UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

Propriedades físicas e mecânicas da mistura de solo-cimento, utilizando o cimento LC^3 (*Limestone Calcined Clay Cement*) e a incorporação das matérias-primas: sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana (*Saccharum officinarum L*) e cinza do caroço do açaí (*Euterpe precatoria Martius*)

Doutoranda: Lilyanne Rocha Garcez

Orientador: Miguel Ángel Ramírez Gil
Coorientador: João de Almeida Melo Filho

2023

Lilyanne Rocha Garcez

Propriedades físicas e mecânicas da mistura de solo-cimento, utilizando o cimento LC^3 (*Limestone Calcined Clay Cement*) e a incorporação das matérias-primas: sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana (*Saccharum officinarum L*) e cinza do caroço do açaí (*Euterpe precatória Martius*)

Tese apresentada como requisito à obtenção do título de Doutora do Programa em Ciência e Tecnologia de Materiais da Faculdade de Ciências – Campus de Bauru (SP).

Orientador: Miguel Ángel Ramírez Gil
Coorientador: João de Almeida Melo Filho

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE LILYANNE ROCHA GARCEZ, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 dias do mês de agosto do ano de 2023, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de LILYANNE ROCHA GARCEZ, intitulada **Propriedades físicas e mecânicas da mistura de solo-cimento, utilizando o cimento LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*) e a incorporação das matérias-primas: sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana (*Saccharum officinarum L*) e cinza do caroço do açaí (*Euterpeprecatoria Martius*)**. A Comissão Examinadora foi constituida pelos seguintes membros: Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Materiaise Tecnologia / Faculdade de Engenharia e Ciencias - Unesp/ Câmpus de Guaratingueta, Prof. Dr. HOLMER SAVASTANO JUNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - USP/ Câmpus de Pirassununga, Prof. Dr. JOÃO BOSCO LADISLAU DE ANDRADE (Participação Virtual) do(a) Universidade Federal do Amazonas, Prof. Dr. CARLOS EDUARDO TINO BALESTRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo, Profa. Dra. LUCIANE FARIAS RIBAS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade do Estado do Amazonas. Após a exposição pela doutoranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma virtual, a discente recebeu o conceito final aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Miguel Angel Ramirez Gil

Firmado digitalmente por Miguel Angel Ramirez Gil
Fecha: 2023.08.07 07:24:46 -03'00'

Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL

G215p

Garcez, Lilyanne Rocha

Propriedades físicas e mecânicas da mistura de solo-cimento, utilizando o cimento LC3 (Limestone Calcined Clay Cement) e a incorporação das matérias-primas: sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana (Saccharum officinarum L) e cinza do caroço do açaí (Euterpe precatoria Martius) / Lilyanne Rocha Garcez. -- Bauru, 2023

169 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências, Bauru

Orientador: Miguel Angel Ramirez Gil

Coorientador: João de Almeida Melo Filho

1. Tecnologia sustentável. 2. Matérias-primas alternativas. 3. Resíduos industriais e agroindustriais. 4. Tijolo de solo-cimento. 5. Avaliação do ciclo de vida. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Dedicatória

Aos meus pais e meus sobrinhos

AGRADECIMENTOS

- Aos que contribuíram com a concessão das matérias-primas utilizadas na pesquisa: Enei da Rocha, Levidson Farias, Jasson Carvalho, José Antônio Tavares, Tony Victor Tavares, Vitor Ferreira, Jucinara Bastos e Del Lima; as empresas Cimentos Itambé, Metacaulim do Brasil e Minérios Ouro Branco pelo material concedido para a realização dos ensaios; a empresa Ecotol – Fábrica de Tijolos modulares Ecológicos de Toledo/PR pelo tempo disponibilizado para apresentar e ensinar sobre tijolo de solo-cimento e pelo solo concedido para confecção dos corpos de prova das misturas de solo-cimento.

- Aos técnicos, professores e coordenadores dos laboratórios: Laboratório de Materiais Amazônicos e Compósitos (LAMAC), Laboratório de Ensaio de Materiais, Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia, Laboratório de Técnicas Mineralógicas (LABTECMIN) do Instituto de Ciências Exatas e o Laboratório de Forragicultura e Pastagens da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Amazonas (UFAM); Laboratório do Grupo Crowfoot de Métodos de raios X da Universidade do Estado do Amazonas (UEA); Laboratório de Análises Minerais do Serviço Geológico do Brasil – CPRM/ SUREG/MA; Laboratório Temático de Microscopia Ótica e Eletrônica e do Instituto de Pesquisas da Amazônia (LTMOE/INPA); Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT/SP); Laboratórios de Análises por Técnicas de raios X da Universidade Estadual de Londrina (PR); Laboratório de Materiais Cerâmicos (UNESP – Guaratinguetá); Laboratórios de Mecânica dos Solos e de Materiais de Construção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR – Campus Toledo).

- Aos graduandos em engenharia civil Mateus Lima e Thiago Carlos Campos, ao mestrando Lucas Félix Gonçalves e a arquiteta Daniele Oliveira Balestra pela parceria nos ensaios realizados nos laboratórios. Os corpos de prova foram rompidos, mas o companheirismo na caminhada continua resistente.

- Aos professores que ministraram as disciplinas e tanto nos fizeram amadurecer com os conteúdos e experiência de vida. A turma do Dinter pela amizade fundamental nesse processo de doutoramento e ao Prof. Jamal Chaar pela responsabilidade do convênio UNESP/UFAM.

- Ao Prof. Sérgio Francisco dos Santos que me fez enxergar esta pesquisa por outras dimensões, me orientou a verificar formas de desenvolvê-la e, mais ainda, por contribuir, na banca de qualificação, com as sugestões que delimitam estes escritos. Uma pesquisa é infinita e a caminhada vai sendo construída não só pelos resultados, mas por essas dimensões que passamos a ver durante o processo.

- A Marianne Di Domênico pelas informações e dados referente ao Ecoinvent e principalmente a Prof.ª Nathalie Monteiro por seu primoroso tempo, pelas correções, ensinamentos e manuseio do software OpenLCA. Aprendemos, continuaremos a aprender e nossa parceria será duradoura, tenho certeza disso.

- A Prof.ª Luciane Ribas pelos esclarecimentos e ensinamentos que contribuíram para o desenvolvimento desta tese. É mais difícil trilhar um doutorado se não existirem outros dividindo parte do trabalho, pois é com esse tipo de auxílio que conseguimos crescer e avançar. Como foi importante ter seu companheirismo nesta jornada.
- Ao professor Holmer Savastano Júnior pelas contribuições. Tem uma frase que diz "quem ensina o que sabe muda a história de quem aprende" e a minha história tem sido modificada por cada ensinamento que venho adquirindo.
- Aos professores Elidiane Rangel e Sebastião Ribeiro que se colocaram à disposição para avaliarem a tese havendo necessidade.
- Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra, que por seu interesse e empenho conseguimos vários dados e resultados para esta pesquisa. Nossa parceria foi primorosa, o tempo dedicado aos testes e ensaios contribuíram para meu crescimento pessoal e técnico. Não há como descrever minha gratidão por tudo que foi construído. Se uma pesquisa é realizada pela visão de vários ângulos, nossa pirâmide tem sido consolidada e possui muitas arestas.
- Ao Prof. Dr. João Bosco Ladislau de Andrade. Como é difícil expressar minha gratidão por tudo que este relacionamento representa. Desde a graduação, como sua aluna até minha ida ao mestrado. Suas palavras perante minha defesa da dissertação de mestrado e novamente estamos juntos nessa defesa de tese. Como aprendo com seus ensinamentos. Sou uma privilegiada por tê-lo no meu histórico profissional, que se externa ao pessoal.
- Ao meu coorientador, Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho. Nossa amizade surgiu por conversas sobre assuntos extracurriculares, que posteriormente foi crescendo e a contribuição para o projeto de pesquisa, os questionamentos e análises foram essenciais na construção desta tese. Sabemos que "tudo contribui para o nosso bem" e nessa convicção acreditamos que a escalada é árdua, mas juntos somos fortalecidos.
- Ao Prof. Dr. Miguel Angel Ramirez Gil. Como sou privilegiada em tê-lo como meu orientador. Inicialmente pela amizade conquistada. Mas também por cada diálogo, palavra de incentivo, apoio e, essencialmente, por cada ensinamento durante o período de doutoramento desde as primeiras conversas até a continuidade diária da nossa parceria na pesquisa e na vida!
- A Igreja de Cristo Jesus presente na terra que intercedeu por mim. Vocês foram meu suporte (Efésios 4.2) e se um cordão de três dobras não se quebra facilmente (Eclesiastes 4.12) tenho a certeza de que éramos eu, Deus e vocês unidos em cada batalha.
- A minha família "Bastos Rocha e Garcez". Sinto-me privilegiada em estar galgando ser a primeira doutora da família. A vida de cada um de vocês me inspira. E que Deus continue sendo o centro de nossas vidas e motivo de nossas vitórias.
- A Hosana Emília Leite e Ellem Contente pela amizade diária que tem me fortalecido. Cada conversa é primorosa, cada vídeo e fotos enviados me fazem sorrir e

me animam para seguir em frente, mesmo em meio às tempestades da vida (como uma pandemia). Aos amigos pelas mensagens de carinho que tenho recebido perguntando como estou e se está tudo bem. Como isso faz diferença e nos anima. Às "maratonistas em treinamento" vocês não têm ideia do quanto são especiais na minha vida.

- A Tamile Uehara pelo tempo de amizade e companheirismo onde dividíamos o espaço para nossos estudos e convivência. Ao Jânderson, Evandrícia e Jordan Garcez pelo tempo que passamos juntos onde pude desenvolver parte dos experimentos da tese. A Eudes, Tânia e família pela acolhida nas minhas idas e vindas passando por São Paulo. As psicólogas Luciana Chaves Cavalcante, Larissa Leite Barboza e Julyanne Garcez Ferreira, sócias da clínica Evolluna, que permitiram a utilização do tempo e do espaço da clínica para que eu pudesse escrever esta tese e os professores Regis Pamponet e Maria de Nazaré que tiveram um tempinho para me ajudar na construção da estrutura desta tese.
- Aos meus irmãos e cunhados Mary Anne, Luís, Jânderson, Evandrícia, Julyanne e Vitor minha gratidão por serem minha família, minha moradia e meu apoio, mas principalmente por me presentearem três sobrinhos lindos Alice, Bianca e Jordan a quem dedico este título, pois trouxe comigo a fotografia deles que fixei na escrivaninha usada para meus estudos e isso tem me fortalecido a cada dia, pois olhar para eles me incentivava a seguir essa caminhada e meu desejo é que eles saibam que a titia os ama e quer ser exemplo de vida pra eles.
- Ao meu esposo Vinicius Cavalcanti, pois sou imensamente feliz por você fazer parte da minha vida (e também as suas filhas Ana Luiza e Ana Rebeca). Não existe uma forma concreta de expressar o sentimento de gratidão.
- Aos meus pais. Vocês são meu orgulho. Não existem palavras em nenhum idioma que expressem minha gratidão. Vocês têm sido meu sustento: quando saí de Codajás (AM) carregando o sonho de uma faculdade pública, os cinco anos de graduação, na minha ida ao projeto Radical Latino-americano em outro país, sair novamente de casa e atravessar o Brasil para fazer mestrado na Paraíba e agora mais uma vez nesse tempo em São Paulo e no Paraná. Se não fosse vocês eu não teria conseguido. Muito obrigada!
- E o meu principal agradecimento é ao meu Deus, que um dia enviou seu filho Jesus Cristo do céu e se fez um de nós, não tinha qualquer beleza ou majestade que nos atraísse, nada em sua aparência para que o desejássemos, foi desprezado e rejeitado pelos homens, mas tomou sobre si as nossas enfermidades e sobre si levou as nossas dores e o castigo Dele nos trouxe a paz (Isaías 53) e mesmo derramando gotas de sangue que cobriram o chão no caminho ao calvário, morreu e ressuscitou ao terceiro dia por mim... por nós... Por isso, minha gratidão, a esse Deus que meu deu a vitória em Cristo, que perdoou minhas faltas e restaurou a minha comunhão com Ele. Glória, Honra e Louvor seja a Deus, pois Ele é o Rei desde antes da criação do mundo e para sempre será coroado.

RESUMO

A crescente demanda por tecnologia sustentável em diversas áreas das engenharias tem impulsionado pesquisas com excelentes resultados quanto ao uso de resíduos e sua aplicação como matérias-primas alternativas no desenvolvimento de novos produtos. Diante desse contexto, utilizou-se para esta pesquisa os resíduos industriais: sílica ativa e cinza volante e os resíduos agroindustriais: cinza do bagaço de cana (*Saccharum officinarum L*) e cinza do caroço do açaí (*Euterpe precatoria Martius*) aplicados à mistura de solo-cimento. Portanto, esta tese teve como objetivo avaliar o efeito da incorporação dos resíduos industriais e agroindustriais nas propriedades mecânicas, físicas e ambientais da mistura solo-cimento, utilizando de modo comparativo o cimento de alta resistência inicial (CP-V) e o cimento LC^3 (*Limestone Calcined Clay Cement*), escolhendo, a partir dos ensaios laboratoriais realizados, a mistura mais viável tecnicamente e que demonstrasse eficácia para a produção do tijolo de solo-cimento em escala real. Com base nesse contexto foram produzidas misturas no qual o teor de clínquer foi substituído em 10 % pelos resíduos industriais e agroindustriais supracitados. Os valores de resistência à compressão aos 28 dias de todas as misturas foram considerados dentro dos padrões estabelecidos por norma técnica, com destaque aos resultados mecânicos e estatísticos para a mistura com a cinza do caroço de açaí, os quais apresentou os maiores valores. Quanto ao cenário ambiental, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida, foi possível observar que os menores impactos e consequências ambientais foram das misturas contendo os resíduos agroindustriais e, ainda, as que se utilizou o cimento LC^3. Após a análise dos estudos aplicados, destaca-se que a mistura contendo a cinza do caroço de açaí e o cimento LC^3 apresentaram resultados técnicos e normativos satisfatórios em relação às propriedades físicas, mecânicas, ambientais e com comprovações estatísticas. Com o intuito de proporcionar um material alternativo mais sustentável, optou-se em produzir o tijolo de solo-cimento em escala real utilizando o cimento LC^3 e incorporou-se à mistura, 20 % de cinza do caroço de açaí em substituição do teor de clínquer do cimento LC^3 produzido. A resistência média de compressão do tijolo em escala real foi de 5,8 MPa, superior ao mínimo estabelecido por norma técnica destacando, portanto, que a cinza do caroço do açaí incorporada no tijolo de solo-cimento cumpre os requisitos da norma técnica, ademais, considera-se de grande relevância este estudo, quanto à sua originalidade e aos critérios técnicos avaliados, considerando que o tijolo produzido pode agregar valores de sustentabilidade, trazendo benefícios, principalmente a municípios de pequeno porte da região amazônica que produzem a polpa do fruto do açaí em escala artesanal e ainda, apresentam dificuldades de logísticas para aquisição de tijolo cerâmico convencional.

Palavras-chave: Tecnologia sustentável, matérias-primas alternativas, resíduos industriais e agroindustriais, tijolo de solo-cimento, avaliação do ciclo de vida.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable technology in several areas of engineering has driven research with excellent results regarding the use of waste and its application as alternative raw materials in the development of new products. In this context, industrial residues were used for this research: active silica and fly ash and agro-industrial residues: sugarcane bagasse ash (Saccharum officinarum L) and açaí stone ash (Euterpe precatoria Martius) applied to the soil-cement mixture. Therefore, this thesis aimed to evaluate the effect of the incorporation of industrial and agro-industrial residues on the mechanical, physical, and environmental properties of the soil-cement mixture, using in a comparative way the high initial resistance cement (CP-V) and the LC^3 cement (Limestone Calcined Clay Cement), choosing, based on the laboratory tests carried out, the most technically viable mixture that demonstrated effectiveness for the production of soil-cement brick on a full scale. On this context, mixtures were produced in which the clinker content was replaced by 10 % by the aforementioned industrial and agro-industrial residues. The compressive strength values at 28 days of all mixtures were considered within the standards established by technical norm, with emphasis on the mechanical and statistical results for the mixture with açaí stone ash, which presented the highest values. As for the environmental scenario, through the Life Cycle Assessment, it was possible to observe that the lowest impacts and environmental consequences were of the mixtures containing agro-industrial residues and, also, those that used LC^3 cement. After analyzing the applied studies, it is highlighted that the mixture containing açaí stone ash and LC^3 cement presented satisfactory technical and normative results in relation to physical, mechanical, environmental properties and statistical evidence. In order to provide a more sustainable alternative material, it was decided to produce the soil-cement brick on a full scale using LC^3 cement and 20 % of ash from the açaí stone was incorporated into the mixture, replacing the clinker content of the LC^3 cement produced. The average compressive strength of the brick in full scale was 5.8 MPa, higher than the minimum established by technical standard, highlighting, therefore, that the ash from the açaí stone incorporated in the soil-cement brick meets the requirements of the technical standard, in addition, this study is considered of great relevance, regarding its originality and the technical criteria evaluated, considering that the brick produced can add sustainability values, bringing benefits, mainly to small municipalities in the Amazon region that produce the pulp of the fruit of the açaí on an artisanal scale and also present logistical difficulties for the acquisition of conventional ceramic bricks.

Keywords: Sustainable technology, alternative raw material, industrial residues, agro-industrial residues, soil-cement brick, life cycle assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais fases do clínquer.....28

Figura 2. Materiais, equipamento para confecção e modelo do tijolo de solo-cimento.....33

Figura 3. Geometria e dimensões do tijolo de solo-cimento.....33

Figura 4. Palmeira do açaizeiro (a), cacho contendo o fruto (b), os frutos do açaí no pedúnculo (c) a fruta (d), o caroço do açaí após processamento (e) e a polpa do açaí (f)...39

Figura 5. (a) Solo 1. (b) Ensaios de umidade, (c) limites de liquidez e (d) limites de plasticidade do solo.....50

Figura 6. (a) Caroços do açaí após o processamento da polpa, ainda úmidos; (b) caroços do açaí secos em temperatura ambiente; (c) caroços da espécie Euterpe precatória utilizados nos ensaios laboratoriais.....52

Figura 7. (a) Caroços utilizados para a morfoanatomia; (b) caroços no moinho de facas; (c) caroços moídos para realizar os ensaios de caracterização.....53

Figura 8. (a) Caroços moídos para determinação do teor de umidade (b) e em mufla para verificar o teor de perda ao fogo e o teor de cinzas (c).....54

Figura 9. (a) Amostra triturada, (b) após o beneficiamento térmico e (c) amostra após queima e moagem.....56

Figura 10. (a) Ensaios de resistência à compressão para determinar o índice de pozolanicidade da argamassa com traço padrão e (b) traço com a cinza do caroço de açaí; (c) Ensaios para determinar o tempo inicial e final de pega com o traço padrão e (d) o traço com a cinza do caroço de açaí.....58

Figura 11. Fluxograma do planejamento experimental elaborado visando a produção do tijolo de solo-cimento. 59

Figura 12. (a) Cimento Portland CP V, (b) metacaulim, (c) fíler, (d) cinza do caroço de açaí.....60

Figura 13. (a) Homogeneização manual dos materiais; (b) compactação dos corpos de prova cilíndricos; (c) corpo de prova padrão da mistura solo-cimento; (d) corpo de prova da mistura solo-cimento e cinza do caroço de açaí.....62

Figura 14: (a) Fluxograma do processo de produção do tijolo de solo-cimento SC_1 e a delimitação da fronteira do sistema; (b): Fluxograma do processo de produção do tijolo de solo-cimento SC_2 e a delimitação da fronteira do sistema.....66

Figura 15: (a) Fluxograma do processo de produção do tijolo de solo-cimento SC_3 e a delimitação da fronteira do sistema; (b): Fluxograma do processo de produção do tijolo de solo-cimento SC_4 e a delimitação da fronteira do sistema.....67

Figura 16. (a) Tijolo de solo-cimento tipo paver com as dimensões de altura e largura, (b) tijolo após 7 dias de cura em equipamento de ensaios destrutivos, (c) tijolo após rompimento.....72

Figura 17. (a) Fruto interligado ao cacho pelo pedúnculo; (b) Camada fina do epicarpo após despolpamento do caroço do açaí; (c) Caroço revestido com fibras mesocárpicas (FM) e a Rafe (RF); (d) Endosperma do caroço; (e) Embrião, Hilo e o Poro Germinativo do caroço.....73

Figura 18. (a) Termogravimetria e a (b) sua derivada, aplicadas às amostras do caroço do açaí moídos.....77

Figura 19. Difratograma das amostras do caroço do açaí moídos 80

Figura 20. Difratogramas (a) do caroço moído com linha base corrigida (LBC) de P_2O_5 fase alpha e (b) caroço moído com linha base corrigida (LBC) de CaO_2 e K_2O.....81

Figura 21. Curvas granulométricas da amostra *Euterpe precatória* (AM) beneficiada termicamente em cinco temperaturas diferentes.....82

Figura 22. Histogramas do volume da amostra AM beneficiada termicamente em cinco temperaturas diferentes.....84

Figura 23. Difratometria da amostra beneficiada termicamente em cinco temperaturas..85

Figura 24. (a)(b)(c) Micrografias do caroço de açaí *in natura* e (d)(e)(f) micrografias da cinza do caroço de açaí.....88

Figura 25. Mapas elementares por meio da leitura realizada por EDS apresentando os teores de (b) Si, (c) K e (d) Ca na amostra.....88

Figura 26. Tempo de início e fim de pega da argamassa padrão e da argamassa com a substituição do cimento em 25 % da cinza do caroço do açaí.....89

Figura 27. Ensaio de resistência à compressão do corpo de prova com a argamassa padrão e com a substituição do cimento em 25 % da cinza do caroço do açaí.....90

Figura 28. Curva granulométrica dos solos e descrição das proporções e tamanho dos grãos conforme estabelecido pela ABNT.....94

Figura 29. Resistência à compressão da mistura solo-cimento e adições.....99

Figura 30. Teores de umidade dos corpos de prova e os valores de saturação após sete dias submersos.....101

Figura 31. Resultado do Teste Tukey aplicado a partir dos resultados estatísticos da ANOVA.....105

Figura 32. Resultado gráfico da Avaliação do Ciclo de Vida, analisada pelo método CM 2001 no software OpenLCA para as dez misturas de solo-cimento.....106

Figura 33. (a) Resultado gráfico comparativo da AVC para as de misturas de solo-cimento SC_1, SC_2, SC_3 e SC_4. (b) Resultado gráfico comparativo da AVC para as de misturas de solo-cimento SC_1, SC_2, SC_5 e SC_6.....116

Figura 34. (a) Resultado gráfico comparativo da AVC para as de misturas de solo-cimento SC_1, SC_2, SC_7 e SC_8. (b) Resultado gráfico comparativo da AVC para as de misturas de solo-cimento SC_1, SC_2, SC_9 e SC_{10}.....119

Figura 35. Representação do desvio padrão em relação à média obtida por meio da simulação de Monte Carlo.....121

Figura 36. Resistência à compressão do tijolo de solo-cimento.....125

Figura 37. Teor de absorção de água do tijolo de solo-cimento.....127

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Tipos de cimentos produzidos e suas características.....29

Quadro 2. Nomenclatura usada para as misturas de solo-cimento com o cimento CP V, cimento LC^3 e adições 61

Quadro 3. Categoria de impactos globais avaliadas.....65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Constituintes fundamentais do cimento Portland 27

Tabela 2. Características das principais fases do clínquer 28

Tabela 3. Quantidade de materiais em massa utilizados nas misturas.....61

Tabela 4. Nomenclatura e quantidade de materiais utilizada para confecção dos corpos de prova com LC^3.....70

Tabela 5. Média dos teores de umidade, perda ao fogo e cinzas das amostras do caroço do açaí moído 74

Tabela 6. Composição química das amostras do caroço do açaí pelo método de FRX 79

Tabela 7. Parâmetros quantitativos das curvas de distribuição granulométrica.....83

Tabela 8. Composição química por FRX da cinza do caroço de açaí.....86

Tabela 9. Limites de liquidez, plasticidade e o índice de plasticidade dos solos 1 e 2, em porcentagem.....93

Tabela 10. Composição química do solo obtida utilizando a técnica de FRX.....95

Tabela 11. Composição química por FRX das matérias-primas que compõem o cimento LC^3.....96

Tabela 12. Composição química por FRX das matérias-primas que foram utilizadas como adição na mistura solo-cimento.....97

Tabela 13. Anova referente as proporções de cinza e os tipos de solo na mistura solo-cimento.....104

Tabela 14. Anova referente as variações das misturas com solo-cimento.....129

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 17
CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 22
1.1. Contextualização 22
1.2. Estabilização mecânica, física e química da mistura de solo-cimento 23
1.3. O cimento Portland e suas características 27
1.4. O cimento LC^3 (*Limestone Calcined Clay Cement*) 29
1.4.1. Aspectos ambientais do cimento LC^3 31
1.5. Tijolos de solo-cimento 32
1.6. Resíduos industriais e agroindustriais incorporados à mistura solo-cimento 35
1.6.1. Sílica ativa 35
1.6.2. Cinza volante 36
1.6.3. Cinza do bagaço da cana de açúcar 37
1.6.4. Cinza do caroço de açaí 38
1.6.4.1. Caroço de açaí: o gênero Euterpe (palmeira e o fruto) 38
1.6.4.2. Características da biomassa do caroço de açaí 39
1.6.4.3. A cinza do caroço de açaí aplicada em matriz cimentícia 40
1.7. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) 41
1.7.1. Componentes da ACV 42
1.7.2. A ACV na construção civil 43
1.7.3. A ACV aplicada à produção de tijolo de solo-cimento 44
CAPÍTULO 2 – MATERIAIS E MÉTODOS 46
2.1. Matérias-primas de partida 46
2.1.1. Solo 46
2.1.2. Cimento 46
2.2. Matérias-primas constituintes do Cimento LC^3 47
2.2.1. Metacaulinita 47
2.2.2. Fíler 47
2.2.3. Clínquer e gesso 47
2.3. Resíduos incorporados aos cimentos 48
2.3.1. Sílica ativa 48
2.3.2. Cinza volante 48
2.3.3. Cinza do bagaço de cana 48
2.3.4. Caroço de açaí 48
2.4. Caracterização das matérias-primas 49
2.4.1. Caracterização das matérias-primas de partida 49
2.4.1.1. Solo 49
2.4.1.2. Cimento CP V 51

2.4.2. Caracterização das matérias-primas base do cimento LC^3 51
2.4.3. Caracterização dos resíduos inseridos à composição do cimento 51
2.5. Caracterização do caroço de açaí 51
2.5.1. Beneficiamento e caracterização inicial do caroço de açaí 52
2.5.2. Análise morfoanatômica do caroço de açaí 52
2.5.3. Trituração do caroço de açaí 52
2.5.4. Teor de umidade dos caroços moídos 53
2.5.5. Teor de perda ao fogo e teor de cinzas dos caroços moídos 53
2.5.6. Análise termogravimétrica e termogravimetria derivada dos caroços moídos 54
2.5.7. Difratometria de raios X e fluorescência de raios X dos caroços moídos 54
2.5.8. Beneficiamento térmico do caroço do açaí e a produção das cinzas 55
2.6. Produção e caracterização da cinza do caroço de açaí 56
2.6.1. Caracterização física, química e microscópica da cinza do caroço de açaí 57
2.6.2. Índice de pozolanicidade da cinza produzida a 600 °C 57
2.7. Planejamento experimental 58
2.8. Produção e dosagens das misturas de solo-cimento 60
2.8.1. Produção do cimento LC^3 60
2.8.2. Dosagem das matérias-primas 60
2.8.3. Produção das misturas de solo-cimento com a incorporação dos resíduos 60
2.9. Propriedades das misturas de solo-cimento com a incorporação dos resíduos 62
2.9.1. Ensaio de análise das propriedades mecânica e física 62
2.9.2. Teste estatístico – Análise de variância (Anova) 62
2.10. Avaliação do ciclo de vida (ACV) das misturas de solo-cimento 64
2.10.1. Objetivo e escopo do estudo da Avaliação do ciclo de vida (ACV) 64
2.10.2. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) 65
2.10.3. Software, levantamento do inventário e base de dados 68
2.10.4. Matriz Pedigree 68
2.10.5. Interpretação dos resultados da ACV 69
2.11. Viabilidade técnica do solo-cimento com diferentes proporções da cinza do caroço de açaí 70
2.12. Confecção do tijolo de solo-cimento + cinza do caroço de açaí em escala real 71
CAPÍTULO 3 – PROPRIEDADES DO CAROÇO E DA CINZA DO CAROÇO DE AÇAÍ 73
3.1. Características do caroço de açaí 73
3.1.1. Morfoanatomia do caroço do açaí (*Euterpe oleracea e Euterpe precatoria*) 73
3.1.2. Teor de umidade, perda ao fogo e teor de cinzas 74
3.1.3. Análise térmica: termogravimetria (TG) e a derivada (DTG) 76
3.1.4. Fluorescência de raios X (FRX) e difratometria de raios X (DRX) 78

3.2. Características do caroço após beneficiamento térmico e moagem 81
3.2.1. Granulometria a laser 81
3.2.2. Difratometria de raios X (DRX) 84
3.3. Características da cinza do caroço de açaí produzida 86
3.3.1. Característica química obtida por meio do FRX 86
3.3.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 87
3.3.3. Ensaios de caracterização cimentante e pozolânica da cinza do caroço de açaí 89
CAPÍTULO 4 – PROPRIEDADES DA MISTURA DE SOLO-CIMENTO 93
4.1. Características das matérias-primas de partida 93
4.1.1. Características do solo 93
4.1.2. Características das matérias-primas base para o cimento LC^3 96
4.1.3. Características das adições utilizadas na mistura solo-cimento 97
4.2. O efeito das adições nas misturas solo-cimento 98
CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) 106
5.1. Resultados da ACV para as misturas de solo-cimento 106
5.2. Resultado comparativo entre os resíduos industriais incorporados às misturas 115
5.3. Resultado comparativo entre os resíduos agroindustriais incorporados às misturas 118
5.4. Cálculos de incerteza por meio da Simulação Monte Carlo 120
CAPÍTULO 6 – PROPRIEDADES DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO EM ESCALA REAL 124
6.1. Efeitos da incorporação da cinza do caroço de açaí na mistura solo-cimento 124
6.1.1. Ensaio de resistência a compressão 124
6.1.2. Ensaio de absorção de água 127
6.1.3. Teste estatístico – Análise de variância (Anova) 129
6.2. Propriedades do tijolo de solo-cimento 130
6.3. Aspectos de sustentabilidade do tijolo: solo-cimento com cinza do caroço de açaí. 133
CONCLUSÕES 135
REFERÊNCIAS 138
ANEXO 1 - Normas técnicas citadas na tese 157
APÊNDICE 1 – PARTE A 158
APÊNDICE 1 – PARTE B 160

INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, vários estudos no campo da ciência dos materiais têm sido pesquisados e aprimorados a partir do aproveitamento de diversos tipos de matérias-primas, tais como os resíduos gerados por indústrias ou agroindústrias que surgem como uma fonte alternativa de recurso para o desenvolvimento de materiais tecnológicos sustentáveis.

Com a crescente demanda de urbanização, impactos ambientais foram evidenciados de maneira negativa à sociedade, devido a fatores como emissões de poluentes e consumo energético associados à produção de insumos e materiais de construção. Considerando os esforços para regularizar os impactos econômicos e ambientais do setor da construção civil, observa-se um aumento no desenvolvimento de novas tecnologias construtivas, bem como materiais de construção e técnicas de construção sustentáveis (ALTUWAIM et al., 2023).

Os tijolos de solo-cimento têm se destacado como uma opção atraente à construção civil, pois apresentam baixo custo de produção e menores impactos ambientais em seu processo de fabricação quando comparado com os tijolos cerâmicos convencionais. A adição de cimento ao solo contribui significativamente para o aumento de sua resistência mecânica, tornando o material estruturalmente resistente, estável e durável.

Apesar do solo ser o elemento com maior proporção nos tijolos, a quantidade de cimento utilizada para estabilizá-lo é considerada alta no aspecto técnico-ambiental. Consequentemente, uma forma bem-sucedida de reduzir o impacto ambiental deste tijolo constitui em substituir total ou parcialmente o teor de cimento por outras matérias-primas com menores impactos ambientais. Dias *et al*. (2022) destacam que o uso combinado da argila calcinada e do calcário possui grande potencial para ser empregado em substituição parcial do clínquer no cimento, sem que haja perda nas propriedades mecânicas.

Nesse contexto, o cimento denominado na literatura como LC^3 (*Limestone calcined clay cement*) apresenta vantagens técnicas relacionadas à durabilidade e propriedades mecânicas, além de atender aos critérios de viabilidade econômica, baixo custo de investimento e disponibilidade fácil de matérias primas, pois emprega os mesmos insumos da produção do cimento: argila e calcário. Além disso, ocasionaria em ganhos ambientais, tendo em vista a grande redução de clínquer em prol da mistura de argila calcinada e calcário, materiais de menor gasto energético e de menor emissão de CO^2. (AL-NOAIMAT et al., 2023).

Pela ótica da sustentabilidade, pesquisas com solo-cimento visam minimizar impactos ambientais e consumo de energia, além disso, é possível analisar o desempenho físico e mecânico das misturas de solo-cimento com a inserção de matérias-primas alternativas, tais como resíduos sólidos gerados em indústrias ou agroindústrias. Estudos com estes aspectos contribuem com o desenvolvimento de materiais para o setor da construção civil, pois alguns destes resíduos são utilizados como matéria-prima em substituição ao cimento.

No Brasil, as adições minerais normalmente aplicadas à composição do cimento Portland são a escória de alto forno, sílica ativa e a cinza volante, que contribuem para aumentar a resistência mecânica e compacidade, diminuindo a permeabilidade do sistema com o processo de refinamento dos poros, principalmente, devido à ocorrência de reações pozolânicas.

Já entre os resíduos agroindustriais, cita-se como exemplo a cinza de bagaço de cana-de-açúcar comumente aplicada em matriz cimentícia, por ser constituída quimicamente de quantidades significativas de sílica (SiO_2) e óxido de cálcio (CaO), apresentando propriedades pozolânicas que reagem com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (CORDEIRO, 2006).

Vale salientar que pesquisas com a incorporação resíduos em solo-cimento não demonstram apenas a importância da aplicabilidade técnica, mas atuam como indicadores da tecnologia de baixo carbono. Destaca-se também a importância de analisar parâmetros como disponibilidade de recursos, que representa a sustentabilidade e pode servir de impulso para práticas de políticas sustentáveis.

Considerando a temática das propriedades técnicas da mistura de solo-cimento, aliado a necessidade do setor das engenharias de materiais e civil na busca de novos produtos sustentáveis interligados com valores socioeconômicos e a regionalidade da Amazônia, delimitou-se o **problema de pesquisa** que direciona esta tese as questões norteadoras: Como resultará o desempenho mecânico em um tijolo de solo-cimento produzido com o cimento LC^3? As categorias de impactos ambientais avaliadas por meio do ciclo de vida apresentam aspectos positivos com a incorporação de resíduos industriais e agroindustriais em substituição ao teor de clínquer do cimento LC^3? As cinzas do caroço do açaí possuem propriedades que influenciam no processo de estabilização do solo e reforçam as propriedades mecânicas da mistura de solo-cimento?

Por **hipótese** deste trabalho, é possível supor que a mistura do solo utilizando o cimento LC^3 seja uma alternativa viável tecnicamente e que a substituição parcial do cimento por resíduos industriais e agroindustriais influenciam positivamente em termos de propriedades físicas e mecânicas da mistura. Supõe-se também que o tijolo prensado de solo-cimento utilizando a cinza do caroço de açaí em substituição parcial do clínquer no cimento LC^3 resultará no produto viável quanto aos aspectos técnicos e sustentáveis e em conformidade com as exigências normativas.

Destaca-se ainda, que partir de uma **análise bibliométrica** utilizando como principal indicador o "solo-cimento" nas plataformas Scielo, Scopus, Science Direct, Google Scholar e Web of Science, verificou-se que foram publicados nos últimos 25 anos, aproximadamente 73 mil artigos científicos, principalmente quanto a aplicação do cimento para estabilização do solo. Destes artigos, 28 % apresentam resultados quanto a incorporação de matérias residuais na mistura de solo-cimento, sendo 23 % com a aplicação da sílica ativa, 17 % com a aplicação da cinza volante e menos de 2 % com cinza agroindustrial. Reitera-se também que dos artigos referentes ao cimento LC^3, 83 % foram publicados nos últimos dez anos.

A Região Amazônica produz e exporta a polpa do fruto do açaizeiro e, em consequência desta demanda comercial, tem crescido o processo de despolpamento e a geração de resíduos provenientes dos caroços do fruto. O fruto de açaí, tem sido fonte de estudos, principalmente nos últimos dez anos, porém, a maioria das publicações são nutricionais e medicinais, no qual somente 23 % apresentam aplicabilidade tecnológica do caroço. Desta porcentagem, somente 2 % são de pesquisas que utilizam o caroço do açaí ou da fibra que reveste o caroço em matriz cimentícia.

Com base no estudo bibliométrico não se localizou registros quanto ao uso do cimento LC^3 em tijolos de solo-cimento. Ademais, existe uma lacuna quanto ao uso do caroço do açaí, beneficiado ou não, como matéria-prima alternativa em substituição parcial do cimento na produção de tijolos ou sobre o efeito das cinzas nas propriedades tecnológicas e microestruturais dos tijolos de solo-cimento.

Neste sentido, destaca-se a relevância desta tese para a ciência dos materiais, considerando um estudo promissor das propriedades físicas e mecânicas da mistura de solo-cimento com o cimento LC^3, reiterando que não foram encontradas publicações a partir da incorporação da cinza do caroço do açaí em tijolo de solo-cimento utilizando o cimento LC^3, acrescentando a este fato, a originalidade e o ineditismo desta pesquisa.

Considerando tais premissas e em resposta ao problema de pesquisa, delimitou-se como **objetivo geral**: Avaliar o efeito da incorporação de resíduos industriais e agroindustriais nas propriedades mecânicas, físicas e ambientais da mistura solo-cimento, utilizando de modo comparativo o cimento de alta resistência inicial (CP-V) e o cimento LC^3 (*Limestone Calcined Clay Cement*), escolhendo a mistura mais viável tecnicamente e demonstrando sua eficácia para a produção do tijolo de solo-cimento em escala real.

A fim de se alcançar o objetivo geral, foram traçados os seguintes **objetivos específicos**:

- Produzir o cimento LC^3 com a mistura manual da metacaulinita, fíler e alterando em 10 % o teor da composição do clínquer e gesso com a substituição alternada das cinzas dos resíduos industriais: sílica ativa e cinza volante e dos resíduos agroindustriais: cinza do bagaço de cana (*Saccharum officinarum L*) e cinza do caroço do açaí (*Euterpe precatória Martius*), para aplicação e análise das características mecânicas, físicas e ambientais da mistura de solo-cimento;
- Comparar aspectos ambientais das misturas de solo-cimento produzidas com a inserção dos resíduos industriais e agroindustriais por meio da avaliação do ciclo de vida, considerando as categorias de impacto: aquecimento global, depleção de recursos abióticos, depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, toxicidade humana, ecotoxicidade, acidificação e eutrofização;
- Utilizar as proporções de 5, 10, 15 e 20 % da cinza do caroço de açaí em substituição ao teor de clinquer e gesso da composição LC^3, verificando a influência destes teores nas propriedades físicas e mecânicas da formulação de solo-cimento no estado endurecido, a partir dos resultados de absorção de água, resistência mecânica à compressão e análises estatísticas;
- Produzir tijolos prensados de solo-cimento em escala real com a incorporação da cinza do caroço do açaí na proporção de 20 % em substituição ao clinquer e gesso do cimento LC^3 aplicado ao solo, analisando as propriedades técnicas e sustentáveis do tijolo confeccionado.

Com vistas em atender aos objetivos propostos, organizou-se esta pesquisa em seis capítulos. O **capítulo 1** descreve uma revisão da literatura abordando teoria referente a matriz solo-cimento e suas características, bem como as propriedades do cimento

Portland comum, de alta resistência inicial e do cimento LC^3, considerado uma alternativa de ligante com menor impacto ambiental ao ser comparado com outros tipos de cimento.

O **capítulo 2** apresenta e especifica as matérias-primas de partida, de elemento base para a produção do cimento LC^3, bem como os resíduos e a matéria-prima secundária, a exemplo da cinza do caroço do açaí que foi produzida como parte desta pesquisa. Neste capítulo também são descritos os métodos executados para caracterização dessas matérias-primas e o procedimento experimental utilizado para as dosagens, produção e caracterização das misturas de solo-cimento e do tijolo de solo-cimento, bem como as análises estatísticas aplicadas e os dados e informações referentes os procedimentos metodológicos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

O **capítulo 3** apresenta as propriedades do caroço de açaí *in natura*, moído, beneficiado termicamente e as características da cinza do caroço de açaí que foi aplicada à mistura de solo-cimento.

Os resultados referentes ao comportamento mecânico (esforços de compressão) e estatístico das misturas de solo-cimento são apresentados no **capítulo 4**. Neste capítulo, todas as análises são realizadas considerando os cimentos Portland de alta resistência inicial (CP V) e o cimento LC^3 produzido. Tais cimentos foram adicionados ao solo após serem modificados com a incorporação alternada dos resíduos industriais: sílica ativa e cinza volante; do resíduo agroindustrial: cinza do bagaço de cana; e da cinza do caroço de açaí produzida a partir do resíduo agroindustrial: caroço de açaí.

Para todas estas misturas de solo-cimento realizou-se a ACV e no **capítulo 5** são apontados comentários referentes aos aspectos ambientais observados.

Uma das matrizes de solo-cimento foi selecionada para verificar diferentes proporções da incorporação da matéria-prima alternativa, neste caso, a cinza do caroço de açaí, cujos resultados mecânicos e estatísticos são demonstrados no **capítulo 6**. Além disso, neste capítulo também é apresentada a avaliação das propriedades do tijolo de solo-cimento confeccionado com a mistura considerada adequada técnica e ambientalmente.

Por fim, são abordadas as principais conclusões, trazendo-se as principais aprendizagens e observações, destacando a importância e a contribuição do presente trabalho, bem como as sugestões para pesquisas futuras. Posteriormente, expõem-se os elementos pós-textuais aqui configurados como referências, anexo e apêndice.

CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1. Contextualização

A engenharia de materiais tem contribuído para a aplicação de matérias-primas alternativas em diversos produtos, destacando com isso os aspectos que podem compor os três pilares da sustentabilidade: da esfera ambiental na produção de novos materiais que visam soluções de geração e descarte de resíduos; da esfera social com alternativas de um material de fácil acesso à sociedade; e da esfera econômica com a agregação de valor e oportunidade de produção de baixo custo.

Nesse contexto, as cerâmicas tecnológicas com propriedades inovadoras utilizadas na construção civil possuem grande interesse científico (ACerS, 2021). Nas últimas décadas, uma variedade de novos materiais cerâmicos foi desenvolvida, que se caracterizam, principalmente, pelo controle de suas composições, das dimensões de suas partículas e do processo de produção dos seus componentes. A cerâmica tradicional como os tijolos cerâmicos convencional e o cimento Portland são importantes para a construção civil com vasto campo de aplicação, porém, vale destacar os impactos ambientais decorrentes do processo de fabricação destes produtos.

Na produção de tijolos convencionais, as substâncias poluentes emitidas em maior quantidade são o dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO_2), material particulado e, com menor emissão, os compostos orgânicos voláteis. Os principais poluentes emitidos durante o processo de fabricação do cimento são: material particulado, dióxido de carbono (CO_2), óxidos de enxofre (SO_x) e nitrogênio (NO_x) e ainda os poluentes atmosféricos perigosos como as dioxinas, furanos, metais, compostos orgânicos voláteis e ácidos halogenados (BARBOSA, *et al*., 2012; CNI-ABCP, 2012).

Para a produção do clínquer, principal constituinte do cimento, ocorre um índice elevado de emissão de CO_2, que o caracteriza como responsável por cerca de 10 % das emissões globais (KINUTHIA e KIRGIZ, 2020). O uso de matérias-primas alternativas ao cimento Portland tem um enorme potencial para reduzir as emissões de carbono e o consumo de recursos naturais decorrentes do processo de fabricação do cimento, principalmente onde uma fração significativa do cálcio necessário para o clínquer é fornecido em uma forma descarbonatada (DHANDAPANI *et al*., 2018).

Embora os problemas associados aos impactos ambientais ainda sejam extensos no decorrer dos processos cerâmicos supracitados, é de suma importância científica a busca por alternativas de novos materiais e produtos sustentáveis, que substituam os

materiais convencionais com melhor ou o mesmo desempenho, na indústria da construção.

Vilela *et al*. (2020) discorreram sobre a mistura do solo-cimento como tecnologia de grande potencial para a construção civil, sendo uma alternativa pouco poluente, de baixo consumo energético, resistente à ação da água e a carregamentos de esforços e, quando utilizado como alvenarias, apresentam conforto térmico devido à sua porosidade que permite a troca de calor com a temperatura ambiente.

Kongkajun *et al*. (2020) destacam a crescente demanda quanto ao uso de tijolos prensados de solo-cimento na construção civil, pois o processo de produção do tijolo de solo-cimento é simples, compondo as fases de destorroamento, peneiramento e secagem do solo, mistura homogênea com o cimento, adição de água, prensagem da mistura em prensas mecânicas ou manuais, desforma e cura, segundo a NBR 10.833 (ABNT, 2012).

Como forma de aprimorar a busca de novos materiais sustentáveis, considera-se pertinente a análise das proporções de dosagens e incorporação de matérias-primas de resíduos industriais, como a sílica, cinza volante e de resíduos agroindustriais, como a cinza do bagaço de cana e do caroço de açaí, na mistura de solo-cimento, com a finalidade de obter um tijolo de solo-cimento com propriedades de resistência mecânica e absorção de água que demonstrem a eficiência e seu uso na construção civil, destacando-o como tecnologia alternativa e de práticas sustentáveis.

1.2. Estabilização mecânica, física e química da mistura de solo-cimento

O emprego do solo na construção civil ocorre desde a antiguidade e atualmente tem sido utilizado obedecendo critérios técnicos e normativos, pois as propriedades desse material são complexas e heterogêneas, ressaltando a importância de conhecer os elementos físicos e químicos que influenciam na estabilização dos solos.

