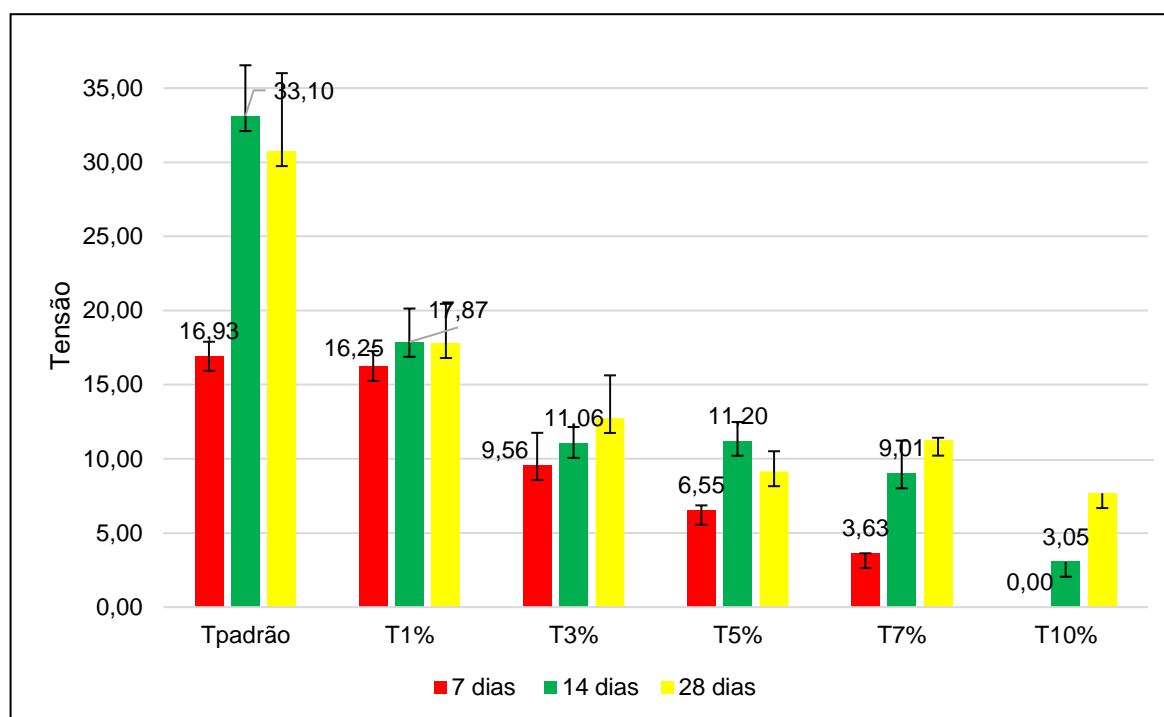


Figura 33 - Valores médios de resistência à compressão em função dos resíduos aplicados nos corpos de prova com desvio padrão

Conforme apresentado na figura 33, mostra a avaliação de resistência à compressão dos corpos de prova com 7 dias de idade, com 14 dias e com 28 dias. Observamos que conforme aumenta o percentual de resíduos a resistência é

reduzida. Esses resultados estão associados a melhor aderência da matriz com as partículas quando o percentual está entre 1% e 3%.

Brasileiro *et. al.* ao fabricarem corpos de prova, traço 1:8 de tijolos solo-cimento com fibras e partículas de pó de coco, em sua amostra padrão sem incorporação do reforço atingiu o resultado de resistência à compressão de 14,62MPa além de obter todos os resultados com a incorporação dos resíduos vegetais acima de 4,5MPa [75].

Esses resultados estão associados à pequena quantidade de extrativos presentes na mesma comparada com adições maiores, que faz com que haja maior interação entre a partícula e a matriz e conseqüentemente favorece as propriedades mecânicas dos compósitos [72].

Para a inclusão de apenas um tipo de adição vegetal, observou-se que o menor teor de adição resultou em melhores resultados mecânicos. De acordo com dados levantados na literatura, podemos afirmar que a adição de reforço vegetal em matriz solo-cimento pode variar em torno de 1% a 3%, conforme a tabela 13.

Ao comparar os resultados dessa pesquisa com os resultados encontrados na literatura, percebe-se que a diminuição da resistência à compressão pode estar associada à maior porosidade dos tijolos produzidos com resíduos lignocelulósicos e devido a sua menor densidade, uma vez que são fatores que influenciam diretamente as propriedades mecânicas de qualquer compósito [72].

Tabela 13 - Resultados encontrados na literatura para a resistência à compressão de tijolos de solo-cimento com substituição parcial do cimento por resíduo vegetal

Autor	Reforço vegetal	%	RC (MPa)	Idade
Carvalho, 2019	Fibra do coco babaçu	1,5	2,28	7dias
Castro, 2017	Casca de arroz	3,0	1,59	28dias
Metzker, 2019	Eucalipto	1,5	2,4	28dias
Vilela, 2019	Eucalipto	1,5	2,16	28dias
	Pinus		2,42	
Sabino, 2019	Casca de arroz	1,5	1,75	28dias
	Casca de café		1,39	
	Bambu		1,57	

A adição de porcentagens de resíduos vegetais em excesso diminui a resistência dos tijolos de tijolo-cimento visto que os compostos químicos, presentes no resíduo vegetal, tais como extrativos, ligninas, hemiceluloses entre outros, interferem, significativamente, na reação de hidratação do cimento [89].

Para T10%, os principais motivos que levaram a um decaimento na resistência mecânica podem ser justificados pela perda da qualidade estrutural dos tijolos devido à baixa densificação da mistura e do surgimento da rugosidade superficial com pequenas imperfeições que causam concentração de tensões [47].

CONCLUSÃO

A adição de partículas de materiais lignocelulósicos, especialmente caroços de açaí moídos, pode ser considerada uma boa opção para tijolos solo-cimento. Uma vez que a adição feita em pequenas porcentagens oferece propriedades mecânicas suficientes para tijolos.

Os ensaios de Limite de liquidez e Limite de plasticidade, que permite obter o índice de plasticidade, juntamente com o ensaio de granulometria por peneiramento, atenderam rigorosamente os requisitos normativos da ABNT. Os índices de plasticidade que para S1 foi de 4,68%, e S2 se comportou de forma não plástica pois continha pouca quantidade de argila.

Para granulometria dos solos, os resultados encontrados foram para S1 do tipo silte argiloso e S2, também em acordo com teste táctil visual em campo, com o tipo mais arenoso com 9,89% de fração silte e argila que ficou retido na peneira de 0,074mm o que tornou S2 impróprio, nessa pesquisa para confecção dos corpos de prova. Logo, a amostra selecionada foi S1 para procedimentos de confecção dos corpos de prova.

Na análise química, por meio do MEV/EDS, com a finalidade de encontrar os elementos químicos presentes para consolidar os resultados de DRX através das informações cristalográficas em bases (CIF), identificou a presença de óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de silício (SiO_2), óxido de ferro (FeO) e óxido de titânio (TiO_2).

Através do DRX, foi possível plotar o difratograma e caracterizar para consolidar a estrutura de S1, comprovando que o solo seria ideal para a confecção dos corpos de prova. As estruturas presentes em S1 foram os minerais caulinita $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$, quartzo SiO_2 , gibbsita $Al(OH)_3$ e anatase TiO_2 .

De acordo com os dados de caracterização e com estudo teórico prévio o traço adotado foi de 1:8, sendo o teor de cimento mais elevado com adições de pozolanas para que a matriz envolva o reforço granular.

A análise dimensional se mostrou satisfatória quanto aos requisitos da ABNT, uma vez que a média de variação aferida para todas as formulações, padrão e com adições de resíduos vegetais, não sofreram variação superior a 1mm. O desvio padrão que para o comprimento dos corpos de prova para as formulações foi para TP (0,13), T1% (0,19), T3% (0,37), T5% (0,30), T7% (0,38) e T10% (0,58). Na largura, o desvio apresentou os valores de TP (0,12), T1% (0,09), T3% (0,17), T5% (0,03), T7% (0,37)

e T10% (0,44). E o desvio padrão na altura para as formulações foi o seguinte: TP (0,19), T1% (0,63), T3% (0,53), T5% (0,88), T7% (0,78) e T10% (0,89).