As propriedades dos solos são diversas, porém, com base nas características e tema desta tese, serão enfatizados apenas os aspectos: granulometria, composição mineralógica e compactação, pois interferem diretamente na estabilização e resistência mecânica dos solos.

Num sentido amplo, a estabilização do solo consiste em modificar as características da estrutura solo-água-ar original com a finalidade de obter propriedades necessárias a uma aplicação particular, pelo qual o solo, sob efeito de cargas aplicadas, torna-se mais resistente à deformação e ao deslocamento do que o solo original (PINTO, 2000). As principais modificações ocorridas nas propriedades e no processo de

estabilização de um solo podem ser alteradas por métodos mecânicos, físicos e/ou químicos (BRITO & PARANHOS, 2017).

A estabilização mecânica consiste na compactação do solo por uma aplicação de força mecânica que afeta diretamente a densidade, porosidade, permeabilidade, compressibilidade e resistência. A estabilização física atua diretamente sobre a textura do solo onde são adicionadas frações de partículas de diferentes granulometrias e otimizam-se as proporções entre areia, silte e argila, causando um melhor empacotamento das partículas (INGLÊS & METCALF, 1972). Já a estabilização química ocorre quando outros materiais são adicionados ao solo modificando suas propriedades por reações físico-químicas, criando uma matriz que aglutina e cobre as partículas do solo, ocorrendo a floculação da argila que propicia propriedades em seu tamanho efetivo e a redução da plasticidade, aumentando assim a compacidade dos materiais e a resistência da matriz (KESTLER, 2009; FIROOZI, 2017).

O cimento, cal, resinas e colas são os principais agentes estabilizadores químicos, sendo mais usual o cimento, devido a sua ação aglutinante na formação de cadeia capaz de envolver as partículas do solo (MAKUSA, 2013; AFRIN, 2017). Na estabilização do solo com cimento ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une as partículas adjacentes do solo, conferindo-lhe um aumento da resistência mecânica. Convém considerar que a hidratação do cimento ocorre com a formação do hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, o qual pode contribuir para floculação das argilas (dispersão e estabilidade das partículas) através de uma reação pozolânica (PETRUCCI, 1978; KHANDAY *et al*., 2021).

Para Marques *et al*. (2015) as propriedades de resistência da mistura solo e cimento sofrem influência dependendo das características do solo, considerando a proporção da fração argilosa e da fração arenosa, porém a estabilização do solo com cimento ocorre principalmente pela hidratação do cimento e permite utilizar vários tipos de solo e as combinações de suas características para a mistura de solo-cimento (FONDJO *et al*., 2021).

Os solos granulares se estabilizam pela cimentação nos pontos de contato entre os agregados que os compõem (areia e pedregulho). Além da formação da estrutura cimentada, há uma maior resistência à compressão devido às fortes ligações físicas que se estabelecem na interface do gel com as partículas do solo. Solos bem graduados onde as dimensões das partículas abrangem uma extensa faixa de valores são os ideais, pois

além de requererem menor teor de estabilizante, os espaços existentes entre as partículas maiores são preenchidos por partículas menores do próprio solo e, neste caso, os produtos formados das reações ocasionadas pelos estabilizantes, ao invés de preencherem os vazios, agem de forma integral na ligação entre as partículas. Quanto mais fina a granulometria do solo, maior é sua área específica, significando que a área a ser envolvida pelo aglomerante é tendencialmente maior (PITTA, 1980; MILANI & DIAS, 2018; NASCIMENTO *et al*., 2021).

As alterações no sistema solo-estabilizante compactado como o aumento do limite de plasticidade, a diminuição do limite de liquidez e o abatimento das curvas de compactação com aumento da faixa do teor de umidade conferem ao produto final estabilidade dimensional e o aumento de resistência mecânica em patamares definidos para sua utilização (INGLES & METCALF, 1972; GRANDE, 2003).

Além desses aspectos, é importante mencionar a estabilização mecânica e química dos solos que associa a ação mecânica da compactação reduzindo o volume de seus vazios e tornando-o mais estável, com a ação aglutinante dos aglomerantes adicionados aos solos e que iniciado o processo de hidratação, desencadeia reações que originam compostos hidratados promovendo o aumento da resistência das misturas do solo tratado.

De acordo com Lopes (2002), Milani e Dias (2018), quando a maioria das partículas possuem aproximadamente a mesma dimensão, ou seja, a distribuição em tamanho das partículas do solo é uniforme, a porosidade é mais alta, apresentando uma curva de compactação mais abatida. Porém, quando a distribuição em tamanho das partículas é mais ampla e o solo bem graduado, a aplicação da força mecânica de compactação pode rearranjar as partículas mais finas, forçando-as a se assentarem nos vazios do solo.

Ferreira (2003) e Firoozi *et al*. (2017) salientam ainda que um baixo teor de umidade dificulta a compactação do solo obtendo-se baixos valores de massa específica aparente e alto volume de vazios. O aumento do teor de umidade lubrifica as partículas tornando o solo mais trabalhável, proporcionando dessa forma, valores maiores de massa específica e menores volume de vazios.

Além disso, vale destacar que o sistema de estabilização de solos pode também ser verificado a partir da incorporação de outros materiais às composições de solo-cimento, que influenciam na granulometria e compactação da mistura, e ainda contribuem para a reação aglutinante do cimento favorecendo o aumento da resistência mecânica da mistura.

Souza *et al*. (2020) e Duchesne (2021) enfatizam que para maior resistência da mistura solo-cimento é necessária uma proporção maior de cimento, porém, pode levar a fissuras e comprometimento nas propriedades da matriz.

Nesse contexto, há o esforço contínuo científico de introduzir matérias primas oriundas de resíduos industriais ou agroindustriais, visando a redução do cimento, considerando que a inserção dessas matérias-primas provoque melhorias mecânicas nas propriedades dos solos. Cabe salientar que a diminuição do teor de cimento representa uma matriz cimentícia mais sustentável, pois conjuga materiais abundantes, menor consumo energético e menor emissão de CO_2 em relação aos cimentos com maiores quantidades de clínquer (MOREIRA e REGO, 2020).

Como alternativa, a adição de resíduos industriais como as escórias, pó de vidro, sílica ativa, cinzas volantes e cinzas de incineração de resíduos sólidos urbanos é considerada uma forma de melhorar as características granulométricas e o desempenho mecânico da mistura, sem comprometer a estabilização do solo. Destaca-se também, cinzas residuais vegetais como a da casca de arroz, do bagaço de cana de açúcar, da espiga de milho, de madeira e da casca do coco, que apresentam composição e características que influenciam nas propriedades físicas, químicas e mecânicas da mistura de solo-cimento (BAGHBAN e MAHJOUB, 2020).

Zhang *et al*. (2020) destacam a necessidade de caracterizar as cinzas residuais para conhecer a composição química, mineralógica e propriedades físicas que envolvem a distribuição do tamanho das partículas e área de superfície específica, e assim, maximizar os benefícios de sua incorporação em solo-cimento.

Machado *et al*. (2020) apontam para a substituição do cimento por cinzas da fibra de coco ou da casca de arroz em 10 %, na qual a resistência mecânica e as propriedades de absorção de água no solo-cimento não são afetadas. Moura *et al*. (2021) indicam a viabilidade em substituir o cimento pelas cinzas do bagaço de cana-de-açúcar até 20 % em misturas de solo-cimento, verificando que nessas proporções há um aumento das propriedades mecânicas de resistência e da estabilização física da mistura devido ao efeito de compacidade da composição cinza-solo-cimento.

As cinzas de resíduos agroindustriais apresentam boa reatividade quando possuem sílica amorfa em sua estrutura. Isso acontece se o material for beneficiado com temperaturas em torno de 600 a 700 ºC (MARTIRENA e MONZÓ, 2018). Como as cinzas dos resíduos agroindustriais são provenientes do processo de combustão, o teor de carbono presente deve ser controlado e não pode ultrapassar 5 %, pois teores elevados de

carbono implicam em menor teor de sílica reativa (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Entretanto, Neville (2016) aponta que teores de até 12 % de carbono não causam prejuízo às reações cimentícias.

1.3. O cimento Portland e suas características

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico que endurece sob a ação da água e permanece estável à ação desta. O endurecimento do cimento Portland se dá principalmente devido à hidratação de silicatos de cálcio, mas outros compostos químicos como os aluminatos podem participar do processo de endurecimento (MARTIRENA *et al.*, 2019).

Produzido pela moagem do clínquer, o calcário e a argila são seus principais constituintes e apresentam usualmente como composição química essencial a cal (CaO) e a sílica (SiO_2) e em menores proporções alumina (Al_2O_3), hematita (Fe_2O_3), magnésia (MgO) e outros óxidos como apresentando na Tabela 1.

Tabela 1. Composição geral do cimento Portland em termos de óxidos

	Nomenclatura	**Composição**	**Proporção (%)**
Componentes essenciais	Cal	CaO	60 a 68
	Sílica	SiO_2	17 a 25
	Alumina	Al_2O_3	2 a 9
	Hematita	Fe_2O_3	0,5 a 6
Outros componentes em menores proporções	Magnésia	MgO	0,1 a 4
	Trióxido de enxofre	SO_3	1 a 3
Álcalis do cimento	Óxido de sódio	Na_2O	0,5 a 1,5
	Óxido de potássio	K_2O	

Fonte: Hewlett (2004).

As quatro principais fases formadas pelo clínquer são o silicato tricálcico (C_3S), o silicato dicálcico (C_2S), o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). O percentual usual de cada uma dessas fases no clínquer e algumas de suas principais características estão descritos na Figura 1 e Tabela 2. Os silicatos cálcicos são os compostos mais abundantes, sendo normalmente cristais bem formados gerados nas últimas etapas de clinquerização. Já o aluminato e o ferroaluminato compõem a fase

intersticial, fundida na temperatura de cristalização dos silicatos (MEHTA e MONTEIRO, 2014; TAYLOR, 1990).

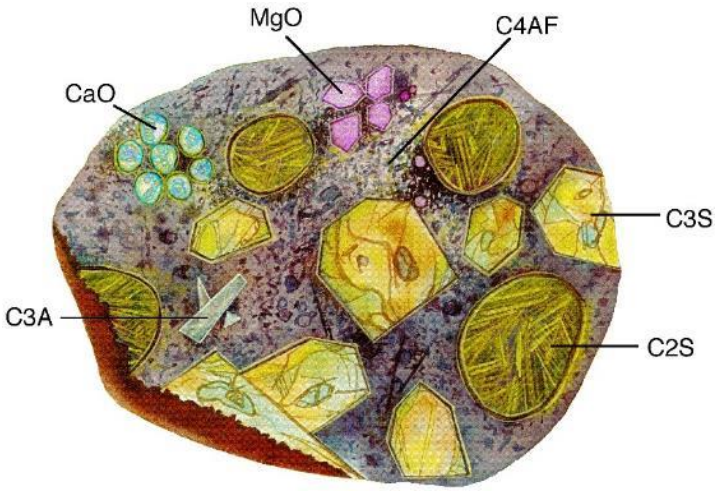


Figura 1. Principais fases do clínquer
Fonte: Taylor (1990)

Tabela 2. Características das principais fases do clínquer

Fase	Composição	Percentual (%)	Principais características
Silicato tricálcico (C_3S)	$3CaO.SiO_2$	50 a 70	Principal componente responsável pelo aumento da resistência até os 28 dias. Reação relativamente rápida com a água, liberando grande calor de hidratação.
Silicato dicálcico (C_2S)	$2CaO.SiO_2$	15 a 30	Responsável pelo aumento da resistência após os 28 dias. Reação lenta com a água, liberando pouco calor de hidratação.
Aluminato tricálcico (C_3A)	$3CaO.Al_2O_3$	5 a 10	Composto de baixa resistência mecânica. Reage rapidamente com a água podendo ocasionar problemas de pega do cimento. O sulfato de cálcio é adicionado para retardar sua reação.
Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	5 a 15	Composto de baixa resistência mecânica. Reage rapidamente em contato com a água. Propicia resistência à corrosão química do cimento.

Fonte: Taylor (1990); Neville (2016).

No âmbito da construção civil, os principais aglomerantes empregados são o cimento Portland, a cal e o gesso. Eles se apresentam sob forma de partículas e, quando hidratados, formam reações químicas que contribuem para o endurecimento das matrizes

cimentícias. O cimento pode apresentar propriedades específicas que são adequadas para certos tipos de aplicações, dependendo de sua constituição mineralógica (BAUER, 2019).

As indústrias de cimento no Brasil produzem cimentos com características mecânicas, físicas e químicas diferenciadas de acordo com o Quadro 1.

Tipo de cimento	Nomenclatura	Características
COMUM	CP I	Comum
	CP I-S	Comum com adição
COMPOSTO	CP II-E	Com adição de escória granulada de alto forno
	CP II-Z	Com adição pozolana
	CP II-F	Com adição de fíler (carbonático) em até 25 %
ALTO FORNO	CP III	Até 75 % de escória granulada de alto-forno
POZÔLANICO	CP IV	Até 50 % de pozolana
A. R. I.	CP V-ARI	90 % a 100 % de clínquer (alta resistência inicial)
CIMENTO BRANCO	CPB (Estrutural)	75 a 100 % de clínquer
	CPB (Não estrutural)	50 a 75 % de clínquer

Quadro 1. Tipos de cimentos produzidos e suas características
Fonte: NBR 16.697 (ABNT, 2018)

Na construção civil, o cimento Portland é comumente usado para solidificação do concreto, de pastas, argamassas e revestimentos, além de elementos mais nobres como concretos especiais (a exemplo dos concretos protendido e aparente). Com esta variedade, deve-se verificar o cimento que melhor se adeque às condições de uma determinada construção garantindo, desta forma, um maior desempenho à sua aplicação.

1.4. O cimento LC^3 (*Limestone Calcined Clay Cement*)

Os componentes do cimento LC^3 são conhecidos como mistura ternária variando de 50 a 70 % de clínquer, 10 a 45 % de argila calcinada e 10 a 22,5 % de fíler calcário. O LC^3 contempla uma nova possibilidade para um cimento técnico e sustentável, considerado uma promissora medida mitigadora na redução da relação clínquer/cimento (STON e SCRIVENER, 2019).

Segundo Scrivener (2014) no cimento LC^3 a hidratação dos silicatos C_3S e C_2S ocorrem de maneira semelhante à dos demais cimentos Portland, formando os produtos de hidratação C-S-H e hidróxido de cálcio e a formação de C-S-H secundário para o sistema cimentício, devido às reações pozolânicas da argila calcinada, fíler e o hidróxido de cálcio disponível.

A formação dos produtos de hidratação ocorre pela reação do aluminato, proveniente da argila calcinada (A), com o carbonato de cálcio (Cc), principal componente do fíler calcário, na presença do hidróxido de cálcio (CH), formando o carboaluminato de cálcio hidratado ($C_3A.Cc.H_{12}$), conforme demonstrado na Equação 1 (SCRIVENER, 2014).

$$A + Cc + 3CH \rightarrow C_3A.Cc.H_{12} \quad \text{(Equação 1)}$$

A potencialização da reação entre o fíler calcário e a argila calcinada pode contribuir para o aumento da resistência mecânica e a durabilidade do material. Isso ocorre a partir da formação do carboaluminato hidratado, que propicia o preenchimento de vazios no sistema cimentício e reduz o tamanho dos poros do material. Em função da formação do carboaluminato, também ocorre à estabilização da etringita e, consequentemente, redução do mossulfoaluminato (GARTNER e HIRAO, 2015; SCRIVENER *et al*., 2018a).

O fíler calcário reage com os componentes do clínquer quando adicionado em pequenas quantidades e acelera a hidratação do cimento nas primeiras idades, além de criar pontos extras de nucleação heterogênea, favorecer o aceleramento das reações e melhorar o empacotamento do sistema. Pode proporcionar o efeito diluição no sistema cimentício (menor volume do cimento hidratado) por ser menos reativo que o cimento e limita o seu percentual de utilização em grandes quantidades (TIRONI *et al*., 2014; ANDRÉS *et al*., 2015).

A argila calcinada é uma espécie de pozolana artificial e sua atividade pozolânica é afetada por parâmetros como a quantidade de minerais calcinados, medida de impureza, técnica de ativação e pós-calcinação, capaz de oferecer uma substituição considerável do clínquer de cimento Portland em cimento misto (BAGHBAN e MAHJOUB, 2020). Além de pozolanas, as argilas calcinadas atuam como pontos de nucleação nas primeiras idades devido à sua finura e colaboram no empacotamento do sistema C-S-H e a formação de carboaluminatos hidratados ocorre devido à combinação de argila calcinada com fíler calcário (TIRONI *et al*., 2014; TIRONI *et al*., 2015; ANDRÉS *et al*., 2015; HERNANDEZ e SCRIVENER, 2015).

De acordo com Scrivener *et al*. (2018b) o cimento LC^3 pode ser usado em uma gama de aplicações semelhantes ao cimento Portland comum, no qual é possível obter bom desempenho mecânico, especialmente em idades precoces.

1.4.1. Aspectos ambientais do cimento LC^3

O cimento Portland é o principal material ligante na construção civil, porém, de grande impacto ambiental e econômico na sua produção. Assim, a possibilidade de minimizar o uso desse material na construção tradicional ou substituí-lo por materiais de construção com menor impacto ambiental e que respeitem os pilares da sustentabilidade trará, benefícios significativos para a sociedade.

As argilas, são materiais abundantes na terra e as argilas cauliníticas calcinadas apresentam maior potencial pozolânico entre as diferentes classes de argilas, sendo altamente pozolânica se calcinadas entre 700 e 850 ºC. Pesquisas mostraram que cerca de 40 % de caulinita em uma mistura de cimento LC^3-50 (nomenclatura utilizada para 30 % argila calcinada, 15 % de calcário, 5 % de gipsita, além de 50 % de clínquer moído) é suficiente para fornecer propriedades comparáveis ao cimento Portland simples de referência (SCRIVENER *et al*., 2018b).

Segundo a organização cubana de normatização, para a produção de cimento LC^3 no qual 50 % do clínquer pode ser substituído por calcário e argila calcinada, pode-se reduzir de 20 % a 30 % a emissão de CO_2 em relação às emissões geradas pelo cimento Portland comum. Em escala industrial, a produção em massa do LC^3 pode reduzir em até 25% as emissões de CO_2 resultantes das etapas produtivas do material (VIZCAÍNO *et al*., 2015).

Berriel *et al*. (2015) avaliaram os aspectos da sustentabilidade, comparando três cimentos: cimento Portland comum, cimento pozolânico e o cimento LC^3. Os resultados mostraram uma redução de cerca de 30 % das emissões de CO_2 do cimento LC^3 em relação ao cimento Portland comum. Com relação ao cimento pozolânico o desempenho do LC^3 apresentou uma redução de 13 % de emissões de CO_2.

De acordo com Zunino & Scrivener (2022) e Zhang *et al*. (2020), os cimentos LC^3 podem reduzir entre 30 e 40 % das emissões de CO_2 por tonelada de cimento produzido em comparação com o cimento Portland comum devido a menor temperatura e redução consumo de combustível durante a clinquerização e não há processo de descarbonatação do calcário, além de demonstrar benefícios técnico econômicos e ambientais. Diante desse contexto, os autores consideraram que ao se utilizar o cimento LC^3 há benefícios sustentáveis, inclusive em escala global.

Estudos realizados por Scrivener (2014) mostraram uma estimativa do impacto referente à redução das emissões de CO_2 pelo uso de substituições de parte do clínquer em contraste com as reduções advindas de uma maior eficiência energética, usos de

combustíveis, captura e armazenamento de carbono, sendo possível determinar o benefício gerado ao longo dos anos.

Nesse sentido, a tecnologia do cimento LC^3 tem potencial para estender sua aplicação em substituição parcial do cimento Portland (GARTNER e HIRAO, 2015), sendo uma abordagem promissora para a produção de cimento com menor impacto ambiental, pois o LC^3 significa um grande avanço para minimizar às emissões de CO_2. Tais vantagens decorrem de aspectos como a calcinação da argila realizada em temperaturas inferiores às temperaturas de produção do clínquer, e consequentemente, redução das emissões de gases poluentes. Ademais, o clínquer pode ser reduzido a 50 % e uma correlação linear é encontrada entre a resistência e o teor de caulinita calcinada (AVET e SCRIVENER, 2018).

1.5. Tijolos de solo-cimento

A fabricação de tijolos cerâmicos convencional é uma parte essencial da indústria de construção, sendo considerados elementos essenciais na construção de alvenarias de vedação ou estrutural, porém a produção do tijolo cerâmico contribui com a causa de impactos ambientais devido ao consumo de energia, a geração de resíduos sólidos e a emissão de poluentes em seu processo de fabricação.

Conforme apontado por Barros *et al*. (2020) um forno de tijolos convencionais emite cerca de 70-282 g de dióxido de carbono, 0,001-0,29 g de carbono negro, 0,29-5,78 g de monóxido de carbono e 0,15-1,56 g de material particulado por quilograma de tijolos queimados, dependendo do solo e combustível usado.

Os tijolos de solo-cimento têm sido amplamente estudados por se apresentarem como produto alternativo, energeticamente eficiente e sustentável. São fabricados com terra (solo) adensada em molde por meio de compactação ou prensagem, seguido de seu desmolde imediato.

França *et al*. (2018) explanaram sobre as construções modulares de tijolos prensados de solo-cimento que estão ganhando espaço na construção civil, uma vez que apresentam vantagens ambientais e econômicas quando comparados às construções com tijolos cerâmicos padrão. A Figura 2 apresenta os materiais, equipamento para confecção e modelos de tijolos de solo-cimento.

Esses tijolos são atrativos para a construção de moradias, principalmente em países em desenvolvimento. Geralmente, são preparados a partir de cimento Portland, areia e solo disponível localmente e apresentam benefícios ecológicos, bom desempenho

termoacústico, além de serem resistentes, duráveis e de baixo custo. Além disso, não precisam ser queimados e dispensam acabamento (KONGKAJUN *et al*., 2020; BARROS *et al*., 2020).

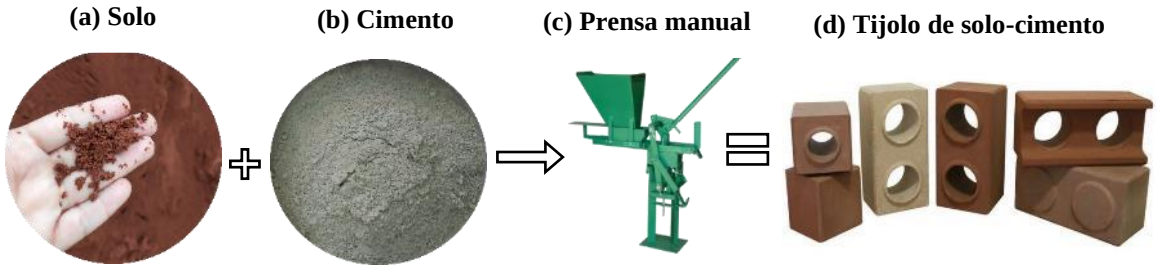


Figura 2. (a) e (b) Materiais; (c) equipamento para confecção e (d) modelos de tijolos de solo-cimento.
Fonte: Própria autora

Teixeira *et al*. (2021) destacam que o solo é o componente com maior volume na produção do tijolo e o cimento é aplicado em quantidades bem menores, variando de 5 % a 10 % da massa do solo, que é o suficiente para estabilizá-lo e conferir-lhe as propriedades de resistência desejadas.

Devido à forma do tijolo, conforme geometria e dimensões apresentadas na Figura 3, o processo construtivo é simples e geralmente são dispensáveis trabalhos altamente especializados, além disso, o tijolo apresenta boas propriedades para conforto acústico e térmico, superando os materiais usados na construção convencional (SEGANTINI e WADA, 2011). Como a queima não é necessária após a formação do tijolo, a produção reduz significativamente os custos de energia em comparação com a produção de tijolos de argila convencionais (KONGKAJUN *et al*., 2020).

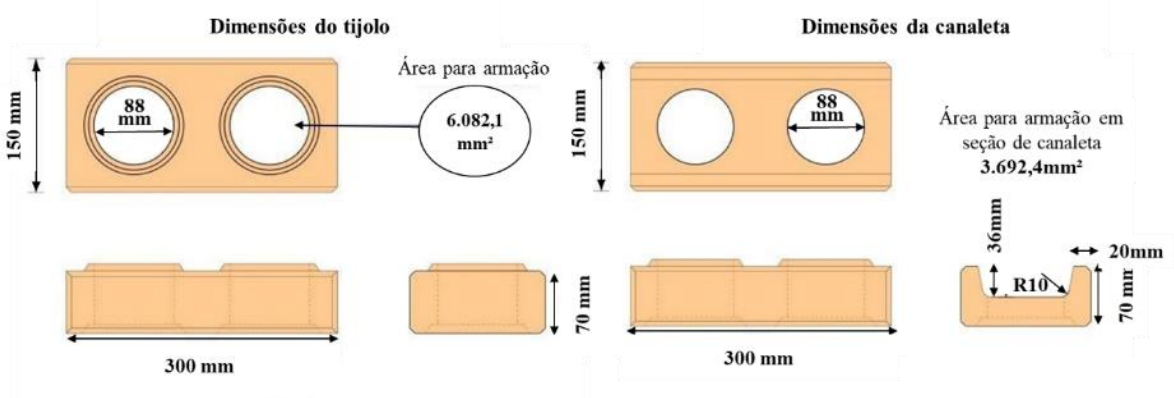


Figura 3. Geometria e dimensões do tijolo de solo-cimento
Fonte: NBR 8.491 (ABNT, 2012).

Grande (2003) cita que em tijolos de solo-cimento ocorre um processo físico-químico de estabilização e reorientação das partículas sólidas do solo com a deposição de substâncias cimentícias nos contatos intergranulares, alterando, portanto, a quantidade relativa de cada uma das três fases (sólida, líquida e gasosa) que constituem o solo. Daí, a necessidade de caracterização do solo considerando que a análise química não deve ser um fator determinante para a reatividade da mistura, sendo apenas indicativa em relação às quantidades de materiais potencialmente reativos.

Salienta-se que para a mistura solo-cimento, de acordo com a NBR 10.833 (ABNT, 2013), deve-se dar preferência aos solos em cuja composição o material orgânico seja ausente e a mistura permite também a possibilidade de adicionar outros materiais, principalmente resíduos, fator importante para a construção sustentável (FERREIRA *et al.*, 2020).

Rivera *et al*. (2020) produziram blocos de solo-cimento comparando dois tipos de solo (argiloso e arenoso) e os resultados médios de resistência a compressão foram de 7 MPa para o solo argiloso e de 17 MPa para o solo arenoso, demonstrando que a resistência mecânica está amplamente relacionada à distribuição granulométrica de cada um dos solos utilizados.

Com o intuito de diminuir a quantidade de cimento Portland utilizado na mistura solo-cimento, Zak *et al*. (2016), Leonel *et al*. (2017) e Danso e Manu (2020) investigaram a substituição parcial do teor de cimento por cinzas de resíduos agroindustriais. As possibilidades incluíram materiais silicosos como a casca do coco, bagaço de cana de açúcar e casca de arroz, que melhoraram mecanicamente as propriedades da mistura quanto à absorção de água e resistência à compressão.

A aplicação de cinzas de resíduos agroindustriais em tijolos de solo-cimento contribui para a formação de uma microestrutura advinda dos produtos de hidratação, principalmente silicatos de cálcio hidratados, que melhoram as propriedades físicas, químicas e mecânicas do tijolo (GRANDE, 2003).

Yatawara e Athukorala (2021), Islam *et al*. (2020) e Rocha *et al*. (2021) destacam que o uso de cinzas de resíduos agroindustriais, como a cinza da casca do arroz e do bagaço de cana, em substituição parcial do cimento, gera um efeito positivo quanto aos impactos ambientais, pois além de aspectos pozolânicos, a cinza possui características como área de superfície específica, a capacidade de empacotamento e o efeito fíler que melhoram as propriedades mecânicas do sistema solo-cimento.

Os autores supracitados concluíram que além da melhoria quanto a resistência mecânica, há ganhos ambientais e econômicos, considerando ainda que os tijolos de solo-cimento produzidos são adequados ao suporte de carga em construção de paredes para casas de um e dois andares e casas térreas e sem carga em paredes (externas e internas).

1.6. Resíduos industriais e agroindustriais incorporados à mistura solo-cimento

A diminuição do consumo de clínquer e o aumento na aplicabilidade de materiais residuais alternativos representa um cimento mais sustentável, pois conjuga de materiais abundantes, menor consumo energético e menor emissão de CO_2 em relação aos cimentos com maiores quantidades de clínquer (MOREIRA e REGO, 2020).

Resíduos industriais como as escórias e cinzas volantes tem sido empregados em substituição parcial do cimento devido à reatividade pozolânica desses materiais (DUCHESNE, 2021). Porém, há o esforço científico para introduzir outras matérias-primas oriundas de resíduos agroindustriais, como cinza da casca de arroz, do bagaço de cana, da espiga de milho e da casca do coco, que também apresentam características que podem beneficiar matrizes cimentícias (BAGHBAN & MAHJOUB, 2020).

Dependendo de características e propriedades como granulometria e reatividade de hidratação do resíduo, seja industrial ou agroindustrial, pode favorecer mecanicamente a mistura de solo-cimento, inclusive ser aplicado em substituição total ou parcial do cimento, pois em diversas pesquisas se concluiu sobre a melhoria das propriedades mecânicas dos solos, além dos benefícios ambientais que apresentam por serem materiais alternativos com menores impactos em sua produção (JAFER *et al*., 2021; GHAVAMI *et al*., 2021). Ademais, cabe salientar que o cimento LC^3 é uma abordagem promissora para a produção de cimento com menor impacto ambiental, no qual o clínquer pode ser reduzido em até 50 % (AVET & SCRIVENER, 2018).

Diante desse contexto, foram utilizados nesta tese as matérias-primas residuais: sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana e cinza do caroço de açaí incorporadas à mistura de solo-cimento, além do efeito comparativo entre o cimento de alta resistência inicial CP V (que não contém outras adições em seu processo produtivo e possui um elevado teor de clínquer) e o cimento LC^3.

1.6.1. Sílica ativa

A sílica ativa é um subproduto da produção de silício elementar ou ligas contendo silício em fornos elétricos a arco. A uma temperatura de aproximadamente 2000ºC a

redução do quartzo de alta pureza à silício produz vapor de dióxido de silício que se oxida e condensa em baixas temperaturas para produzir sílica ativa. Essa matéria-prima apresenta uma reatividade pozolânica (devido sua finura e quantidade de dióxido de silício amorfo), possui uma forma esférica de partículas mais macia do que partículas de cimento e quando aplicada de 5 % a 10 % ao solo aumenta a resistência do solo (GHAVAMI *et al*., 2021).

Al-Khalili *et al*. (2021) destacam que diferentes porcentagens e combinações de cal e sílica ativa aplicadas ao solo favorecem a diminuição da densidade seca máxima, do índice de plasticidade e do limite de liquidez, enquanto o teor de umidade, o limite de plasticidade e a resistência à compressão tendem a aumentar. Difratogramas de raios X apresentados por Queiroz (2018) e Soares (2021) mostram estruturas predominantemente amorfas e o índice de atividade pozolânica obtida pelo método Chapelle modificado de 1334 mg $Ca(OH)_2$/g.

Em misturas de solo-cimento, a sílica propicia a estabilização do solo preenchendo microvazios e gerando uma mistura mais densa, que por sua vez pode diminuir a permeabilidade do sistema levando a melhoria das propriedades geotécnicas do solo (GOODARZI *et al*., 2016). Além disso, agregar metacaulim proporciona também redução na densidade específica do solo, observando melhorias mecânicas na combinação de metacaulim e sílica ativa em solo, sendo fundamental avaliar esta combinação em misturas contendo solo-cimento.

1.6.2. Cinza volante

A cinza volante é produzida durante a combustão do carvão e seus principais componentes mineralógicos e químicos são diversificados, pois dependem da característica do carvão queimado, das condições de combustão e do tipo de controle dos dispositivos de emissão (BLICHARZ e FRANUS, 2023).

As partículas de cinzas volantes geralmente consistem em esferas de silício, alumínio e óxidos de ferro e carbono não oxidado, se caracterizando como cinzas volantes pozolanas – materiais siliciosos e aluminosos. Medeiros (2018) apresentou a composição de óxidos da cinza volante os teores: 94,74 % de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$, 20,25 % de perda ao fogo e atividade pozolânica Chapelle de 616,25 mg$Ca(OH)_2$/g. Porém, ela não se apresenta como material autocimentante requerendo um ativador alcalino como a cal ou o cimento para sua aplicabilidade (FIROOZI *et al*., 2017; ELAHI *et al*., 2021).

Chompoorat *et al*., (2021) destacam que a cinza volante aplicadas em solo torna-se responsável por reações pozolânicas em um processo de longo prazo e mais lento na reação do hidróxido de cálcio com a sílica e alumina presente no solo. Zulkifley *et al*. (2014) avaliaram o efeito das cinzas volantes nas propriedades dos solos resultando na redução do limite de liquidez e do índice de plasticidade, bem como o aumento da resistência à compressão. Os resultados mostraram que cal e cinzas volantes são uma boa combinação para estabilizar solos argilosos e arenosos.

Pesquisas desenvolvidas por Namboonruang *et al*. (2011) e Elahi *et al*. (2021) apontam que a cinza volante incorporada no tijolo de solo-cimento reduz a condutividade térmica, aumenta a resistência à compressão, resistência à flexão e resistência à tração desde que o teor de cinza em substituição ao cimento não ultrapasse a 25 %. Por meio da Avaliação do Ciclo de Vida, os autores demonstraram também que o consumo de energia, o potencial de aquecimento global e outros impactos ambientais são inferiores quando comparados ao tijolo convencional.

1.6.3. Cinza do bagaço da cana de açúcar.

A cinza do bagaço de cana possui sílica amorfa significativa e alumina em sua composição. Dados de difratometria de raios X apresentados por Mancini (2020) mostraram picos de cristalinidade e detectadas fases cristalinas de dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), sendo característico de materiais pozolânicos (CORDEIRO *et al*., 2019a; ANDREÃO *et al*., 2020)

Moura *et al*. (2021) indicam a viabilidade em substituição do cimento pelas cinzas do bagaço de cana-de-açúcar até 20 % nas misturas de solo-cimento, verificando benefícios das propriedades mecânicas, pois o teor de sílica da cinza na forma de quartzo é um dos principais elementos componentes na areia natural, ocasionando o aumento da resistência a compressão, que ocorre também devido ao teor de pozolana e efeito fíler da composição solo-cimento.

Almeida *et al*. (2015) observaram que as partículas da cinza do bagaço da cana de açúcar ocasionaram um efeito de preenchimento aos microporos em matriz cimentícia, reduzindo o número de vazios e, consequentemente, contribuindo para melhorar a resistência à compressão. Moura *et al*. (2021) cita ainda que a adição de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-cimento reduz o peso do produto final e resulta na diminuição de cargas estruturais da edificação.

1.6.4. Cinza do caroço de açaí

Devido a produção da polpa do açaí ser predominantemente artesanal, sob monoculturas de baixa tecnologia, não há um processo agroindustrial que favoreça a geração da cinza do caroço, que podem ser produzidas a partir do beneficiamento térmico e moagem dos caroços após o processamento da polpa.

1.6.4.1. Caroço de açaí: o gênero Euterpe (palmeira e o fruto)

Palm é o nome comum da família de plantas Arecaceae (*Palmae*) representada por cerca de 2600 espécies, com aproximadamente 240 gêneros. O gênero Euterpe é composto por 28 espécies, distribuídas das Antilhas a América do Sul, principalmente em florestas tropicais. No Brasil, cinco espécies foram encontradas: *Euterpe edulis Martius, Euterpe oleracea Martius, Euterpe precatória Martius, Euterpe catinga Wallace* e *Euterpe longibracteata Barbosa Rodrigues*. Destas, as três primeiras são as mais frequentes (LORENZI, 2010).

A espécie *Euterpe precatória* é nativa de estado do Amazonas, mas também é encontrada em países como Colômbia, Venezuela, Trinidad, Guiana, Equador, Peru e Bolívia, principalmente em ecossistemas com inundações periódicas. A espécie *Euterpe oleracea* é encontrada principalmente na Estados brasileiros do Pará, Maranhão, Tocantins e Amapá. Por outro lado, *Euterpe edulis* é nativa da Mata Atlântica encontrada principalmente nos estados da Bahia ao Rio Grande do Sul, bem como nas matas ciliares de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Paraná (SCHULZ *et al*., 2016).

A produção anual média do fruto do açaí no Brasil entre os anos 1986 e 2010 foi de 115 mil toneladas por ano. Esta produção aumentou 80,3 % de 2011 a 2018 (RAMOS *et al*., 2020), sendo o Estado do Pará o maior produtor de açaí (58,4 %), seguido pelos estados do Amazonas (31,0 %) e Maranhão (7,1 %). Em 2021 a produção de açaí ultrapassou 225 mil toneladas gerando por volta de 150 mil toneladas de resíduos com o descarte dos caroços (IBGE, 2019; ALBUQUERQUE *et al*., 2021; MELO *et al*., 2021).

O açaí é uma fruta não climatérica, pequena e redonda com uma cor que evolui de verde a preto durante o processo de maturação. A palmeira *Euterpe Precatória* (Figura 4a) dá frutos abundantemente nos meses de março a junho e cada cacho produz 3 a 5 kg de frutas (Figura 4b) fixadas por pedúnculo (Figura 4c), no qual 1 kg de frutas contém aproximadamente 750 unidades (Figura 4d) (SCHULZ *et al*., 2016). A parte comestível do fruto corresponde a apenas 15 %, sendo uma massa muito fina (Figura 4e) (SCHULZ *et al*., 2016). Quando macerado e extraído com água produz um líquido viscoso e denso

com textura cremosa, chamada popularmente de polpa do açaí (Figura 4f) (BOEIRA *et al*., 2020).

O crescimento da produção nacional da polpa do açaí deve-se principalmente ao aumento de políticas de consumo e investimento público nos setores florestal e agrícola, além de um aumento de áreas cultivadas. Contudo, a produção do cultivo comercial dos estados do Acre, Amazonas e Rondônia é predominantemente explorado por pequenos e médios agricultores, sob monoculturas de baixa tecnologia (ARAÚJO *et al*., 2020).

Com o aumento comercial da polpa do açaí elevou-se também a quantidade de resíduos, formada principalmente pelos caroços que, comumente são descartados e têm sido fonte de estudos em diversas áreas com interesse no desenvolvimento de tratamentos adequados para descarte e reutilização deste resíduo.

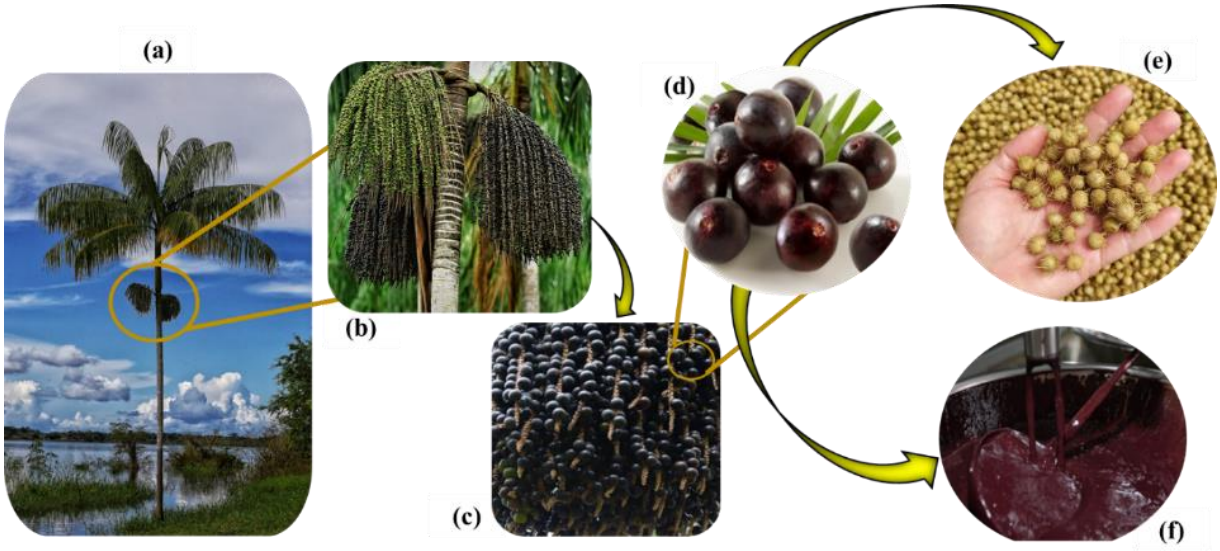


Figura 4. (a) Palmeira do açaizeiro; (b) cacho contendo o fruto; (c) os frutos do açaí no pedúnculo; (d) a fruta; (e) o caroço do açaí após processamento e; (f) a polpa do açaí.
Fonte: Própria autora.

1.6.4.2. Características da biomassa do caroço de açaí

A biomassa do caroço do açaí apresenta teores com um alto poder calorífico e contém abundantes grupos hidroxila e carbonila que permitem que a maceração do caroço se coordene com diversos íons metálicos, que pode ser usado para a síntese de materiais a base de carbono (MONTEIRO *et al*., 2019a).

Silva *et al*. (2019) apresentam os componentes da biomassa do caroço de açaí, sendo em maior quantidade a celulose com valor de 43,81 %, seguida da hemicelulose com 25,89 % e lignina com 24,56 % e deste último, 22,99 % é de lignina insolúvel e apenas 1,57 % de lignina solúvel, ou seja, a lignina insolúvel representa 93,6 % da lignina

total. Almeida *et al*. (2021) concluem que entre as biomassas lignocelulósicas, o caroço de açaí é um resíduo potencial para aplicações tecnológicas e apesar de ser encontrado em toda América, o Brasil concentra na região norte cerca de 87,5 % de todos produção nacional e a eleva à posição de maior produtor mundial.

No processo de polpação a maior parte da fruta é composta do caroço que proporciona uma grande disponibilidade de resíduos, podendo ser aplicado em diversas técnicas, materiais e produtos. Ao considerar o comportamento térmico, o caroço do açaí apresentou características semelhantes às fibras naturais como o sisal e o coco, o que abre novas e promissoras perspectivas para sua utilização (MARTINS *et al*., 2009).

Pesquisas desenvolvidas nas últimas décadas objetivam uma solução sustentável ao caroço, por exemplo, a pirólise da biomassa do caroço de açaí (SANTOS *et al*., 2020); carvão ativado obtido a partir do caroço de açaí (QUEIROZ *et al*., 2020); catalisador químico a partir de caroços de açaí para produção de biocombustível (ARAÚJO *et al*., 2021); metanólise de baixo ácidos graxos livres com novos compostos à base de carbono catalisador derivado de caroços de açaí (ZAVARIZE *et al*., 2021); e hidróxido de potássio ativados com carbono derivado do caroço de açaí (ZAVARIZE, 2021); além da possibilidade de desenvolvimento de novos materiais utilizando o caroço do fruto do açaí como agregado graúdo de misturas asfálticas para uso em pavimentos (SOUZA, 2013); utilização das fibras lignocelulósicas do açaí em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado (GEHLEN, 2014); aplicação da fibra do açaí como matéria prima na produção de ecopainéis particulados (MESQUITA *et al*, 2018); e da cinza do caroço do açaí em concretos (CORDEIRO *et al*., 2019b).

Marins *et al*. (2014) em seus estudos de caracterização do caroço do açaí, verificaram o comportamento da cinza do caroço em misturas com argila e caulim, sugerindo seu uso em processos industriais de material cerâmico como tijolos e telhas convencionais os quais são sinterizados a altas temperaturas.

1.6.4.3. A cinza do caroço de açaí aplicada em matriz cimentícia

O caroço de açaí é um resíduo em potencial devido ao seu processo de polpação se obter uma biomassa que compõe a maior parte da fruta e proporciona uma grande disponibilidade de geração de resíduos (ARAÚJO *et al.*, 2019). Para Almeida *et al.* (2021) uma solução econômica e ecológica para a problemática da gestão do caroço de açaí é utilizá-lo como precursor na produção de cinzas e aplicação destas cinzas em outros materiais, pois trata-se de uma biomassa residual com baixo custo, que propicia a

obtenção uma matéria-prima com propriedades físico-químicas ideais para diversas aplicações e, ainda, apresentando uma alternativa renovável.

Araújo *et al.* (2021) utilizou a cinza do caroço de açaí para produzir argamassa e destacou o benefício da cinza da matriz cimentícia devido à superfície específica da cinza e a relação entre a quantidade de finos e a necessidade de água. Os autores relacionaram esse fenômeno ao fato das partículas da cinza terem a capacidade de retenção de água, portanto, quanto maior for a concentração de partículas finas, maior será o acúmulo de umidade no interior da argamassa.

Costa Oliveira *et al*. (2020) e Oliveira *et al.* (2020) analisaram corpos de prova de concreto e argamassa, respectivamente, com a inserção da cinza do caroço de açaí e evidenciaram que a adição das cinzas possibilitou efeito fíler, além de apresentar uma maior durabilidade na estrutura com menor propensão a patologias. Vale salientar que este comportamento se deve ao efeito microfíler da cinza que apresenta um alto fator de empacotamento, densificando desta forma o concreto proporcionando uma diminuição de sua porosidade resultando em uma menor absorção de água.

Dessa maneira, pode-se argumentar que a incorporação de cinza contribui na diminuição da porosidade e torna a microestrutura da matriz cimentícia mais densa e compacta, resultando em um material com desempenho tecnicamente viável. Isso devido a incidência do efeito microfíler entre os grãos de cimento e da areia, que se alojam nos interstícios da pasta e atuam como pontos de nucleação dos produtos de hidratação, o que proporciona uma característica de refinamento na estrutura dos poros das matrizes cimentícias.

1.7. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma importante ferramenta utilizada para gestão ambiental, sendo considerada uma metodologia de análise ambiental das etapas da vida útil de um determinado produto ou processo e, de acordo com as análises pertinentes, pode ser aplicada para normatização de declarações ambientais na construção civil, seja de um insumo ou um processo construtivo (PASSUELO *et al*., 2014; SOUZA *et al*. 2016).