Percebeu-se que conforme foi adicionado porcentagens de resíduos, houve um aumento crescente no desvio padrão das dimensões dos corpos de prova, entretanto ainda continuaram se enquadrando aos requisitos normativos.

A inclusão de maiores porcentagens, como por exemplo 10%, de materiais de reforço resultou na diminuição da resistência à compressão e no aumento da absorção de água dos corpos de prova, não sendo indicado para produção dos tijolos com essa porcentagem de partículas vegetais.

Os melhores resultados para resistência à compressão foram para T1% com 17,87 MPa, T3% com 11,06 MPa e T5% com 9,16 MPa que atingiram valores superiores ao normativo, dessa forma, pode-se, em trabalhos futuros, diminuir o teor de cimento visando a economia e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] IBGE, “PEVS 2018: produção da silvicultura e da extração vegetal chega a R\$ 20,6 bilhões e cresce 8,0% em relação a 2017,” 2019.
<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/25437-pevs-2018-producao-da-silvicultura-e-da-extracao-vegetal-chega-a-r-20-6-bilhoes-e-cresce-8-0-em-relacao-a-2017> (accessed Nov. 15, 2019).
- [2] Márcio Gallo, “Potencialidades - Açaí,” *Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA)*, 2017.
<http://site.suframa.gov.br/assuntos/potencialidades-acai> (accessed Nov. 07, 2019).
- [3] N. C. Costa, A. C. da Silva, N. C. F. Corrêa, and V. A. Botelho, “Caracterização físico-química do caroço de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) torrado destinado à produção de uma bebida quente,” in *Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos*, vol. 2, 2021, pp. 73–82.
- [4] A. O. da Silva *et al.*, “Estudo da produção de açaí (*Euterpe oleracea* Mart): aspectos econômicos e produtivos baseados nos anos de 2015 a 2017.,” *Brazilian J. Dev.*, vol. 6, no. 1, pp. 1629–1641, 2020, doi: 10.34117/bjdv6n1-112.
- [5] M. A. Moreira and A. L. F. de Sousa, “Tratamento e análise de resíduos da produção de açaí: um estudo sob a ótica da ecoeficiência,” *REVISTA AMBIENTE CONTÁBIL - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - ISSN 2176-9036*, vol. 12, no. 2, pp. 279–297, 2020.
- [6] V. Conto, M. L. de Oliveira, and J. E. Ruppenthal, “Certificações ambientais: contribuição à sustentabilidade na construção civil no Brasil,” *Gepros Gestão da Produção, Operações e Sist.*, vol. 12, no. 4, pp. 100–127, 2017, doi: 10.15675/gepros.v12i4.1749.
- [7] T. M. da C. Oliveira *et al.*, “Aproveitamento das cinzas de caroço de açaí na produção de concreto sustentável analisando sua durabilidade,” *Brazilian J. Dev.*, vol. 6, no. 1, pp. 30749–30756, 2020, doi: DOI:10.34117/ bjdv6n5-510.
- [8] B. J. C. Ribeiro, A. G. L. Moraes, A. F. S. do Nascimento, Jackeline, dos S. Ferreira, and P. de S. Santos, “Estudo de caso: uma análise sobre o aproveitamento do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea* Mart.) como alternativa

- para redução de resíduos orgânicos,” *4º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade*, Gramado, pp. 1–4, May 2021.
- [9] S. de S. Barros *et al.*, “Waste açai (Euterpe precatoria Mart.) seeds as a new alternative source of cellulose: Extraction and characterization Sementes,” *Research, Society and Development*, vol. 10, no. 7, pp. 1–16, 2021.
- [10] A. L. Mesquita, “Estudos de Processos de Extração e Caracterização de Fibras do Fruto do Açai (Euterpe Oleracea Mart.) da Amazônia para Produção de Eco painel de Partículas Homogêneas de Média Densidade,” Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2013.
- [11] L. de N. P. Cordeiro, I. N. L. Paes, P. S. L. Souza, and C. M. Azevedo, “Caracterização da cinza de caroço de açai residual para adição ao concreto,” *Ambient. Construído*, vol. 19, no. 1, pp. 45–55, 2019, doi: 10.1590/s1678-86212019000100292.
- [12] R. R. C. REGO, “ESTUDO DO TIJOLO SOLO CIMENTO EM FORMULAÇÕES COM A ADIÇÃO DA CAL,” INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ, 2019.
- [13] IBRACON, *Materiais de Construção Civil e Principio de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo, 2007.
- [14] M. do S. P. Oliveira, J. T. Farias Neto, R. de A. Mattietto, S. Mochiutti, and A. V. Carvalho, *O açai Euterpe oleracea*. 2017.
- [15] H. Linhares, “Como funciona o mercado de açai | Só Hélices,” *Como funciona o mercado de açai*, 2021. <http://sohelices.com.br/como-funciona-o-mercado-de-acai/#1a> (accessed Aug. 16, 2021).
- [16] R. S. Lira, “A viabilidade do uso do caroço do açai como desenvolvimento sustentável na geração de combustível no estado do Pará,” *III Congr. Nac. Eng. Petróleo, Gás Nat. e Biocombustíveis*, no. 83, 2018.
- [17] SEBRAE, “Boas Práticas para Manejo Florestal e Agroindustrial,” *Sebrae-AM*, 2010.
https://imazon.org.br/PDFimazon/Portugues/livros/boas_praticas_para_manejo/boas-prticas-para-manejo-florestal-e00.pdf (accessed Nov. 08, 2019).
- [18] L. K. O. Yuyama *et al.*, “Caracterização físico-química do suco de açai de euterpe precatoria mart. oriundo de diferentes ecossistemas amazônicos,” *Acta Amaz.*, vol. 41, no. 4, pp. 545–552, 2011, doi: 10.1590/S0044-

- 59672011000400011.
- [19] M. A. Martins, L. H. C. Mattoso, and J. D. C. Pessoa, “Comportamento térmico e caracterização morfológica das fibras do mesocarpo e caroço do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.),” *Rev. Bras. Frutic.*, vol. 31, no. 4, pp. 1150–1157, 2009, doi: 10.1590/s0100-29452009000400032.
- [20] C. Dias, “Feira do Açaí em Belém,” *Fotografia*, 2020. .
- [21] V. da C. Almeida, I. M. Melo, J. F. Freitas, and A. C. S. Melo, “Revalorização do caroço de açaí em uma beneficiadora de polpas do município de Ananindeua/PA: proposta de estruturação de um canal reverso orientado pela PNRS e logística reversa,” *Rev. Gestão da Produção Operações e Sist.*, vol. 59–83, pp. 59–83, 2017, doi: 10.15675/gepros.v12i3.1668.
- [22] W. T. Vieira, “Caracterização cromatográfica e avaliação da atividade antimicrobiana do extrato pirolenhoso obtido a partir de biomassas residuais,” Universidade Federal de Alagoas, 2019.
- [23] M. M. Lopes, “Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado com Fibras de Açaí (*Euterpe oleracea*),” Brasília/ Distrito Federal, 2019.
- [24] A. Miguelina, “Avaliação do Desempenho Térmico de Compósitos Poliméricos Produzidos com Resíduos de Açaí em Habitações na Amazônia,” 23º *CBECiMat - Congr. Bras. Eng. e Ciência dos Mater.*, pp. 2187–2198, 2018.
- [25] L. . OLIVEIRA, I. M. Souza, and P. A. De Oliveira, “Formulação De Concretos: Substituição Parcial do Agregado Graúdo por Caróços de Açaí,” 2018.
- [26] Y. X. da S. Lin, “Processamento de madeira plástica de poliestireno reciclado, reforçado com fibras das sementes de açaí,” 23º *CBECiMat - Congr. Bras. Eng. e Ciência dos Mater.*, 2018.
- [27] M. S. Favacho, “Reutilização de Fibras de Açaí (*Euterpe Oleracea*) Para a Produção se Placas Cimentícias,” 23º *CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, no. 1, pp. 3191–3201, 2018.
- [28] A. de M. Barbosa, “Compósitos poliméricos com resíduo de açaí para mitigação de efeitos térmicos como estratégias eco-alternativas em habitações na Amazônia,” Manaus - Am, 2016. [Online]. Available: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/5494>.
- [29] Governo do Estado do Pará, “AÇAÍ | SEDAP,” *Secretaria de Estado de Desenvolvimento Agropecuário e Pesca*, 2021.