A ACV consiste em uma abordagem para determinar o desempenho ambiental de materiais, desde a extração da matéria-prima, produção, uso e disposição final dos resíduos, bem como de um processo produtivo, pois tem como suporte o reconhecimento e a quantificação dos fluxos de entrada e de saída associados aos processos envolvidos no ciclo de vida de um sistema (produto ou serviço) para que se possa identificar,

quantificar e avaliar os impactos ambientais, e assim, caracterizar o seu desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida, dando suporte, inclusive, no desenvolvimento de políticas públicas ambientais (COSTA *et al*., 2018).

1.7.1. Componentes da ACV

Embora a ACV não seja destinada a materiais individuais, ela é útil como ferramenta para a gestão, pois facilita identificar um problema ou uma fonte potencial de preocupação, além de otimizar e gerir o uso de recursos e resíduos produzidos, contribuindo assim para a tomada de decisão processo entre diferentes materiais sustentáveis (SADABA *et al*., 2017).

As normas ISO (*International Organization for Standardization* ou, em português, Organização Internacional para Padronização) regulamentam a ACV. No Brasil a análise da ACV está conexa com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), normalizada pelas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) "Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura" e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) "Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações". Tais normas fornecem recomendações em modelos e fatores de caracterização que devem ser aplicados.

Para a realização de uma ACV, as normas sugerem a utilização da estrutura metodológica, composta por quatro fases: objetivo e o âmbito (escopo) da análise, a análise do inventário do ciclo de vida, a avaliação dos impactos ambientais e a interpretação dos resultados.

Com base nas normas supracitadas o escopo deve descrever as informações essenciais do estudo: as funções do estudo, requisitos para que o produto ou processo exista; determinação da unidade funcional, processo de quantificação das funções identificadas no estudo; fluxo de referência, que determina a quantidade de produto necessária para atender a unidade funcional.

A fase de análise de inventário é determinada pela coleta de todas as informações referentes ao sistema de análise, quantificando dados de entrada e saída do processo para uma correta avaliação de potenciais impactos ambientais. Esta fase envolve a compilação e a quantificação das variáveis envolvidas no ciclo de vida, como as entradas e saídas de matéria e energia ao longo do ciclo de vida do produto analisado.

Para uma melhor interpretação do levantamento do inventário e dos resultados obtidos à ACV é necessário englobar categorias de impacto que são afetadas com a

produção de cada matéria-prima. A estrutura de categorias de impacto ambiental das declarações ambientais de produtos de materiais e componentes de construção são normalizadas pela CEN 15.804 (EN, 2012) “Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products”. Dong *et al*. (2021) reiteram que para cálculo de impactos ambientais no setor da construção civil também devem ser consideradas categorias que englobem as três principais dimensões: saúde humana, ecossistemas e recursos naturais.

Já a avaliação de impactos tem como objetivo proporcionar o entendimento da significância dos impactos ambientais abordados no estudo ao longo do ciclo de vida do produto, no qual é possível selecionar diferentes categorias, sendo algumas de abrangência global (efeito estufa e depleção da camada de ozônio) e outras de importância local ou regional (efeitos toxicológicos) (MARCAL *et al*., 2013).

Por fim, a etapa de interpretação dos resultados compreende a identificação dos resultados significativos encontrados nas fases de análise de inventário e avaliação de impactos. As constatações dessa etapa devem estar relacionadas ao objetivo e escopo definidos nas etapas iniciais da estrutura da ACV (ABNT 2009a, 2009b).

1.7.2. A ACV na construção civil

A construção civil é reconhecida mundialmente como um dos principais agentes causadores de poluição e degradação ambiental da sociedade moderna, pois tem sido responsável por elevados níveis de extração de recursos naturais, renováveis e não renováveis e, consequentemente, por relevantes cargas de emissões, gerando potenciais impactos ambientais (ALBUQUERQUE *et al*., 2018).

No entanto, há o crescimento no desenvolvimento de materiais alternativos para suprir ou minimizar os efeitos dos impactos ambientais da construção civil. Nesse contexto, a aplicação da ACV na avaliação ambiental de sistemas e elementos construtivos possibilita uma análise mais detalhada e crítica na especificação de materiais, promoção de melhorias ambientais e, até mesmo de benefícios econômicos (CALDAS e SPOSTO, 2017).

Escamilla *et al*. (2018) apresentam dados sobre os aspectos ambientais e a demanda por recursos energéticos associados ao setor da construção civil. Na produção de materiais de construção, como cimento e agregados, se utiliza de 30 % a 40 % da produção de energia mundial e, sob as atuais práticas, esse setor é responsável por 38 % das emissões globais de gases de efeito estufa.

Estudos de ACV relacionados ao setor de construção civil têm avaliado tipos de construção, estratégias de gestão de resíduos de construção e demolição para gerar novos materiais, desenvolvimento e comparação de desempenho ambiental de materiais de construção. Assim, a ACV pode ser aplicada em diferentes esferas que podem estar relacionadas aos materiais de construção, impactos relacionados à manutenção de edificações, consumo de energia, impactos pós-ocupacionais, até à avaliação completa do edifício (CARVALHO *et al*., 2020; RYBERG *et al*., 2021; WASKOW *et al*., 2021).

Bribián *et al*. (2011) comparam os materiais de construção mais utilizados na construção civil e materiais ecologicamente corretos e concluíram que a utilização de técnicas ecoinovadoras podem reduzir os impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida de uma edificação, orientando, assim, a substituição de materiais que utilizem matérias-primas não renováveis em demasia.

Além disso, a aplicação de análises preditivas da avaliação do impacto, do uso da energia e emissões de poluentes durante o ciclo de vida desses novos materiais permite que se produzam materiais ecoeficientes, para atender à demanda de um mercado cada vez mais exigente em matéria ambiental. Uma melhor gestão dos materiais de construção implica uma considerável melhoria na pegada ecológica e de carbono da construção civil e na redução global de consumo de recursos naturais e de impactos associados à produção desses produtos (PASSUELO, *et al*., 2014).

1.7.3. A ACV aplicada à produção de tijolo de solo-cimento

Sabada *et al*. (2017) destaca que o uso de resíduos e subprodutos naturais, industriais e agrícolas em substituição parcial ou total do aglutinante tradicional como o cimento Portland tem um impacto ambiental significativo. Os autores supracitados demostraram que os parâmetros ambientais de uma ACV aplicada em tijolo de solo-cimento apresentaram um desempenho melhor do que os parâmetros com o bloco de concreto. A extração de agregados, seguido de sua ligação com o cimento Portland e do uso intensivo de energia são aspectos que caracterizam a mistura de solo-cimento como uma melhor combinação em termos de sustentabilidade.

Para Christoforou *et al*. (2016) os resultados, em termos de energia incorporada e teor de carbono por kg de tijolo de solo-cimento, confirmam que a minimização das necessidades de transporte e a utilização de recursos podem afetar significativamente a análise ambiental, destacando também que o uso de resíduos com menores impactos

ambientais leva a um melhor desempenho da ACV do produto final, seja referente ao tijolo ou ao processo construtivo.

De acordo com Souza *et al*. (2016) a variabilidade nas características das matérias-primas e a falta de informações nos bancos de dados referentes a produção do tijolo de solo-cimento demonstra grandes desafios para uma ACV. A incorporação de materiais residuais agrava ainda mais o desafio, pois os resíduos podem potencializar problemas referentes a falta de precisão nos dados de entrada e análise do inventário de uma ACV.

CAPÍTULO 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Por sua característica técnico-científica, a pesquisa apresenta uma abordagem experimental, contendo uma investigação bibliográfica e ensaios laboratoriais, constituída de três aspectos: Objeto da pesquisa, construído a partir de materiais aplicáveis à normatização pertinente; Pesquisa experimental, adequando ao projeto os materiais que nos planos teóricos e práticos foram avaliados para direcionar as possíveis soluções para o problema da pesquisa; Pesquisa bibliográfica, haja vista ser imprescindível como fonte de dados secundários, ligados à temática de estudo e parte fundamental para identificar as relações que cercam o produto que está sendo construído.

2.1. Matérias-primas de partida

As matérias-primas de partida foram o solo e o cimento, que formam a base desta pesquisa: a matriz solo-cimento. Para efeito comparativo, foram aplicadas ao solo dois tipos de cimento: o de alta resistência inicial e o LC^3. O cimento LC^3 foi produzido a partir das matérias-primas: clínquer, gesso, fíler e metacaulinita.

2.1.1. Solo

O solo utilizado foi doado pela empresa Ecotol Tijolos Ecológicos, obtido de jazida da região noroeste do Estado do Paraná.

2.1.2. Cimento

O cimento CP V é de alta resistência inicial, pois tem alta reatividade em baixas idades em função do grau de moagem a que é submetido. O desenvolvimento da alta resistência inicial é atingido pela utilização de uma dosagem específica de calcário na produção do clínquer, além da moagem mais fina aplicada, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade.

O cimento Portland utilizado na pesquisa foi o CP V, adquirido por doação pela empresa Itambé, do centro de distribuição da cidade de Cascavel – Paraná. Os dados de ensaio do fabricante apresentam os teores de 4,51 de Al_2O_3, 2,8 de Fe_2O_3, 3,47 % de perda ao fogo, granulometria com 0,08 % retido na peneira #200 e 0,45 % retido na peneira #345. O grau de finura (Blaine) foi de 4,39 cm^2/g e 54,2 MPa o resultado do ensaio de resistência a compressão aos 28 dias (ITAMBÉ, 2021).

2.2. Matérias-primas constituintes do Cimento LC^3

As matérias-primas consideradas como elemento base para a produção do cimento LC^3 são o clínquer, a argila calcinada, o calcário e gesso. Por ser um cimento ainda não comercializado no Brasil utilizou-se para esta pesquisa a mistura das matérias-primas metacaulinita, fíler, clínquer + gesso para obter a composição do cimento LC^3.

Pelos dados de ensaio a composição do cimento CP V é de 18,34 % de SiO_2 e 62,32 % de CaO, que somatiza em mais de 95 % os teores de clínquer + gesso. Para compor a argila calcinada e calcário utilizou-se as proporções de 30 % de metacaulinita e 15 % de fíler, cujas proporções atendem à formação do cimento LC^3.

2.2.1. Metacaulinita

A metacaulinita utilizada foi cedida pela empresa Metacaulim do Brasil, apresenta uma coloração rósea e área superficial específica de 230.000 cm^2/g o que favorece a uma alta reatividade. Conforme fabricante a composição de óxidos na base calcinada do material totaliza 95,3 % de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ e Atividade Pozolânica Chapelle de 880 $mgCa(OH)_2/g$.

2.2.2. Fíler

O fíler utilizado foi cedido pela empresa Minérios Ouro Branco contendo 99 % de pureza de carbonato de cálcio ($CaCO_3$).

2.2.3. Clínquer e gesso

Para estes componentes se utilizou o cimento Portland CP V cuja composição de SiO_2 + CaO, que somatiza em mais de 95 %, referente aos teores de clínquer + gesso. Portanto, o cimento LC^3 foi produzido misturando manualmente 55 % de cimento CP V (clínquer + gesso), 30 % de metacaulinita (argila calcinada) e 15 % de fíler (calcário).

Para um efeito comparativo, foi inserido à composição tanto ao cimento de alta resistência (CP V) quanto ao cimento LC^3 resíduos industriais e agroindústrias, na proporção de 10 % da massa do clínquer, ou seja, do cimento CP V. Os resíduos industriais incorporados foram: sílica ativa e cinza volante; e os resíduos agroindustriais foram: a cinza do bagaço de cana e a cinza do caroço de açaí, sendo esta última processada a partir de testes preliminares executados com o caroço de açaí.

2.3. Resíduos incorporados aos cimentos

2.3.1. Sílica ativa

A sílica ativa utilizada nesta pesquisa foi fornecida pela empresa Elkem Microsílica. Dados de ensaio do fabricante mostram um tamanho médio das esferas de 150 nm, densidade de 2,2 g/cm³ e grau de finura (Blaine) de 18,41 m²/g.

2.3.2. Cinza volante

A cinza volante foi obtida a partir da queima do carvão mineral para geração de energia elétrica junto a empresa Pozofly em Capivari de Baixo (Estado de Santa Catarina). Dados de ensaio do fabricante mostram que a soma de SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 é maior que 75 %.

2.3.3. Cinza do bagaço de cana

A cinza do bagaço de cana foi obtida da empresa CoopCana localizada em São Carlos do Ivai (Estado do Paraná), extraída do resíduo gerado a partir da queima da cana no qual se atinge uma temperatura entre 750 e 800 ºC para obtenção do combustível etanol. Para incorporação nas misturas a amostra foi peneirada utilizando-se 100 por cento das partículas passantes na peneira com abertura de 0,075 mm (#200).

2.3.4. Caroço de açaí

As espécies do fruto do açaí utilizadas para os testes preliminares foram *Euterpe precatória* e *Euterpe oleracea.* As amostras da espécie *Euterpe precatória* foram obtidas após o processamento da polpa e oriundas das cidades de Anori e Codajás, região central do Estado do Amazonas e de uma microagroindústria de Manaus, capital do Estado. E de maneira comparativa, se utilizou também uma amostra dos caroços da espécie *Euterpe Oleracea*, oriundos da cidade de Belém, Estado do Pará.

Em decorrência dos respectivos resultados comparativos assim como da análise das propriedades do caroço do açaí *in natura*, moído e após o beneficiamento térmico, produziu-se a cinza que foi incorporada ao cimento CP V e ao cimento LC^3 com a finalidade de obter um cimento que, ao ser misturado ao solo, apresentasse propriedades físicas e mecânicas aceitáveis a partir das exigências normativas e demonstrasse eficiência na confecção do tijolo de solo-cimento destacando-o como tecnologia alternativa e de práticas sustentáveis.

2.4. Caracterização das matérias-primas

A caracterização das matérias-primas de entrada e das consideradas elementos base para a produção do cimento LC^3, bem como a caracterização dos resíduos: sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana e cinza do caroço de açaí produzida, contribuíram preliminarmente para verificar as propriedades que pudessem influenciar na aplicação do cimento modificado com tais matérias-primas, ao solo.

2.4.1. Caracterização das matérias-primas de partida

2.4.1.1. Solo

A Figura 5a mostra o solo obtido para realização dos ensaios. A caracterização do solo foi realizada por meio dos ensaios de umidade, índices de plasticidade, curva granulométrica e fluorescência de raios X (FRX).

O teor de umidade higroscópica médio (Wh) do solo foi calculado de acordo com a Equação 2, sendo coletadas e pesadas seis amostras do solo úmido (M_u) (Figura 5b), colocadas em estufa a 105 ºC por 24 h, medindo-se novamente a massa do solo seco (M_0) em gramas.

$$Wh = \frac{M_u - M_0}{M_0} * 100(\%) \qquad \text{(Equação 2)}$$

Os índices de consistência (limites de Atterberg) são dados pelo limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) que fornecem o índice de plasticidade do solo (IP).

O limite de liquidez (Figura 5c) é o valor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico. Esse limite é determinado com auxílio do aparelho de Casagrande no qual se verifica o teor de umidade que, com 25 golpes, une as bordas inferiores de uma ranhura (um centímetro de comprimento) aberta, na massa de solo, por um cinzel de dimensões padronizadas. Diversas tentativas são realizadas com o solo em diferentes umidades anotando-se o número de golpes para fechar a ranhura e obtendo-se o limite pela interpolação dos resultados. O procedimento é padronizado no Brasil de acordo com a norma NBR 6.459 (ABNT, 2017).

O limite de plasticidade (Figura 5d) é o valor de umidade na qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido (quebradiço). É o limite no qual o solo começa a se quebrar em pequenas peças, quando enrolado em bastões de 3 mm de diâmetro. Ou seja, é o menor teor de umidade em que o solo se comporta plasticamente. Esse procedimento foi realizado de acordo com a norma NBR 7.180 (ABNT, 2016).

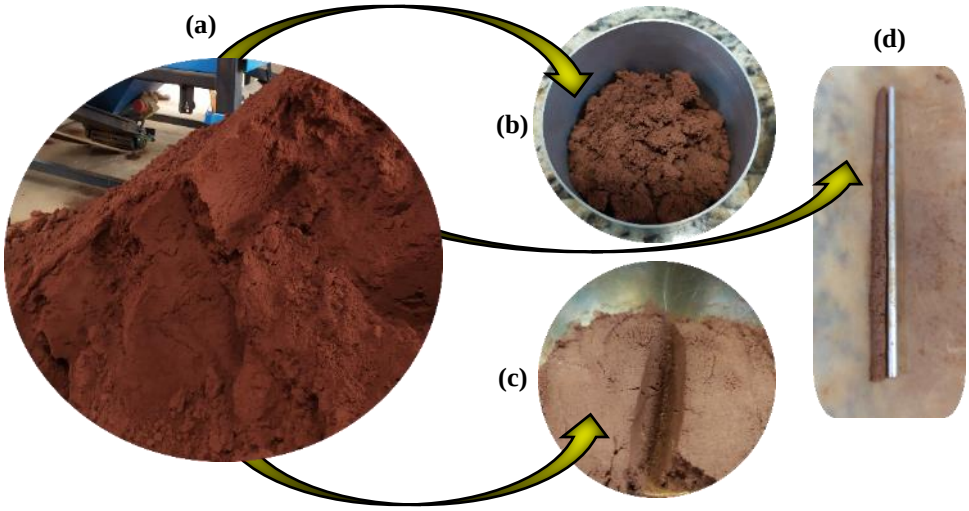


Figura 5. (a) Solo *in natura*. (b) Amostra do solo úmido (c) amostra do solo durante o ensaio de limite de liquidez e (d) bastão de solo para realização do ensaio de limite de plasticidade
Fonte: Própria autora.

O IP determina o caráter de plasticidade de um solo indicando a faixa de variação do estado plástico do solo e o índice de consistência (IC) serve para determinar o grau de consistência em função do teor de umidade que o solo se encontra. O IP foi calculado de acordo com a Equação 3 e o IC calculado de acordo com a Equação 4.

$$IP\ (\%) = LL - LP \qquad \text{(Equação 3)}$$

$$IC\ (\%) = (LL - Wh)/IP \qquad \text{(Equação 4)}$$

A curva de distribuição granulométrica foi determinada de acordo com a norma NBR 7.181 (ABNT, 2016) pelo ensaio de peneiramento de solo fino. Para a realização deste ensaio utilizou-se as peneiras #16, #30, #50, #100 e #200. A série de peneiras foi empilhada com maior abertura acima da peneira com abertura imediatamente menor e assim sucessivamente. Colocou-se 500 g de solo na primeira peneira e a série foi inserida em um vibrador por 15 minutos, para ocorresse a separação das frações de solo. Calculou-se as percentagens do material retido em cada uma das peneiras, em relação ao peso da amostra total seca. O coeficiente de curvatura da granulometria foi calculado pela Equação 5.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \qquad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

D_{60} - diâmetro da partícula correspondente a 60 % mais fino

D_{10} - diâmetro da partícula correspondente a 10 % mais fino
D_{30} - diâmetro da partícula correspondente a 30 % mais fino

2.4.1.2. Cimento CP V

Realizou-se a caracterização química por fluorescência de raios X (FRX) do cimento CP V. As leituras foram realizadas em um equipamento espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF), marca Shimadzu, modelo EDX-720, operado a 50 kV e 100 μA.

2.4.2. Caracterização das matérias-primas base do cimento LC[3]

Para caracterizar quimicamente a metacaulinita e o fíler, foi aplicada a técnica de fluorescência de raios X (FRX), utilizando o mesmo equipamento e as mesmas condições que os do cimento CP V.

2.4.3. Caracterização dos resíduos inseridos à composição do cimento

As matérias-primas aplicadas alternadamente à composição do cimento foram os resíduos industriais: sílica ativa e cinza volante e o resíduo agroindustrial: cinza do bagaço de cana. A caracterização química destes resíduos foi efetuada por fluorescência de raios X (FRX), similar a metodologia aplicada ao cimento CP V.

Como o processamento da polpa do açaí é comumente em escala artesanal, o resíduo gerado desta agroindústria é o caroço que compõe aproximadamente 80 % do fruto utilizado para extração da polpa.

Devido ao volume elevado de resíduos gerados e uma tentativa de destiná-lo tecnicamente em um produto alternativo sustentável, esta pesquisa evidencia a importância técnico-ambiental de uso e preparo do caroço para produção da cinza, com um detalhamento metodológico que apresenta desde a coleta, caracterização e beneficiamento térmico.

2.5. Caracterização do caroço de açaí

Inicialmente foi realizada a caracterização do caroço de açaí para posterior beneficiamento térmico e produção da cinza. Para os primeiros ensaios realizados nos caroços foram utilizadas as espécies *Euterpe precatória* e *Euterpe oleracea*.

2.5.1. Beneficiamento e caracterização inicial do caroço de açaí

Os caroços de açaí de todas as amostras foram recebidos ainda com excesso de borra (resíduo da polpa), textura comum após o processamento e a extração da polpa, por isso foram lavados com água corrente até a retirada completa da borra e de partes do pedúnculo (Figura 6a). Após a lavagem foram colocados para secar em temperatura ambiente de 28 ± 2 ºC por 30 dias (Figura 6b), tempo adequado para diminuir o teor de umidade da parte interna do caroço. A Figura 6c apresenta o caroço da espécie *Euterpe precatória*.

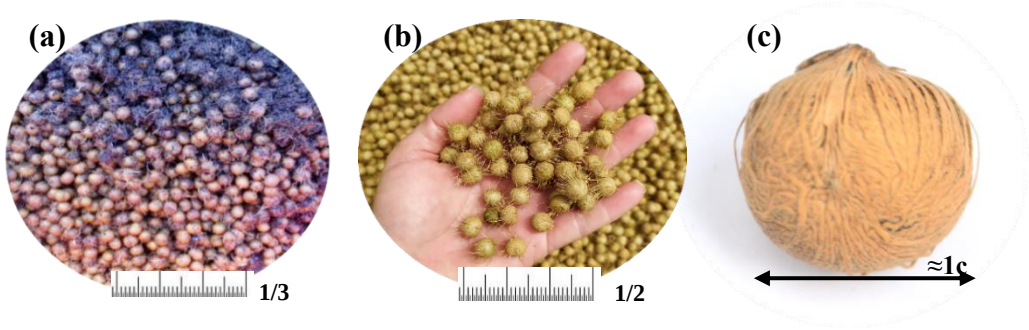


Figura 6. (a) Caroços do açaí após o processamento da polpa, ainda úmidos; (b) caroços do açaí secos em temperatura ambiente; (c) caroço da espécie *Euterpe precatória* utilizados nos ensaios laboratoriais.
Fonte: Própria autora.

2.5.2. Análise morfoanatômica do caroço de açaí

Para a descrição da morfoanatomia externa e interna do caroço foram utilizados 100 caroços secos escolhidos aleatoriamente, sendo selecionados visualmente 50 caroços de menores diâmetros e 50 caroços de maiores diâmetros para as medições de tamanho. Os caroços foram cortados ao meio manualmente com auxílio de uma faca cutelo e fotografados com Câmera Nikon D3200 de lentes DX Nikkor 18-55 mm. Foram observados os constituintes anatômicos da parte externa e interna dos caroços.

2.5.3. Trituração do caroço de açaí

Com os caroços secos (Figura 7a) realizou-se uma trituração preliminar para diminuição de tamanho de partículas com uma distribuição granulométrica menor que 3 mm. Para esta trituração utilizou-se um macro moinho de rotor vertical com facas móveis e fixas (MA680 Marconi) com peneiras de crivo circular número 30 (Figura 7b). Foi inserida uma quantidade aproximada de 500 g da amostra de cada espécie no moinho. As

amostras foram trituradas por cinco minutos, tempo necessário para obter partículas com dimensões máximas de 3 mm (Figura 7c e 8a).

A partir das amostras moídas foram realizados os ensaios de umidade, teor de cinzas, perda ao fogo, termogravimetria (TG/DSC), fluorescência de raios X (FRX) e difratometria de raios X (DRX).

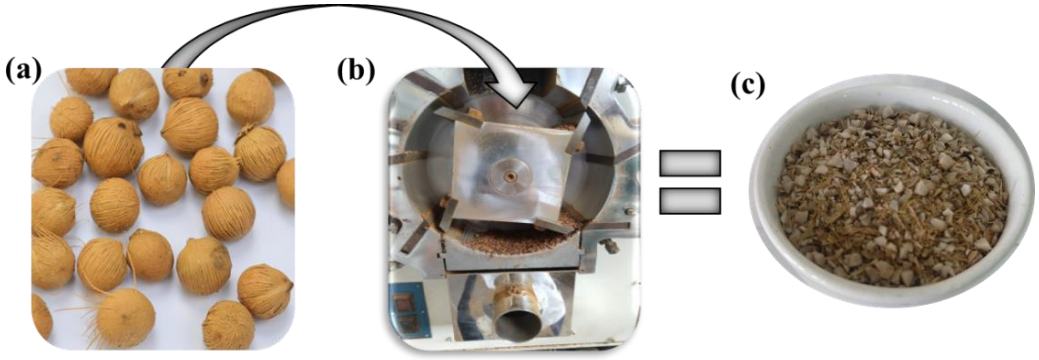


Figura 7. (a) Caroços utilizados para a morfoanatomia; (b) caroços no moinho de facas; (c) caroços moídos para realizar os ensaios de caracterização.
Fonte: Própria autora.

2.5.4. Teor de umidade dos caroços moídos

A umidade (w) dos caroços moídos (*in natura*) foi determinada em triplicata no aparelho Analisador Halogêneo de Umidade da marca Ohaus (Figura 8b). A amostra é pesada pelo equipamento e aquecida com um emissor de radiação infravermelho (lâmpada de halogêneo). A perda de peso é registrada continuamente e a secagem termina quando o critério de variação do peso é estabilizado. O equipamento opera até a temperatura máxima de 105 °C e sinaliza a umidade quando ocorre a constância de massa. O teor de umidade é fornecido pelo equipamento, calculado a partir da diferença de peso.

2.5.5. Teor de perda ao fogo e teor de cinzas dos caroços moídos

Para a determinação da perda ao fogo (Equação 6) os caroços moídos foram pesados e colocado em uma mufla a uma temperatura de 110 °C por 24 h e em seguida, a temperatura de 950 °C por mais 3 h, de acordo com a Norma M-CIENTEC C-028: Materiais cerâmicos – Determinação da perda ao fogo (1995).

$$Perda\ ao\ fogo\ (\%) = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} * 100 \qquad \text{(Equação 6)}$$

Onde:
M_1 - massa do corpo de prova seco à 110 °C (g)
M_2 - a massa do corpo de prova após a sinterização (g)

Para a determinação do teor de cinzas (Equação 7) o cadinho de fusão de 50 ml foi colocado em forno-mufla à temperatura de 600 °C por duas horas, resfriado entre a temperatura máxima e a temperatura ambiente no interior do forno e pesado (P_2). Depois foi inserida a amostra do caroço do açaí moído no cadinho e pesado (P_1). O cadinho mais a amostra foram colocados em forno-mufla à temperatura de 600 ºC por duas horas (Figura 8c), resfriado entre a temperatura máxima e a temperatura ambiente no interior do forno e pesado (P_3), de acordo com a Norma NBR 14.710 – Determinação do teor de cinzas (ABNT, 2017).

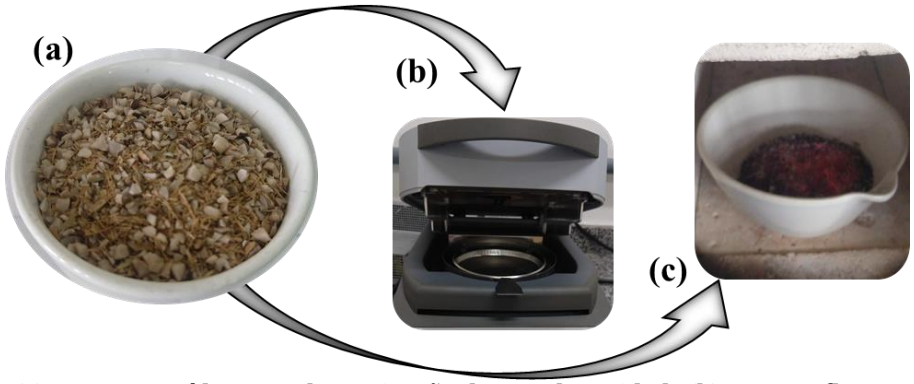


Figura 8. (a) Caroços moídos para determinação do teor de umidade (b) e em mufla para verificar o teor de perda ao fogo e o teor de cinzas (c).
Fonte: Própria autora.

$$Teor\ de\ cinzas\ (\%) = \frac{(P_3 - P_2)}{P_1} * 100 \qquad \text{(Equação 7)}$$

Onde:
P_1 - massa inicial da amostra (g);
P_2 - massa do recipiente (cadinho) vazio (g);
P_3 - massa das cinzas (g).

2.5.6. Análise termogravimétrica e termogravimetria derivada dos caroços moídos

Os testes de análise termogravimétrica e termogravimetria derivada (TG/DSC) foram realizados no equipamento de marca TA Instruments e modelo SDT-Q6000, operando com rampa de aquecimento com taxa de 10 ºC/min de 20 ºC até 700 ºC em atmosfera inerte de nitrogênio (30 mL/min).

2.5.7. Difratometria de raios X e fluorescência de raios X dos caroços moídos

As amostras foram submetidas a uma nova moagem em almofariz e pistilo de ágata até atingir a granulometria entre 10 e 40 µm para leitura em suporte antirreflexivo.

As leituras por Difratometria de raios X (DRX) foram realizadas em difratômetro, marca Shimadzu, modelo XRD 6000 com tubo de raios X de radiação Cu Kα, com

velocidade de leitura 2 º/min, raio de varredura 185 mm e eixos de acionamento θ – 2θ com passo mínimo de ângulo 0,001º (θ) e 0,002º (2θ). As leituras por fluorescência de raios X (FRX) foram realizadas em equipamento PANalytical, modelo Epsilon3-XL com atmosfera de gás hélio (pressão a 10 atm).

A partir da caracterização inicial do teor de umidade, perda ao fogo, teor de cinzas, TG, DRX e FRX se utilizou a espécie *Euterpe precatória* da região metropolitana de Manaus para o beneficiamento térmico do caroço e a produção de cinzas, pois esta espécie apresentou resultados proeminentes ao comparado com as outras espécies.

2.5.8. Beneficiamento térmico do caroço do açaí e a produção das cinzas

Os caroços moídos (Figura 9a) da espécie *Euterpe precatória* foram beneficiados termicamente em forno mufla, conforme método utilizado por Cordeiro (2006), onde foram empregados tempos de residência de 6 h e temperaturas iguais a: 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C e 700 °C de cada amostra, com o intuito de verificar os parâmetros referentes a moagem e granulometria da cinza produzida, em cada temperatura diferente.

As amostras foram colocadas em cadinhos de alta fusão com volume de 50 ml, com aproximadamente 40 g do caroço moído, de modo a evitar diferentes gradientes de aquecimento da amostra. As amostras foram inseridas no forno mufla em temperatura ambiente até que o forno atingisse a temperatura preconizada por 6h e logo após ocorreu o desligamento do equipamento. As amostras beneficiadas (Figura 9b) foram resfriadas entre a temperatura máxima e a temperatura ambiente no interior do forno.

Após o processo de queima e resfriamento, as amostras beneficiadas em cada temperatura foram moídas separadamente no Moinho Multiuso TE 631/3 da marca Tecnal com hélices situadas no eixo central e volume de 350 ml da cuba em aço inox, com sistema de refrigeração para evitar o aquecimento das amostras. O moinho operou com uma rotação de 25.000 rpm.

Foram colocadas 250 g de amostras com tempo de moagem de 4 minutos iniciais. Após esse tempo efetuou-se uma mistura manual para evitar que proporções da amostra ficassem retidas nos cantos circulares e inferiores da cuba, continuando a moagem por mais 2 minutos, totalizando o tempo de 6 minutos para completar o ciclo.

O tamanho das partículas (Figura 9c) foi analisado posteriormente pela curva granulométrica, utilizando o equipamento Mastersizer 2000 acoplado ao dispersor de amostra Hydro 2000MU, na faixa granulométrica entre 0,01 e 10.000 μm.

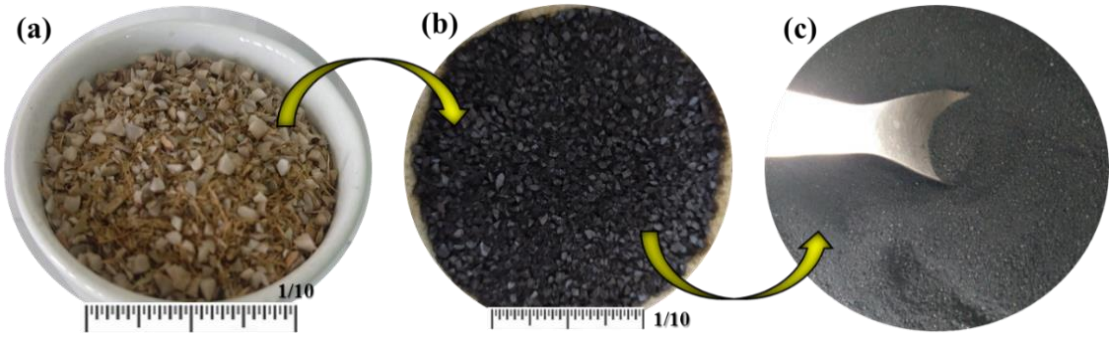


Figura 9. (a) Amostra do caroço de açaí triturada, (b) amostra após o beneficiamento térmico e (c) amostra após queima e moagem (cinza do caroço de açaí produzida).
Fonte: Própria autora.

Os parâmetros relacionados ao diâmetro de partícula em porcentagens foram obtidos a partir das curvas de distribuição granulométrica. Além das curvas, utilizou-se parâmetros relacionados a eficiência da moagem na redução do tamanho das partículas. Um dos parâmetros analisados foi o D_{90} o qual apresenta o diâmetro máximo de 90 % das partículas. Outro parâmetro foi o D_{80} o qual 80 % das partículas apresentam o diâmetro inferior ao obtido e o D_{50} que corresponde ao diâmetro máximo de 50% das partículas.

Estes parâmetros de tamanho de partícula foram utilizados nesta tese para dar suporte à avaliação de moagem, pois são usados para determinar a energia necessária para moer partículas finas com base na Lei de Bond – estabelece que a energia necessária para fragmentar uma massa unitária é inversamente proporcional à raiz quadrada do diâmetro das partículas – no qual conduz a estimativas capaz de prever o consumo de equipamentos que ainda não foram instalados.

A Lei de Bond (1961) convencionou que os tamanhos deveriam ser dados em micrômetros (μm) e referidos como sendo os tamanhos das aberturas de peneira que deixam passar 80 % dos respectivos produtos (BOND, 1961; TARASIEWICZ & RADZISZEWSKI, 1990; WEERASEKARA et al., 2013).

2.6. Produção e caracterização da cinza do caroço de açaí

Os caroços moídos foram beneficiados em cinco temperaturas diferentes e posteriormente triturados para produção da cinza, no qual se realizou ensaios de caracterização para analisar as características físicas, microscópicas e a composição química das cinzas.

2.6.1. Caracterização física, química e microscópica da cinza do caroço de açaí

As micrografias de MEV foram obtidas em um microscópico eletrônico Carl Zeiss, modelo LEO 435 VP, com aceleração de 15-30 kV e 40 pA. Todas as amostras foram cobertas com fina camada de ouro sublimada em um evaporador Balzers SCD 050. Foi realizado o mapeamento de elementos das amostras por EDS (modelo Penta FET x-3 Si) acoplado.

Também for realizada a leitura por difratometria de raios X em difratômetro, marca Shimadzu, modelo XRD 6000 com tubo de raios X de radiação Cu Kα, com velocidade de leitura 2 º/min, raio de varredura 185 mm e eixos de acionamento θ – 2θ com passo mínimo de ângulo 0,001º (θ) e 0,002º (2θ) e por espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF), marca Shimadzu, modelo EDX-720, operado a 50 kV e 100 μA.

Com base nos resultados das análises físicas, químicas e microscópicas comparativas entre as amostras, se utilizou para aplicação nas misturas de solo-cimento a cinza beneficiada a uma temperatura de 600 °C.

Esta escolha foi baseada também, nos estudos propostos por Martirena e Monzó (2018) e Cordeiro *et al*. (2019a) que destacaram as características de materiais e da cinza do bagaço de cana para adição em concreto sustentável, respectivamente. Os autores supracitados indicam que a massa resultante após a elevação da temperatura para aplicação em matriz cimentícia é com queima superior a 600 °C.

2.6.2. Índice de pozolanicidade da cinza produzida a 600 °C

A pozolanicidade da cinza do caroço de açaí foi determinada por meio do índice de desempenho em argamassa com cimento Portland aos 28 dias – NBR 5.752 (ABNT, 2014) e por meio da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado pelo método Chapelle modificado – NBR 15.895 (ABNT, 2010). Com a finalidade de verificar o desempenho em argamassa com a cinza do caroço de açaí foram realizados os testes de tempo de pega em conformidade com a norma técnica NBR 16.607 (ABNT, 2018) e de resistência a compressão baseado na norma técnica NBR 5.752 (ABNT, 2014).

Para os ensaios com argamassa utilizou-se os padrões técnicos de granulometria da areia normal, sendo a areia grossa retida entre as peneiras de abertura nominal de 2,4 mm e 1,2 mm; areia média grossa retida entre as peneiras de abertura nominal de 1,2 mm e 0,6 mm; areia média fina retida entre as peneiras de abertura nominal de 0,6 mm e 0,3 mm e areia fina retida entre as peneiras de abertura nominal de 0,3 mm e 0,15 mm,

conforme NBR 7.214 (ABNT, 2015) e utilizou-se o cimento Portland CP II F 32, conforme preconizado na norma técnica NBR 5.752 (ABNT, 2014).

No ensaio de resistência a compressão foram confeccionados corpos de prova padrão (Figura 10a) com a quantidade de 202 g de cimento Portland II F 32, 148 ml de água e 936 g de areia normal, calculado em proporção ao volume do molde cilíndrico.

Para se obter os parâmetros comparativos, foram moldados corpos de prova com a cinza do caroço de açaí (Figura 10b) alterando a proporção do cimento em 25 % de cinza, (78 g de cinza e 124 g de cimento Portland II F 32), cujas proporções são estabelecidas pela norma NBR 5.752 (ABNT, 2014).

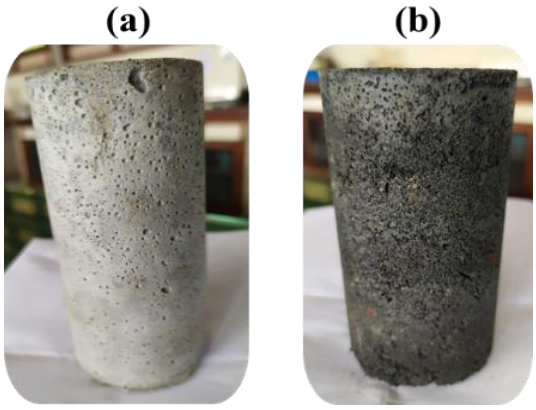


Figura 10. (a) Ensaios de resistência à compressão para determinar o índice de pozolanicidade da argamassa com traço padrão e (b) traço com a cinza do caroço de açaí.
Fonte: Própria autora.

No ensaio de tempo inicial e final de pega utilizou-se a mesma proporção dos materiais utilizados para os corpos de prova com traço padrão e corpos de prova com traço contendo a cinza do açaí.

De forma simplificada, o método de Chapelle modificado consiste em manter em aquecimento (90°C) sob agitação, uma solução com 1 g de óxido de cálcio, 1 g de cinza e 250 g de água isenta de dióxido de carbono durante 16 h. Ao final do ensaio, o teor de CaO livre é medido por meio de titulação de cerca de 50 mL da solução com HCl 0,1 N e fenolftaleína (1 g/L), e estima-se a quantidade de CaO que foi combinada com a pozolana. O resultado é expresso pela quantidade de óxido de cálcio fixado por g de cinza.

2.7. Planejamento experimental

A Figura 11 descreve de modo sucinto o planejamento experimental que embasaram os testes laboratoriais utilizados na matriz solo-cimento. A metodologia utilizada em cada etapa será descrita de maneira detalhada.

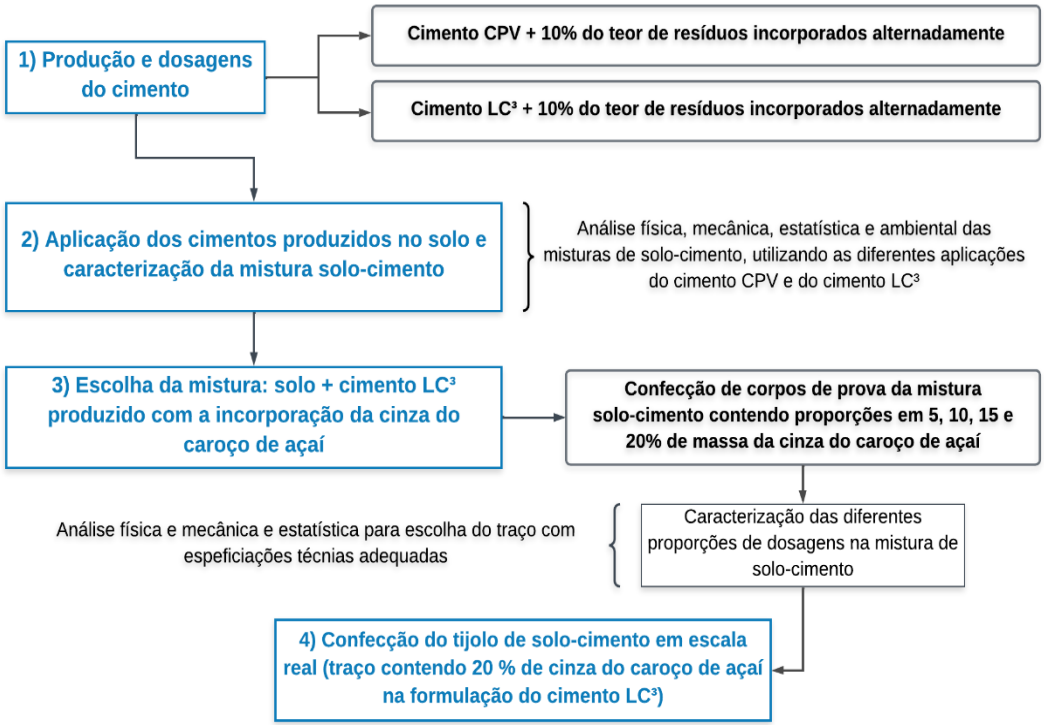


Figura 11. Fluxograma do planejamento experimental elaborado visando a produção do tijolo de solo-cimento.

Fonte: Própria autora.

Ensaios realizados com as matérias-primas incorporadas à matriz de solo-cimento serviram de base comparativa entre a sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana e cinza do caroço de açaí. Com o intuito de destacar o potencial sustentável das misturas, executou-se uma avaliação do ciclo de vida (ACV) evidenciando os impactos ambientais referente a extração de recursos naturais, emissões poluentes e os danos consequentes de tais impactos.

Os resultados de caracterização física, mecânica, teste estatístico e avaliação ambiental da mistura solo-cimento contribuíram para a indicação da cinza do caroço de açaí como o resíduo a ser utilizado em diferentes proporções na produção do cimento LC^3. Tal sugestão foi proposta, destacando a cinza do caroço de açaí como matéria-prima em destaque nesta tese, o qual justifica-se a abrangência de detalhes tanto dos ensaios realizados com o caroço, quanto dos ensaios com a cinza produzida.

Dessa forma, se procedeu com a incorporação da cinza do caroço de açaí na mistura de solo-cimento utilizando os teores de 5, 10, 15 e 20 % da cinza em substituição ao clínquer + gesso na produção do cimento LC^3, que foi aplicado ao solo.

A partir da análise dos resultados de resistência mecânica e absorção de água destas misturas, optou-se em produzir o tijolo de solo-cimento em escala real contendo 20 % de cinza do caroço de açaí em substituição ao teor de cimento da composição LC^3.

2.8. Produção e dosagens das misturas de solo-cimento

2.8.1. Produção do cimento LC^3

As proporções aplicadas das matérias-primas consideradas elemento base para o cimento LC^3 foram: 55 % de cimento CP V (Figura 12a), 30 % de metacaulinita (Figura 12b) e 15 % de fíler de calcário (Figura 12c), baseado nas pesquisas realizadas por Scrivener (2014), Andrés *et al*. (2015) e Nair *et al*. (2020).

Figura 12. (a) Cimento Portland CP V, (b) metacaulinita e (c) fíler.
Fonte: Própria autora.

2.8.2. Dosagem das matérias-primas

Estudos apresentados por Machado *et al*. (2020) verificaram que as propriedades de absorção de água no solo-cimento não são afetadas se cinzas como pó de fibra de coco ou de casca de arroz substituir o cimento em 10 %. Com base neste parâmetro e de acordo com Balestra *et al*. (2023), se utilizou a proporção de 10 % de massa dos resíduos em substituição ao teor de cimento. Esta porcentagem foi utilizada tanto para o cimento CP V quanto para o cimento LC^3.

2.8.3. Produção das misturas de solo-cimento com a incorporação dos resíduos

Para a mistura solo-cimento considerou-se a proporção de 90 % de solo e 10 % de cimento. Em cada corpo de prova cilíndrico de 1000 cm^3 (10 cm de diâmetro, altura de 12,73 cm) foi previsto a quantidade de 2500 g de material, considerando 90 % de solo úmido, 10 % de cimento e 14 % de água (teor do próprio solo).

A nomenclatura aplicada para a produção dos corpos de prova de solo-cimento com o cimento CP V, cimento LC^3 e adições está descrita no Quadro 2. A quantidade de materiais utilizada em cada corpo de prova está descrita na Tabela 3.

Quadro 2. Nomenclatura usada para as misturas de solo-cimento com o cimento CP V, cimento LC^3 e adições

SC_1	Solo-cimento padrão com cimento CP V
SC_2	Solo-cimento com a mistura ternária LC^3
SC_3	Solo-cimento com 10% de sílica ativa em substituição ao cimento da mistura padrão
SC_4	Solo-cimento com 10% de sílica ativa em substituição ao cimento da mistura com LC^3
SC_5	Solo-cimento com 10% de cinza volante em substituição ao cimento da mistura padrão
SC_6	Solo-cimento com 10% de cinza volante em substituição ao cimento da mistura com LC^3
SC_7	Solo-cimento com 10% de cinza do bagaço de cana em substituição ao cimento da mistura padrão
SC_8	Solo-cimento com 10% de cinza do bagaço de cana em substituição ao cimento da mistura com LC^3
SC_9	Solo-cimento com 10% de cinza do caroço de açaí em substituição ao cimento da mistura padrão
SC_{10}	Solo-cimento com 10% de cinza do caroço de açaí em substituição ao cimento da mistura com LC^3

Fonte: Própria autora.