- <http://www.sedap.pa.gov.br/content/açaí> (accessed Aug. 16, 2021).
- [30] IBGE, “PEVS 2018: produção da silvicultura e da extração vegetal chega a R\$ 20,6 bilhões e cresce 8,0% em relação a 2017,” 2019. .
- [31] R. P. da Silva, “Utilização do caroço do açaí na produção de tijolos nas olarias da cidade de Imperatriz,” 2018.
- [32] S. R. Silva, “TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO REFORÇADO COM SERRAGEM DE MADEIRA,” UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2005.
- [33] À. M. do Nascimento, A. de O. Feitosa, T. da S. Almeida, and D. M. de Lacerda, “Tijolo Modular De Solo-Cimento Como Material Na Construção Civil,” *InterScientia*, vol. 6, no. 1, p. 16, 2018.
- [34] P. Giorgi, G. de C. Grigoletti, R. C. A. de Lima, and L. S. Lorenzi, “Avaliação de sustentabilidade e habitabilidade de blocos de solo-cimento segundo a norma ABNT NBR 15575,” *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 23, no. 3, Rio de Janeiro, 2018.
- [35] J. C. Marchiori, “Análise das propriedades físicas e mecânicas de tijolos Solo-cimento prensados com a incorporação de materiais Alternativos,” *Monografia*, p. 120, 2020, [Online]. Available: https://online210.psych.wisc.edu/wp-content/uploads/PSY-210_Unit_Materials/PSY-210_Unit01_Materials/Frost_Blog_2020.pdf%0Ahttps://www.economist.com/special-report/2020/02/06/china-is-making-substantial-investment-in-ports-and-pipelines-worldwide%0Ahttp://.
- [36] V. J. Ferrari, Á. H. C. de Souza, H. P. Baltazar, W. Dotto, and J. G. Vieira Neto, “Tijolos vazados de solo-cimento produzidos com solo da Região do Arenito Caiuá do Paraná,” *Ambient. Construído*, vol. 14, no. 3, pp. 131–148, 2014, doi: 10.1590/s1678-86212014000300011.
- [37] A. P. da S. Milani, “Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz,” Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- [38] C. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. THABA, *Manual de construção com solo-cimento*, 3rd ed. São Pa: ABCP, 2020.
- [39] A. C. F. Gomes, “Aplicação de rejeito de mineração de ouro na produção de tijolo de solo-cimento,” Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

- [40] T. P. F. Sabino, “Materiais lignocelulósicos como reforço em tijolo solo-cimento,” Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- [41] P. I. L. gadelha Jardim, L. C. J. G. Jardim, F. M. Costa, and R. K. Lopes, “Aspectos dos Blocos Ecológicos de Solo-cimento,” *Diálogos: Economia e Sociedade*, vol. 1, Porto Velho, pp. 79–88, Feb. 2019.
- [42] J. R. De Oliveira, A. Garcia, and R. M. Schneider, “INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE TORNEARIAS MECÂNICAS NA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO,” *Nativa, Sinop*, vol. 02, pp. 53–57, 2014.
- [43] I. E. P. da I. M. IEP, *Cartilha Produção De Tijolos De Solo-Cimento*. PIRACICABA, 2016.
- [44] J. C. S. S. Motta *et al.*, “Tijolo De Solo-Cimento: Análise Das Características Físicas E Viabilidade Econômica De Técnicas Construtivas Sustentáveis,” *E-Xacta*, vol. 7, no. 1, pp. 13–26, 2014.
- [45] ABNT, *ABNT NBR 8492 Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2016.
- [46] M. I. B. Souza, A. A. S. Segantini, and J. A. Pereira, “Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto,” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 12, no. 2, pp. 205–212, 2008.
- [47] R. S. de S. Carvalho, “Estudo da viabilidade da utilização da fibra de coco babaçu em formulações de tijolo solo-cimento,” Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2019.
- [48] M. E. C. Oliveira, M. Z. Azevedo, and A. R. Mendes, “A UTILIZAÇÃO DAS CINZAS DA PALHA DO ARROZ NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO,” Paranavaí, 2018.
- [49] A. R. Soares Júnior, I. C. Oliveira, and J. C. M. Menezes Júnior, “ESTUDO E FORMULAÇÃO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS DE SOLO CIMENTO PRODUZIDOS A PARTIR DO LODO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS: UM MODELO DE GERENCIAMENTO,” *ASSEMAE - Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento*, Fortaleza, pp. 434–449, 2018.
- [50] L. P. Rodrigues and J. N. F. Holanda, “Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos

- solo-cimento,” *Ceramica*, vol. 59, no. 352, pp. 551–556, 2013, doi: 10.1590/s0366-69132013000400010.
- [51] L. de A. Miranda *et al.*, “Avaliação do Potencial do Grits Como Material de Construção na Produção de Tijolos de Solo-Cimento,” *Rev. Arvore*, vol. 35, no. 6, pp. 1335–1340, 2011, doi: 10.1590/S0100-67622011000700020.
- [52] N. K. P. Dantas, M. W. R. Sales, C. C. T. Marques, I. K. P. Dantas, and L. K. de O. Bosco, “ESTUDO GRANULOMÉTRICO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA FABRICAÇÃO DE MISTURA DE SOLO-CIMENTO,” *Gl. Sci Technol*, Rio Verde, pp. 87–96, 2019.
- [53] L. Q. C. de Albuquerque, G. A. Biscaro, S. R. L. Negro, A. C. de Oliveira, L. A. de Carvalho, and S. T. Leal, “Resistência a compressão de tijolos de solo-cimento fabricados com o montículo do cupim *cornitermes cumulans* (kollar, 1832),” *Cienc. e Agrotecnologia*, vol. 32, no. 2, pp. 553–560, 2008, doi: 10.1590/s1413-70542008000200032.
- [54] R. de C. Ferreira, J. C. da C. Gobo, and A. H. N. Cunha, “INCORPORAÇÃO DE CASCA DE ARROZ E DE BRAQUIÁRIA E SEUS EFEITOS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO,” *Eng. Agríc., Jaboticabal*, vol. 28, no. 1, pp. 1–11, 2008, doi: 10.1590/S0100-69162008000100001.
- [55] F. M. Grande, “Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa,” p. 148, 2003, doi: 10.1520/E0975-00.
- [56] ABNT, *ABNT NBR 8491 Tijolo de solo-cimento — Requisitos*. Rio de Janeiro, 2016.
- [57] G. D. dos Reis, N. F. Negreiros, and T. H. Canetomi, “Uso de resíduos da construção civil na fabricação de tijolos solo-cimento,” *Revista Científica ANAP Brasil*, vol. 9, no. 16, pp. 45–53, 2016.
- [58] A. C. da F. Pinheiro and M. Crivelaro, *Materiais de construção*, 2nd ed. São Paulo, 2016.
- [59] ABNT, “ABNT NBR 16697 Cimento Portland – Requisitos,” Rio de Janeiro, 2018.
- [60] W. F. Smith and J. Hashemi, *Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 5th ed. Porto Alegre, 2012.