Tabela 3. Quantidade de materiais em massa utilizados nas misturas.

Materiais	**Quantidade de materiais (g)**									
	SC_1	**SC_2**	**SC_3**	**SC_4**	**SC_5**	**SC_6**	**SC_7**	**SC_8**	**SC_9**	**SC_{10}**
Solo úmido	2250	2250	2250	2250	2250	2250	2250	2250	2250	2250
Cimento CP V	250	137,5	225	123,75	225	123,75	225	123,75	225	123,75
Metacaulinita	-	75	-	75	-	75	-	75	-	75
Fíler	-	37,5	-	37,5	-	37,5	-	37,5	-	37,5
Sílica ativa	-	-	25	13,75	-	-	-	-	-	-
Cinza volante	-	-	-	-	25	13,75	-	-	-	-
Cinza do bagaço de cana	-	-	-	-	-	-	25	13,75	-	-
Cinza do caroço de açaí	-	-	-	-	-	-	-	-	25	13,75

Fonte: Própria autora.

A massa de solo-cimento para cada corpo de prova foi misturada separadamente. As matérias-primas foram espalhadas em uma bandeja de plástico e mexidas manualmente até a completa homogeneização (Figura 13a).

Os corpos de prova foram moldados por compactação em três camadas de alturas iguais, compactadas com 25 golpes e escarificada entre uma camada e outra para melhor adesão do solo, conforme metodologia aplicada para o ensaio e energia de compactação dos solos (Figura 13b). Foram confeccionados os corpos de prova com as adições (Figura 13c) e após a moldagem, foram devidamente identificados e mantidos em temperatura ambiente (23 ± 2°C) para o processo de endurecimento e ganho de resistência.

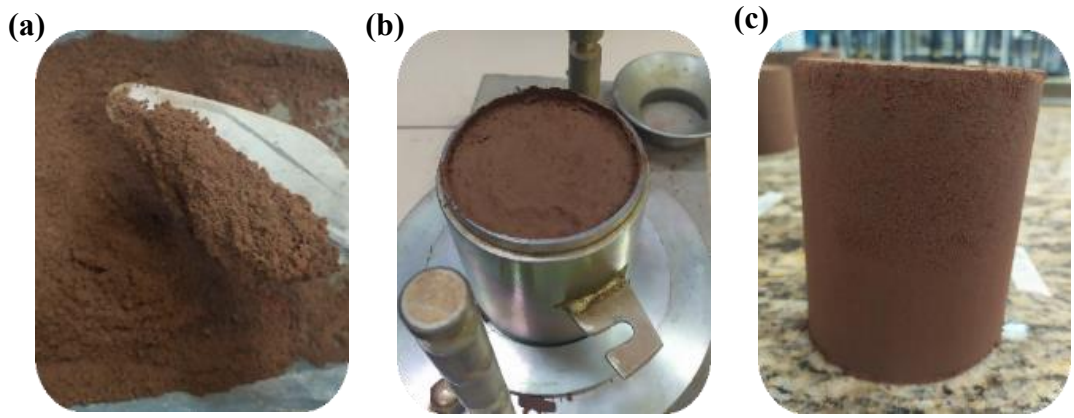


Figura 13. (a) Homogeneização manual dos materiais; (b) compactação dos corpos de prova cilíndricos; (c) corpo de prova padrão da mistura solo-cimento.
Fonte: Própria autora.

2.9. Propriedades das misturas de solo-cimento com a incorporação dos resíduos

2.9.1. Ensaio de análise das propriedades mecânica e física

A análise das propriedades mecânica e física das misturas foi realizada por meio dos ensaios de resistência à compressão e do teor de água em massa úmida, respectivamente.

Para determinar a resistência à compressão os corpos de prova foram rompidos aos 7 e 28 dias em equipamento universal de ensaios destrutivos Emic DL30000N com a taxa de incremento de 0,15 MPa/s. A determinação do teor de água em massa úmida aos sete dias foi realizada a partir da produção de corpos de prova cilíndricos (volume de 196,25 cm^3), moldados no mesmo traço descritos na Tabela 3 e compactados manualmente.

Os corpos de prova foram colocados em câmara úmida por 7 dias, posteriormente, foram retirados da câmara úmida, limpos com um pano seco para eliminar o excesso de água superficial e assim medida a massa úmida (M_w). Em seguida, foram colocados em estufa a (105 ± 5°C), por 24 h. Após este período, mediu-se a massa seca em estufa (M_s).

O teor de água foi calculado conforme Equação 8.

$$AA = \frac{(M_w - M_s)}{M_s} * 100\ \% \qquad \text{(Equação 8)}$$

2.9.2. Teste estatístico – Análise de variância (Anova)

A análise multivariada de variância (ANOVA) é uma ferramenta estatística para testar hipóteses de significância entre grupos e foi utilizada para identificar a influência das variáveis independentes (linhas) misturas com a cinza do caroço de açaí (M_1), cinza

do bagaço de cana (M_2), cinza volante (M_3) e sílica ativa (M_4), nas variáveis (coluna) utilizando os dois tipos de cimento (CP V e LC^3) e o tempo de ruptura dos corpos de prova em 7 e 28 dias.

Para realizar a análise através da ANOVA múltiplos fatores – fator duplo sem repetição, se adotou um nível se significância (α) para o valor-P igual a 5%. Para hipótese nula (H0) se adotou o pressuposto que: a média (μ) das variáveis referentes aos materiais inseridos nas misturas são todas iguais. Se considerou para a hipótese alternativa (H1) o pressuposto de que: haverá, ao menos, uma diferença entre as médias dos grupos ensaiados.

H0 → μ = Para todos os grupos ensaiados

H1 → μ ≠ Para, ao menos, um dos ensaiados

Com o intuito de verificar a influência das proporções de cinza do caroço de açaí no resultado de resistência à compressão das misturas utilizou-se a Anova fator único para testar hipóteses de significância entre grupos. Foi utilizada para identificar a influência das variáveis independentes apresentadas em linhas as misturas de solo-cimento com os diferentes teores de cinza do caroço de açaí no fator tempo de ruptura dos corpos de prova em 28 dias.

Ao realizar a análise, se adotou um nível se significância (α) para o valor-P igual a 5%. Para hipótese nula (H_0) se adotou o pressuposto que: a média (μ) das variáveis referentes aos materiais inseridos nas misturas são todas iguais. Se considerou para a hipótese alternativa (H_1) o pressuposto de que: haverá, ao menos, uma diferença entre as médias dos grupos ensaiados.

Após a verificação dos resultados da massa seca e úmida dos corpos de prova com as misturas de solo-cimento bem como os resultados de resistência à compressão, foi possível observar tais valores com as normas técnicas vigentes para produção de tijolo de solo-cimento. Os testes estatísticos corroboraram para estas observações.

Além disso, foi possível realizar a avaliação do ciclo de vida ACV, sendo de suma importância esta análise que deu suporte a uma discussão dos aspectos sustentáveis do tijolo, bem como os materiais incorporados que contribuíssem com menor impacto ambiental. A metodologia e resultados da ACV serão apresentados detalhadamente em capítulo posterior. A partir destas etapas se procedeu com a mistura de solo-cimento e a incorporação da cinza do caroço de açaí na composição do cimento LC^3.

2.10. Avaliação do ciclo de vida (ACV) das misturas de solo-cimento

2.10.1. Objetivo e escopo do estudo da Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Por meio da ACV esta pesquisa buscou avaliar os impactos ambientais potenciais em mistura de solo-cimento, cujos componentes estudados foram as matérias-primas: solo, cimento CP V, metacaulinita e fíler. Para efeito comparativo foram inseridas à mistura de solo-cimento outras matérias-primas como a sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana e a cinza do caroço de açaí.

O objetivo do estudo para aplicação da ACV teve o intuito de investigar os impactos ambientais nas diferentes misturas de solo-cimento. A intenção de utilizar as análises comparativas entre as misturas e aplicações das matérias-primas corroborou para demonstrar as possibilidades de intervenções e formas de restringir os impactos ambientais.

O escopo do sistema do estudo proposto consistiu em avaliar o comparativo entre os potenciais impactos ambientais das diferentes misturas que compõem o tijolo de solo-cimento.

A unidade funcional utilizada que quantificou as funções identificadas no produto considerou um quilo da mistura, sendo a massa de matérias-primas utilizada para produção de um tijolo de solo-cimento.

Os fluxos de referência nortearam-se de forma comparativa entre as matérias-primas convencionais utilizadas na alvenaria de solo-cimento com às destacadas nesta tese, desde a substituição do cimento CP V pelo cimento LC^3, bem como a inserção das matérias-primas alternativas sustentáveis. Portanto, o valor do fluxo de referência aplicado foi de 2,5 kg, equivalente a massa do tijolo de solo-cimento, nas proporções indicadas no inventário.

As fronteiras e determinações do escopo do estudo da ACV contemplaram desde a extração da matéria prima até a produção do tijolo, sendo o estudo delimitado como "berço ao portão", considerando as etapas de extração e processamento das matérias-primas. Por se tratar de um estudo genérico, adotou-se distâncias médias para o levantamento e avaliação da etapa de transporte das matérias-primas.

A utilização da alocação de impactos ambientais se faz necessária, por exemplo, quando um sistema a ser estudado gera mais de um produto, neste caso, não se adotou método de alocação, por não se caracterizar um sistema multifuncional.

2.10.2. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

O método de AICV utilizado foi o CML 2001 que é um método de avaliação de impacto desenvolvido pelo Instituto de Ciências Ambientais, Universidade de Leiden, Holanda, e que restringe a modelagem quantitativa aos estágios iniciais da cadeia de causa e efeito para limitar as incertezas (GHINEÉ, 2001; CML-IA, 2016).

Quanto à caracterização, o nível de avaliação de impacto do método CML 2001 é atribuído em *Midpoint*, no qual se usa indicadores localizados ao longo do mecanismo ambiental antes de chegar ao ponto final da categoria, cada impacto *midpoint* é agrupado em categorias intermediárias de acordo com mecanismos comuns (por exemplo, mudança climática) ou agrupamentos comumente aceitos (por exemplo, ecotoxicidade) (GHINEÉ, 2002; PIEKARSKI *et al*., 2012; MENDES *et al*., 2016).

Não há um método específico elaborado para a caracterização de materiais, produtos e processos brasileiros, assim, uma das formas de reduzir as incertezas em estudos brasileiros se deu por meio da escolha de um método de AICV global que garante uma maior confiabilidade aos resultados.

No entanto, o método CML 2001 foi selecionado como referência para as categorias de impacto a serem analisadas, conforme demostrado no Quadro 3, pois este método tem sido frequentemente adotado para AICV em edificações e matrizes cimentícias (DONG *et al*., 2021).

Por se tratar de um tijolo de solo-cimento no qual a matéria-prima utilizada em maior quantidade para sua produção é o solo, que é extraído de jazidas naturais, bem como o cimento que é o principal aglomerante hidráulico e, consequentemente, a matéria-prima que favorece o aumento da resistência mecânica do tijolo, torna-se relevante a avaliação dos impactos referente a extração de recursos naturais, emissões poluentes e os danos consequentes de tais impactos.

Quadro 3. Categoria de impactos globais avaliadas

	Categoria de impacto	**Unidade**
1	Aquecimento global	kg CO_2 eq
2	Depleção de recursos abióticos	kg Sb eq
3	Depleção da camada de ozônio	kg CFC_{11} eq
4	Oxidação fotoquímica	kg etileno eq
5	Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq
6	Ecotoxicidade	kg 1,4-DCB
7	Acidificação	kg SO_2 eq
8	Eutrofização	kg P eq

Diante desse contexto, foram consideradas categorias de impactos globais que abordam alguns indicadores e expressam a gravidade relativa de impacto ambiental no processo de produção do tijolo se solo-cimento no qual se utilizou as matérias-primas: solo, cimento CP V, metacaulinita, fíler, sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana e cinza do caroço de açaí, conforme nomenclatura descrita no Quadro 2.

Nesse contexto, os fluxogramas que delimitam as fronteiras do sistema estão apresentados nas Figuras 14a e 14b para o SC_1 e para o SC_2, respectivamente.

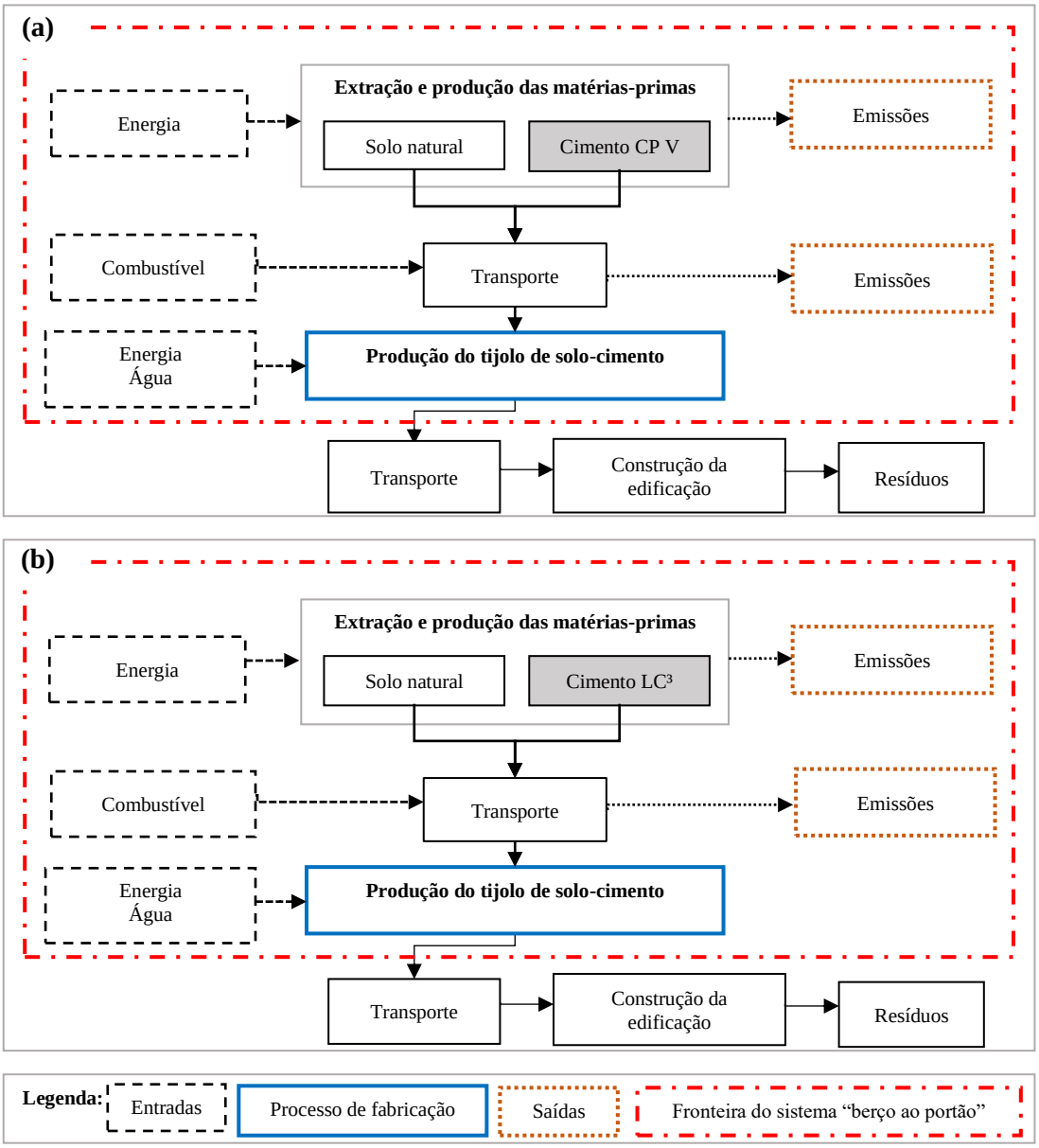
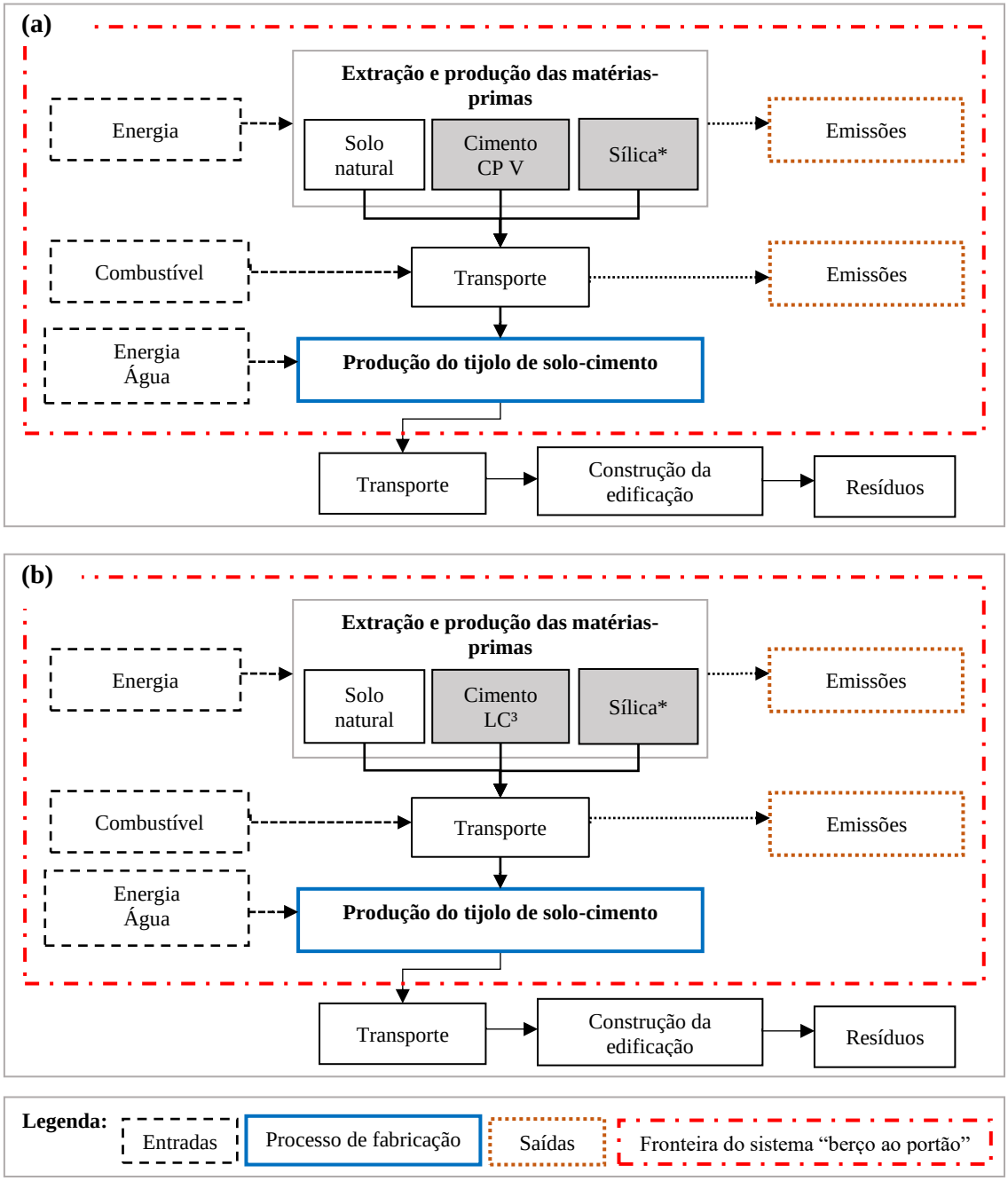


Figura 14: (a) Fluxograma do processo de produção do tijolo de solo-cimento SC_1 e a delimitação da fronteira do sistema; (b): Fluxograma do processo de produção do tijolo de solo-cimento SC_2 e a delimitação da fronteira do sistema
Fonte: Própria autora

As fronteiras do sistema para o tijolo SC_3 (cujo fluxograma é representativo para às misturas SC_5, SC_7 e SC_9 com a alteração referente à matéria-prima inserida à mistura com cimento CP V) e SC_4 (cujo fluxograma é representativo para às misturas SC_6, SC_8 e SC_{10} com a alteração referente à matéria-prima inserida à mistura com cimento LC^3), estão apresentados nas Figuras 15a e 15b, respectivamente.



* Matéria-prima substituída por cinza volante (SC_5 e SC_6), cinza do bagaço de cana (SC_7 e SC_8) e cinza do caroço de açaí (SC_9 e SC_{10})

Figura 15: (a) Fluxograma do processo de produção do tijolo de solo-cimento SC_3 e a delimitação da fronteira do sistema; (b): Fluxograma do processo de produção do tijolo de solo-cimento SC_4 e a delimitação da fronteira do sistema.
Fonte: Própria autora

2.10.3. Software, levantamento do inventário e base de dados

Nesta pesquisa foi utilizado o *software* livre OpenLCA, que possui licença gratuita (Nexus OpenLCA, disponível em https://nexus.openlca.org/databases) e tem sido bastante utilizado em meio acadêmico. O OpenLCA é um programa profissional *opensource* para ACV, desenvolvido pela empresa alemã GreenDelta.

Esta ferramenta permite o cálculo de impactos ambientais e comparações quanto aos aspectos energéticos, favorecendo a análise dos sistemas e processos envolvidos para a aplicação das matérias-primas em destaque nesta tese. O programa depende da utilização de bases de dados no qual se utilizou para o levantamento de inventário a base de dados "Ecoinvent 3.7.1 *cut-off unit regionalized*", que abrange dados referentes à construção civil e regionalizados para o Brasil, conferindo assim, maior confiabilidade à análise dos resultados.

A base de dados forneceu informações de diversos produtos para a avaliação quantitativa dos impactos ambientais gerados em seu ciclo de vida e os dados foram relacionados às matérias-primas para que a formação do inventário e a avaliação de impacto pudessem apresentar uma completude esperada, como estipulado pela norma NBR ISO 14.044 (ABNT, 2009b).

Os dados referentes aos fluxos de entradas, produção e saídas foram contabilizados a partir da base de cálculo apresentada no Apêndice I (Parte A) e da produção em volume da massa do tijolo de solo-cimento. Os dados referentes ao Inventário do Ciclo de Vida estão descritos no Apêndice I (Parte B).

2.10.4. Matriz Pedigree

A Matriz Pedigree é utilizada para estimativa de incertezas em estudos de ACV, no qual se avalia as fontes de dados de acordo com cinco indicadores. O uso da matriz irá envolver julgamentos subjetivos que irão depender da base de conhecimentos do usuário realizando a pontuação.

Os indicadores que são independentes do estudo no qual os dados são aplicados são: confiabilidade e abrangência. Os indicadores relativos as condições naturais de produção e tecnológicas na qual os dados são válidos e então dependem das metas de qualidade de dados para o estudo no qual os dados são aplicados são: correlação temporal, geográfica e tecnológica. No protocolo, para todos os parâmetros (de todos os processos) cada indicador recebe uma avaliação de 1 a 5, sendo que 1 representa o melhor grau de qualidade do indicador e 5 o pior caso encontrado (Notas Pedigree).

Além da matriz Pedigree, foi aplicado também o método de Monte Carlo que é uma técnica de amostragem artificial empregada para operar numericamente sistemas complexos que tenham componentes aleatórios. As bases para a aplicação da Simulação de Monte Carlo no cálculo da incerteza consistem em selecionar aleatoriamente um número de uma distribuição de possíveis valores, para uma grandeza de entrada e repetir o procedimento para as outras grandezas de entrada.

Cada valor obtido aleatoriamente é considerado no modelo matemático da medição e um resultado é, então, obtido para a grandeza de saída. Este passo é repetido n vezes, de forma independente, a fim de avaliar a função densidade de probabilidade do mensurando (BIPM, 2004). A simulação de Monte Carlo produz curvas de distribuição probabilística que agregam as incertezas de cada parâmetro dos materiais/processos críticos e representam a incerteza de parâmetro total envolvida.

A saída da matriz Pedigree é parte do processo de cálculo da entrada da simulação Monte Carlo. Assim, para realizar simulações, a saída da matriz Pedigree (variância do processo) precisa ser trabalhada para determinar o desvio padrão e, indiretamente, a média, necessários como dados de entrada para o software externo a utilizar (WEIDEMA *et al*., 2013; BAIOCHI e SILVA, 2021).

Para alinhamento com as recomendações e boas práticas da literatura, adotou-se 10.000 iterações e intervalo de confiança de 95% para as simulações.

2.10.5. Interpretação dos resultados da ACV

As categorias de impacto utilizadas contêm indicadores aplicados na descrição dos impactos ambientais de produtos da construção civil. Com a ACV, buscou-se apresentar os impactos das misturas de solo-cimento produzidas para as categorias supracitadas. A especificação e representatividade das siglas das unidades apresentadas no Quadro 3 serão discriminadas na interpretação dos resultados.

Portanto, os resultados foram divididos em duas etapas, no qual inicialmente, será apresentado os impactos ambientais de cada processo criado para cada mistura de solo-cimento, nas categorias supracitadas.

Posteriormente, será feito um comparativo quanto aos aspectos ambientais da mistura de solo-cimento utilizando os dois tipos de cimento com cada matéria-prima incorporada à mistura.

2.11. Viabilidade técnica do solo-cimento com diferentes proporções da cinza do caroço de açaí

A partir dos resultados comparativos contendo diferentes adições e os cimentos CP V e LC^3 se observou a viabilidade técnica quanto a absorção de água e resistência à compressão em utilizar o cimento LC^3 e a cinza do caroço de açaí da mistura solo-cimento. Destaca-se que pesquisadores (JAMES 2019; ISLAM *et al*., 2020; OBIANYO *et al*., 2020; NSHIMIYIMANA, *et al*., 2021) analisaram o teor de cinza de resíduo agroindustrial em matriz de solo-cimento substituindo o teor de cimento até 20 %.

Nesse contexto, utilizou-se este critério como teor máximo para substituir o cimento pela cinza do caroço de açaí, aplicando uma variação de 5 % de cinza em cada corpo de prova, iniciando com o corpo de prova padrão (sem a cinza) e os acréscimos de 5 % de cinza em substituição ao teor de cimento.

Portanto, foram moldados os corpos de prova cilíndricos com as misturas de solo-cimento considerando as seguintes nomenclaturas: mistura solo-cimento padrão utilizando o cimento LC^3 (MSC-LC^3) e as misturas de solo-cimento nas diferentes proporções de substituição do teor de cimento pela variação em 5 % da cinza do caroço do açaí (MSC-5%), 10 % (MSC-10%), 15 % (MSC-15%) e 20 % (MSC-20%).

A quantidade de cada uma das matérias-primas utilizadas em cada corpo de prova está descrita na Tabela 4.

Tabela 4. Nomenclatura e quantidade de materiais em massa para confecção dos corpos de prova

Materiais	**Quantidade de materiais (g)**				
	MSC-LC^3 (com LC^3)	**MSC-5% (LC^3 + 5% cinza)**	**MSC-10% (LC^3 + 10% cinza)**	**MSC-15% (LC^3 + 15% cinza)**	**MSC-20% (LC^3 + 20% cinza)**
Solo (15 % de umidade)	2250	2250	2250	2250	2250
Cimento CP V	137,5	130,63	123,75	16,87	110
Metacaulinita	75	75	75	75	75
Fíler	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
Cinza do açaí	-	6,87	13,75	20,63	27,5

Fonte: Própria autora.

Após a moldagem, os procedimentos de desmolde, secagem, cura, endurecimento e rompimento à compressão foram os mesmos utilizados para as misturas de solo-cimento com a incorporação dos resíduos descritas no item 3.9.1.

Para verificar o teor de absorção de água com base na NBR 8.492 (ABNT, 2012) se utilizou os mesmos traços descritos na Tabela 4. Foram compactados e moldados

corpos de prova cilíndricos (volume de 196,25 cm³) e colocados em estufa a (105 ± 5 ºC) por 24 h. Após esse tempo foram resfriados em temperatura ambiente e pesados (M_{seco}). Posteriormente, os corpos de prova foram colocados imersos em água por 24 h. Após esse tempo retirou-se o excesso de água superficial com um pano úmido e mediu-se a massa úmida ($M_{saturado}$).

O teor de absorção de água foi calculado conforme a Equação 9.

$$AA = \frac{(M_{saturado} - M_{seco})}{M_{seco}} * 100\ \% \qquad \text{(Equação 9)}$$

A resistência à compressão dos corpos de prova foi determinada conforme o ensaio de análise das propriedades mecânica e física descrito no item 3.9.1.

Com o intuito de verificar a influência das proporções de cinza do caroço de açaí no resultado de resistência à compressão das misturas utilizou-se a Anova fator único para testar hipóteses de significância entre grupos, similar ao teste aplicado nas misturas de solo-cimento, onde se utilizou de maneira comparativa os cimentos CP V e LC^3 com a incorporação de resíduos.

Neste caso, aplicou-se o teste com as diferentes proporções da cinza do caroço de açaí, no qual se utilizou para identificar a influência das variáveis independentes apresentadas em linhas as misturas de solo-cimento com os diferentes teores de cinza do caroço de açaí no fator tempo de ruptura dos corpos de prova em 28 dias.

Para realizar a análise, se adotou um nível se significância (α) para o valor-P igual a 5%. Para hipótese nula (H_0) se adotou o pressuposto que: a média (μ) das variáveis referentes aos materiais inseridos nas misturas são todas iguais. Se considerou para a hipótese alternativa (H_1) o pressuposto de que: haverá, ao menos, uma diferença entre as médias dos grupos ensaiados.

2.12. Confecção do tijolo de solo-cimento + cinza do caroço de açaí em escala real

A partir dos resultados de resistência a compressão e dados estatísticos se utilizou para a confecção do tijolo em escala real a quantidade de matérias-primas, contendo a mistura 90 % de solo úmido e 10 % de cimento LC^3.

O cimento LC^3 aplicado no tijolo foi a partir da substituição do teor de cimento CP V pela cinza do caroço de açaí, na proporção: 132 g de cimento CP V e 33 g de cinza

do caroço do açaí, equivalente a 20 % do teor de cimento; e, completando a mistura ternária, utilizou-se 90 g de metacaulinita e 45 g de fíler.

O tijolo de solo-cimento em escala real foi confeccionado em triplicata, no formato paralelepípedo maciço com dimensões de 5,0 x 9,0 x 18,0 cm (Figura 16a) utilizando molde desmontável feito com chapas de ferro galvanizado.

As matérias-primas foram colocadas em uma bandeja plástica, misturadas manualmente e colocadas no molde com golpes para escarificação do solo até o enchimento completo. Em seguida, o molde foi colocado em uma prensa no qual a força de compressão aplicada para prensagem dos blocos foi de 50 kN similar a força que é aplicada em prensa manual para confecção do tijolo de solo-cimento.

Em seguida o tijolo foi desmoldado e mantido em temperatura ambiente (23 ± 2 ºC) para o processo de endurecimento durante 7 dias (Figura 16b), período mínimo em que a norma NBR 10.833 (ABNT, 2013) regulamenta para se verificar os valores de resistência a compressão acima de 2 Mpa. O procedimento para moldagem dos corpos de prova seguiu as instruções das normas NBR 8.491 (ABNT, 2012) e NBR 8.492 (ABNT, 2012).

A resistência à compressão do tijolo foi determinada conforme o ensaio de análise das propriedades mecânica e física descrito no item 3.9.1., sendo a ruptura executada em máquina universal de ensaios destrutivos Emic DL30000N com a taxa de incremento de 0,15 MPa/s (Figura 16c).

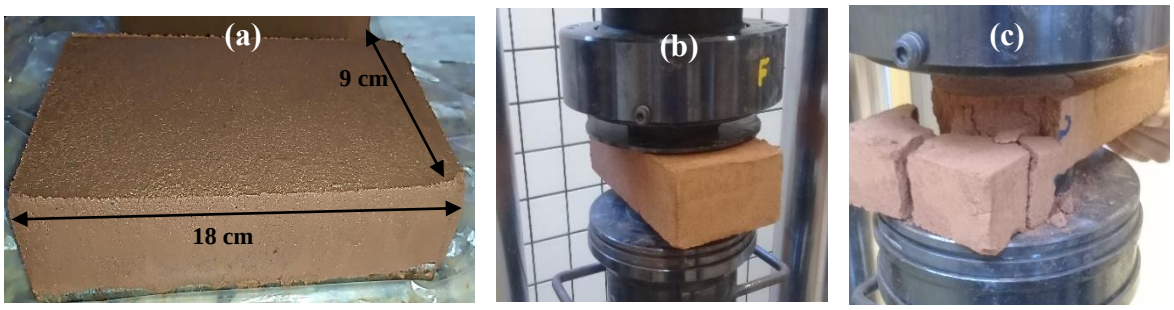


Figura 16. (a) Tijolo de solo-cimento maciço com as dimensões de altura e largura, (b) tijolo após 7 dias de cura e inserido em equipamento de ensaios destrutivos, (c) tijolo após rompimento.

CAPÍTULO 3 – PROPRIEDADES DO CAROÇO E DA CINZA DO CAROÇO DE AÇAÍ

3.1. Características do caroço de açaí

3.1.1. Morfoanatomia do caroço do açaí (*Euterpe oleracea e Euterpe precatoria*)

O fruto do açaí *in natura* é arredondado e com base nas medições executadas ele possui aproximadamente 1 cm de diâmetro e um peso médio que varia de 0,8 g a 2,3 g, fixado ao cacho por meio de pedúnculo (Figura 17a) com comprimento entre 5 cm e 15 cm. O seu epicarpo de cor violáceo, púrpura quase negro e muito fino e o mesocarpo também bastante fino, sendo as partes comestíveis do fruto (Figura 17b).

O caroço é revestido com Fibras Mesocárpicas (FM) que tem um comprimento aproximado de 12 cm, a parte que interliga o fruto ao pedúnculo no cacho é conhecida como Rafe (RF) (Figura 17c). O pericarpo do caroço possui espessura (E) variando de 1 µm a 1 mm e o endosperma (EN) – diâmetro interno – do caroço (D) varia entre 0,75 cm e 0,95 cm (Figura 17d). O endosperma possui uma biomassa sólida, de coloração branca e ocupa toda a região interna do pericarpo.

Na Figura 17e observa-se o embrião (EM), o Hilo (HI) e o Poro Germinativo (PG) no endosperma do caroço, que são fundamentais para o potencial germinativo e produtivo da espécie.

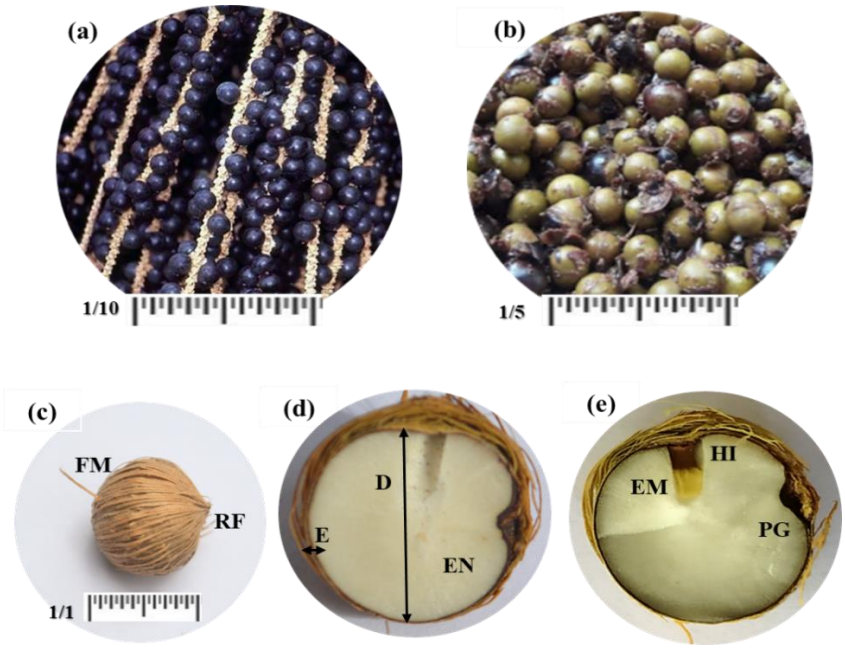


Figura 17. (a) Fruto interligado ao cacho pelo pedúnculo; (b) Camada fina do epicarpo após despolpamento do caroço do açaí; (c) Caroço revestido com fibras mesocárpicas (FM) e a Rafe (RF); (d) Endosperma do caroço; (e) Embrião, Hilo e o Poro Germinativo do caroço.
Fonte: Própria autora

Outras características do caroço do açaí em pesquisas realizadas por Machado *et al*. (2018) e Barbosa *et al*. (2019) apresentaram para a composição em massa do endosperma: teores lipídios entre 1,65 e 3,56 %, fibras totais entre 29,69 e 62,75 %, hemicelulose entre 9,01 e 14,19 %, celulose entre 39,83 e 40,29 %, lignina entre 4,00 e 8,93 %, 0,83 % de carbono fixo e 7,82 % de matéria volátil. Aguiar & Mendonça (2003), Martins *et al*. (2009), Marins *et al*. (2014) e Machado *et al*. (2018) apresentaram a caracterização do caroço similar à descrição deste trabalho.

Vale destacar que a morfologia de sementes permite identificar a estrutura e testes de germinação e o endocarpo permite o crescimento do embrião durante a germinação (ARAÚJO e MATOS, 1991). Portanto, nesta tese se utilizará o termo caroço por não se tratar de reprodução da espécie.

3.1.2. Teor de umidade, perda ao fogo e teor de cinzas

O teor de umidade do caroço de açaí após o processamento do fruto variou entre 22 e 28,5 % e após 15 dias em temperatura ambiente, o teor de umidade variou entre 15 e 16 %. Silva *et al*. (2004) e Luczynski *et al*. (2011) detectaram teores de umidade do caroço de açaí entre 20 e 40 % após o processamento, similar ao encontrado nesta pesquisa. Martins *et al*. (2009) destaca que o índice de umidade do caroço *in natura* varia dependendo dos índices pluviométricos da colheita. A Tabela 5 apresenta a média dos teores de umidade, perda ao fogo e cinzas das amostras do caroço do açaí moído, após 30 dias secos em temperatura ambiente.

Tabela 5. Média dos teores de umidade, perda ao fogo e cinzas das amostras do caroço do açaí moído

Amostra	Teor de umidade			Perda ao fogo	Teor de cinzas
	Média	Desvio Padrão	Variância		
Amostra Anori	10,345	0,025	0,00125	97,60	1,78
Amostra Codajás	12,250	0,540	0,58300	97,75	6,34
Amostra Manaus	8,977	0,143	0,03682	98,38	7,84
Amostra Pará	11,080	0,350	0,24500	96,66	1,36

Fonte: Própria autora

A média dos teores de umidade apresentaram uma variação entre 8 e 12% para as diferentes amostras acondicionadas em temperatura ambiente. Destaca-se o maior teor de umidade para a amostra de Codajás e o menor valor para a amostra de Manaus. Pesquisas desenvolvidas por Barbosa Neto *et al*. (2014) e Berni *et al*. (2018) demonstram que uma

grande concentração da umidade do caroço está nas fibras mesocárpicas (FM) e quando expostos a temperatura ambiente há a perda rápida de umidade na parte superficial da biomassa, porém a umidade interna não é grandemente influenciada pela evaporação na superfície, ficando uma proporção maior de água na hemicelulose presente na parte interna do caroço atrelada às reações de desidratação dos grupos (-OH) provenientes dos polissacarídeos lignocelulósico.

Para o beneficiamento térmico do caroço, é importante verificar o teor de umidade, pois quanto menor a quantidade de água, menor também será o consumo energético para o processo inicial de queima (SILVA *et al*., 2015). Nesse contexto, vale destacar que a amostra de Manaus pode favorecer um melhor desempenho quanto ao beneficiamento térmico, principalmente nas primeiras temperaturas onde o gasto energético ocorre para evaporação da água na massa.

Ainda nesse aspecto, a moagem inicial favorece o transporte de calor para o endocarpo de maneira uniforme, caso contrário, poderia gerar um material heterogêneo com zonas mais quentes e mais frias, e, portanto, com respostas mecânicas desiguais.

As porcentagens referentes a perda de massa (ao fogo) em 950 ºC foram de 96 % ± 2,5 % em todas as amostras, demonstrando a remoção total de carbono e compostos voláteis presentes na massa a partir dessa temperatura, resultado comumente encontrado para espécies vegetais.

O teor de cinzas variou entre 1,3 e 1,7 % para as amostras de Anori e do Pará e entre 6,3 e 7,8 % para as amostras de Codajás e de Manaus. Nesse aspecto, houve maior proporção no teor de cinzas da amostra de Manaus, no qual a massa restante após a queima foi de 7,8 % da massa inicial, sendo que as outras amostras obtiveram proporções menores demonstrando que as condições de calcinação do material foram capazes de eliminar os compostos ricos em carbono.

Com base neste critério a amostra de Manaus é a que se obtém uma quantidade maior de massa para produzir a cinza, quando o caroço é submetido a temperaturas de 600ºC. Teores próximos a 8 % significam a presença da massa lignocelulósica, caracterizando o elevado teor de massa lignocelulósica do caroço do açaí, cujos teores verificados por Barbosa *et al*. (2019) foram de 35 % de celulose e 45 % de lignina. Como a lignina é uma molécula tridimensional amorfa em associação com a celulose na parede celular e de natureza polimérica, pode proporcionar um maior tempo para a degradação do material, porém seu processo de volatilização inicia a partir dos 300 ºC (LOURENÇO *et al*., 2016; ATTA-OBENG *et al*., 2017).

Cordeiro *et al*., (2009), Mittri *et al*. (2018), Andreão *et al*. (2020) e Mostafa *et al*. (2020) apresentaram um teor de cinzas para a casca do arroz e bagaço de cana variando de 2 a 6 % de massa resultante após a elevação da temperatura a 600 ºC e concluíram que a proporção mais adequada quanto aos parâmetros físicos e mecânicos para aplicação de cinza de resíduos agroindustriais em matriz cimentícia é entre 10 % e 6 %. Nesse contexto as amostras de Codajás e de Manaus se enquadram nessa característica.

3.1.3. Análise térmica: termogravimetria (TG) e a derivada (DTG)

A Figura 18a apresenta a TG com a variação da perda de massa em relação a temperatura em três estágios e a Figura 18b demonstra o DTG com os limites de tempo e as inflexões nos picos onde as áreas são proporcionais à variação da massa. O comportamento das quatro amostras pela análise térmica foi similar para a variação da massa em relação a temperatura.

As amostras apresentaram três estágios de decomposição térmica, sendo o primeiro onde ocorreu a variação de massa em 17,5 % até uma temperatura próxima a 220 ºC, referente à volatilização de composto de baixo peso molecular que se decompõem pela ação do calor e à evaporação da água que se deve ao alto caráter hidrofílico das fibras lignocelulósicas.

O teor de umidade das amostras a 110°C é de aproximadamente de 10 %, portanto, é possível perceber os limites de tempo da primeira inflexão com uma perda de 10 % de massa variando de 0 a 150 ºC e de 7,5 % perda de massa entre 150 e 220 ºC, indicando que além da água, há materiais de baixo peso molecular, como as fibras do caroço, que volatilizaram até a temperatura de 220 ºC (DENG *et al*., 2016; LIU *et al*., 2015; MOURA *et al*., 2019).

O segundo estágio ocorreu entre 220 e 370 ºC e compreende uma perda de massa de 62,5 %. Com base nos teores de celulose, hemicelulose e lignina supracitados é possível caracterizar que nessa variação de temperatura ocorreu a degradação da hemicelulose, que é hidrofílica e com alto grau de cadeias ramificadas, no qual sua decomposição ocorre até 280 ºC (LIU *et al*., 2015; LEE *et al*., 2018). A partir de 280 ºC houve uma perda de massa de 25 % sendo atribuída a quebra das ligações de celulose, cujo teor está associado a absorção de nutrientes que existem dentro da massa vegetal (GEHLEN *et al*., 2013; MOURA *et al*., 2019).

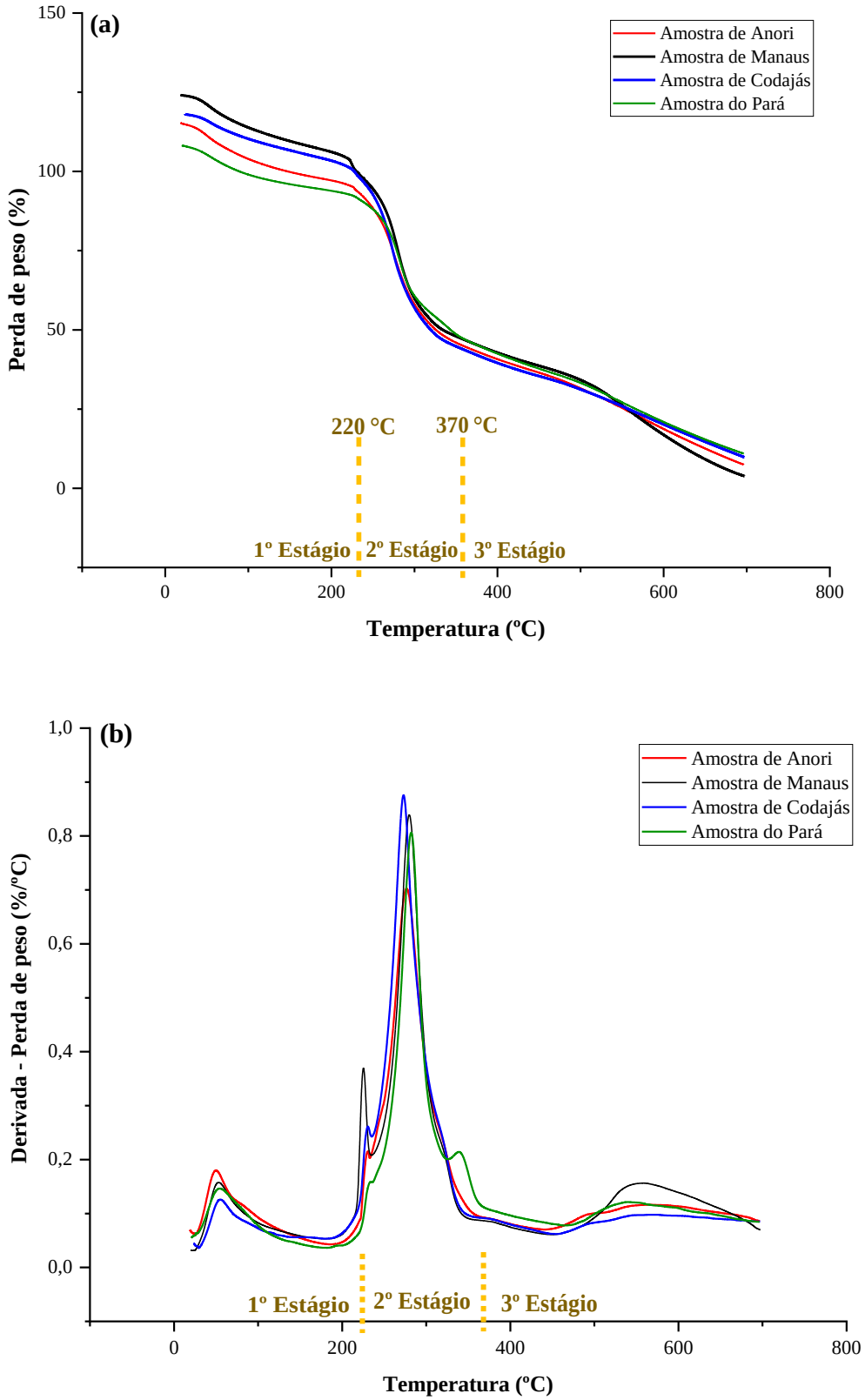


Figura 18. (a) Termogravimetria e a (b) sua derivada, aplicadas às amostras do caroço do açaí moídos.
Fonte: Própria autora

O terceiro estágio ocorreu entre 370 e 700 ºC sendo uma primeira variação de 370 a 570 ºC com uma perda de massa de 12,5 % atribuída a decomposição do carbono fixo e a alteração da estrutura molecular da celulose onde o grau de polimerização da cadeia de celulose diminui e promove o processo de transformação da massa em carvão (MENG *et al*., 2019). E uma segunda variação a partir de 570 ºC com a perda de massa de atribuída a decomposição da lignina, considerado o componente mais difícil de volatilização da biomassa devido a sua estrutura complexa com ligações de éteres de hidrolixas e do grupo metoxi (CRUZ *et al*., 2018). Este processo envolve a fusão da lignina, volatilização e degradação do polissacarídeo que são fracamente ligados. Com a elevação de temperatura atribui-se à degradação maciça de lignina através da quebra de ligações β-O-4 e finalmente a última faixa de temperatura onde ocorre a maior produção de carvão quando comparado com a celulose e hemicelulose (YEO *et al*., 2019).

Como descrito na Tabela 5, acima de 600 ºC o teor de cinzas em massa foi de 6,3 a 7,8 % para as amostras de Codajás e Manaus, respectivamente, similar a decomposição do teor de massa apresentado nas Figuras 18 para a mesma variação de temperatura.

Em geral, a estabilidade térmica é baixa, pois se obteve 60 % da perda de massa até 350 ºC devido ao início do processo de decomposição do elevado teor de celulose presente do caroço do açaí e a perda de massa continua evoluindo progressivamente até atingir 85 % em relação a massa inicial com temperatura acima de 650 ºC que corresponde à descarbonatação de matéria volátil e composto orgânicos, bem como a formação de cinzas (CRUZ *et al*., 2018; DENG *et al*., 2016; ROSELLÓ *et al*., 2017).

O alto percentual de perda de massa é encontrado nesta fase devido à ocorrência de uma desvolatilização passiva no qual ocorre a decomposição dos componentes não biodegradáveis e compostos inorgânicos, além da grande quantidade de celulose que é convertida em voláteis (LIU *et al*., 2015; YEO *et al*., 2019).

Com estes resultados é possível observar a perda de água bem como a decomposição da massa e o percentual de cinzas resultantes com a elevação da temperatura, o que pode contribuir para analisar os elementos, principalmente os teores de celulose, que interferem no processo de queima e influenciam nas características da cinza quando incorporadas ao cimento.

3.1.4. Fluorescência de raios X (FRX) e difratometria de raios X (DRX)

A Tabela 6 apresenta a composição química em relação à óxidos presentes nas quatro amostras obtida por fluorescência de raios X (FRX). Destaca-se a similaridade das

amostras quanto a equivalência dos óxidos, principalmente para as amostras de Anori, Manaus e do Estado do Pará.

Tabela 6. Composição química das amostras do caroço do açaí moído pelo método de FRX

Amostras	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	Fe_2O_3	Outros (MnO, MgO, Na_2O) <1 ou não detectado
Amostra de Anori	3,458	21,295	14,969	37,387	14,336	1,112	-
Amostra de Codajás	1,852	19,401	10,125	35,292	13,912	1,571	-
Amostra de Manaus	2,515	26,319	12,927	31,145	19,284	1,878	-
Amostra do Pará	2,631	25,472	13,739	31,939	18,830	1,862	-
Média	2,61	23,12	12,94	33,94	16,59	1,61	-
Variância	0,43	10,98	4,23	8,51	8,18	0,13	-

Fonte: Própria autora

O maior valor encontrado para SiO_2 foi de 26,31 % para a amostra de Manaus. Teores comumente encontrados em outros resíduos agroindustriais como cinza da casca do arroz e bagaço de cana variam de 2 a 90 % para o SiO_2, 0,5 a 5 % para o Al_2O_3 e 0,2 a 7 % para o Fe_2O_3 (PRUSTY *et al*., 2016; YADAV *et al*., 2020).

Vale salientar como diferencial, o teor de CaO que, na maioria dos resíduos agroindustriais tais teores variam de 1 a 11% (KERAMATIKERMAN *et al*., 2019), mas nas amostras do caroço de açaí o menor valor encontrado foi de 13,9 % e o maior valor foi de 19,2 %, contendo maior quantidade em comparação com todos os tipos de resíduos agroindustriais.

Com base nos resultados apresentados a amostra de Manaus apresentou o menor teor de umidade, o maior teor de cinzas e a maior proporção da soma dos óxidos do caroço moído in natura ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$), totalizando um somatório de 30,712 %.

Os resultados de difratometria de raios X para as quatro amostras estão apresentados na Figura 19.

Os difratogramas das amostras do caroço de açaí moído mostraram um comportamento predominantemente amorfo e apontam características típicas de celulose I com dois picos de difração conhecidos em 2θ em torno de 16,5º e 22,5º atribuídos a (110) e (200), respectivamente. Porém, esses picos são sobrepostos por uma banda larga a partir de 10º, além disso, os picos são largos, o que na cristalografia de raios X pode indicar que o material tem pouca cristalinidade.

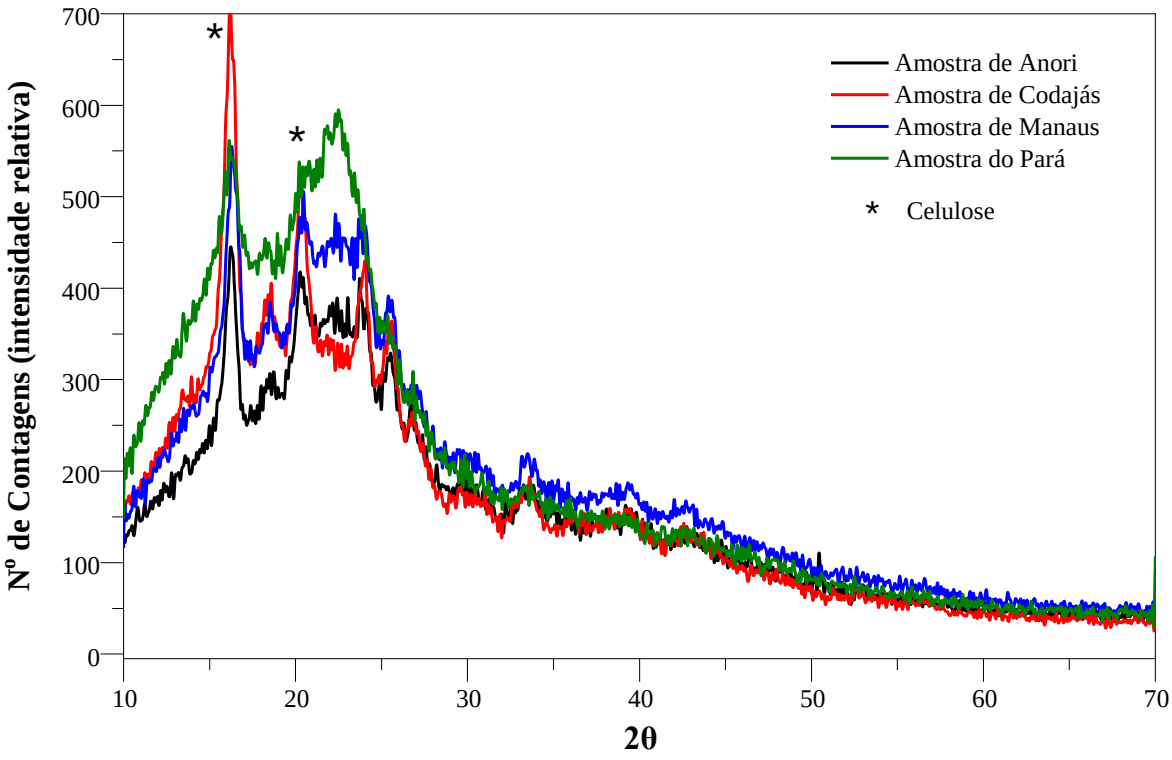


Figura 19. Difratograma das amostras do caroço do açaí moídos.
Fonte: Própria autora

Estes perfis são semelhantes aos encontrados para outros resíduos agroindustriais *in natura* como bagaço de cana de açúcar e palha de trigo, que apresentam biomassas com valor aproximado de 40 % de celulose (MONTEIRO *et al*., 2019b).

No intuito de verificar a presença de óxidos na forma cristalina, foram utilizados picos de difração da amostra de Manaus na forma mineral e comparados com os encontrados nas cartas cristalográficas do banco de dados, apresentados nas Figuras 20a e 20b.

Os difratogramas da Figura 20 tiveram sua linha base corrigida (LBC) para amenizar o sinal da parte amorfa da amostra. Além disso, para melhor visualização, os números de contagem tanto da amostra quanto dos padrões foram normalizados entre 0 e 1. Observa-se que quase não há sobreposição dos picos da amostra de Manaus com a linha base corrigida e os elementos P, K e Ca apresentados em forma de óxidos (P_2O_5, KO_2 e CaO_2). Apenas o P_2O_5 apresenta um pico de alta intensidade em 15º que sobrepõem ao da amostra. Com isto, é possível considerar que os picos que aparecem na amostra bruta provavelmente são de materiais semicristalinos e orgânicos, os quais são comuns em espécies vegetais.

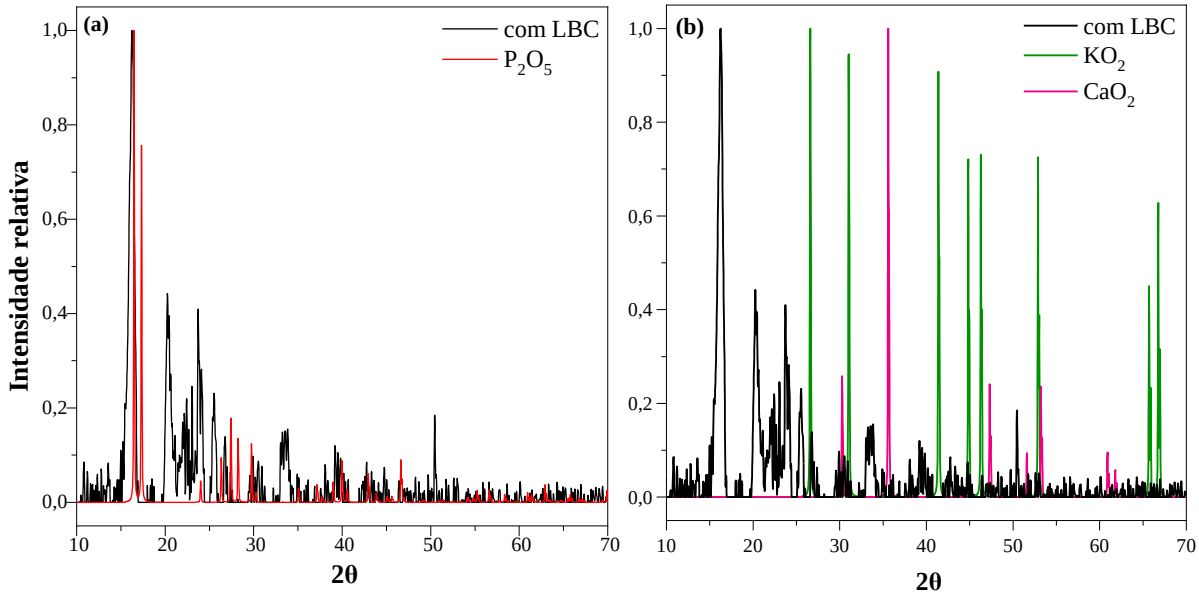


Figura 20. Difratogramas (a) do caroço moído com linha base corrigida (LBC) de P_2O_5 fase alpha e (b) caroço moído com linha base corrigida (LBC) de CaO_2 e K_2O.
Fonte: Própria autora

Tendo como base a caracterização inicial das amostras de Anori, Codajás, Manaus e do Pará e após análise dos resultados considerando o menor teor de umidade, maior teor de cinzas, amorficidade e os teores da soma dos óxidos $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$, foi utilizada a amostra da Região Metropolitana de Manaus para o beneficiamento térmico, moagem e produção das cinzas.

3.2. Características do caroço após beneficiamento térmico e moagem

3.2.1. Granulometria a laser

As curvas granulométricas da amostra de Manaus, espécie *Euterpe precatória*, foram realizadas após o beneficiamento térmico em cinco temperaturas diferentes e moagem, conforme apresentadas na Figura 21.

Pelo que pode ser observado na Figura 21, há uma pequena mudança na curva de distribuição granulométrica com o aumento da temperatura. A amostra beneficiada a 700ºC destaca-se por apresentar partículas mais finas. É possível verificar ainda que as amostras beneficiadas a 300ºC e 400ºC apresentaram partículas mais grossas. As curvas de distribuição granulométrica das amostras nas temperaturas 500ºC e 600ºC estão sobrepostas o que indica que o aumento de temperatura nessa faixa não alterou a distribuição de tamanho das partículas de forma perceptível.

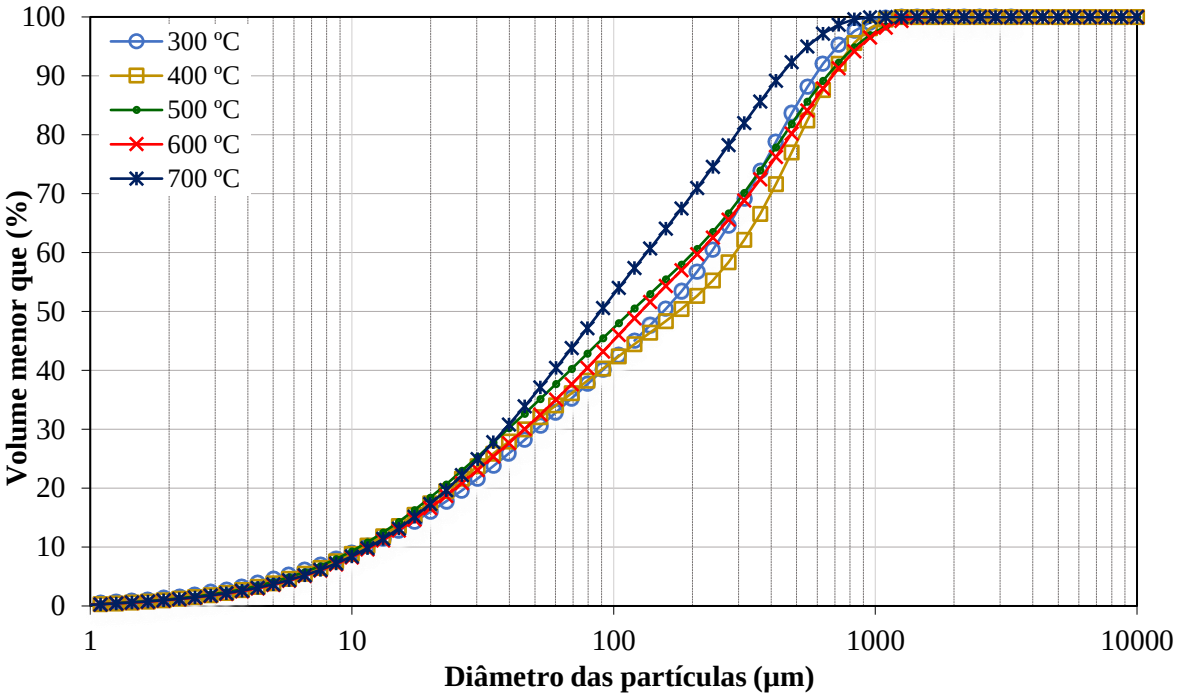


Figura 21. Curvas granulométricas da amostra *Euterpe precatória* (AM) beneficiada termicamente em cinco temperaturas diferentes e moídas.
Fonte: Própria autora

A alteração na curva de distribuição granulométrica após 600ºC pode estar relacionada com a completa degradação das fibras tornando-as mais frágeis, facilitando a moagem, pois os componentes da estrutura celulósica se degradam até 650ºC, o que reforça o argumento de que a 700ºC ocorre à descarbonatação de matéria volátil e compostos orgânicos, bem como a quantidade de celulose resultante é convertida em voláteis e há a formação de cinzas. Nesse aspecto, o material perde sua estrutura tornando-se mais frágil e suscetível a ação mecânica da moagem, no qual a fragmentação em partículas mais finas aumenta a finura da cinza (KATARE & MADURWAR, 2020).

Vale salientar que quando misturadas ao solo, a cinza bem graduada, conforme especificada em sua distribuição granulométrica, tende a melhorar a compactação entre as partículas e a homogeneização da mistura. Noaman *et al*. (2019) afirmam que a microestrutura homogênea dos materiais influencia no desempenho em fornecer uma densidade mais uniforme e melhor comportamento mecânico. Além disso, quando a cinza é amorfa ela favorece as reações da mistura, pois contribui para melhorar o desempenho mecânico (NOBRE *et al*., 2018; CORDEIRO *et al*., 2019a).

Na Tabela 7 constam os parâmetros D_{90}, D_{80} e D_{50} obtidos a partir das curvas de distribuição granulométrica que permitem uma avaliação quantitativa do efeito da temperatura na redução do tamanho de partículas no processo de moagem.

Tabela 7. Parâmetros quantitativos das curvas de distribuição granulométrica

Parâmetro	Diâmetro (µm)				
	300ºC	**400ºC**	**500ºC**	**600ºC**	**700ºC**
D_{90}	588,58	680,85	654,67	688,82	433,23
D_{80}	432,04	517,36	449,81	475,47	294,22
D_{50}	155,17	177,02	116,89	127,52	89,08

Fonte: Própria autora

O D_{90} das amostras moídas após submetidas as temperaturas de 300ºC a 600ºC não apresentam diferença significativa no tamanho de partículas. Porém mesmo sendo pequena a diferença entre os tamanhos, não há uma redução proporcional ao aumento da temperatura. Isso pode estar relacionado ao fato de que nestas temperaturas o material celulósico apresenta relativa resistência a fragmentação por não ter degradado totalmente seus componentes. No entanto, a amostra na temperatura de 700ºC apresentou o menor D_{90}, o que era esperado devido a fragilidade do material após ter todos os seus componentes degradados nesta temperatura.

O D_{50} é o parâmetro que indica o diâmetro máximo de 50 % das partículas que, quando apresenta diâmetro inferior ao cimento pode ter maior reatividade. Porém, para a amostra após queima nas cinco temperaturas diferentes, o diâmetro apresentado é maior que o do cimento.

Estudos afirmam que a microestrutura dos materiais constantes em matrizes cimentícias não influencia apenas nas reações pozolânicas, mas também no desempenho em fornecer uma densidade mais uniforme e homogênea na matriz. Nesse sentido, mesmo que a cinza não apresente reatividade química (pozolânica) ela interfere na microestrutura da matriz devido ao efeito físico de enchimento e empacotamento (efeito fíler).

Para avaliar-se a moagem foi utilizado o D_{80} como parâmetro quantitativo do efeito da redução do tamanho de partícula com o aumento da temperatura. Observou-se que a redução no tamanho de partícula foi maior nas amostras moídas após queima a 700ºC. A amostra beneficiada nas temperaturas 500°C e 600°C apresentaram uma granulometria similar, que pode estar associada a temperatura de combustão e ao nível de potássio existente na amostra e demonstrando menores teores de carbono e porosidade (FERNANDES *et al.*, 2016).

Os histogramas referentes a cada curva granulométrica é onde estão representadas as porcentagens de tamanho de partículas por faixa de tamanho. Nos histogramas (Figura 22) observou-se formação de duas populações em todas as amostras.

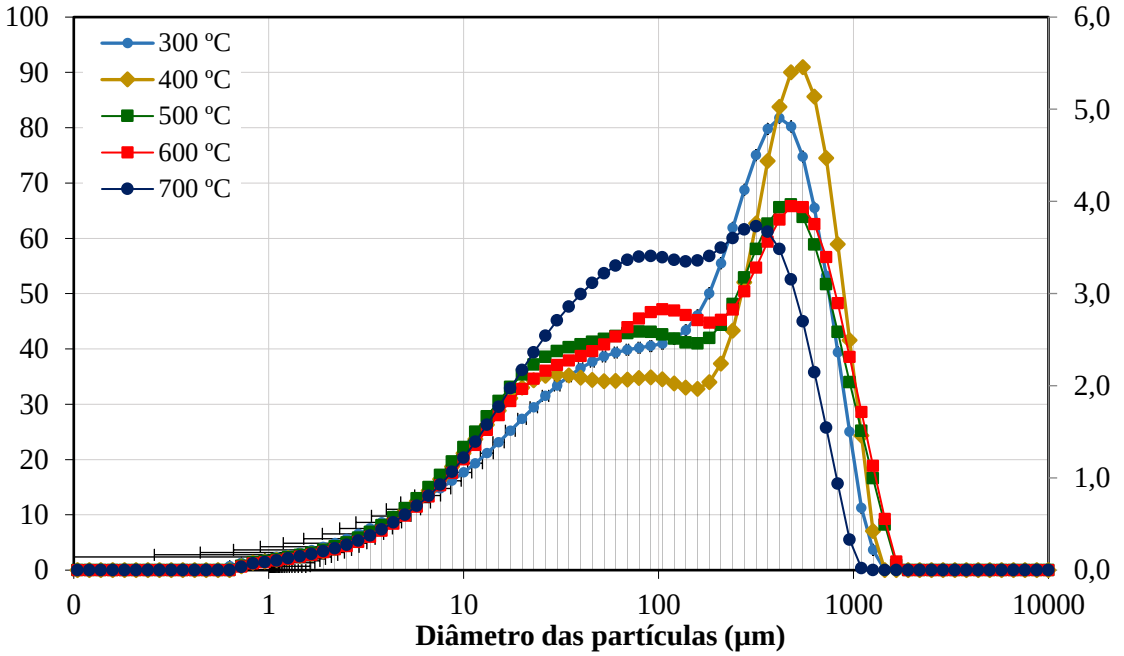


Figura 22. Histogramas do volume da amostra AM beneficiada termicamente em cinco temperaturas diferentes.
Fonte: Própria autora

Verifica-se que na amostra a 700ºC houve uma redução no segundo pico, indicando redução no tamanho de partícula de uma determinada faixa granulométrica. Essa redução não foi observada proporcionalmente no primeiro pico, que permaneceu no mesmo tamanho. Quando isso ocorre considera-se que a moagem atingiu o seu limite de redução de tamanho de partícula.

Reitera-se também que o efeito da temperatura acima de 500°C teve pouca influência na granulometria das partículas da cinza, salientando que acima de 700°C normalmente ocorre a cristalização da amostra. Além disso, a 600°C os compostos orgânicos são degradados e a essa temperatura pode se evitar a emissão de dióxido de carbono resultante da descarbonatação. Desta forma, materiais com estrutura amorfa apresentam maior reatividade em comparação com materiais cristalinos. Portanto, as partículas da cinza do caroço de açaí beneficiado a 600°C podem favorecer uma maior reatividade e o efeito fíler à mistura de solo-cimento.

3.2.2. Difratometria de raios X (DRX)

A técnica da difratometria de raios X nas amostras beneficiadas e moídas nas cinco temperaturas foi realizada para identificar diferenças na formação de sílica amorfa ou

cristalina em cada temperatura. A Figura 23 apresenta os difratogramas das amostras após o beneficiamento térmico.

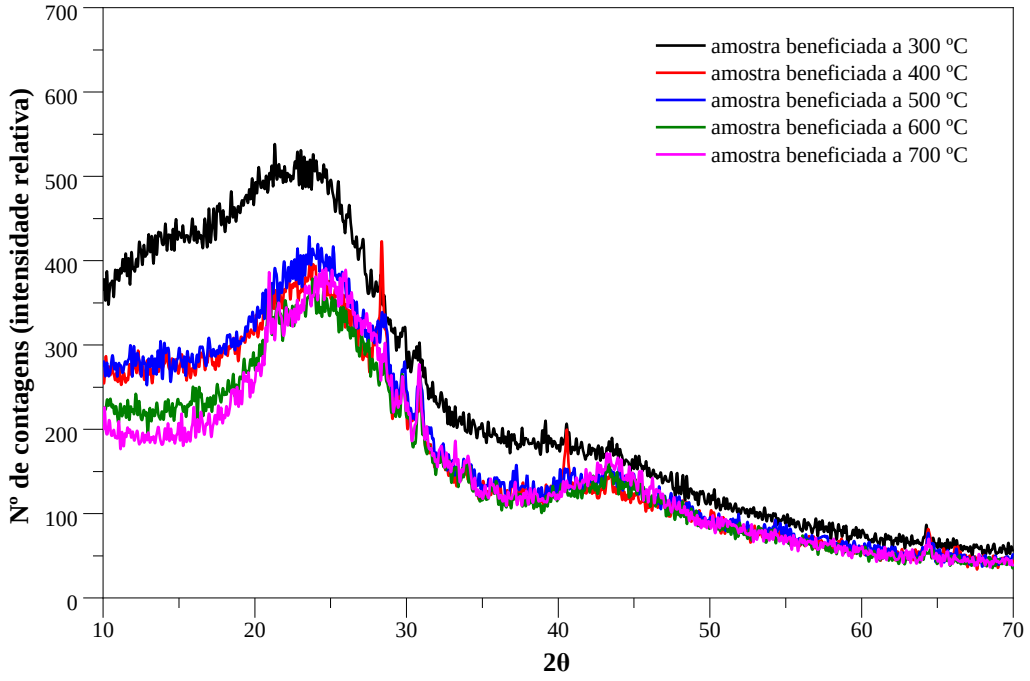


Figura 23. Difratometria de raios X das cinzas do caroço de açaí beneficiadas e tratadas termicamente a diferentes temperaturas.
Fonte: Própria autora

Todos os difratogramas apresentam duas bandas largas centradas em 25º e 45º o que indica a presença de material amorfo o que é possível, pois tanto a sílica quanto o fósforo podem formar materiais vítreos. A temperatura de 700 °C a matéria orgânica remanescente tende a ser insignificante. Logo, é possível que os materiais inorgânicos presentes em quantidades significativas se encontrem na forma amorfa.

Como as pesquisas envolvendo a aplicação tecnológica da cinza do caroço de açaí são recentes, até a data referente aos estudos desta pesquisa, não se localizou estudos comparativos. Porém, para uma melhor compreensão da estrutura de resíduos agroindustriais após beneficiamento térmico, verificou-se os estudos realizados com a cinza da casca do arroz e do bagaço de cana.

Xu *et al*. (2012) analisaram diferentes temperaturas para produzir a cinza da casca do arroz para aumentar a sua reatividade ao substituir o cimento. Os autores verificaram pela estrutura cristalográfica que a 600°C a sílica permaneceu essencialmente amorfa e quase nenhuma reflexão cristalina ocorreu e a 700°C começou a aparecer reflexão razoavelmente intensa evidenciando a formação de cristobalita. Além disso, ao

verificarem a resistência a compressão, o maior valor encontrado foi ao substituir o cimento pela cinza beneficiada a 600ºC. Os resultados indicaram que para evitar qualquer transformação da forma amorfa para a cristalina, a temperatura de carbonização deve ser abaixo de 700ºC.

Minnu *et al*. (2021) em seus estudos com a cinza do bagaço de cana verificaram que a 700ºC ocorre a recristalização de sílica. Cordeiro *et al*. (2019a) determinaram que o consumo específico de energia para a produção da cinza a 600ºC é significativamente inferior aos 110 kWh/t consumidos no processo de fabricação de cimento, o que demonstra ainda o benefício ambiental de aplicar este material com a queima a 600ºC em substituição ao cimento.

Com base nos resultados granulométricos apresentados em conjunto com a análise dos difratogramas das amostras é possível perceber que o beneficiamento térmico a 600°C e a 700°C não apresentam diferenças significativas, ambas apresentam alargamento dos picos indicando amorfização.

Considerando a eficiência energética que se espera de cinzas agroindustriais (Tabela 7 e Figura 19), a análise granulométrica (Figuras 21 e 22) e a amorficidade da amostra (Figura 23), optou-se pela aplicação cinza do caroço de açaí submetida a temperatura de 600°C para avaliar sua propriedade pozolânica, sua potencialidade e os efeitos quando incorporada em matriz de solo-cimento.

As cinzas com partículas finas adicionadas ao solo de granulometria diferente, podem promover o aumento da densidade de empacotamento do solo por meio de dois mecanismos: um, por densidade volumétrica da mistura solo + cinza, ocupada pelas partículas finas da cinza e o outro, de forma similar, pelo preenchimento do espaço dos poros, ou seja, as cinzas finas entre as partículas grossas do solo.

3.3. Características da cinza do caroço de açaí produzida

3.3.1. Característica química obtida por meio do FRX

A Tabela 8 apresenta a composição química da cinza do caroço produzida a 600°C. Os resultados estão apresentados em porcentagem e na forma de óxidos.

Tabela 8. Composição química por FRX da cinza do caroço de açaí

Matéria-prima	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Fe_2O_3	P_2O_5	CaO	TiO_2	SO_3	Outros <1 ou não detectado
Cinza do caroço de açaí	9,125	-	75,469	-	10,135	4,789	-	0,313	-

Fonte: Própria autora

Com base na Tabela 8 observa-se os teores de sílica e óxido de cálcio, que com a adição de água e alumina potencializam as reações em misturas cimentícias e o teor de pentóxido de fósforo comumente encontrado em vegetais derivados dos fertilizantes utilizados para desenvolvimento da espécie. A maior porcentagem encontrada foi do óxido de potássio, útil como nutriente em todo o tipo de palmeira e, mesmo após a queima em temperaturas menores que 800ºC, ainda pode ficar retido nas cinzas.

Reitera-se que em concretos, os óxidos de potássio, mais conhecidos como álcalis, podem reagir com os agregados do concreto, provocando a desintegração da mistura e afetando na velocidade de ganho de resistência do cimento. Andrade (1997) explica que o gel formado pela reação dos álcalis pode ser ou não expansivo, dependendo da concentração de cálcio, pois quando esta se sobrepõe à dos álcalis, sua predominância na integração da membrana do cimento para dar continuidade à formação do gel não expansivo de cal-álcali-sílica que ocorre na fase inicial de reação e não produz efeito prejudicial à matriz cimentícia.

No caso da estabilização química em solo, o efeito do material aglutinante, como o cimento, destina-se principalmente, a criar ligações das partículas de modo a garantir um aumento da parcela resistente relativa à coesão, no qual as partículas de cimento comportam-se como núcleos, aderindo às partículas que o rodeiam formando regiões de material que apresentam ligações oriundas dos fenômenos de cimentação.

Nesse contexto, a influência do óxido de potássio é pequena comparado a outros fatores que influenciam na estabilização do solo, relacionados com as estabilizações físicas e granulométricas, essenciais para favorecer a estabilização mecânica do solo.

3.3.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 24 corresponde as micrografias da cinza do caroço de açaí beneficiada termicamente a 600°C e moídas (Figuras 24a e 24b).

É possível observar na Figura 24a alguns orifícios presentes na cinza do caroço de açaí o que pode facilitar o armazenamento de água e assim, contribuir para o processo de cura das partículas do cimento.

Na Figura 24b se observa esferas de silício de acordo com a técnica de Espectroscopia de raios X por Dispersão de Energia (EDS) apresentada na Figura 25a, na qual mostra presença de silício (Figura 25b), potássio (Figura 25c) e cálcio (Figura 25d).

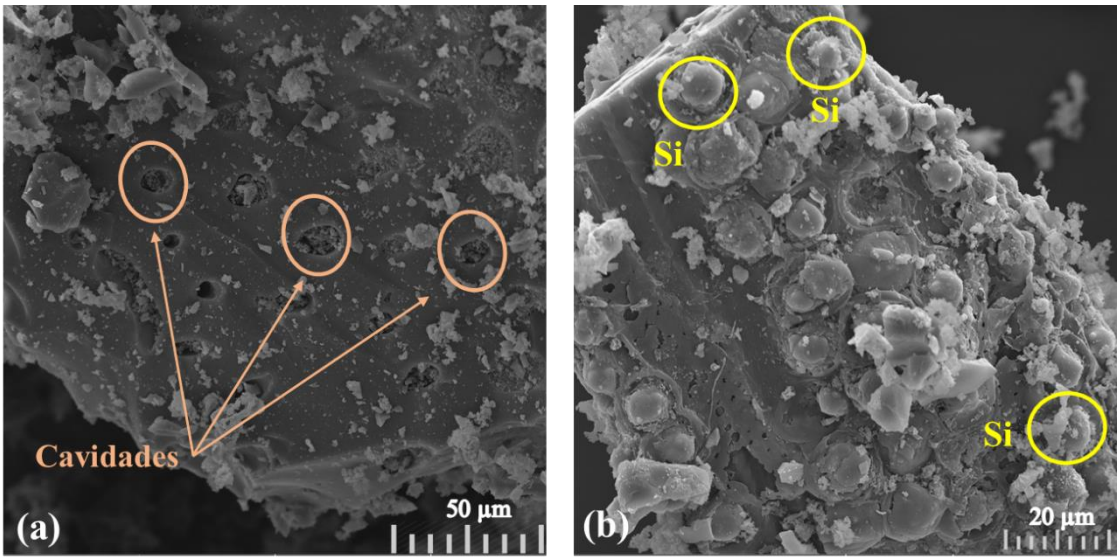


Figura 24. (a)(b) Micrografias da cinza do caroço de açaí
Fonte: Própria autora

O espectro em EDS foi realizado com o intuito de verificar a composição elementar da amostra por meio da geração de espectros de energia e mapas. Sendo assim, notou-se a predominância dos elementos de uma molécula orgânica e, conforme demonstrado na Figura 24, apresentou características similares aos do resultado de FRX com teores de Si, K e Ca.

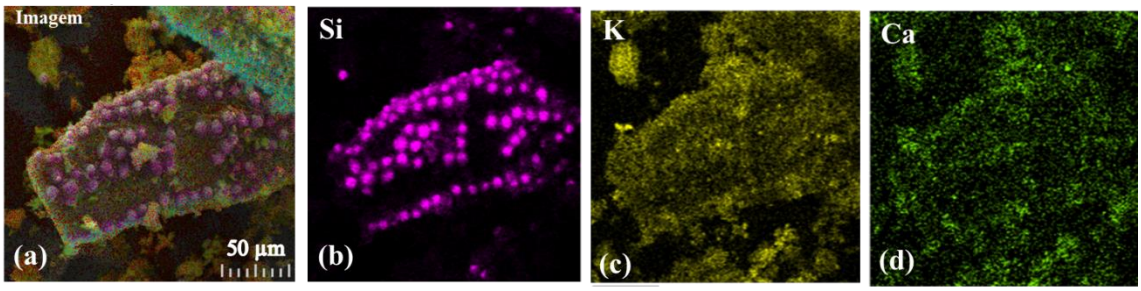


Figura 25. (a) Mapas elementares por meio da leitura realizada por EDS apresentando os teores de (b) Si, (c) K e (d) Ca na amostra
Fonte: Própria autora

As imagens do MEV e as análises qualitativas por EDS das cinzas apresentam aspectos com esferas de sílica e outros elementos espalhados pela amostra, ademais, permitiu identificar as áreas com cavidades e os aspectos de rugosidade da cinza. Tais características tendem a favorecer a aderência da cinza com o solo, bem como, o armazenamento de água para o processo de cura da mistura cimentícia e são suscetíveis para a incorporação da cinza do caroço de açaí em mistura com solo-cimento.

3.3.3. Ensaios de caracterização cimentante e pozolânica da cinza do caroço de açaí

A cinza do caroço de açaí beneficiada termicamente a 600 ºC e moída foi incorporada em argamassa substituindo o teor de cimento em 25 %. Os resultados de início e fim de pega estão representados na Figura 26.

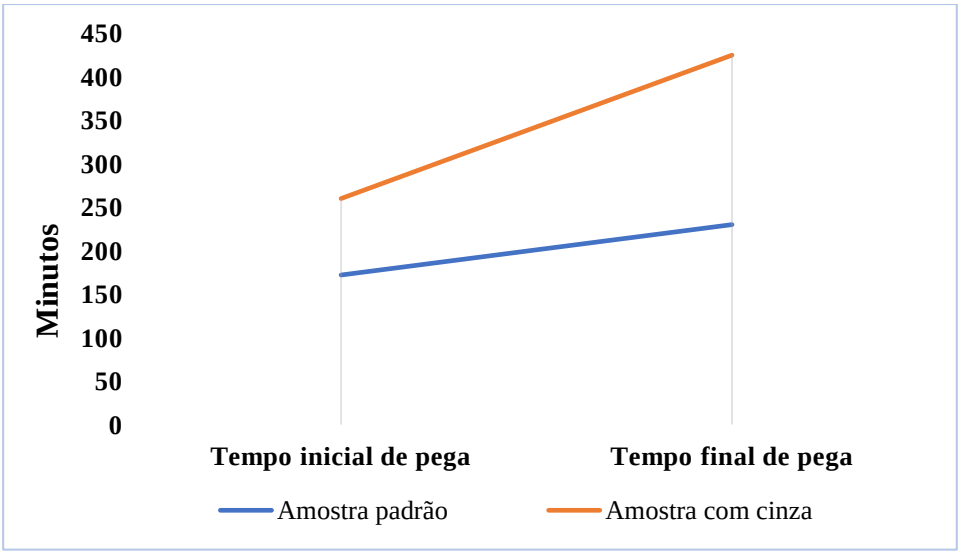


Figura 26. Tempo de início e fim de pega da argamassa padrão e da argamassa com a substituição do cimento em 25 % da cinza do caroço do açaí.
Fonte: Própria autora

O tempo de endurecimento indica o início da transação da viscosidade das partículas em suspensão em uma matriz rígida interconectada. Esta transformação ocorre como resultado da hidratação que causam conexões rígidas entre as partículas e o cimento. Nesse sentido, os tempos de pega – inicial e final – são importantes na hidratação da matriz cimentícia, pois determina a taxa de desenvolvimento da resistência (GAR *et al*., 2017; KANG *et al*., 2020).

Observa-se que a argamassa convencional iniciou o processo de endurecimento em 2 h 52 min finalizando a pega em 3 h 50 min, tempo que ainda não se deu o início do endurecimento da argamassa contendo a cinza do caroço de açaí, que só iniciou com 4 h 20 min e finalizando a pega em 7 h 05 min.

O resultado mostrou um tempo inicial e final maior com a substituição parcial do cimento por cinza. Esse aumento no tempo de pega está relacionado à baixa taxa de hidratação na argamassa. Isso era esperado uma vez que misturas com substituição parcial do cimento por cinzas agroindustriais comumente necessitam da presença de hidróxido de cálcio em solução para reagirem e formar C-S-H adicional (GAR *et al*., 2017).

Silva *et al*. (2021a) em seus estudos com a cinza da casca do arroz em argamassa, apontam que para atingir o mesmo fluxo de trabalhabilidade da amostra padrão, a demanda de água aumenta com a inserção da cinza, que pode ser atribuída as características de porosidade, natureza esponjosa e o tamanho da área de superfície.

Com isso, destaca-se que a estrutura em termos de tamanho e volume dos poros da cinza desempenham um papel importante no processo de hidratação devido ao fato de que a água é absorvida em seus poros e pode afetar o desempenho mecânico de empacotamento e de resistência à compressão da mistura (CHRISTOPHER *et al*., 2017; FARÍAS *et al*., 2018).

A Figura 27 apresenta as médias resultantes do rompimento dos corpos de prova aos 28 dias, contendo argamassa padrão e argamassa com a cinza do caroço de açaí.

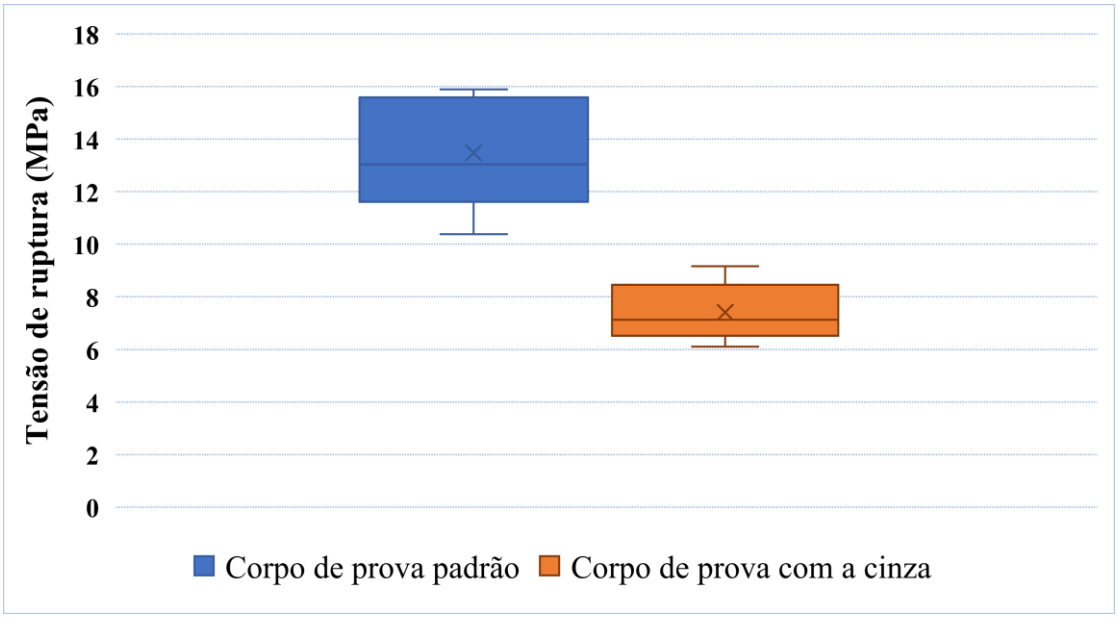


Figura 27. Ensaio de resistência à compressão do corpo de prova com a argamassa padrão e com a substituição do cimento em 25 % da cinza do caroço do açaí.
Fonte: Própria autora

A resistência à compressão média do corpo de prova com a argamassa convencional (corpo de prova padrão) foi de 13,71 MPa e do corpo de prova no qual se substituiu 25 % do cimento pela cinza do caroço do açaí, como preconizado em norma técnica, foi de 7,26 MPa, valor equivalente a 52,95 % da resistência padrão.

O resultado do ensaio pelo método Chapelle expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material pozolânico foi de 174 mg $Ca(OH)_2$/g de material. Conforme a norma brasileira NBR 15.895 (ABNT, 2010) o índice de atividade pozolânica deve ser maior ou igual à 750 mg $Ca(OH)_2$/g de material.

Estes resultados indicam que a cinza do caroço de açaí não atende aos critérios estabelecidos por norma técnica brasileira quanto ao índice pozolânico, no qual a resistência à compressão de misturas contendo substitutos de cimento devem ser no mínimo 75 % dos corpos de prova padrão e observou-se uma redução de, aproximadamente, 50 % na resistência à compressão com a substituição do cimento pela cinza, indicando um baixo valor de resistência para materiais pozolânicos. Estes valores são calculados principalmente para avaliar a reatividade de adições minerais com cimento, de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 2014).

O mecanismo de resistência é baseado na reação de hidratação e formação do gel C-S-H que liga as partículas de cimento aos outros materiais e assim, fortalece a mistura, no entanto, é possível relatar que quando a cinza foi inserida, o processo de formação do gel foi retardado levando à lentidão no processo de desenvolvimento do gel na mistura, o que invariavelmente reduz também a resistência.

Além disso, a redução da resistência à compressão pode estar ainda associada ao efeito de diluição do cimento na mistura considerando que foi inserido a mesma quantidade de água na argamassa para uma menor quantidade de cimento ao ser substituído pela cinza, resultando em menor quantidade de hidróxido de cálcio disponível para a formação de esqueleto granular contínuo e menor densificação da microestrutura da argamassa (BHEEL *et al*., 2021).

Outro fator refere-se ao tamanho de partícula da cinza que apresenta diâmetro médio das partículas maior que o cimento, sendo menos partículas de cinza necessárias para substituir uma massa igual de partículas de cimento. Assim, as distâncias interpartículas aumentam com a quantidade de cinza na argamassa.

Diante desse contexto, considera-se que o endurecimento da argamassa foi afetado pela baixa reatividade da cinza, produzindo menor quantidade de C-S-H adicional. Misturas com menor quantidade de cimento e adição de cinzas de baixa reatividade produzem menor quantidade de hidratos para preencher os espaços interpartículas e solidificar as pastas (LIAO *et al*., 2020; CHRISTOPHER *et al*., 2017). Todos esses fatores interferem na resistência à compressão das argamassas que é influenciada pela hidratação do cimento, enchimento dos poros e ação reativa da cinza.