- [61] L. de F. Lopes, *Materiais de construção civil I*. Londrina, 2017.
- [62] G. C. Isaia, *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*, 3rd ed., vol. 1 e 2. São Paulo: IBRACON, 2017.
- [63] C. T. M. Silva and S. V. A. Barros, “Análise Da Absorção De Água De Tijolos De Solo-Cimento Incorporados Com Pó De Brita,” pp. 1–12, 2020, [Online]. Available: <http://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/4994>.
- [64] S. L. O. Metzker, “Qualidade de tijolos solo-cimento com a inclusão de resíduos vegetais e urbanos,” Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- [65] W. D. Callister, *Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução*, 7th ed. Rio de Janeiro, 2008.
- [66] J. F. Shackelford, *Introdução à ciência dos materiais para engenheiros*, 6th ed. São Paulo, 2008.
- [67] R. V. de L. Duarte, “Preparação de Compósitos de Óxido de Ferro e Carvão Ativado do Ouriço (Mesocarpo) da Castanha-do-Brasil Para a remoção de Corante Azulde Metileno em Meio Aquoso,” Universidade Federal do Amazonas, Manaus - Am, 2017.
- [68] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering An Introduction*, 9th Editio. United States of America, 2014.
- [69] M. Ferrante, *Seleção de Materiais*, 2nd ed. São Carlos, 2002.
- [70] P. G. de Paula, “Formulação e caracterização de comoósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica,” Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.
- [71] M. C. M. Pereira, “Desenvolvimento de painéis sanduíche com núcleo de concreto leve com caroço de açaí e laminados cimentícios reforçados com fibras de juta,” Universidade Federal do Amazonas, 2019.
- [72] A. P. Vilela, “Tijolo solo-cimento reforçado com partículas vegetais e resíduo de mineração,” Universidade Federal de Lavras, 2019.
- [73] F. E. Linhares Júnior, “Desenvolvimento de tijolos ecológicos com cinzas volantes,” Universidade Federal do Ceará, 2018.
- [74] A. D. M. Barbosa, V. S. M. Rebelo, L. G. Martorano, and V. M. Giacón, “Characterization of acai waste particles for civil construction use,” *Revista Materia*, vol. 24, no. 3, pp. 1–11, 2019.
- [75] G. A. M. Brasileiro, F. F. C. Silva, I. S. dos Santos, and V. F. L. Feitosa,

- “Produção e caracterização de corpos de prova de solo-cimento com fibras e partículas de pó de coco,” *Revista Expressão Científica*, vol. Edição Esp, 2019.
- [76] ABNT, *ABNT NBR 6457 Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, 2016.
- [77] ABNT, *ABNT NBR 7181 Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 2016.
- [78] ABNT, *ABNT NBR 6459 Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 2016.
- [79] ABNT, *ABNT NBR 7180 Solo — Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 2016.
- [80] M. A. G. Marques and L. F. Mendes, “Estudo dos tijolos de solo-cimento quanto à sua adequação às normas vigentes.”
- [81] A. M. Maliska, “Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise,” Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- [82] ABNT, *ABNT NBR 10833 Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento*. Rio de Janeiro, 2012.
- [83] A. B. D. C. P. ABCP, *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais*. 2000, p. 16.
- [84] L. R. de M. Reis, “Utilização de resíduos da construção e demolição na fabricação de tijolos de solo-cimento,” Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2017.
- [85] P. H. C. dos Santos, “Micromorfologia e grupos funcionais do endo e mesocarpo do açaí,” *GMGA – Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada – 11 –*, 2016. <http://gmga.com.br/micromorfologia-e-grupos-funcionais-do-endo-e-mesocarpo-do-acai/> (accessed Aug. 16, 2021).
- [86] D. N. M. Coelho, S. N. Monteiro, V. S. Cândido, and A. C. R. da Silva, “Caracterização microestrutural do Caroço do açaí para aplicação com material compósito de matriz polimérica,” *73º Congresso Anual da ABM – Internacional, parte integrante da ABM Week*, São Paulo, pp. 2375–2382, Oct. 2018.
- [87] S. D. S. Silva, G. F. da Silva, and D. D. F. Castro, “Utilização de fibras do mesocarpo e caroço do açaí como componente de misturas areia-asfalto para a pavimentação na cidade de Manaus/AM,” *J. Eng. Exact Sci.*, vol. 3, no. 4, pp.

- 627–633, 2017, doi: 10.18540/24469416030420170627.
- [88] M. M. Corrêa, J. C. Ker, V. Barrón, J. Torrent, M. P. F. Fontes, and N. Curi, “Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos do ambiente tabuleiros costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano,” *Rev. Bras. Ciência do Solo*, vol. 32, no. 5, pp. 1857–1872, 2008, doi: 10.1590/s0100-06832008000500007.
- [89] E. D. Castro, “Aplicação de Café Nas Propriedades De Tijolos De Solo-Cimento,” *Univ. Fed. Lavras*, p. 114, 2017.
- [90] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 8491: Tijolo Maciço de Solo-Cimento - Requisitos.” Rio de Janeiro, p. 5, 2012, [Online]. Available: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=193713>.
- [91] R. R. Carvalho, “Estudo do tijolo solo cimento em formulações com a adição da Cal,” Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2019.