Esta tese, aponta como discussão a estabilização do solo por meio da inserção de matérias-primas, e que, devido à natureza das partículas demonstrada pelas características de amorficidade e pelas micrografias, podem influenciar diretamente neste comportamento granulométrico, proporcionando uma estabilização.

Farias *et al.* (2018) destaca que, além da reação pozolânica, o aumento da resistência mecânica de misturas em solo-cimento está associado a outros dois mecanismos, que são: a estabilização mecânica, pela compactação adequada a distribuição das partículas e pela tensão para sucção de água dentro dos poros, produzindo um fenômeno de aderência entre as partículas. Tais fatores podem, ainda, serem favoráveis a incorporação da cinza do caroço de açaí em mistura de solo-cimento.

CAPÍTULO 4 – PROPRIEDADES DA MISTURA DE SOLO-CIMENTO

4.1. Características das matérias-primas de partida

4.1.1. Características do solo

De acordo com a norma brasileira NBR 12.023 (ABNT, 2012), a umidade no processo de produção do solo-cimento é de suma importância, cujo teor deve ser variável de 5 a 20 % de água. Para o solo utilizado nesta tese, se verificou que o valor médio do teor de umidade foi de 14 %, considerando adequado para a produção dos corpos de prova com a mistura de solo-cimento e adições.

Os limites de consistência e os índices de plasticidade e consistência do solo estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Limites de liquidez, plasticidade e o índice de plasticidade do solo, em porcentagem

	Solo
Limite de Liquidez (LL)	18,40
Limite de Plasticidade (LP)	13,99
Índice de Plasticidade (IP)	4,41
Índice de consistência (IC)	0,99

Fonte: Própria autora

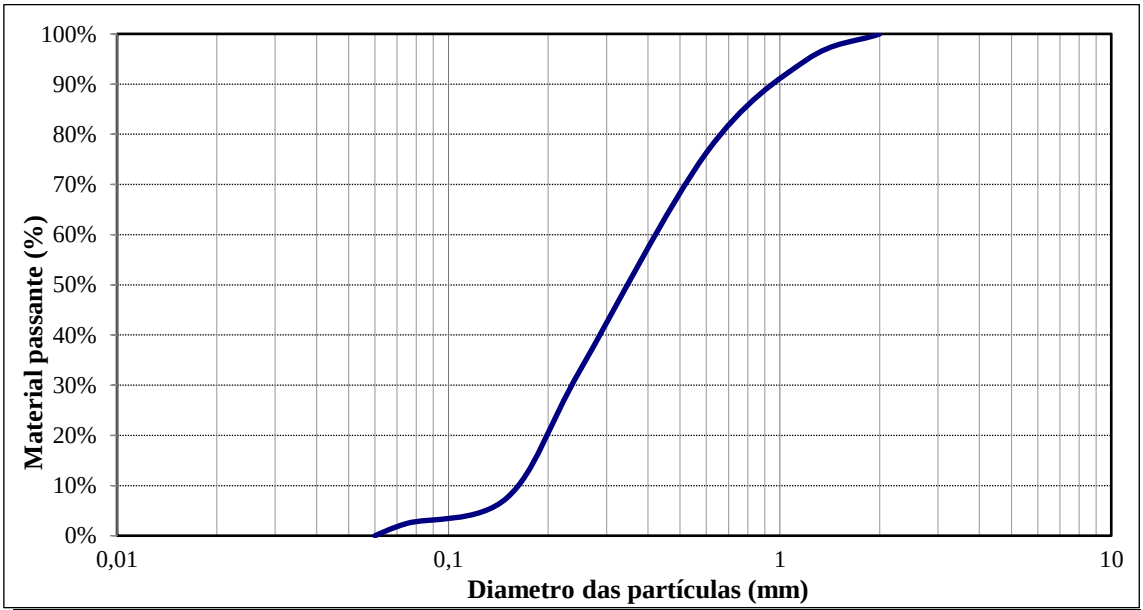
A coesão é a resistência que a fração argilosa empresta ao solo, pela qual ele se torna capaz de se manter coeso. Solos que não possuem essa propriedade denominam-se não coesivos, como areias e pedregulhos. Com base nos índices de consistência e de plasticidade, o solo foi classificado como rijo, no qual estando em estado plástico requer esforço para serem moldados e solo sem coesão.

Verifica-se que os valores de LL e LP (LL ≤ 45 % e LP ≤ 18 %) estão de acordo com os valores recomendados pela norma técnica NBR 10.833 (ABNT, 2012) para produção de tijolo solo-cimento. Vale ressaltar que os teores de materiais plásticos e não plásticos podem influenciar nos fatores como conformação, resistência mecânica e ainda no comportamento de hidratação do cimento (FRAGA *et al*., 2016).

As partículas de areia não apresentam plasticidade sendo considerada rijas e, portanto, não possuem a capacidade de serem moldadas, ao contrário do que ocorre com as argilas. Assim, quanto maior o índice de plasticidade mais o material estará sujeito às variações dimensionais, resultantes do inchamento do solo quando úmido e de sua retração, quando seco.

Os limites de consistência são as variáveis que melhor expressam as condições de trabalhabilidade dos solos, sendo solos arenosos os indicados para fabricação de tijolo solo-cimento porque se estabilizam com menores quantidades de cimento. O solo analisado apresentou índice de plasticidade da ordem de 4, o qual pode ser classificado como um material com baixa plasticidade (ou plasticidade leve) e, portanto, dentro dos padrões normativos para tijolo de solo-cimento, conforme NBR 10.833 (ABNT, 2012).

Além dos índices de consistência e plasticidade, os solos podem ser classificados de acordo com as dimensões de suas partículas sólidas. A Figura 28 apresenta a curva granulométrica para o solo e a descrição na legenda está apresentada conforme estabelecido pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) que relaciona o tamanho das partículas e as proporções retidas nas peneiras.



Material	Fração de finos (argila + silte)	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulhos e pedras
Solo	12,94 %	42,58 %	44,44 %	0,04 %	0,00 %

Figura 28. Curva granulométrica do solo e descrição das proporções e tamanho das partículas conforme estabelecido pela ABNT.
Fonte: Própria autora

A partir dos resultados granulométricos e dos índices físicos, o solo está classificado como $A_{2\text{-}4}$, solo arenoso-argiloso, conforme o sistema de classificação AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), pois reflete material com uma distribuição de tamanho de partícula concentrado na fração areia média e fina e para solos com essa classificação, o teor de cimento a ser adicionado varia de 7 a 10% (PITTA, 2004).

A curva granulométrica demonstrou que o solo possui aproximadamente 87 % de areia e 13 % de partículas finas. O coeficiente de curvatura da granulometria (C_c) calculado foi de 1,15 indicando um solo bem graduado. Os solos de maneira geral contribuem para melhorias significativas em suas propriedades mecânicas quando possuem um mínimo de teor de fração fina, pois a resistência é devido a coesão da fração fina devidamente compactada. Solos arenosos com cerca de 10 a 30 % de fração de silte e argila são considerados os mais favoráveis para a estabilização com o cimento, pois solos arenosos com baixo teor de finos apresenta maior dificuldade para efetuar sua compactação e acabamento (SILVA, 2015).

De acordo com Segantini (2000) é importante a presença de areia na composição do solo, pois ela atua como material inerte e com função apenas de enchimento, permitindo a liberação de maior quantidade de cimento para aglomerar os grãos menores.

A Tabela 10 apresenta a composição química do solo obtida pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). Os resultados estão apresentados em porcentagem e na forma de óxidos.

Tabela 10. Composição química do solo obtida utilizando a técnica de FRX

	SiO_2	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**TiO_2**	**K_2O**	**CaO**	**MnO, ZrO_2, CuO e ZnO <1**
Solo	60,85	37,50	1,17	0,344	0,056	0,048	-

A composição química do solo na forma de óxidos apresenta um teor de sílica de 60,85 %, óxido de alumínio de 37,50 % e óxido de ferro de 1,17 %.

As características químicas do solo podem determinar a viabilidade da estabilização química com o cimento, que ocorre basicamente a partir dos produtos das reações de hidratação (silicatos e aluminatos hidratados) e das reações entre os argilominerais existentes no solo e o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento (ZAK *et al*.; 2016). Nesse processo, os íons de cálcio encontram-se disponíveis na mistura e se associam à superfície dos argilominerais que possuem capacidade de troca de cátion.

Portanto, para o solo em estudo, os teores de óxidos representam mais de 98 % da composição química do solo, no qual a quantidade desses elementos minerais presentes fortalece os íons de ligação das partículas do solo, influenciando na estabilização química e mecânica que, consequentemente, contribuem para o aumento da resistência à compressão.

4.1.2. Características das matérias-primas base para o cimento LC^3

A Tabela 11 apresenta a composição química das matérias-primas que compõem o cimento LC^3 – metacaulinita, fíler e cimento CP V, obtida utilizando a técnica de FRX. Os resultados estão apresentados em porcentagem e na forma de óxidos.

Tabela 11. Composição química por FRX das matérias-primas que compõem o cimento LC^3

Matérias-primas	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	K_2O	Outros (MnO, TiO_2, SO_3) <1 ou não detectado
Cimento	38,73	49,16	4,42	-	7,1	-
Metacaulinita	26,68	0,018	1,62	70,58	0,78	-
Fíler	5,04	93,17	0,63	-	0,65	-

Fonte: Própria autora

Com base na Tabela 11 verifica-se os teores de cimento sendo composto por 38,73 % de SiO_2 e 49,16 % de CaO. A metacaulinita é composta principalmente por Al_2O_3 com teor de 70,58 % e o fíler composto principalmente por CaO com teor de 93,17 %. Esta formulação de cimento contendo as proporções supracitadas de SiO_2, CaO e Al_2O_3 aproveita-se de uma ação sinergética entre a metacaulinita e o carbonato de cálcio do fíler, que permite a utilização de um alto nível de substituição do clínquer do cimento Portland sem comprometimento das propriedades mecânicas.

Isso se dá principalmente porque durante o processo de formação da metacaulinita há um desordenamento da estrutura cristalina dos minerais argilosos, em uma reação química denominada desidroxilação, no qual ocorre a remoção da água estrutural e uma consequente transformação do material cristalino em amorfo. Essa amorficidade é o que garante a metacaulinita ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) propriedades pozolânicas.

Destaca-se também a distribuição do tamanho das partículas com a aplicação do fíler calcário que causa um "empacotamento" melhorando a demanda de água, a resistência mecânica e a porosidade da pasta, pois cria pontos de nucleação que aceleram a reação nas primeiras idades.

Segundo Krishnan & Bishnoi (2020) e Sharma *et al.*, (2021) a composição e quantidade das matérias-primas que compõem o LC^3 definem a reatividade da mistura e tanto CaO quanto SiO_2 são necessários para a hidratação e produção do C-S-H, bem como a quantidade de água adicionada a mistura, pois com a adição de água os íons de cálcio reagem com a alumina e com a sílica formando silicatos de cálcio insolúveis ($CaSiO_3$) e aluminatos ($CaOAl_2O_3$) (SULAIMAN & ALIYU, 2020; SHARMA & KUMAR, 2021).

Com a sinergia entre as adições do cimento LC^3 ocorre potencialização da reação entre o fíler calcário e a metacaulinita, que pode contribuir com a resistência mecânica e a durabilidade do material. Isso ocorre a partir da formação do carboaluminato hidratado, que propicia o preenchimento de vazios no sistema cimentício e reduz o tamanho dos poros do material.

Nesse contexto, cabe salientar que as argilas calcinadas compostas com fíleres calcários, podem ser utilizadas em altos percentuais de substituição do clínquer, sem perdas significativas de resistência mecânica, pois os aluminatos existentes na argila reagem com o carbonato de cálcio do fíler e com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do clínquer, produzindo carboaluminatos de cálcio hidratados que preenchem os espaços no sistema, melhorando a resistência mecânica e o sistema de poros. Chenarboni *et al*. (2021) enfatiza, ainda, que os óxidos responsáveis pela formação C-S-H atuam na estabilização química e, consequentemente, contribuem positivamente para a estabilização mecânica do solo, devido ao efeito reativo dos silicatos e carboaluminatos.

4.1.3. Características das adições utilizadas na mistura solo-cimento

A Tabela 12 apresenta a composição química obtida utilizando a técnica de FRX de cada matéria-prima que foi utilizada para a mistura com o solo-cimento. Os resultados estão apresentados em porcentagem e na forma de óxidos.

Tabela 12. Composição química por FRX das matérias-primas que foram utilizadas como adição na mistura solo-cimento

Matérias-primas	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**K_2O**	**Fe_2O_3**	**P_2O_5**	**CaO**	**TiO_2**	**Outros <1 ou não detectado**
Sílica ativa	99,074	-	0,616	0,029	-	0,257	-	
Cinza volante	50,204	40,359	5,843	2,631	-	0,561	0,338	
Cinza do bagaço de cana	54,022	29,91	8,026	4,835	1,408	0,899	0,77	

Fonte: Própria autora

A Tabela 12 apresenta os teores detectados para as matérias-primas adicionadas à mistura solo-cimento, com exceção da cinza do caroço de açaí que será demonstrada posteriormente. Destaca-se para a sílica ativa o teor de 99,074 % de SiO_2 e o somatório dos teores SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 para a cinza volante e cinza do bagaço de cana foi de 93,194 % e 88,167 % respectivamente. Tais somatórios demonstram que as matérias-

primas, ao serem incorporadas ao cimento, podem favorecer as reações que beneficiam as propriedades químicas e mecânicas das misturas.

Os benefícios de inserir sílica ativa em misturas com cimento são referentes ao desempenho mecânico e ao aumento da durabilidade frente ao ataque por cloretos. Essas reações ocorrem devido a alterações na condutividade elétrica do meio (soluções) e de mudanças físicas na estrutura dos poros da pasta de cimento com a sílica ativa.

Já a cinza volante nem sempre apresenta elevados índices de atividade pozolânica, porém, os principais elementos como o silício, alumínio e ferro nas partículas têm importância na solubilização da fase vítrea e na formação dos compostos hidratados. Sua fase cristalina e vítrea e o diâmetro de suas partículas, que está diretamente relacionado com a área específica, exercem influência na determinação da interação com o óxido de cálcio, favorecendo o aumento da resistência mecânica.

Para a cinza do bagaço de cana obteve-se um teor acima de 75 % no somatório de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ e granulometria menor que 0,075 mm. A partir deste resultado, é possível considerá-la como cinza pozolânica.

4.2. O efeito das adições nas misturas solo-cimento

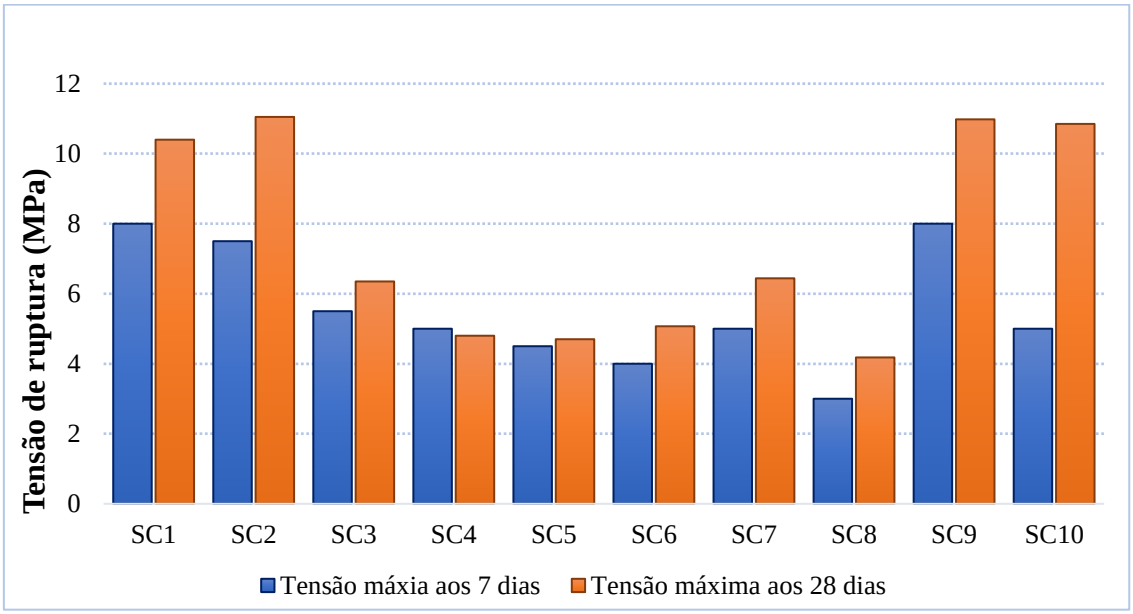
Com a finalidade de obter resultados comparativos da mistura solo-cimento, foram produzidos corpos de prova contendo as misturas: (SC_1) mistura convencional contendo solo + cimento CP V e (SC_2) mistura contendo solo + cimento LC^3. Para observar o efeito das adições na mistura solo-cimento, o teor de cimento foi substituído em 10 % de massa por cada resíduo, com as nomenclaturas descritas no Quadro 2.

Os resultados de resistência a compressão das misturas de solo-cimento com as adições, rompidos aos 7 e 28 dias estão apresentados na Figura 29.

A resistência à compressão aos sete dias dos corpos de prova com solo-cimento convencional e com o cimento LC^3, bem como com a inserção da cinza do caroço de açaí (SC_1, SC_2 e SC_9) apresentaram uma média de 8 MPa. O menor valor foi detectado para o corpo de prova com a cinza do bagaço de cana (SC_8) com resistência à compressão de 3 MPa. Para as misturas com as demais adições a resistência aos sete dias apresentou uma média de 5 MPa.

Aos 28 dias a média da resistência para o SC_1 (solo-cimento convencional) foi de 10,4 MPa, para o SC_2 (solo cimento com LC^3) foi de 11,05 MPa. Os valores similares detectados foram para os corpos de prova com a cinza do caroço de açaí, sendo para o SC_9 uma média da resistência de 10,98 MPa e para o SC_{10} uma média de 10,85 MPa, o

que não ocorreu com as outras adições onde a resistência a compressão variou com a média de 5 MPa, similar a resistência obtida aos 7 dias.



SC_1 - Solo-cimento (SC) convencional
SC_2 - Solo-cimento (SC) com LC^3
SC_3 - SC convencional com 10% de sílica
SC_4 - SC com LC^3 e 10% de sílica
SC_5 - SC convencional com 10% de cinza volante
SC_6 - SC com LC^3 e 10% de cinza volante
SC_7 - SC convencional com 10% de cinza do bagaço de cana
SC_8 - SC com LC^3 com 10% de cinza do bagaço de cana
SC_9 - SC convencional com 10% de cinza do caroço de açaí
SC_{10} - SC com LC^3 e 10% de cinza do caroço de açaí

Figura 29. Resistência à compressão das misturas de solo-cimento com as adições
Fonte: Própria autora

Apesar da sílica ativa, cinza volante e cinza do bagaço de cana serem consideradas matérias-primas pozolânicas e possuírem o somatório de SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 maior que 75 % (Tabela 12), não se percebeu elevadas alterações da resistência à compressão quando comparado os valores de rompimento aos 7 e aos 28 dias, cuja diferença maior ocorreu na mistura do cimento CP V com a cinza do bagaço de cana (SC_7) que foi de 2,4 MPa.

Já nas misturas do solo-cimento convencional utilizando o cimento CP V e o LC^3, bem como nas misturas onde foram inseridas a cinza do caroço de açaí, se observou uma variação da resistência à compressão de 2,5 a 5,0 MPa quando comparado os valores de rompimento aos 7 e aos 28 dias. Para estabilização mecânica do solo com finalidade de aplicação em alvenaria sem função estrutural, a norma técnica estabelece como valor mínimo de resistência à compressão 2 MPa.

Sendo assim, todos os resultados das misturas de solo-cimento analisados atendem ao estabelecido pela norma. Porém, os valores mais elevados demonstrando melhor

eficiência mecânica das misturas foram: SC_1 (solo-cimento convencional), SC_2 (solo cimento com LC^3), SC_9 e SC_{10} contendo a cinza do caroço de açaí que influenciou positivamente na mistura.

De acordo com Reddy & Kumar (2011) a resistência e o desempenho do solo estabilizado com cimento são influenciados pela classificação e composição do solo, densidade, teor de cimento e o tempo decorrido desde a mistura de água e início do processo de compactação. Os dados obtidos confirmam a relação entre propriedades (resistência à compressão e teor de água) para as misturas padrão (SC_1 e SC_2) que atingiram maiores valores de resistência e teores de absorção de água semelhantes.

O mecanismo de resistência é baseado na reação de hidratação e formação do gel C-S-H que liga as partículas de cimento as outras matérias-primas e assim, fortalece a mistura. No entanto, é possível observar que quando os materiais como a sílica e cinza volante foram inseridos às respectivas misturas, o processo da reação de hidratação foi limitado, pois não favoreceu a formação do gel na mistura e nem o aumento da resistência.

Vale salientar que a estabilização do solo não ocorre somente por meio da estabilização química, mas também pela estabilização física e mecânica, no qual a estrutura solo-água-ar original tem suas características alteradas por meio de propriedades que auxiliam no processo de tornar o solo mais resistente à deformação e ao deslocamento. Nesse contexto, o cimento atua como um aglutinante para aderir as partículas de solo, em conjunto com outras propriedades como a faixa granulométrica, densidade e hidratação da mistura e a força de compactação.

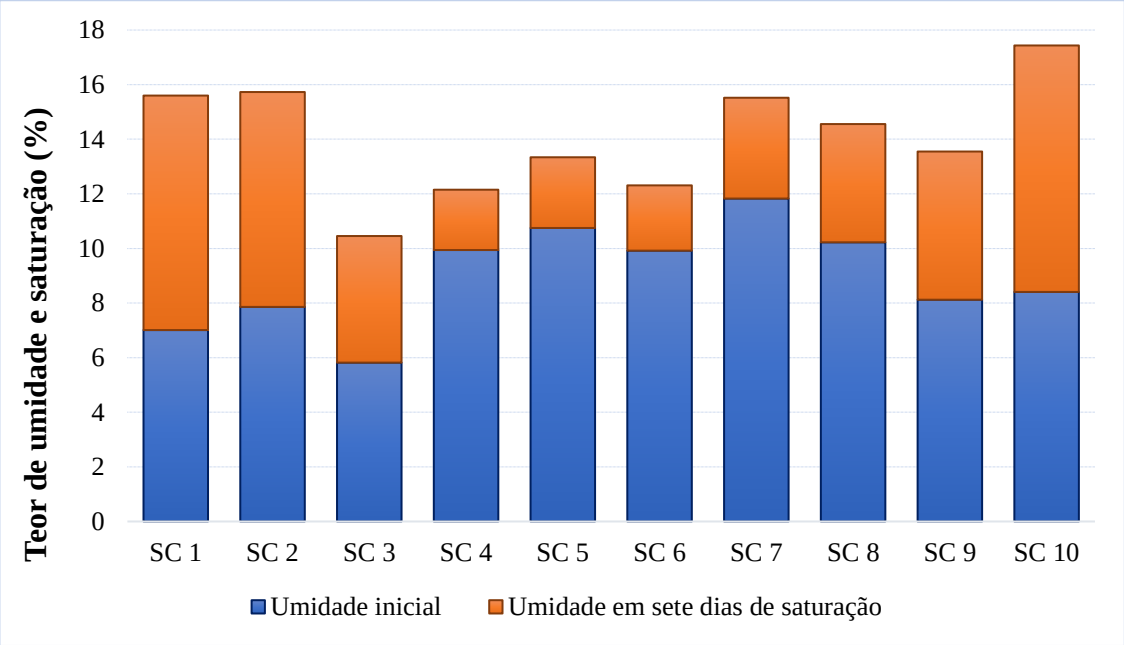
Observa-se que a resistência à compressão aos sete dias com a inserção da cinza do caroço de açaí foi relativamente menor porque nas primeiras idades de hidratação a cinza atua como enchimento e causa um efeito de diluição que exige maior demanda de água, formando uma camada de partículas de cinza em torno do anidro das partículas de cimento que retarda a hidratação (ASHA *et al*., 2020). Porém, aos 28 dias o valor da resistência, a inserção da cinza do caroço de açaí à mistura foi similar para o corpo de prova padrão com o cimento CP V e com o LC^3, demonstrando que no sistema solo-cimento a relação entre a microestrutura da cinza do caroço de açaí com as propriedades cimentícias beneficiam mecanicamente e podem favorecer o aumento de resistência à compressão da mistura.

Neste aspecto, os resultados obtidos com a mistura solo-cimento e a cinza do caroço de açaí evidenciaram valores de resistência conforme com as especificações técnicas e normatização brasileira, apontando que a incorporação da cinza do caroço de

açaí possibilita a redução dos impactos negativos sobre o meio ambiente, pois é possível uma diminuição do teor de cimento a partir do uso do cimento LC^3 e se conseguiu, com estes resultados, uma diminuição ainda maior do teor de cimento aplicado à mistura ao substituí-lo pela cinza.

Além disso, Ghavami *et al*. (2021) destaca que entre as técnicas de estabilização do solo, a sílica atua como estabilizador químico e, além de pozolana, ela também atua na estabilização física e granulométrica, pois preenche os micros vazios do solo gerando uma matriz mais densa, promovendo uma estabilização físico-química. Portanto, a incorporação da metacaulinita e do cimento LC^3 favoreceu a ação mecânica de compactação e, consequentemente, o aumento da resistência mecânica da mistura.

Os teores de umidade da mistura após submersos em água e secos em estufa com relação a massa inicial, estão apresentados na Figura 30. Para cada corpo de prova se observou o teor de água absorvido pelas misturas após sete dias submersos em água, bem como a porcentagem de água após secos em estufa com relação a massa inicial, reiterando que o aumento da capacidade de absorção, constituído naturalmente pelo maior teor de água, associa-se a perda mais rápida da água deixando mais espaços vazios.



SC_1 - Solo-cimento (SC) convencional
SC_2 - Solo-cimento (SC) com LC^3
SC_3 - SC convencional com 10% de sílica
SC_4 - SC com LC^3 e 10% de sílica
SC_5 - SC convencional com 10% de cinza volante
SC_6 - SC com LC^3 e 10% de cinza volante
SC_7 - SC convencional com 10% de cinza do bagaço de cana
SC_8 - SC com LC^3 e 10% de cinza do bagaço de cana
SC_9 - SC convencional com 10% de cinza do caroço de açaí
SC_{10} - SC com LC^3 e 10% de cinza do caroço de açaí

Figura 30. Teores de umidade dos corpos de prova e os valores de saturação após sete dias submersos
Fonte: Própria autora

O teor de água das misturas foi similar nos corpos de prova com solo-cimento convencional e com o cimento LC^3 (SC_1 e SC_2), bem como com a inserção da cinza do caroço de açaí (SC_9 e SC_{10}) considerando para a massa seca em estufa em relação a umidade inicial um valor aproximado de 8 %.

Verifica-se também que o teor de água foi similar para os corpos de prova com sílica ativa e uso do cimento LC^3 (SC_4) e os corpos de prova com a cinza volante e uso do cimento convencional (SC_5) obtendo um valor aproximado de 10 %. O menor teor de água foi detectado para o corpo de prova onde se utilizou a sílica ativa e cimento convencional (SC_3) com valor de 6 % e o maior teor para o corpo de prova onde se utilizou a cinza do bagaço de cana e cimento convencional (SC_7) com 12 %.

Existe similaridade da quantidade de água absorvidas pelos corpos de prova convencional (SC_1) e com a mistura do LC^3 (SC_2) devido à redução da porosidade da matriz causada pela cura do produto nos primeiros sete dias, o que favorece as reações de hidratação do cimento e, consequentemente, ocorre a diminuição dos poros e maior densidade do compósito. Ademais a adição do metacaulim no LC^3 proporciona melhorias mecânicas devido a uma microestrutura menos porosa, pois é considerado um material pozolânico reativo e refina a estrutura dos poros. A distribuição de partículas de material fino atua como preenchimento, reduzindo os grandes poros capilares na matriz, promovendo ligações químicas com cimento Portland e resultando em uma matriz mais densa.

Os corpos de prova com a cinza do bagaço de cana (SC_7 e SC_8) apresentaram um teor elevado em relação a umidade inicial que pode ser explicado pela capacidade de alta absorção de água e superfície porosa da cinza (CORDEIRO *et al*., 2019a), influenciando na quantidade de água necessária para a hidratação do cimento e formação do gel C-S-H.

A sílica e a cinza volante são materiais que possuem reatividade pozolânica devido sua finura e teores de SiO_2 e Al_2O_3 (MOUSAVI, 2018; CHENARBONI *et al*., 2021), o que justifica uma menor absorção da água após 7 dias, das misturas contendo sílica (SC_3 e SC_4) e cinza volante (SC_5 e SC_6), pois atuam como estabilizadores por preencher os microporos da mistura proporcionando maior densidade. Ademais, acrescentar ao solo arenoso partículas finas destas cinzas e do ligante como o cimento influencia no empacotamento de partículas e compactação da mistura, o que durante o processo de cura resulta em menos vazios e, portanto, menos penetração de água (VILELA *et al*., 2020).

As misturas contendo a cinza do caroço do açaí (SC_9 e SC_{10}) se assemelharam às misturas utilizadas como padrão (SC_1 e SC_2). De acordo com Cordeiro *et al*., (2019b) a

cinza do caroço de açaí é considerada como não reativa quanto aos índices pozolânicos e o teor de água absorvido pode estar relacionado às características morfológicas da cinza que apresenta uma estrutura visualmente porosa e com partículas irregulares, conforme observado na Figura 24.

Considerando a amostra de massa úmida dos corpos de prova após sete dias submerso, ocorreu uma variação um pouco maior de absorção de água nos corpos de prova utilizados como padrão (SC_1 e SC_2) e contendo a cinza do caroço do açaí (SC_9 e SC_{10}) com valor médio de 8 % e os menores teores para os corpos de prova contendo a sílica e a cinza volante (SC_4, SC_5 e SC_6) com variação de 3 %.

Houve pouca variação na quantidade de água dos corpos de prova contendo as adições, com exceção para a mistura contendo o cimento LC^3 e a cinza do caroço de açaí que pode ter ocorrido devido a faixa granulométrica mais ampla das partículas da cinza, no qual a aplicação da força de compactação ocasionou o rearranjo dos materiais distribuindo as partículas da cinza nos vazios do solo. Observa-se que o teor de água nos corpos de prova padrão (SC_1 e SC_2) foi semelhante e se deu devido à redução da porosidade da matriz causada pela cura do produto nos primeiros sete dias, o que favorece as reações de hidratação do cimento e, consequentemente, fez com que diminua a quantidade de poros para a entrada de água no compósito.

Consonante aos resultados demonstrados na Figura 29, realizou-se também uma análise estatística comparativa entre às adições utilizadas. A Tabela 13 apresenta a análise da estatística descritiva dos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova referentes a dois grupos, sendo um grupo com os valores de resistência à compressão do solo-cimento e adições e o outro grupo da relação entre o cimento de alta resistência inicial CP V, o cimento LC^3 e o tempo de rompimento dos corpos de prova. Na sequência, procedeu-se à ANOVA para a avaliação dos resultados de resistência à compressão entre os grupos, em função das adições, comparando o afastamento entre as médias amostrais com a variação existente dentro dos grupos.

Observando os valores de variância, que são uma medida de dispersão dos resultados dos ensaios, verifica-se no primeiro grupo referente às adições que o valor mais elevado foi para a mistura referente ao uso da cinza do caroço de açaí, com variância de 8,0 e os valores mais baixos, variando de 0,19 a 2,1 para as outras adições.

Quanto aos tipos de cimento e o tempo de ruptura, a variância nas distribuições atingiram valores entre 7 % e 10 % com rompimento aos 28 dias, indicando

homogeneidade dos valores das amostras e consequentemente consistência dos dados nesta idade de cura, utilizando tanto o cimento CP V quanto o cimento LC^3.

Tabela 13. Anova referente as proporções de cinza e os tipos de solo na mistura solo-cimento

	Grupos	Soma	Média	Variância
RESUMO	SC sílica	21,65	5,4125	0,4772
	SC cinza volante	18,27	4,5675	0,1988
	SC cinza do bagaço de cana	18,62	4,655	2,0899
	SC cinza do caroço de açaí	34,83	8,7075	8,0002
	CP V (7d)	23,00	5,75	2,4166
	LC^3 (7d)	17,00	4,25	0,9166
	CP V (28d)	28,47	7,11	7,2704
	LC^3 (28d)	24,90	6,22	9,6457

	Fonte da variação	SQ	F	valor-P	F crítico
ANOVA	Linhas	45,7148	**9,1224**	**0,0043**	**3,8625**
	Colunas	17,2654	**3,4453**	**0,0650**	**3,8620**
	Total	78,01399			

Fonte: Própria autora

A análise dos resultados apresentados permite concluir que há diferença significativa entre os grupos referente às adições (expressas na fonte de variação das linhas). Observa-se que F calculado é maior que F crítico, portanto, rejeita-se a hipótese nula (que não há diferença entre os grupos) em prol da hipótese alternativa (há diferença entre os grupos) ao risco de 5% (significância de 95%). A análise do valor-P (0,0043 – muito menor que 0,05) permite rejeitar a hipótese nula de igualdade de médias para qualquer nível de significância, ou seja, as médias diferem entre si com nível de significância de 95%.

Já análise dos resultados apresentados para os dois tipos de cimento permite concluir que não há diferença significativa entre os grupos dos corpos de prova rompidos aos 7 e aos 28 dias de idade. Observa-se que F é menor que F crítico, aceitando a hipótese nula (que não há diferença entre os grupos) em prol da hipótese alternativa (há diferença entre os grupos) ao risco de 5%. A análise do p-valor (é maior que 5%) permite aceitar a hipótese nula de igualdade de médias para qualquer nível de significância.

Em síntese, a ANOVA e os testes de comparações múltiplas permitem concluir que, para qualquer nível de significância das variáveis distribuídas em linhas, uma vez que o p-valor é aproximadamente zero, as médias dos vários grupos não são todas iguais, o que indica que existem diferenças significativas nas médias das resistências à compressão. Porém, para as médias dos grupos expressos nas colunas, indicam que não

existem diferenças significativas nas médias das resistências à compressão para as composições da mistura com o cimento CP V, bem como com o LC^3.

Os resultados referentes ao grupo contendo as adições não se mostraram homogêneos, destacando que entre os grupos houve diferença estaticamente significativa quando comparadas às misturas contendo a inserção da cinza do caroço de açaí, cinza do bagaço de cana, cinza volante e da sílica ativa às misturas.

Com a diferença entre os grupos com as adições aplicou-se o teste tukey e o resultado do teste está apresentado na Figura 31, em 3 dimensões, confirmando que a inserção da cinza do caroço de açaí à mistura é o resultado que se destaca diferenciando das outras matérias-primas (amostras) dentro do grupo.

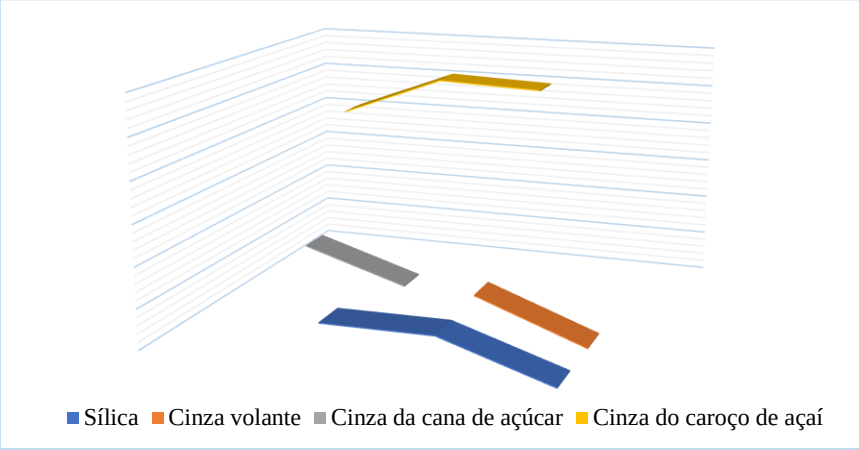


Figura 31. Resultado do Teste Tukey aplicado a partir dos resultados estatísticos da ANOVA
Fonte: Própria autora

O resultado apresentado na Figura 31 corrobora com a análise da estabilização física e mecânica das misturas de solo-cimento, no qual se observou que, a mistura com melhor distribuição granulométrica das partículas favoreceu o desempenho de resistência à compressão, principalmente das misturas com o solo e o cimento LC^3, bem como das misturas com a inserção da cinza do caroço de açaí.

Tal efeito, pode ter sido influenciado pela caracterização microestrutural da cinza, que demonstrou um material com finura intermediária entre as matérias-primas constantes no cimento LC^3 e o solo, gerando uma granulometria bem graduada e, consequentemente, uma adequada distribuição de partículas, além de sua forma e textura que demonstra uma rugosidade e porosidade que, pode ter favorecido a absorção de água e a compactação das misturas.

CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A partir dos inventários, os dados foram inseridos no *software* OpenLCA favorecendo a criação de processos, tendo como base as respectivas informações ou similares, constantes na base de dados do Ecoinvent 3.7.1. Para cada "sistema de produto" (no caso desta pesquisa, cada mistura de solo-cimento) foram analisadas, pelo método CML 2001, as categorias de impacto: aquecimento global, depleção de recursos abióticos, depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, toxicidade humana, ecotoxicidade, acidificação e eutrofização.

5.1. Resultados da ACV para as misturas de solo-cimento

Os resultados estão apresentados na Figura 32 considerando cada categoria de impacto e as misturas de solo-cimento identificadas. O gráfico está apresentado em escala logarítmica para melhor apresentação visual.

A análise e discussão dos resultados serão descritas de forma geral, por categoria, comparando as misturas de solo-cimento e apresentado os valores numéricos determinados pelo *software*. Reitera-se que os comparativos entre as matérias-primas incorporada aos cimentos serão apresentados posteriormente.

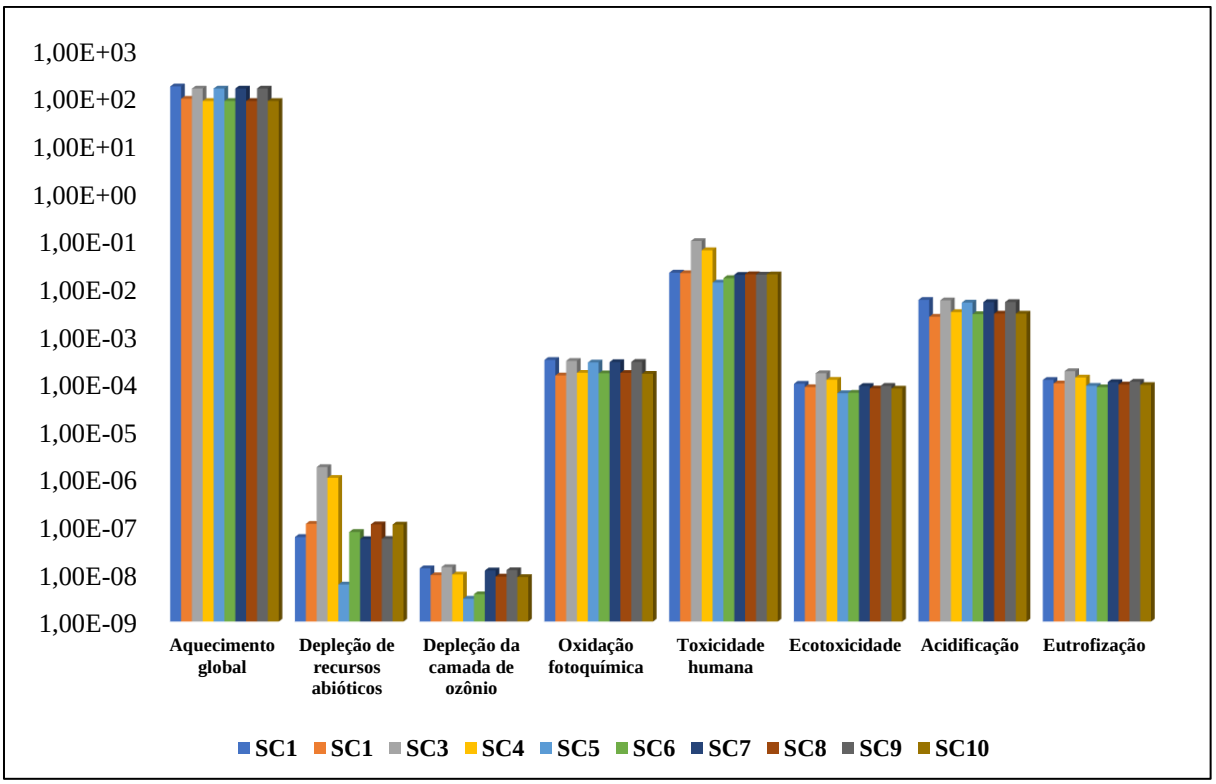


Figura 32. Resultado gráfico da Avaliação do Ciclo de Vida, analisada pelo método CML 2001 no software OpenLCA para as dez misturas de solo-cimento
Fonte: Própria autora

Aquecimento global

O aquecimento global é apresentado em quilograma de dióxido de carbono cuja principal interferência ambiental são as mudanças climáticas, que relacionam à emissão de gases e o efeito estufa na atmosfera. Os fatores são expressos como Potencial Aquecimento Global em kg.$CO_{2.eq}$.

Com base no critério adotado que é do "berço ao portão", considera-se este impacto desde a extração das matérias-primas até o processo de produção dos tijolos de solo-cimento, no qual é possível perceber que houve uma diferença dos valores, comparando as misturas com o cimento CP V e o cimento LC^3.

Os resultados entre as misturas com o cimento CP V variaram de 144 kg.$CO_{2.eq}$ a 160 kg.$CO_{2.eq}$ e os resultados entre as misturas com o cimento LC^3 teve uma variação de 79 kg.$CO_{2.eq}$ a 88 kg.$CO_{2.eq}$.

Para Silva *et al.* (2020) a principal causa dos impactos nesta categoria são as emissões atmosféricas da produção de cimento, sobretudo óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2), sendo que a emissão de dióxido de carbono é de duas a três ordens de grandeza superior às demais, o que explica a importância do potencial de aquecimento global em produtos cimentícios. Farias *et al.* (2022) descreve que a contribuição principal desse impacto provém, principalmente, da emissão do CO_2 resultante do processo de calcinação do calcário para originar o clínquer.

O processo produtivo de calcinação do calcário e outras matérias primas para fabricação do clínquer é muito complexo e envolve o consumo de grandes quantidades de matérias-primas (com propriedades variáveis), técnicas de piroprocessamento, energia (calor e eletricidade) e fontes de combustível (por exemplo, carvão, petróleo, coque, gás natural, óleo combustível, biomassa ou diferentes tipos de resíduos). Devido a esta complexidade, as emissões atmosféricas derivam das reações físico-químicas envolvendo principalmente a descarbonização do calcário e do tipo de processo de combustão.

Além das emissões de poluentes ocorre também relevantes impactos na extração da principal matéria-prima (calcário), o que justifica desenvolver estudo de outros insumos, modelos correspondentes, escala de produção, localização geográfica, bacias geológicas, entre outros parâmetros que devem ser considerados. Nesse contexto, Bendouma *et al.* (2020) enfatiza a importância de desenvolver estudos de ACV, verificando o impacto ambiental associado a cada processo produtivo na extração de

calcário separadamente, para facilitar a análise dos dados e identificar os produtos mais nocivos para o ambiente.

Depleção de recursos abióticos

Este indicador de categoria de impacto está relacionado à extração de minerais e combustíveis fósseis considerando a "entrada" no sistema, como exemplo a energia para extração do solo. O Fator de Depleção Abiótica é determinado para cada extração em massa de reserva do recurso abiótico e sua relação com a massa de reserva de referência (no caso do método CML 2001, o antimônio equivalente por quilograma de extração) baseado na concentração de reservas e a taxa de consumo.

Os valores em destaque são para as misturas de solo-cimento com a incorporação da sílica ativa e da cinza volante, que apresentaram valores de $1{,}02x10^{-6}$ $kg.Sb_{.eq}$ para a mistura SC_3 e de $5{,}09x10^{-9}$ $kg.Sb_{.eq}$ para a mistura SC_5. A origem destes valores é fortemente influenciada pelo consumo de fontes de energia não renováveis obtidos a partir de combustíveis fósseis e, apesar de alguns minerais, como o solo e o calcário, serem globalmente abundantes, pode haver escassez local, considerada por este indicador, o consumo de recursos.

Em termos de valor absoluto, esta categoria é a que tem o maior valor na extração das matérias-primas. Além de causar mudanças significativas adversas ao uso do solo, essas atividades requerem grandes áreas, acarretando prejuízos ao meio ambiente. Nesta pesquisa, o insumo mais relevante quanto ao uso de recursos abióticos é o solo, porém, por ser expressa a mesma quantidade em todas as misturas, ocorreu similaridade dos resultados quanto aos impactos gerados.

Analisando os sistemas comparativamente, a demanda de materiais com alta energia incorporada, ou seja, que requer grandes intensidades energéticas para a extração, transporte e produção, é levada em consideração para as matérias-primas aplicadas à mistura, como a sílica e cinza volante. Os dados inseridos incluem materiais de entrada, energia, uso da terra, maquinário em alguns casos, emissões de saída, além de uma avaliação das práticas de saúde e segurança. Dessa forma, os resultados para essas categorias foram coerentes para os sistemas em análise.

Manjunatha *et al.* (2021) destaca que materiais como as cinzas volantes são produtos industriais que consomem grandes quantidades de energia e recursos naturais para fabricação de aço e geração de energia, liberando uma quantidade de emissão de CO_2 na atmosfera, causando a poluição ambiental e o esgotamento dos recursos naturais.

Porém, deve-se destacar que, quando esses materiais são utilizados como uma espécie de recurso de uma nova matéria-prima (subproduto), a exemplo de substituição do cimento, geram um impacto mais significativo positivamente em termos de meio ambiente.

Depleção da camada de ozônio

Esta categoria está relacionada à "saída" no sistema em escala global. Este fator considera a radiação ultravioleta que atinge a superfície terrestre devido à depleção do ozônio estratosférico e, consequentemente, alguns efeitos danosos sobre os ecossistemas e os ciclos biogeoquímicos. O modelo de caracterização define o potencial de diferentes gases em quilograma de CFC^{-11} equivalente (tricloromonofluormetano) por quilograma de emissão.

Os resultados apresentaram similaridade entre as misturas de solo-cimento variando de $1{,}17x10^{-8}$ $kg.CFC^{-11}_{.eq}$ a $1{,}3x10^{-8}$ $kg.CFC^{-11}_{.eq}$ para as misturas com o cimento CP V e variando de $8{,}5x10^{-9}$ $kg.CFC^{-11}_{.eq}$ a $9{,}8x10^{-9}$ $kg.CFC^{-11}_{.eq}$ para as misturas com o cimento LC^3, sendo destes o menor valor para a mistura com a incorporação da cinza do caroço de açaí. Ressalta-se como exceção as misturas com a incorporação da cinza volante cujos valores foram de $3{,}1x10^{-9}$ $kg.CFC^{-11}_{.eq}$ para a mistura SC_4 e para a mistura SC_5 de $9{,}8x10^{-9}$ $kg.CFC^{-11}_{.eq}$.

A origem destes valores deve-se basicamente ao processamento do clínquer devido à emissão de gases na atmosfera. Nesta categoria as emissões ocorrem durante o processo de fabricação do clínquer e no uso de fornos para o processamento de outros insumos e/ou matérias-primas.

Segundo Zimele *et al.* (2019) o potencial de destruição da camada de ozônio indica o dano de vários gases no ozônio estratosférico, por exemplo, os compostos clorados e bromados reduzem a capacidade de impedir que a luz ultravioleta entre na atmosfera.

Como citado anteriormente, os poluentes mais relevantes resultantes do processo de fabricação do cimento são as partículas: CO_2, NO_x, SO_2 e CO que contribuem para esta categoria de impacto. Além disso, Muneron *et al.* (2021) considera relevante destacar à contribuição que vem do transporte das matérias-primas devido ao NO_x emitido durante a queima de combustível dos caminhões, bem como a extração mineral e o uso de combustíveis fósseis.

Para Farias *et al.* (2022) a vida útil média da depleção da camada de ozônio na atmosfera é de, aproximadamente, 50 anos e, neste período, o gás CFC^{-11} permanece

degradando a camada e potencializando, desse modo, seu dano ambiental. Como esta categoria de impacto é medida em termos de massa equivalente, pode haver emissões de outros gases com o mesmo dano ambiental, mas com vida útil maior que o CFC^{-11}, agravando ainda mais o problema. Porém, dentre as categorias estudadas, esta apresenta os menores valores absolutos de impacto negativo.

Observa-se, portanto, que tem ocorrido uma melhoria deste cenário por meio de novos processos produtivos e materiais, comparado às antigas linhas de produção de clínquer. Essas melhorias podem ser relacionadas com a maior eficiência energética, menor quantidade de combustível fóssil e a redução de emissões.

Oxidação fotoquímica

O indicador de Oxidação Potencial Fotoquímica para emissão de substâncias no ar é expresso em quilograma de etileno por quilograma de emissão. A formação foto-oxidante é causada principalmente pelas emissões de substâncias reativas provenientes de compostos químicos que interferem na formação de ozônio (devido à ação da luz solar sobre alguns poluentes atmosféricos primários, monóxido de carbono e metano) e, consequentemente, são danosos aos ecossistemas e à saúde humana.

Os resultados apresentaram similaridade entre as misturas com o cimento CP V, cujos valores variaram entre 0,0003 $kg.C_2H_{4.eq}$ a 0,00027 $kg.C_2H_{4.eq}$ e entre as misturas com o cimento LC^3 cujos valores variaram entre 0,00014 $kg.C_2H_{4.eq}$ a 0,00016 $kg.C_2H_{4.eq}$, sendo os menores valores os das misturas SC_9 e SC_{10}.

Zimele *et al.* (2019) considera que a oxidação fotoquímica é uma poluição do ozônio fotoquímico causada por vários compostos, como monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO_2), óxido de nitrogênio (NO), amônio e COVNM (compostos orgânicos voláteis não metálicos), além de poluentes atmosférico primários.

Além das consequências ao meio atmosférico, Wang *et al.* (2017) relatam o fator protetivo da camada para o ecossistema, no qual a quantidade apropriada de ozônio pode absorver a maior parte dos raios ultravioleta, no entanto, o excesso de ozônio pode afetar o crescimento normal e atividade de organismos, bem como causar danos ao corpo humano. Por isso, a camada de ozônio deve ser controlada em uma faixa de concentração de ozônio razoável.

Farias *et al.* (2022) destaca que as maiores emissões de material particulado em materiais cimentícios ocorrem nos processos de fabricação e não na extração de matérias primas, no qual o cimento é o insumo mais relevante na contribuição dessas emissões

devido ao processo de queima para produção do clínquer e também ao coprocessamento de materiais que são utilizados pelas empresas cimenteiras, porém, os COVNM são liberados principalmente na queima de biomassas com elevado teor de carbono. Entre estes, cita-se a queima do bagaço de cana e do caroço de açaí, que possuem um potencial de emissão de poluentes, principalmente, o monóxido de carbono.

Apesar disto, o uso alternativo destas matérias-primas em substituição ao cimento, insumo relevante na emissão de poluentes e compostos químicos que interferem na formação de ozônio, pode representar uma forma para a redução dos impactos ambientais desta categoria.

Toxicidade humana

Esta categoria está relacionada à exposição aos efeitos de substâncias tóxicas para um horizonte de tempo infinito e suas consequências ao ambiente humano. O Potencial de Toxicidade Humana (HTP – Human Toxicity Potentials) é calculado e expresso em equivalência entre o 1,4-DB (diclorobenzeno equivalente) e cento e oitenta substâncias toxicas por quilograma de emissão.

Destacam-se os maiores valores para as misturas com a sílica ativa, sendo o valor de 0,09 kg.1,4-$DB_{.eq}$ para a mistura SC_3 e de 0,05 kg.1,4-$DB_{.eq}$ para a mistura SC_4. Bem como os menores valores para as misturas com a cinza volante, sendo o valor de 0,012 kg.1,4-$DB_{.eq}$ para a mistura SC_5 e de 0,015 kg.1,4-$DB_{.eq}$ para a mistura SC_6.

Os resultados apontam a similaridade entre as misturas com a cinza do bagaço de cana e a cinza do caroço de açaí, cujos valores foram em média 0,018 kg.1,4-$DB_{.eq.}$

O potencial de toxicidade humana é calculado como índice de produtos químicos liberados no meio ambiente que são perigosos para a saúde humana. Embora as fases de extração de matéria-prima e produção, por exemplo, do clínquer contribuem para o impacto do aquecimento global, as categorias de impacto de toxicidade humana e de ecotoxicidade são dominadas pelas subfases da extração e processamento. Isso reflete em que a produção de sílica ativa, apesar de material inerte, seja responsável pelo maior impacto danoso das vias aéreas, inclusive pelo pó de sílica, que pode ser tóxico, afetando diferentes níveis, principalmente o sistema pulmonar.

No impacto de toxicidade humana por veiculação hídrica verifica-se o processo do clínquer, por meio do depósito de mercúrio, que é uma das preocupações quando combinado com carbono, aumentando seu potencial de toxicidade. A diferença nos

impactos causados por essas emissões é devido também a energia empregada no processo produtivo baseado em combustível fóssil.

Os impactos referentes ao HTP na agroindústria são os que comumente contribuem para a liberação de substâncias tóxicas à saúde humana, causadas pelo uso de fertilizantes e pesticidas na agricultura que liberam emissões de óxidos de nitrogênio e enxofre (NOx e SOx), além da queima desses resíduos, como o bagaço da cana de açúcar e o caroço de açaí, pelo potencial de emissões orgânicas respiratórias devido aos compostos orgânicos voláteis.

Ecotoxicidade

Este indicador, semelhante ao HTP, está relacionado à exposição aos efeitos de substâncias tóxicas para um horizonte de tempo infinito e suas consequências ao ar, água e solo. O Potencial de Ecotoxicidade (EP – Ecotoxicity Potential) é calculado e expresso em equivalência entre o 1,4-DB (diclorobenzeno equivalente) e diversas substâncias toxicas, por quilograma de emissão, distribuídas em cinco subcategorias: aquática de água doce, aquática marinha, sedimento de água doce, sedimento marinho e terrestre.

Similar aos valores apresentados a categoria da toxicidade humana destacam-se as misturas com incorporação da sílica ativa, sendo o valor de $1{,}4x10^{-4}$ kg.1,4-$DB_{.eq}$ para a mistura SC_3 e de $1{,}1x10^{-4}$ kg.1,4-$DB_{.eq}$ para a mistura SC_4. Bem como os menores valores para as misturas com a cinza volante, sendo de $6{,}1x10^{-5}$ kg.1,4-$DB_{.eq}$ para a mistura SC_5 e de $6{,}2x10^{-5}$ kg.1,4-$DB_{.eq}$ para a mistura SC_6.

Os resultados apontam a similaridade entre as misturas com a cinza do bagaço de cana e a cinza do caroço de açaí, cujos valores foram em média $8{,}7x10^{-5}$ kg.1,4-$DB_{.eq}$ para as misturas com cimento CP V e a média de $7{,}6x10^{-5}$ kg.1,4-$DB_{.eq}$ para as misturas com o cimento LC^3.

A maior concentração de impacto está na ecotoxicidade do solo. Porém, nas categorias de impacto ecotoxicidade em água doce e eutrofização, os materiais de construção que mais contribuem para estes impactos são o cimento Portland e o revestimento cerâmico. Parte significativa destas emissões está relacionada aos processos produtivos, onde há geração de efluentes, além disso, os subprodutos gerados na combustão são lançados na atmosfera e carreados para o solo, atingindo aos corpos hídricos (FARIAS *et al.*, 2022).

A ecotoxicidade hídrica relacionada a produção do cimento, se dá principalmente pelos impactos de processamento do clínquer. Porém, uma das principais fontes do

potencial de ecotoxicidade aquática para o ciclo de vida está no teor de zeólita e na contaminação de metais como alumínio e cobre, ambos presentes na cinza volante.

Manjunatha *et al.* (2021) destacam que a cinza volante consome grandes quantidades de combustíveis fósseis, energia, recursos naturais, minerais e o aproveitamento desse subproduto industrial como um substituto do clínquer, também apresenta impactos ambientais de toxicidade, pois para se obter a cinza ocorre o processo produtivo da fabricação do aço que gera emissões de gases e íons tóxicos, como as emissões de gás por zeolitas, que possuem potencial cancerígeno por elementos como íon arsênico e emissões orgânicas por compostos orgânicos voláteis. Porém, destaca-se como matéria-prima o subproduto cinza volante que é um passivo ambiental, reiterando o benefício de sua aplicabilidade.

O valor potencial ponderado da ecotoxicidade está relacionado a cinza residual de combustão da agroindústria que possuem metais presente nas respectivas cinzas, que adentram em cultivos terra quando se aplica fertilizantes e defensivos agrícolas que são absorvidos pelo solo e pela vegetação (Wang *et al.*, 2017).

Nesse contexto, os efeitos da ecotoxicidade no solo agrícola influenciam o ciclo de vida de matérias-primas como a cinza do bagaço de cana e a cinza do caroço de açaí, no qual deve-se promover trabalho de prevenção e o controle da toxicidade de modo a evitar outros danos ambientais que podem ter efeitos significativos sobre os recursos hídricos, ar e solo.

Acidificação

Os poluentes acidificantes têm uma grande variedade de impactos no solo, água subterrânea, águas superficiais, organismos biológicos, ecossistemas e, inclusive, em materiais de construção. As substâncias que mais contribuem para a acidificação são o dióxido de enxofre e amônia (SO_2 e NH_3). O Potencial de Acidificação para emissões é calculado e expresso como quilograma de SO_2 equivalente por quilograma de emissão.

Os resultados apontam para uma pequena variação das misturas com o cimento CP V, sendo de entre 0,3 kg.$SO_{2.eq}$ a 0,5 kg.$SO_{2.eq}$ e para as misturas com o cimento LC^3 os resultados foram em média de 0,2 kg.$SO_{2.eq}$.

Esses valores de impacto são comumente apresentados devido ao uso de combustíveis fósseis. Uma liberação de pequenas quantidades de NH_3 e emissões de SO_2 são produzidas adicionalmente devido às operações e processos de queima. Essas emissões podem acidificar o solo, a água, os ecossistemas e os organismos.

As principais emissões durante a produção de cimento ocorrem devido a combustão de alta energia (altas temperaturas) da rocha calcária para produção do clínquer, assim como o uso de equipamentos mecânicos e transporte veicular. Além disso, vale considerar em menor escala, outras matérias-primas utilizadas na produção de cimento e a fração de SO_2 não combinada quimicamente que é emitido para a atmosfera. Estas substâncias acidificantes causam uma ampla gama de impactos nos ecossistemas e em edificações da construção civil (VALDERRAMA *et al.,* 2012).

Destaca-se também a combustão da biomassa de resíduos agroindustriais que para sua conversão em calor e eletricidade na usina de cogeração liberam óxidos de nitrogênio (NO_x) na atmosfera, assim como a presença de compostos contendo enxofre nos fertilizantes para cultivo da agroindústria são contribuintes para o impacto causado por emissões acidificantes aquáticas. Ademais, há o impacto no uso do solo devido a redução da biodiversidade causada pela extração da matéria-prima (SREEJITH *et al.,* 2013; OSPINA *et al.,* 2021).

Existem outras emissões que podem ser consideradas, como amônia (NH_3) e nitrogênio total (N-tot), mas seu efeito quanto a análise do ciclo de vida é de pouca relevância em comparação com o efeito de NO_x. Portanto, a razão relevante para acidificação quanto ao ciclo de vida é devido a volatilização de amônia (MUNERON *et al.,* 2021). A emissão desses gases na atmosfera facilmente resulta na formação de chuva ácida, no qual é válido salientar que o grande dano de gás ácido não pode ser ignorado, pois, este indicador de impacto considera algumas consequências como a destruição da camada de ozônio e mudanças climáticas, bem como os efeitos cancerígenos e respiratórios que impactam a saúde humana.

Eutrofização

A eutrofização é o enriquecimento de nutrientes, nitrogênio (N) e fósforo (P), na água ou solo que podem causar uma indesejável mudança na composição de espécies nos ecossistemas e uma redução na diversidade ecológica. Nas águas superficiais a mudança na gama de espécies é geralmente evidente pelo rápido crescimento das algas, o que pode levar a um déficit de oxigénio, com os consequentes efeitos na flora e fauna.

O potencial de eutrofização (EP) é definido como a relação entre o potencial de biomassa em equivalentes de nitrogênio por quantidade emitida de substância e o potencial de biomassa em equivalentes por quantidade emitida de uma substância de

referência, sendo expressa como quilograma de fosfato equivalente por quilograma de emissão.

Destacam-se como maiores concentrações os valores das misturas com o cimento CP V e o resultado de maior valor o da mistura SC_3 sendo $1,7x10^{-4}$ kg.$PO_{4.eq}$. Os menores valores foram para as misturas SC_8 e SC_{10}, sendo $9,2x10^{-5}$ kg. $PO_{4.eq}$ e $9,0x10^{-5}$ kg. $PO_{4.eq}$, respectivamente.

Esses impactos ambientais devem-se principalmente às emissões inorgânicas causadas por fosfatos, carbono orgânico total e óxidos de nitrogênio, bem como às emissões de longo prazo para os recursos de água doce, que causam o aumento exagerado de nutrientes (amônia, nitratos, óxidos de nitrogênio e fósforo) em corpos d'água, ocasionando o crescimento de algumas algas e a mortandade de organismos aquáticos por falta de oxigênio.

Na categoria da eutrofização aquática, o cimento Portland é o que mais colabora com este impacto negativo, que considera a água incorporada ao produto, bem como os impactos causados pela deposição de efluentes em corpos hídricos. No caso do cimento Portland, o maior uso da água ocorre de forma indireta, na fabricação do clínquer.

A alta taxa de contribuição da eutrofização terrestre resultam de uma variedade de razões. Uma delas é que o fósforo pode se infiltrar em água subterrânea e então a água subterrânea flui para rios, lagos e oceanos. Além disso, existem os componentes contidos em fertilizantes para uso na agroindústria que podem volatilizar no ar, caindo no solo com a precipitação pluviométrica. No caso do açaizeiro, comumente se utiliza fertilizantes contendo nitrogênio, fósforo e potássio, conhecidos como NPK que auxiliam no desenvolvimento de palmeiras.

Portanto, a categoria de impacto eutrofização baseia-se na concentração de nutrientes químicos no ecossistema, o que leva a reduções severas na qualidade da água e nas populações de animais. Os impactos relativamente significativos quanto à contaminação de recursos hídricos são atribuídos às práticas intensivas da produção agrícola. A utilização de superfosfato simples como fertilizante e as emissões de usinas de combustíveis fosseis são fontes de eutrofização.

5.2. Resultado comparativo entre os resíduos industriais incorporados às misturas

Para uma melhor interpretação gráfica, será apresentado os resultados das categorias de impacto de maneira comparativa entre os resíduos sílica ativa e cinza volante incorporadas nos cimentos CP V e LC^3. Para uma melhor formatação os valores

foram divididos pelo maior valor de cada categoria, para obter a proporção até o numeral "1" e apresentado em escala logarítmica.

A Figura 33a apresenta os resultados comparativos entre: o solo-cimento misturado com o cimento CP V (SC_1) e com o cimento LC_3 (SC_2) e, também, entre o solo-cimento com a incorporação da sílica ativa no cimento CP V (SC_3) e a sílica ativa no cimento LC_3 (SC_4). A Figura 33b apresenta os resultados comparativos entre: o solo-cimento misturado com o cimento CP V (SC_1) e com o cimento LC_3 (SC_2) e, também, entre o solo-cimento com a incorporação da cinza volante no cimento CP V (SC_5) e a cinza volante no cimento LC_3 (SC_6).

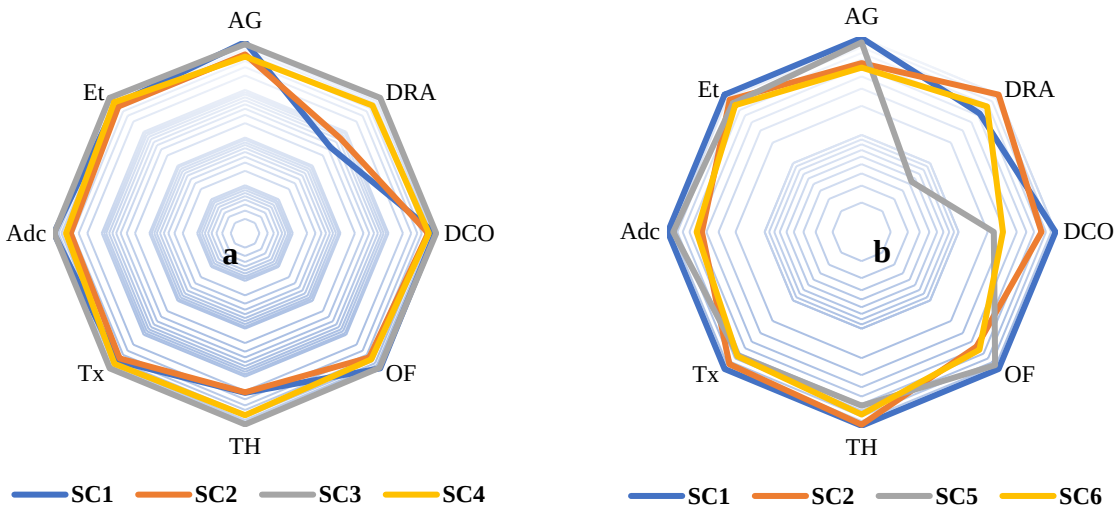


Figura 33. (a) Resultado gráfico comparativo da AVC para as de misturas de solo-cimento SC_1, SC_2, SC_3 e SC_4. (b) Resultado gráfico comparativo da AVC para as de misturas de solo-cimento SC_1, SC_2, SC_5 e SC_6. Legenda: AG – Aquecimento global, DRA – Depleção de recursos abióticos, DCO – Depleção da camada de ozônio, OF – Oxidação fotoquímica,TH – Toxicidade humana, Tx – Ecotoxicidade, Acd – Acidificação e Et – Eutrofização.
Fonte: Própria autora

Os principais pontos de destaque entre as diferentes categorias de impacto se tornaram necessárias para detectar a contribuição de cada uma delas, observando e avaliando os potenciais impactos ambientais. As Figuras 33a e 33b permitem comparar as categorias de ambos os cenários contendo a sílica ativa e a cinza volante. Para cada categoria, foi obtido um valor pontual e atribuído uma alternativa sendo facilmente identificado quanto mais favoráveis ou desfavoráveis elas se apresentam.

A Figura 33a apresenta valores muito semelhantes em seis das categorias analisadas, com a exceção das categorias depleção de recursos abióticos (DRA) e toxicidade humana (TH) onde as misturas contendo a sílica ativa foram mais

desfavoráveis ao impacto ambiental. Aspectos similares de observa na Figura 33b com os valores muito semelhantes exceto para a categoria depleção de recursos abióticos (DRA) no qual as misturas com a cinza volante e o cimento LC^3 foram mais desfavoráveis ao impacto ambiental.

Referente a Figura 33a, vale salientar que, apesar de ser um subproduto caracterizado como passivo ambiental, para que obtenhamos a sílica ativa torna-se necessário os processos industriais de silício e ferrosilício. A lama para extração do material contém óxidos de ferro e silício podendo ter presença de outros metais dependendo do solo extraído.

Em termos de valor absoluto, a sílica é destacada como resíduo industrial e sua contribuição para esta categoria de impacto pode parecer insignificativa ao comparar com todas as matérias-primas utilizadas nas misturas. Apesar de não apresentar toxicidade direta, seu processo produtivo pode influenciar no pH e alterar a composição de nutrientes dissolvidos em cursos d'água, além de tornar o solo infértil, modificar a dinâmica dos ecossistemas locais e apresentar riscos pulmonares e cancerígenos à saúde humana (BRASIL, 2020; ONYELOWE *et al.*, 2022).

Já a Figura 34b, demonstra os efeitos para esta categoria de impacto de maneira negativa com a utilização das quatro principais matérias-primas da mistura: clínquer, metacaulinita, fíler e cinza volante. Todas estas, contribuem para a depleção de recursos, por serem matérias de extração e preparação para uso.

A cinza volante é um pó fino composto de partículas vítreas e são um subproduto de usinas elétricas movidas a carvão, com elevado gasto energético e tradicionalmente considerada como um resíduo industrial.

De acordo com Onyelowe *et al.* (2022) na etapa de produção da cinza volante, a emissão tóxica, os impactos ambientais e os custos são relativamente baixos quando comparado ao cimento Portland. Isso ocorre porque as cinzas volantes são geradas a partir de outros processos, tornando-a um subproduto. Nesse contexto, a produção de clínquer utiliza um procedimento intensivo de energia, responsável por altas emissões e, consequente gera maior impacto.

Referente a sua extração como matéria-prima e ainda como material residual pós processo produtivo, a falta de gerenciamento da cinza volante torna-se um problema ambiental se tiver um manejo inadequado, pois consome combustíveis fósseis, recursos naturais e minerais e seu descarte pode ser prejudicial ao solo e ao ecossistema, bem como

pode afetar a saúde humana por doenças respiratórias (ELAHI *et al.*, 2021; MANJUNATHA *et al.*, 2021).

Apesar das consequências ambientais quanto a depleção de recursos abióticos, Sato *et al.* (2017) destacam benefícios ambientais em substituir o clínquer por cinzas volantes, analisando esta substituição de uma perspectiva pelas emissões de gases do efeito estufa, mesmo se houver grandes distâncias entre o transporte de carvão e a fábrica de cimento, ainda assim há uma melhoria no desempenho ambiental.

Cabe ainda destacar que, segundo Rahla *et al.* (2019), os resíduos são considerados como subprodutos se satisfizerem as seguintes condições: a) O uso posterior da substância ou objeto; b) a substância ou objeto é produzido como parte integrante de um processo de produção; c) a substância ou objeto pode ser usado diretamente sem qualquer processamento adicional além da prática industrial; d) o uso posterior é lícito, ou seja, a substância ou objeto atende a todos os requisitos relevantes de produto e requisitos de proteção à saúde para o uso específico e não levar a impactos ambientais ou à saúde humana globalmente adversos.

Com base nesse contexto, deve ser observado no estudo do ciclo de vida que contenham sílica ativa ou cinza volante, de considerar a inclusão da alocação para contabilizar os impactos ambientais em maiores proporções. Portanto, no que diz respeito aos subprodutos, a utilização de um método de ACV e a atribuição do procedimento de alocação deve ser aplicado, sendo fundamental para atribuir e analisar o número de emissões, produção de resíduos, matéria-prima e consumo de energia destes resíduos industriais.

5.3. Resultado comparativo entre os resíduos agroindustriais incorporados às misturas

Será apresentado os resultados das categorias de impacto de maneira comparativa entre os resíduos cinza do bagaço de cana e cinza do caroço de açaí incorporadas nos cimentos CP V e LC^3. Para uma melhor formatação gráfica os valores foram divididos pelo menor valor de cada categoria, para obter a proporção até o numeral “1” e apresentado em escala logarítmica.

A Figura 34a apresenta os resultados comparativos entre: o solo-cimento misturado com o cimento CP V (SC_1) e com o cimento LC_3 (SC_2) e, também, entre o solo-cimento com a incorporação da cinza do bagaço de cana no cimento CP V (SC_7) e a cinza do bagaço de cana no cimento LC_3 (SC_8).

A Figura 34b apresenta os resultados comparativos entre: o solo-cimento misturado com o cimento CP V (SC_1) e com o cimento LC_3 (SC_2) e, também, entre o solo-cimento com a incorporação da cinza do caroço de açaí no cimento CP V (SC_9) e a cinza do caroço de açaí no cimento LC_3 (SC_{10}).

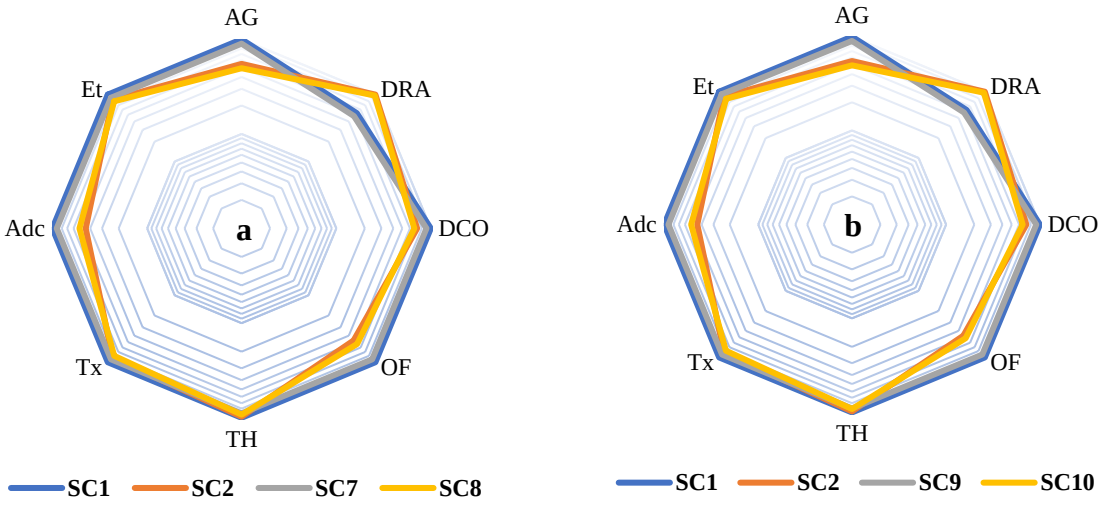


Figura 34. (a) Resultado gráfico comparativo da AVC para as de misturas de solo-cimento SC_1, SC_2, SC_7 e SC_8. (b) Resultado gráfico comparativo da AVC para as de misturas de solo-cimento SC_1, SC_2, SC_9 e SC_{10}. Legenda: AG – Aquecimento global, DRA – Depleção de recursos abióticos, DCO – Depleção da camada de ozônio, OF – Oxidação fotoquímica,TH – Toxicidade humana, Tx – Ecotoxicidade, Acd – Acidificação e Et – Eutrofização.
Fonte: Própria autora

As Figuras 34a e 34b apresentam uma similaridade entre os resultados, tendo como principal ponto de destaque a categorias de impacto depleção dos recursos abióticos (DRA), pelo uso da terra, gerando impactos quanto a transformação, ocupação e relaxamento do solo, além disso, as plantações utilizam uma grande da terra podendo causar danos ao ecossistema através da perda de habitat. Ademais, as Figuras também apresentam valores semelhantes nas categorias Toxicidade humana (TH), Ecotoxicidade (Tx) e Eutrofização (Et), em comparação com os cimentos CP V e LC^3.

Os impactos referentes a agroindústria são influenciadas por redução da biodiversidade, diminuição da fertilidade do solo, mudanças no uso da terra, erosão, aplicação de defensivo, que gera um grande problema ambiental, pois, apesar da irrigação demandar grande utilização de energia, nas áreas não irrigadas são usadas quantidades maiores de fertilizantes, deixando as emissões de gases de efeito estufa em patamares semelhantes.

Segundo Ponce (2019) na prática das atividades agrícolas em que não se aplicam defensivos ou fertilizantes, as fontes de impactos ambientais estão relacionadas à mecanização das operações agrícolas como: o desgaste dos pneus dos maquinários

agrícolas, a combustão do diesel nas operações agrícolas e as cargas ambientais provenientes da produção do diesel, dos tratores e dos implementos agrícolas.

Ademais, as Figuras também apresentam valores semelhantes nas categorias Toxicidade humana (TH), Ecotoxicidade (Tx) e Eutrofização (Et), em comparação com os cimentos CPV e LC^3. Estas três categorias obtêm parâmetros de impacto ambiental: TH – devido à sua influência primordial na saúde; Tx – devido à sua contribuição para os ecossistemas, à saúde do ambiente e de seus habitantes em escala regional e Et – devido a sua contribuição para a eutrofização a nível regional.

Normalmente, os resíduos agroindustriais advêm cultivos agrícolas que requerem inerentemente água para produzir biomassa e do uso de fertilizantes. Isto infere-se que a produção e desnitrificação de fertilizantes nitrogenados são fontes de nitrogênio óxido que contribuem para a degradação atmosférica e resultam em impactos ambientais negativos além de representar um risco para a saúde humana (SINOH *et al.,* 2020).

Referente a atividade agrícola da cana de açúcar, há de considerar os impactos no meio água provocados pelas usinas sucroalcooleiras devido aos fluxos de captação e uso de água no processo industrial de produção de etanol e açúcar e as etapas de lavagem: no processo de evaporação / condensação, destilação (águas residuais, água aquecedora, lavagens de pisos e tanques e descartes) e caldeira. Os impactos são de natureza quantitativa e qualitativa, podendo degradar os recursos hídricos pelo uso intensivo, escassez e, pelo grande potencial poluidor das atividades agroindustriais e uso do solo.

Além disso, considerando tais matérias-primas como resíduo, há o descarte e/ou disposição que pode gerar efeitos negativos e, no caso do caroço de açaí, há um destaque maior tendo em vista que há uma limitação científica na falta de dados e estudos, bem como, não há processos produtivos para sua reutilização.

5.4. Cálculos de incerteza por meio da Simulação Monte Carlo

Uma análise comparativa das incertezas foi realizada pelo método de simulação Monte Carlo considerando o desvio padrão e os valores médios de cada uma das categorias associadas ao método CML e as misturas comparativas de solo-cimento. A Figura 35 mostra a representação gráfica aproximada do desvio padrão em relação à média encontrada.

Figura 35. Representação do desvio padrão em relação à média obtida por meio da simulação de Monte Carlo
Fonte: Própria autora

A variabilidade da maioria dos fluxos elementares do banco de dados Ecoinvent é representada por uma distribuição *lognormal* em torno do valor central especificado, caracterizado pelo seu desvio padrão. Esse a variabilidade, no entanto, não é determinada usando medições reais, mas é estimada estatisticamente pela aplicação da matriz de pedigree (mostrada no Apêndice 1) descrevendo a qualidade dos dados por sua origem, seu método de coleta e sua representatividade geográfica, temporal e tecnológica (SOUZA *et al.*, 2016).

A simulação de Monte Carlo é uma abordagem para quantificar os efeitos das incertezas dos parâmetros inseridos sobre os impactos ambientais estimados no qual um intervalo de confiança pode ser obtido para cada impacto. A análise de incerteza revela o intervalo de confiança em cada categoria de impacto, por meio do desvio padrão, pois quanto maior for o desvio padrão dos valores estimados, maior será a variância e, consequentemente, maior o risco (SOLEIMANI *et al.*, 2023).

Os resultados apresentados na Figura 35 demonstram que os valores de desvio padrão praticamente nulos são os das categorias: Aquecimento Global e de Acidificação. Já os valores com desvio padrão variando entre 20 e 50 %, mostrando um valor relativo médio de 40 % foram para as demais categorias, com exceção da Ecotoxicidade. Aplicando o conceito supracitado aos resultados encontrados, pode-se concluir que as maiores incertezas estão concentradas nas categorias de ecotoxicidade, uma vez que apresentaram alto valor de dispersão, indicados pela variância no desvio padrão.

De acordo com Monteiro *et al.*, (2021) a categoria aquecimento global apresentou coeficiente de variação nulo podendo ser justificado pelo banco de dados adotado obter o indicador proveniente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2020) que garante maior confiabilidade dos cálculos e resultados. Assim, as maiores incertezas ocorreram nas categorias em que os dados de inventário foram estimados, indicando a necessidade de melhor qualidade e uso de dados coletados *in loco* (primários). Além disso, o escopo do método influencia a certeza, corroborando a necessidade de dados de inventário mais regionalizados para a realidade brasileira. Isso justifica o alto grau de incerteza para a categoria associada à ecotoxicidade.

Ademais, a matriz Pedigree utilizada (conforme Apêndice 1) considerou um conjunto de “critérios” específicos do problema em uma escala numérica, aplicada aos cinco indicadores: confiabilidade, integridade, correlação temporal, correlação geográfica e correlação tecnológica. Este método de análise de incerteza dependeu do julgamento do autor que insere os dados, carecendo de uma base empírica documentada e,

consequentemente, seus resultados podem não ser altamente precisos, o que ocasiona a variação elevada do desvio padrão.

Silva *et al.* (2018) cita que dados estimados aumentam as incertezas, especialmente, em estudos relativos a materiais de construção. Neste contexto, nos cenários em que foram utilizados dados secundários considerados parcialmente representativos na análise, foi constatada distribuição aleatória mais dispersa e maior nível de incerteza, a exemplo da ecotoxicidade.

Lasvaux *et al.* (2016) e Feng *et al.* (2023) apontam para uma correlação entre a ecotoxicidade (como indicador da ACV) e os materiais de construção no qual às emissões liberadas durante os processos relacionados à produção do material até a destinação dos resíduos, contribuem para a potencialização dos impactos de emissões tóxicas, porém é uma das categorias mais difíceis de descrever com um único fluxo elementar de uma ACV. Isto impacta diretamente nos resultados, pois limita a possibilidade de construir um inventário mais confiável, justificando a variabilidade elevada dos resultados de desvio padrão para esta categoria.

CAPÍTULO 6 – PROPRIEDADES DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO EM ESCALA REAL

Após a análise física, química, mecânica e ambiental (ACV) das misturas de solo cimento deu-se continuidade à pesquisa produzindo o tijolo de solo-cimento em escala real. Quanto aos resultados técnicos considerou que, embora se altere a composição do LC^3 ao substituir uma porcentagem do teor de cimento pela cinza do caroço do açaí, não há perdas quanto a resistência à compressão da mistura, bem como ocorre a minimização dos impactos ambientais.

6.1. Efeitos da incorporação da cinza do caroço de açaí na mistura solo-cimento

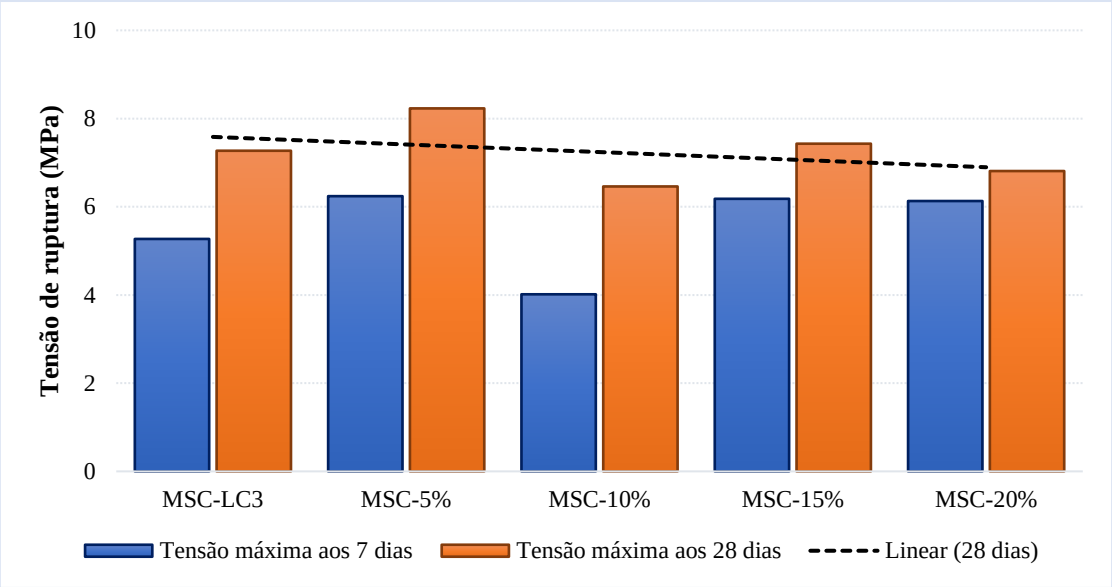
Para observar os efeitos físicos e mecânicos da inserção da cinza do caroço do açaí à mistura do solo com o cimento LC^3, foram analisados o ensaio de absorção de água e a resistência à compressão em corpos de prova contendo solo + cimento LC^3 com as proporções da cinza do caroço de açaí de 5, 10, 15 e 20 % em substituição ao cimento da composição LC^3.

6.1.1. Ensaio de resistência a compressão

A Figura 36 apresenta os valores de resistência à compressão referente as misturas do solo com o cimento LC^3 e a substituição do teor de cimento CP V da composição LC^3 pela cinza do caroço de açaí nas proporções de 5, 10, 15 e 20 %.

Observa-se que os valores de resistência a compressão das misturas aos 7 dias variaram entre 4 MPa e 6,2 MPa. Aos 28 dias os valores de resistência a compressão das misturas variaram entre 6,4 MPa e 8,2 MPa. A norma técnica brasileira limita o menor valor em 2 MPa, demostrando que aos 7 dias todas as proporções ultrapassaram a resistência mínima exigida por norma.

Pela linha de tendência em destaque para a resistência à compressão aos 28 dias é importante salientar que quanto mais proporções de cinza foram incorporadas a alteração da resistência foi pequena o que pode ser justificado pelas proporções adequadas da granulometria do solo que forneceram uma boa estabilização física da mistura, confirmando que a resistência está amplamente relacionada com à distribuição do tamanho das partículas, além da estabilização química ocorrida devido a presença dos componentes nas matérias-primas.



MSC-LC^3 - Solo-cimento com LC^3
MSC-5% - Solo-cimento com LC^3 substituindo o teor do cimento CPV em 5 % de cinza do caroço do açaí
MSC-10% - Solo-cimento com LC^3 substituindo o teor do cimento CPV em 10 % de cinza do caroço do açaí
MSC-15% - Solo-cimento com LC^3 substituindo o teor do cimento CPV em 15 % de cinza do caroço do açaí
MSC-20% - Solo-cimento com LC^3 substituindo o teor do cimento CPV em 20 % de cinza do caroço do açaí

Figura 36. Resistência à compressão do tijolo de solo-cimento
Fonte: Própria autora

Enfatiza-se que o resultado de resistência à compressão mais elevado aos 28 dias foi para a mistura de solo-cimento contendo 5 % de cinza do caroço de açaí. É possível perceber a influência da cinza na mistura que, por suas características granulométricas e morfológicas, favoreceu o processo de autocura e endurecimento, pois à luz dos resultados da caracterização da cinza do caroço do açaí produzida a 600 ºC, a resistência mecânica à compressão não está relacionada à atividade pozolânica e sim ao efeito fíler.

Os resultados contendo 10, 15 e 20 % de cinza do caroço de açaí demonstram que apesar de diminuir o teor de cimento CP V da composição LC^3, que é o principal ligante da mistura entre todas matérias-primas utilizadas e substituí-lo pela cinza, houve um efeito significativo sobre a resistência à compressão da mistura após 28 dias de cura, observando que com a utilização da cinza, houve uma variação menor que 2 MPa considerando, portanto, valores semelhantes em relação à mistura padrão (MSC-LC^3).

Esta similaridade pode está relacionada à distribuição granulométrica presente na mistura, ou seja, partículas mais finas (neste caso o cimento, o metacaulim e a cinza do caroço de açaí) preenchendo os vazios entre as partículas mais grossas do solo.

Nesse contexto, atribui-se os ganhos de resistência decorrente da adição de cinza, ao efeito físico do material fino, que pode ter levado a uma densificação da microestrutura, conforme descrito na caracterização granulométrica e morfológica da

cinza. Estes valores também refletem a influência dos vazios (cavidades) presentes na cinza do caroço de açaí, demonstrado na Figura 24, pois mesmo com a diminuição do cimento, a água absorvida pela cinza e pelo solo favoreceu a cura interna e endurecimento da mistura, resultando em uma matriz mais rígida e com valores elevados e proporcionais à mistura padrão quanto a resistência mecânica.

Segundo Jordan *et al*. (2019) este fato pode ser justificado pelas propriedades físico-mecânicas da cinza caracterizada como fina, que melhora a microestrutura da zona de transição interfacial do ligante com o solo, resultando em um aumento da resistência.

De acordo com Ogwang *et al*. (2021) a disponibilidade de umidade interna da argila e da água absorvida pela cinza facilitam a hidratação da mistura cálcio-sílica-hidratos (C-S-H) o que também eleva o índice de resistência mecânica. Além disso, os tamanhos das partículas da cinza são menores que a do solo e preenchem os espaços os vazios, bem como as partículas do metacaulim que além do tamanho das partículas exibe alta reatividade pozolânica e efeitos de preenchimento, responsáveis também pelas propriedades mecânicas.

Outras hipóteses podem ser argumentadas a partir da compactação eficaz e a compatibilidade física da cinza com o cimento. No processo de produção dos corpos de prova, a diminuição de vazios e a natureza hidrofílica da cinza interferiu positivamente no sistema solo-cimento, elevando ou mantendo os valores de resistência, mesmo com a diminuição do teor de cimento, principal ligante da mistura.

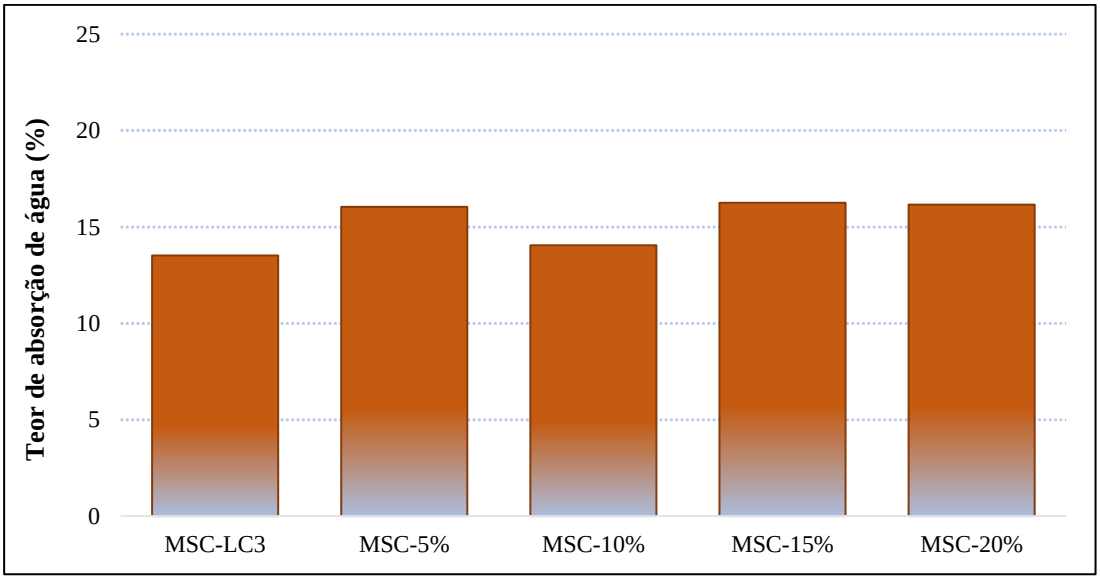
Ressalta-se que a ação do efeito fíler é predominantemente física e granulométrica, sendo assim, havendo compatibilidade física da cinza do caroço de açaí com o cimento LC^3, a mistura é capaz de intensificar a hidratação do cimento Portland agindo como pontos de nucleação. Isso significa que ao incorporar a matéria-prima adicional, a cinza se reorienta nos poros inerentes à mistura a partir da compactação aplicada e tal efeito é chamado de microfíler. No entanto, para obtenção desse tipo de efeito que propicia a densificação da matriz de solo-cimento, o diâmetro médio das partículas da cinza deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas do cimento e do solo.

Nesse contexto, destaca-se que o efeito microfíler e a compactação da mistura contribuíram para que a propriedade mecânica de resistência à compressão fosse similar ou superior da amostra padrão contendo solo + cimento LC^3 em comparação com as amostras contendo a incorporação da cinza do caroço de açaí, mesmo com 20 % de cinza em substituição ao teor de cimento.

Em síntese, além dos argumentos supracitados, reitera-se que alguns compostos químicos presentes na cinza, como o teor de potássio, além de extrativos como a lignina, hemicelulose e outros que podem interferir significativamente na reação de cura do cimento, não foram suficientes para prejudicar os efeitos físicos e granulométricos da mistura, pois, observa-se que aos 28 dias, a formação de silicato de cálcio (C-S-H) que promove o endurecimento da mistura não foi prejudicada, bem como as características físicas e de amorficidade da cinza que contribuíram para que ocorresse pequena variação de resistência à compressão dos corpos de prova, comparando as diferentes misturas.

6.1.2. Ensaio de absorção de água

A Figura 37 demonstra os teores de absorção de água das amostras e a linha de tendência dos pontos médios de cada proporção.



MSC-LC³ - Solo-cimento com LC^3
MSC-5% - Solo-cimento com LC^3 substituindo o teor de cimento CPV em 5 % de cinza do caroço do açaí
MSC-10% - Solo-cimento com LC^3 substituindo o teor de cimento CPV em 10 % de cinza do caroço do açaí
MSC-15% - Solo-cimento com LC^3 substituindo o teor de cimento CPV em 15 % de cinza do caroço do açaí
MSC-20% - Solo-cimento com LC^3 substituindo o teor de cimento CPV em 20 % de cinza do caroço do açaí

Figura 37. Teor de absorção de água do tijolo de solo-cimento
Fonte: Própria autora

Os corpos de prova das misturas foram confeccionados contendo solo + cimento LC^3 (MSC - LC^3) e adicionando outras proporções da cinza em substituição ao teor de cimento CP V da composição do cimento LC^3, sendo utilizada a nomenclatura: (MSC - 5 %) contendo solo + cimento LC^3 + substituição do teor de cimento CP V pela cinza do

caroço do açaí em 5 %, (MSC - 10 %) 10 %, (MSC - 15 %) 15 % e (MSC - 20 %) 20 %, respectivamente.

É possível perceber que houve pequena variação quanto a absorção de água das misturas e todos os resultados apresentaram uma variação média menor que 18 %, demonstrando que qualquer proporção está em conformidade com a norma técnica brasileira que limita o valor da absorção de água em solo-cimento até 20 %.

Nshimiyimana *et al*. (2021) e Rivera *et al*. (2020) apontam que a capacidade de absorção de água não é afetada apenas pelo teor de cimento ou outro ligante, mas também pelas características do solo, pois a porcentagem de absorção de água é uma propriedade que está diretamente ligada às quantidades de argila e do material cimentício adicionado.

Outro fator que influencia na absorção de água é referente ao tamanho da partícula e da área de superfície das matérias-primas, pois quanto melhor a distribuição granulométrica, menor é a absorção devido a uma menor porosidade, maior densidade e consequentemente um maior empacotamento das partículas.

Nesse contexto, as partículas finas da cinza do caroço de açaí contribuíram para a estabilização física e granulométrica da mistura, causando o efeito de preenchimento dos microporos do solo, no qual a média dos valores da capacidade de absorção de água com a cinza variou de 14 a 16 %, pouco superior a mistura padrão que apresentou uma média de 13,5 %.

Destaca-se também que nenhum valor foi abaixo de 12 % e podem ser explicados devido a interação entre o sistema solo-cimento e a presença de componentes químicos, tais como lignina e extrativos, entre outros, presentes na cinza do caroço de açaí, que tendem a retardar ou até mesmo impedir o processo de hidratação do cimento, promovendo um volume de vazios que apresenta maior capacidade de absorver água.

Outro fator importante salientar é a natureza hidrofílica do metacaulim e da argila constante no solo. Segundo Islam *et al*. (2020) e Akinyemi *et al*. (2021) este efeito pode estar relacionado a proporção de argila, que ao ser imersa na água progride nas primeiras horas de hidratação para uma absorção mais rápida devido a ruptura das ligações ativas entre as partículas de argila e o cimento que age causando uma mudança na estrutura da partícula da argila com o aparecimento de poros, porém, no decorrer do tempo, os silicatos e aluminatos, ao serem hidratados permanecem envoltos nas partículas do solo e melhoram a capacidade de ligação da matriz solo-cimento.

Normalmente é esperado que a absorção de água diminua com o passar da idade, pois os produtos formados pela hidratação do cimento vão preenchendo os espaços vazios

existentes, diminuindo, assim, a porosidade do material e, consequentemente, sua capacidade de absorção.

6.1.3. Teste estatístico – Análise de variância (Anova)

Com base nos resultados analisados nos subitens 7.1.1 e 7.1.2, se verificou que a aplicação de 20 % da cinza do caroço de açaí em substituição ao teor de cimento da composição LC^3 teve um efeito significativo, proporcionando uma compatibilidade mecânica e tecnicamente viável entre as matérias-primas, obtendo resultado relevante, inclusive ambientalmente e, dentro dos padrões normativos brasileiros para a mistura de solo-cimento.

Para confirmar estatisticamente este argumento, a Tabela 14 apresenta os resultados estatísticos da ANOVA fator único, referentes as proporções da incorporação da cinza do caroço de açaí utilizados nas misturas.

Tabela 14. Anova referente as variações das misturas com solo-cimento

	Grupo	Soma	Média	Variância
RESUMO	**MSC - LC^3**	12,54	6,270	2,000
	MSC - 5 %	14,47	7,235	1,980
	MSC - 10 %	10,47	5,237	2,989
	MSC - 15 %	13,61	6,805	0,781
	MSC -20 %	12,94	6,470	0,231

	Fonte da variação	SQ	F	valor-P	F crítico
ANOVA	Entre grupos	4,4687	**0,699866**	**0,624317**	**5,192168**
	Dentro dos grupos	7,9815			
	Total	12,4503			

Fonte: Própria autora

Os resultados apresentados na Tabela 14 permitem concluir que não há diferença significativa entre os grupos dos corpos de prova com as diferentes proporções de cinza do caroço de açaí incorporadas às misturas. Observa-se que F é menor que F crítico, aceitando a hipótese nula (que não há diferença entre os grupos) em prol da hipótese alternativa (há diferença entre os grupos) ao risco de 5 %. A análise do valor-P (é maior que 5%) permite aceitar a hipótese nula de igualdade de médias para qualquer nível de significância.

Com base nos testes de comparações pode-se concluir que para qualquer nível de significância das variáveis distribuídas em linhas (diferentes proporções da cinza do caroço de açaí na mistura), uma vez que o valor-P é superior a 5 %, as médias dos grupos

são semelhantes, indicando que não existem diferenças significativas quanto aos valores de resistência à compressão para diferentes as composições proporções de cinzas incorporadas com o uso do cimento LC^3.

Com base nos resultados apresentados, verifica-se que as médias das variações estão bem próximas e os resultados de resistência à compressão obtidos para os 28 dias de rompimento se enquadraram em uma mesma tendência (7 MPa), indicando que o ganho de resistência com o tempo de cura está associado, principalmente, a estabilização física e granulométrica devido a relação da cinza e a porosidade da mistura com a diminuição do índice de vazios, e não somente à reação pozolânica e estabilização química do cimento.

É importante reiterar que o processo de fabricação do cimento o torna a matéria-prima mais poluente entre as matérias utilizadas e quanto menor o teor de cimento em um tijolo de solo-cimento, maior são os destaques de sustentabilidade que podem ser analisados. Nesse contexto, para a produção do tijolo de solo-cimento, se utilizou da incorporação de 20 % da cinza do caroço de açaí, tendo em vista que os valores de resistência mecânica dos corpos de prova com esse teor e o corpo de prova padrão foram estatisticamente similares.

6.2. Propriedades do tijolo de solo-cimento

A partir da análise dos resultados de absorção de água, resistência à compressão e análises estatísticas das misturas de solo-cimento utilizando o cimento LC^3 e as proporções de 5, 10, 15 e 20 % de cinza do caroço de açaí em substituição ao teor de cimento CPV da formulação do LC^3, optou-se em confeccionar os tijolos de solo cimento utilizando solo + cimento LC^3 + matéria-prima adicional contendo 20 % da cinza do caroço de açaí em substituição ao teor de cimento do LC^3.

Os tijolos foram conformados semelhante aos tijolos produzidos em prensa manual, desenformados e secos em temperatura ambiente. Após os sete dias de cura os tijolos foram rompidos e apresentaram uma resistência à compressão média de 6,7 MPa (com desvio padrão de 1,13) considerada dentro dos padrões normativos brasileiros para tijolos não estruturais.

Normalmente o que se espera nesse tipo de estudo é a diminuição das propriedades mecânicas do tijolo devido ao aumento do teor de cinzas e a diminuição do principal aglutinante, no entanto, os resultados mostram que até 20 % de cinzas na mistura ocorreu uma tendência de variação decrescente bastante pequena para a resistência à compressão,

que demonstra ser insignificante com base na análise estatística, principalmente ao se comparar com a quantidade de cimento retirado em cada mistura.

Com isso, destaca-se que os resultados apresentados com a incorporação da cinza do caroço de açaí foram bastante significativos, devendo ser observado que o tipo de cinza aplicada é do tipo amorfa, fato que poderá não refletir os mesmos resultados se ensaiados com outros tipos de solos, pois o solo com o coeficiente de curvatura da granulometria indicando um solo bem graduado, não uniforme e ainda contendo os teores de sílica e alumínio, ao serem misturados com a cinza do caroço de açaí e o cimento LC^3, reagiram quimicamente influenciando no índice de vazios e na absorção de água, bem como mecanicamente para o aumento da resistência à compressão da mistura.

Com base nas características granulométricas do solo, principalmente as proporções de areia e argila tendem a apresentar um ponto positivo das propriedades mecânicas da mistura em detrimento da redução da quantidade de finos. A areia é um material inerte com função de enchimento permitindo que os teores de cimento sejam destinados à aglomeração com as partículas menores e com a porcentagem de finos, a resistência final do solo-cimento deve-se também ao grau de compactação e à coesão da fração fina compactada.

O processo de prensagem se deu, por meio de uma prensa manual, cuja aplicação da carga ocorre de maneira centrada, uma vez que foram prensados dois tijolos por etapa e foi utilizado uma placa de ferro para dividir a carga entre os elementos. Uma das hipóteses para a resistência ter se mantido dentro dos padrões normativos é a distribuição uniforme da carga de prensagem. Nesse contexto, a estabilização física está relacionada com a textura do solo, tendo partículas em diferentes faixas de diâmetro e uma otimização das frações de areia, silte e argila, gerou um melhor empacotamento das partículas.

Rivera *et al*. (2020) e Hany *et al*. (2021) citam que as características de plasticidade do solo também apresentam grande efeito sobre as propriedades mecânicas, recomendando que o teor de argila ideal à mistura de solo cimento é próximo de 10 %, pois diminui a força necessária para a compactação e, consequentemente, contribui para o aumento da resistência à compressão. Nesse sentido, para o caso específico do solo utilizado nesta pesquisa, é possível destacá-lo como adequado para a produção do tijolo.

Já a estabilização química ocorre, quando são misturados ao solo outros tipos de materiais capazes de promover reações físico-químicas entre o grão e o material ou, ainda, pode criar uma matriz que aglutina e cobre os grãos. Com a adição do cimento, do fíler e da cinza do caroço de açaí ao solo, elevou-se o teor de cálcio bem como a sílica presente

no solo, cujos compostos tendem a favorecer a reação da sílica e alumina com o hidróxido de cálcio e a água, contribuindo para o aumento da resistência mecânica do tijolo.

Estes resultados podem ser explicados pela interação entre o sistema solo, metacaulinita, fíler e a cinza do caroço de açaí e pela presença de componentes químicos, principalmente a sílica e o teor de cálcio, pois, apesar de componentes como a lignina e materiais voláteis ainda estarem presentes na cinza do caroço de açaí e que tendem a retardar ou até mesmo impedir o processo de hidratação do cimento, as características morfológicas e granulométricas da cinza promoveu a diminuição no volume de vazios, deixando o material menos poroso e com a capacidade de absorver água na proporção ideal para favorecer a hidratação e endurecimento da mistura.

Sendo assim, a partir da incorporação da cinza ao tijolo, o solo-cimento passou a experimentar uma maior tendência de redução do seu índice de vazios, onde as partículas minúsculas e inertes das cinzas ajudam a preencher os espaços da mistura. Esse comportamento, atrelado a uma diminuição da superfície específica a ser hidratada, contribui para um menor consumo de água durante o processo de compactação, o que implica na redução do teor de umidade ótimo e aumento da massa específica seca máxima.

Os resultados também indicam um comportamento relacionado ao teor de absorção de água que podem interferir no comportamento mecânico da mistura. No presente estudo, como os tijolos não foram submetidos a processos mecânicos de secagem e sim, feita a secagem natural, atribui-se o comportamento de resistência ao fato de que o teor de absorção média variou de 13 a 15 % em sete dias de cura, no qual o teor de umidade na mistura favoreceu o contato via água e partículas das matérias-primas, beneficiando o efeito mecânico de resistência do tijolo.

Quanto a cinza do caroço de açaí como partícula, vale salientar o tamanho e a superfície rugosa em comparação com as matérias-primas de partida do cimento LC^3. Estes dois fatores contribuíram para uma combinação dos materiais da mistura que proporcionaram uma resistência devido contato entre as partículas maiores, a rugosidade da partícula mediana da cinza e os vazios preenchidos pelas partículas mais finas, propiciando uma permeabilidade e uma densidade adequadas à resistência mecânica.

Fernandes *et al.* (2016) destacam que a área de superfície de uma partícula, mesmo que sejam menores em relação a outras partículas, mas altamente porosas, apresentam resultados maiores quando aplicados em matriz cimentícia. Fator que também é destacado por Elahi *et al.* (2021), no qual a melhora dos resultados mecânicos no solo em termos de

densidade, porosidade e resistência à compressão pode ser atribuída ao fato de que, o arranjo de grãos bem graduados ao serem compactados tornam a mistura densa e reduzem os vazios interpartículas.

Os tijolos não foram submetidos ao umedecimento durante a cura e os resultados foram obtidos em condições de laboratório, utilizando a metodologia de cura dos corpos de prova em temperatura ambiente, que tende a simular com mais nível de confiança o valor de resistência à compressão em um canteiro de obras devido à perda de água do material por evaporação.

A incorporação de 20 % da cinza do caroço de açaí e do cimento LC^3 para a produção do tijolo de solo-cimento se apresentou como uma forma sustentável de melhorar o desempenho de tijolos não queimados, os efeitos das matérias-primas aplicadas sobre as propriedades físicas e mecânicas da mistura foram positivos e considerados importantes para alcançar padrões ideais normativos de resistência à compressão do tijolo.

Outro importante destaque referente as proporções de cinza do caroço de açaí aplicadas foram com base nos autores Gar *et al*. (2017); Zarei *et al*. (2018); Cordeiro *et al*. (2019a) que em pesquisas realizadas com cinzas de resíduos agroindustriais afirmam que teores de cinza superior a 20 % afetam a permeabilidade, compactação, trabalhabilidade e consistência da mistura solo-cimento. Por isso, não se utilizou outras proporções superiores a 20 % de cinza.

Cabe enfatizar nesta tese a questão ambiental, pelos resultados apresentados na ACV e reconhecendo que a cinza do caroço de açaí é um resíduo agroindustrial no qual, após o seu uso, é comumente descartado, sendo apontado nesta pesquisa uma maneira de reaproveitá-lo visando benefícios ao resíduo e aplicando-o no tijolo de solo-cimento que pode ser inserido na construção civil como um tijolo mais sustentável.

6.3. Aspectos de sustentabilidade do tijolo: solo-cimento com cinza do caroço de açaí

A ideia de sustentabilidade está relacionada ao desenvolvimento produtivo e de consumo, juntamente com a percepção ambiental na sociedade. A sustentabilidade é um conceito sistêmico e complexo, porque os pilares ambiental, social e econômico devem estar completamente interligados (SILVA *et al*, 2021b).

Desta forma, o emprego e o desenvolvimento da tecnologia de tijolo de solo-cimento estão em conformidade com um dos maiores desafios impostos a pesquisadores,

aos profissionais e à sociedade: a diminuição de impactos ambientais e os interesses sociais e econômicos advindos das atividades do setor de construção.

Entre os ganhos ambientais do tijolo de solo-cimento, comparando-o com o tijolo cerâmico convencional, pode-se considerar o processo tecnológico e a matriz energética, como a redução nos níveis de emissão do CO_2 utilizados na produção do tijolo convencional e, ainda, a redução do desmatamento de espécies para a extração de lenha (SOUZA *et al.,* 2022). Reitera-se que o solo não é um material contaminante e é o componente com maior volume na produção do tijolo. Como os materiais a base de argila são inertes e não tóxicos, sua aplicação geralmente não causa poluição ambiental direta durante o ciclo de vida do tijolo de solo-cimento (BHAIRAPPANAVAR *et al.,* 2021).

O cimento, por outro lado, contribuí com quantidades bem menores (no caso desta pesquisa aplicou-se 10 % da massa do solo), suficiente para estabilizá-lo e conferir-lhe as propriedades de resistência desejadas. Destacando, portanto, os aspectos ambientais do cimento LC^3 que com a incorporação da cinza do caroço de açaí, conferiu ao tijolo, propriedades com menor impacto.

Outro aspecto relevante está na eficiência da construção civil executada com tijolos de solo-cimento que apresenta uma redução de custo, menor impacto ambiental, menor gasto de energia, bom desempenho termoacústico e níveis de desperdício extremamente baixos. Estes tijolos podem, ainda, potencialmente, ajudar tendências atuais para o desenvolvimento de produtos verdes e flexíveis. Em caso de produção artesanal (ou manual) é necessário um local para efetuar a mistura e aplicar o material misturado na prensa, pois, não necessita mão de obra especializada, sendo possível manusear o equipamento com melhorias ergonômicas e sua execução pode ser aplicada de modo fácil e prático a qualquer trabalhador (LEÃO *et al.,* 2022).

Vale salientar também para o aspecto social, pois devido a simplicidade do processo produtivo do tijolo, aliado a tentativa de solucionar o descarte correto do caroço de açaí que, a maioria do quantitativo gerado é de produtores em escala artesanal, a confecção de tijolo de solo-cimento utilizando a cinda do caroço de açaí há de contribuir para a bioeconomia, principalmente em localidades de pequeno porte.

CONCLUSÕES

Esta tese analisou os efeitos da incorporação dos resíduos industriais: sílica ativa e cinza volante e dos resíduos agroindustriais: cinza do bagaço de cana (*Saccharum officinarum L*) e cinza do caroço do açaí (*Euterpe precatória Martius*) nas propriedades físicas, mecânicas e ambientais da mistura solo-cimento, utilizando o cimento de alta resistência inicial (CP-V) e o cimento LC^3 (*Limestone Calcined Clay Cement*).

Os resultados de caracterização química da sílica ativa, cinza volante e cinza do bagaço de cana foram similares aos encontrados na literatura, com a soma dos valores de SiO_2, + Al_2O_3 + Fe_2O_3, superior a 75 %, demonstrando a potencialidade de tais resíduos para aplicação em matriz cimentícia e melhoria das propriedades mecânicas.

Além das matérias-primas supracitadas, destaca-se nesta pesquisa o do caroço de açaí, por ser um resíduo ainda pouco estudado. Em sua característica física e morfológica, os resultados obtidos em quatro amostras do caroço de açaí foram similares a outros resíduos agroindustriais oriundos da família *Palmae*, apresentando teor de cinza com variação próxima a 8 % e propriedades celulósicas. Considerando a caracterização química das amostras do caroço de açaí, a média da composição foi de 23 % para o SiO_2, 2,6 % para o Al_2O_3 e 1,5 % para o Fe_2O_3 sendo valores comumente encontrados em outros resíduos agroindustriais como a cinza da casca do coco.

Após análise dos de caracterização inicial, a amostra do caroço de açaí *Euterpe precatoria*, obtida da fábrica de processamento na cidade de Manaus, foi beneficiada em 600 °C para produção da cinza. A cinza do caroço de açaí não apresentou características pozolânicas, porém, os aspectos granulométrico, mineralógico e morfológico da cinza apresentaram grau de amorficidade e características que foram consideradas de relevância para avaliar a estabilização física do solo na matriz solo-cimento contendo esta cinza.

O solo utilizado apresentou características ideais, dentro dos padrões técnicos e normativos quanto os limites de Atterberg (com LL ≤ 45 % e LP ≤ 18 %), granulometria (com 12 % de partículas finas cuja variação deve ser de 10 a 30 %) e composição química para produção de tijolo de solo-cimento.

As matérias-primas incorporadas à mistura solo-cimento apresentaram valores de resistência à compressão superior ao mínimo estabelecido por norma técnica, destacando a mistura de solo cimento com a cinza do caroço de açaí, cujos valores foram de 10,98 MPa para a mistura com o cimento CP V e 10,85 MPa para a mistura com o cimento LC^3 similares aos resultados das misturas consideradas “padrão”, contendo solo + cimento

(CPV e LC^3), cuja média nos valores de resistência à compressão aos 28 dias foi de 10,4 MPa e 11,05 MPa, respectivamente.

Tais resultados corroboraram para considerar o efeito positivo e o aumento da resistência mecânica da mistura após hidratação na mistura de solo + cimento LC^3 + 10 % da cinza do caroço de açaí em substituição ao clínquer do cimento LC^3. Destaca-se com isso que a incorporação do metacaulim, considerado um material pozolânico reativo e do fíler, que refina a estrutura dos poros, juntamente com a cinza do caroço de açaí, proporcionaram melhorias mecânicas no desenvolvimento da microestrutura do solo + clínquer, atuando na capacidade de absorção de água dos poros capilares na matriz, promovendo ligações químicas e resultando em uma matriz mais densa e, consequentemente, mais resistente à compressão.

O preenchimento dos vazios na hidratação da mistura, que juntamente com o efeito fíler das partículas das matérias-primas, contribuíram para a ampliação da faixa granulométrica do solo, a redução da porosidade do material, melhorando a homogeneização, compactação, absorção de água e, consequentemente, proporcionando benefícios físicos e mecânicos da matriz solo-cimento, no qual a aplicação da força de compactação ocasionou o rearranjo dos materiais distribuindo os mais finos nos vazios do solo e, favoreceu o aumento da resistência mecânica.

Analisando os cenários ambientais, observou-se que as principais emissões e consequências ao meio ambiente foram das misturas contendo mais clínquer e os cenários mais vantajosos ambientalmente foram das misturas contendo biomassa agroindustrial. Em termos absolutos em incorporação ao solo, o uso as quatro matérias-primas – sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana e cinza do caroço de açaí – demonstrou um favorecimento ambiental como manejo adequado desses resíduos e uma contribuição técnica na confirmação de todas as aplicações efetuadas.

Para fabricação do tijolo em escala real, optou-se pela cinza do caroço de açaí, que apresentou melhores resultados físicos, químicos, mecânicos e ambientais, em concordância com as exigências normativas. Os resultados obtidos com o tijolo de solo-cimento e a cinza do caroço de açaí evidenciaram valores de acordo com as especificações técnicas, apontando que existe viabilidade técnica no aproveitamento deste resíduo agroindustrial para uso na fabricação de tijolos solo-cimento sem função estrutural. Essa aplicação tecnológica pode possibilitar a redução dos impactos negativos sobre o meio ambiente e, ainda, o custo de construção, especialmente em localidades de pequeno porte.

Ainda em consonância com a relevância desta tese, serão apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Analisar o efeito da sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana e cinza do caroço de açaí em diferentes proporções, como 20, 30, 40 e até 50 % em substituição do clínquer do cimento LC^3 em matrizes de solo-cimento.
- Verificar outros benefícios que podem ser identificados como potenciais na aplicação da cinza do caroço de açaí no tijolo de solo-cimento, a exemplo da resistência à flexão, módulo de resiliência, isolamento térmico e acústico.
- Analisar as fases de cristalinidade e a microestrutura final do tijolo solo-cimento com adição de cinza do caroço de açaí, por meio de DRX e MEV.
- Estudar as patologias e a influência de reação entre os álcalis do cimento e a cinza do caroço de açaí com aplicação em solo.
- Aprofundar os estudos referente a avaliação do ciclo de vida comparando com outras categorias de impacto como o ReCiPe e Impact Word.
- Utilizar a cinza do caroço de açaí da espécie *Euterpe oleracea*, bem como o metacaulim da região amazônica para avaliar as propriedades destas matérias-primas aplicadas ao solo da região amazônica.

REFERÊNCIAS

ACerS – The American Ceramic Society. Structure and Properties of Ceramics – **Electronic structure and atomic bonding determine microstructure and properties of ceramic and glass materials.** Disponível em: https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/structure-and-properties-of-ceramics. Acesso em 01.2021.

AFRIN, Habiba. **A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques.** International Journal of Transportation Engineering and Technology. Vol. 3, No. 2, pp. 19-24, 2017. doi:10.11648/j.ijtet.20170302.12

AGUIAR, Madalena Otaviano, MENDONÇA, Maria Sílvia de. **Morfo-Anatomia da Semente de *Euterpe precatoria Mart. (Palmae*).** Revista Brasileira de Sementes. Vol. 25, Nº 1, p.37-42, 2003.

AKINYEMI, Banjo Ayobami; OROGBADE, Blessing O.; OKORO, Chukwunonyenim Wilson. **The potential of calcium carbide waste and termite mound soil as materials in the production of unfired clay bricks.** Journal of Cleaner Production, Nº 279, paper 123693, 2021.

ALBUQUERQUE, H. R.; LIRA, J.; SPOSTO, R. M. **CO_2 emissions in mortar coating systems: comparative case study between projected and conventional method.** Ambiente Construído. v. 18, n. 4, p. 377-393. 2018. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000400311

ALBUQUERQUE, Alan R.L.; ANGÉLICA, Rômulo S.; MERINO, Agustín; PAZ, Simone P.A. **Chemical and mineralogical characterization and potential use of ash from Amazonian biomasses as an agricultural fertilizer and for soil amendment.** Journal of Cleaner Production, 295, paper 126472, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126472

AL-KHALILI, Ahmed M.; ALI; Ahmed S.; AL-TAIE, Abbas J. **Effect of metakaolin and silica fume on the engineering properties of expansive soil.** Journal of Physics: Conference Series. Article 012017. 2021. doi:10.1088/1742-6596/1895/1/012017.

ALMEIDA, Arthur da Silva Vasconcelos de; VIEIRA, Wedja Timóteo; BISPO, Mozart Daltro; MELO, Samara Farias de; SILVA, Thiago Lopes da; BALLIANO, Tatiane Luciano; VIEIRA, Melissa Gurgel Adeodato; SOLETTI, João Inácio. **Caffeine removal using activated biochar from açaí seed (*Euterpe oleracea Mart*): Experimental study and description of adsorbate properties using Density Functional Theory (DFT).** Journal of Environmental Chemical Engineering, Nº 9, paper 104891, 2021.

ALMEIDA, Fernando C.R.; SALES, Almir; MORETTI, Juliana P.; MENDES, Paulo C.D. **Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar.** Construction and Building Materials 82. 31–38. 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.039

AL-NOAIMAT, Yazeed A.; CHOUGAN, Mehdi; . AL-KHEETAN, Mazen J.; AL-MANDHARI, Othman; AL-SAIDI, Waleed; AL-MAQBALI, Marwan; AL-HOSNI, Haitham; GHAFFAR, Seyed Hamidreza. **3D printing of limestone-calcined clay cement: A review of its potential implementation in the construction industry.** Results in Engineering, 18, 101115, 2023. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101115

ALTUWAIM, Ayman; AL TASAN, Abdulelah; ALMOHSEN, Abdulmohsen. **Success Criteria for Applying Construction Technologies in Residential Projects.** Sustainability. N 15, Paper 6854, 2023. https://doi.org/10.3390/su15086854

ANDRADE, Walter Pacelli de (Editor). **Concretos: Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo: Ensaios e Propriedades.** FURNAS (Laboratório de Concreto). São Paulo: Pini, 1997.

ANDREÃO, P.V., SULEIMAN, A.R., CORDEIRO, G.C. **Beneficiation of Sugarcane Bagasse Ash: Pozzolanic Activity and Leaching Behavior.** Waste and Biomass Valorization, V. 11, N. 8, pp. 4393–4402, 2020.

ANDRÉS, Vizcaíno; ANTONI, Mathieu Georges; DIAZ, Adrian Alujas; HERNÁNDEZ, José Fernando Martirena; SCRIVENER, Karen Louise. **Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements.** Advances in Cement Research. Institution of Civil Engineers Publishing. Volume 27, Issue 9, pp 546–556, Paper 1400095, 2015.

ARAÚJO, Cleyton Silva de; LUNZ, Aureny Maria P.; SANTOS, Vanderley Borges dos; ANDRADE NETO, Romeu de Carvalho; NOGUEIRA, Sônia Regina; SANTOS, Rayane Silva dos. **Use of agro-industry residues as substrate for the production of Euterpe precatoria seedlings.** Pesq. Agropec. Trop., Goiânia, V. 50, article: e58709, 2020.

ARAÚJO, Juliene Cruz da Silva; GARCIA, Adson de Sousa; BONFIM, Francirene Pereira; SOUZA, Grazielle Tigre de. **Influência da cinza do caroço de açaí nas propriedades de argamassas de chapisco.** Revista de Engenharia e Tecnologia. V.13, No. 3. 2021.

ARAUJO, Rayanne O.; CHAAR, Jamal da S,; QUEIROZ, Leandro S.; ROCHA FILHO, Geraldo N. da; COSTA, Carlos Emmerson F. da; SILVA, Graziela C.T. da; LANDERS, Richard; COSTA, Maria J.F.; GONÇALVES, Alexandre A.S.; SOUZA, Luiz K.C. de. **Low temperature sulfonation of acai stone biomass derived carbons as acid catalysts for esterification reactions.** Energy Conversion and Management. 196. 821–830. 2019. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.059

ARAUJO, Rayanne O.; SANTOS, Vanuza O.; RIBEIRO, Flaviana C.P.; CHAAR, Jamal da S.; PEREIRA, Anderson M.; FALCÃO, Newton P.S.; SOUZA, Luiz K.C. de. **Magnetic acid catalyst produced from acai seeds and red mud for biofuel production.** Energy Conversion and Management, Nº 228, paper 113636, 2021.

ARAÚJO, S. S.; MATOS, V. P. **Morfologia de sementes e plântulas de *Cassia fistula* L.** Revista Árvore, Viçosa. Vol.15, N.13, pp.217-223, 1991.

ASHA, P.; JOHNSON, K.; SACHIN, C. M.; VETRIVEL, V.; PRASANNA, E. **Performance of Compressed Stabilised Earth Blocks with Rice Husk Ash.** Current Journal of Applied Science and Technology, N. 39(25), article 60188, pp 143-153, 2020.

ATTA-OBENG, Emmanuel; DAWSON-ANDOH, Benjamin; SEEHRA, Mohindar S.; GEDDAM, Usha; POSTON, James; LEISEN, Johannes. **Physico-chemical characterization of carbons produced from technical lignin by sub-critical hydrothermal carbonization.** Biomass and Bioenergy. V. 107, pp. 172–181. 2017.

AVET, François e SCRIVENER, Karen. **Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC^3).** Cement and Concrete Research, Vol. 107, pp. 124–135, 2018.

BAGHBAN, Mohammad Hajmohammadian and MAHJOUB, Reza. **Natural Kenaf Fiber and LC^3 Binder for Sustainable Fiber-Reinforced Cementitious Composite: A Review.** Applied Science. Vol. 10, N. 357; 2020. http://doi:10.3390/app10010357

BAIOCHI, A. G.; SILVA, V. G. da. **Análise de incerteza de parâmetros com base em processos críticos em avaliação do ciclo de vida de edificações.** PARC – Pesquisa em Arquitetura e Construção. v. 12, p. e021027. 2021. http://dx.doi.org/10.20396/parc.v12i00.8661478

BALESTRA, Carlos Eduardo Tino; GARCEZ, Lilyanne Rocha; SILVA, Leandro C. da; VEIT, Márcia T.; JUBANSKI, Eliziane; NAKANO, Alberto Y.; PIETROBELLI, Marina H.; SCHNEIDER, Ricardo; RAMIREZ, Miguel Angel. **Contribution to low-carbon cement studies: Effects of silica fume, fly ash, sugarcane bagasse ash and açai stone ash incorporation in quaternary blended limestone-calcined clay cement concretes.** Environmental Development v 45, paper 100792. 2023. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100792

BARBOSA, Andrezza de Melo; REBELO, Viviane Siqueira Magalhães; MARTORANO, Lucieta Guerreiro; GIACON, Virginia Mansanares. **Characterization of acai waste particles for civil construction use.** Revista Materia, V. 24, N. 3, 2019.

BARBOSA NETO, A. M.; LIMA, J. O.; MARQUES, L. G.; PRADO, M.M. do. **Secagem Infravermelho de Caroços de Açaí para a Obtenção de Biomassa**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Anais... 2014.

BARBOSA, Priscila Pasti; SILVA, Taís Larissa da; GALASSI, Cristiane; LUZ, Sheila; ANGELIS NETO, Generoso de. **Análise dos impactos ambientais da produção de blocos cerâmicos.** Anais do III Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, 2012.

BARROS, Maiccon Martins; OLIVEIRA, Marcelo Ferreira Leão de; RIBEIRO, Roberto Carlos da Conceição; BASTOS, Daniele Cruz; OLIVEIRA, Márcia Gomes de. **Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin.** Construction and Building Materials. Vol. 232, paper: 117252, 2020.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção – Vol. 1**. 6ª Ed. LTC, 2019.

BENDOUMA, Sabrina; SERRADJ, Tayeb; VAPUR, Hüseyin. **A case study of the life cycle impact of limestone quarrying on the Environment.** International Journal Global Warming, Vol. 22, No. 4, pp.432–447. 2020.

BERNI, J. V; DE CESARO, J. P. V; SCHEUFELLE, F. B; VIEIRA, M. F; **Produção e caracterização de carvão ativado proveniente do caroço de açaí.** XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Anais... 2018.

BERRIEL, S.S.; DÍAZ, Y.C.; HERNÁNDEZ, J.F.M.; HABERT, G. **Assessment of Sustainability of Low Carbon Cement in Cuba. Cement Pilot Production and Prospective Case.** In: Scrivener K., Favier A. (eds) Calcined Clays for Sustainable Concrete. RILEM Bookseries, vol 10. Springer. 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_23

BHAIRAPPANAVAR, Shruti; LIU, Rui; SHAKOOR, Abdul. **Eco-friendly dredged material-cement bricks.** Construction and Building Materials, 271, paper 121524. 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121524

BHEEL, Naraindas; MAHRO, Santos Kumar; ADESINA, Adeyemi. **Influence of coconut shell ash on workability, mechanical properties, and embodied carbon of concrete.** Environmental Science and Pollution Research Nº 28, pp 5682–5692, 2021.

BIPM. **Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) - Supplement 1: Numerical methods for the propagation of distributions - Temporary ISO Guide 9998**. BIPM/JCGM-WG1-SC1-N10. 2004.

BLICHARZ, Ewelina G. & FRANUS, Wojciech. **A critical review on mechanochemical processing of fly ash and fly ash-derived materials.** Science of the Total Environment, 860, 160529, 2023. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160529

BOEIRA, Lúcia S.; FREITAS, Paulo H. Bastos; UCHÔA, Nicole R.; BEZERRA, Jaqueline A.; CÁD, Sandra V.; DUVOISIN JUNIOR, Sergio; ALBUQUERQUE, Patrícia M.; MAR, Josiana M.; RAMOS, Andrezza S.; MACHADO, Marcos B.; MACIEL, Luís R. **Chemical and sensorial characterization of a novel alcoholic beverage produced with native açai (Euterpe precatoria) from different regions of the Amazonas state.** LWT - Food Science and Technology, Vol. 117, paper 108632, 2020.

BOND, F.C. **Crushing and Grinding Calculations.** Parts I and II. Allis Chalmers Bulletin n° 07R9235B. Reprinted from British Chemical Engineering, 1961

BRASIL, Deilton Ribeiro. **Remarks on the environmental licensing of the photovoltaic solar energy production process.** Brazilian Journal of Development. v. 6, n. 2, p.6735-6763. 2020. http:// doi.org/10.34117/bjdv6n2-103

BRIBIÁN, I.Z.; CAPILLA, A.V.; USÓN, A.A. **Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential.** Building and Environment. v.46, p. 1133-1140, 2011.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, 2017.

CALDAS, Lucas Rosse e SPOSTO, Rosa Maria. **CO_2 emissions related to building materials transportation in Brazil: comparative study on structural ceramic and concrete bricks.** Ambiente Construído. v. 17, n. 4, p. 91- 108. 2017. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400187

CARVALHO, J.M.F. et al. **Enhancing the eco-efficiency of concrete using engineered recycled mineral admixtures and recycled aggregates**. Journal of Cleaner Production. v.257, 120530, 2020.

CHENARBONI, Hamed Ahmadi; LAJEVARDI, Seyed Hamid; ABASI, Hossein Mola; ZEIGHAMI, Ehsanollah. **The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils.** Construction and Building Materials. Vol. 272, article 121630, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121630.

CHRISTOPHER, Fapohunda; BOLATITO, Akinbile; AHMED, Shittu. **Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review.** International Journal of Sustainable Built Environment, V. 6, pp. 675–692, 2017.

CHRISTOFOROU, Elias; KYLILI, Angeliki; Paris A. FOKAIDES, Ioannis IOANNOU. **Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks.** Journal of Cleaner Production 112, article 443e452. 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.016.

CHOMPOORAT, Thanakorn; THANAWONG, Krisdha & LIKITLERSUANG, **Suched. Swell-shrink behaviour of cement with fly ash-stabilised lakebed sediment.** Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Paper 80:2617–2628. 2021. https://doi.org/10.1007/s10064-020-02069-2.

CML-IA. **Characterization Factors**. Institute of Environmental Sciences (CML). Leiden University, Netherlands. Aeesso em: https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors

CNI-ABCP – Confederação Nacional da Indústria. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Indústria brasileira de cimento: base para a construção do desenvolvimento.** Encontro da Indústria para a Sustentabilidade. Brasília, 2012.

CORDEIRO, Guilherme Chagas. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos.** Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Civil. UFRJ. pp. 445, 2006.

CORDEIRO, G. C.; ANDREÃO, P. V.; TAVARES, L. M. **Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning.** Heliyon, V. 5, N. 10, pp. 0–5, 2019a.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E.M.R. **Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana.** Quim. Nova, Vol. 32, No. 1, 82-86, 2009.

CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro; PAES, Isaura Nazaré Lobato; SOUZA, Paulo Sérgio Lima; AZEVEDO, Caroline Menezes. **Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto.** Ambiente Construído, Porto Alegre, V. 19, N. 1, p. 45-55, 2019b.

COSTA, M.P.; SCHOENEBOOM, J.C., OLIVEIRA, S.A.O.; VIÑAS, R.S.; MEDEIROS, G.A. **A socio-eco-efficiency analysis of integrated and non-integrated crop-livestock-forestry systems in the Brazilian Cerrado based on LCA**. Journal of Cleaner Production. v. 171, p. 1460-1471, 2018.

COSTA OLIVEIRA, Thainá Maria da; NASCIMENTO, Karoline F. S. do; RIBEIRO JUNIOR, Jayron A.; SILVA, Luiz Felipe A. da; JACINTO, Moisés de A. S.; SANTOS, Rafael G. dos. **Aproveitamento das cinzas de caroço de açaí na produção de concreto sustentável analisando sua durabilidade.** Brazilian Journal of Development. v. 6, n. 5, p. 30749-30756. 2020. http://dx.doi.org10.34117/ bjdv6n5-510

CRUZ JR., Orlando F.; SILVESTRE-ALBERO, Joaquín; CASCO, Mirian E.; HOTZA, Dachamir; RAMBO, Carlos R. **Activated nanocarbons produced by microwave-assisted hydrothermal carbonization of Amazonian fruit waste for methane storage**. Materials Chemistry and Physics, V. 216, pp. 42–46, 2018.

DIAS, Raquel Pedroso; SELLA, Dalila C.N.; SANTOS, Ana Carolina P. dos; POSSAN, Edna. **Cimento LC³: emissões, inovações e capacidade de produção no Brasil.** Revista Técnico-científica – CREA/PR. 28ª edição. Junho de 2022.

DANSO, Humphrey e MANU, Dorothy. **Influence of coconut fibres and lime on the properties of soil-cement mortar.** Case Studies in Construction Materials. Vol.12, paper e00316, 2020. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00316

DENG, Shuanghui; WANG, Xuebin; TAN, Houzhang; MIKULČIĆ, Hrvoje; YANG, Fuxin; LI. Zhifeng; DUIĆ, Neven. **Thermogravimetric study on the Co-combustion characteristics of oily sludge with plant biomass.** Thermochimica Acta, V. 633, p. 69–76, 2016.

DHANDAPANI, Yuvaraj; SAKTHIVEL, T.; SANTHANAM, Manu; GETTU, Ravindra; PILLAI, Radhakrishna G. **Mechanical properties, and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC^3).** Cement and Concrete Research, Vol. 107, pp 136–151, 2018.

DONG, Yahong; NG, S. Thomas; LIU, Peng. **A comprehensive analysis towards benchmarking of life cycle assessment of buildings based on systematic review.** Building and Environment 204. Article 108162. 2021. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108162

DUCHESNE, J. **Alternative supplementary cementitious materials for sustainable concrete structures: a review on characterization and properties.** Waste and Biomass Valorization. Vol. 12, pp 1219–1236, 2021. https://doi.org/10.1007/s12649-020-01068-4

ELAHI, Tausif E.; SHAHRIAR, Azmayeen Rafat; ISLAM, Mohammad Shariful. **Engineering characteristics of compressed earth blocks stabilized with cement and fly ash.** Construction and Building Materials 277. Article 122367. 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122367.

ESCAMILLA, E. Z. et al. **Industrial or Traditional Bamboo Construction? Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Bamboo-Based Buildings.** Sustainability. v. 10. 3096, 2018.

FARIAS, Emmanuel E.V.; OLIVEIRA, Rui de; SILVA, Mônica M.P.; MELO, Thiago Aguiar de. **Life cycle assessment of Brazilian civil housing construction.** Research, Society and Development, v. 11, n. 1, e58011125360. 2022. http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i1.25360

FARÍAS, O. Ojeda; RANGEL, J. M. Mendoza; ZAMORA, M. A. Baltazar. **Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material.** Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 194 - 208, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282

FERNANDES, Iara J.; CALHEIRO, Daiane; KIELING, Amanda G.; MORAES, Carlos A.M.; ROCHA, Tatiana L.A.C.; BREHM, Feliciane A.; MODOLO, Regina C.E. **Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy.** Fuel, V. 165, pp. 351–359, 2016.

FERNANDO, Sarah; GUNASEKARA, Chamila; LAW, David W.; NASVI, M.C.M.; SETUNGE, Sujeeva; DISSANAYAKE, Ranjith**. Life cycle assessment and cost analysis of fly ash–rice husk ash blended alkali-activated concrete.** Journal of Environmental Management, 295, paper 113140. 2021. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113140

FERREIRA, Débora Macanjo; LUSO, Eduarda; CRUZ, Maria Lurdes; MESQUITA, Luís M.R.; GONTIJ, Guilherme. **Fire behaviour of ecological soil–cement blocks with**

waste incorporation: Experimental and numerical analysis. Journal of Fire Sciences. Vol 38, Issue 2, 2020.

FERREIRA, R. C. **Desempenho Físico-mecânico e Propriedades Termo Físicas de Tijolos e Mini-Painéis de Terra Crua Tratada com Aditivos Químicos.** Tese de Doutorado. Campinas - SP: Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI da UNICAMP, 2003.

FIROOZI, Ali Akbar; OLGUN, C. Guney; FIROOZI, Ali Asghar; BAGHINI, Mojtaba Shojaei. **Fundamentals of soil stabilization.** International journal of Geo-Engineering. Vol 8:26, 2017. https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-

FONDJO, Armand Augustin; THERON, Elizabeth; RAY, Richard P. **Stabilization of Expansive Soils Using Mechanical and Chemical Methods: A Comprehensive Review.** Civil Engineering and Architecture, vol 9(5), pages 1295-1308, 2021. https://doi.org/10.13189/cea.2021.090503

FRAGA, Yuri Sotero Bomfim; BARBOSA, Andréa Quaranta; DORTAS, Ivan Santos; SANTOS, Luís Henrique Pereira; MOTA, Walter Vieira. **Tecnologia dos materiais: a utilização do tijolo de solo-cimento na construção civil.** Ciências exatas e tecnológicas V. 3, Nº 3, pp. 11-24, 2016.

FRANÇA, Bruno Rangel; AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez; MONTEIRO, Sergio Neves; GARCIA FILHO, Fabio GRANDE, Fernando Mazzeo da Costa; MARVILA, Markssuel Teixeira; ALEXANDRE, Jonas; ZANELATO, Euzébio Bernabé. **Durability of Soil-Cement Blocks with the Incorporation of Limestone Residues from the Processing of Marble.** Materials Research. Paper e20171118, 2018.

GAR, Parisa Setayesh; SURESH, Narayana; BINDIGANAVILE, Vivek. **Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures.** Construction and Building Materials. V. 153, pp. 929–936, 2017.

GARTNER, Ellis e HIRAO, Hiroshi. **A review of alternative approaches to the reduction of CO2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete.** Cement and Concrete Research, Volume 78, Part A, Pages 126-142, 2015. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.012.

GEHLEN, Larissa Rossi. **Efeito da Utilização de Fibras Lignocelulósicas (Açaí e Curauá) em Compósitos dom Matriz de Resina Poliéster Insaturado.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE. Universidade Federal do Paraná. Dissertação de Mestrado. 2014.

GEHLEN, Larissa R.; SOUZA, Suelen G.; KOLLER, Elisane; PEZZIN, Ana P.T.; SYDENSTRICKER, Thais H.D. **Estudo das propriedades térmicas de compósitos híbridos de resina poliéster insaturada com fibras lignocelulósicas (açaí e curauá).** 12º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais...2013.

GHAVAMI, Sadegh; NASERI, Hamed; JAHANBAKHSH, Hamid; NEJAD, Fereidoon Moghadas. **The impacts of nano-SiO_2 and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer.** Construction and Building Materials, n 285, article 122918, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122918.

GLOGIC, Edis; KAMALI, A. Kamal; KEPPETIPOLA, Nilanka M.; ALONGE, Babatunde; KUMARA, G. R. Asoka; SONNEMANN, Guido; TOUPANCE, Thierry;

COJOCARU, Ludmila. **Life Cycle Assessment of Supercapacitor Electrodes Based on Activated Carbon from Coconut Shells.** ACS Sustainable Chem. Eng. 10, 15025−15034. 2022. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c03239

GOMES, Kelly C.; CARVALHO, Monica; DINIZ, Daniel de P.; ABRANTES, Rafael de C.C.; BRANCO, Michel A.; CARVALHO JR., Paulo R.O. **Carbon emissions associated with two types of foundations: CP-II Portland cement-based composite vs. geopolymer concrete.** Revista Matéria. article e-12525, 2019. http: //doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0850

GOODARZI, A.R.; AKBARI, H.R.; SALIMI, M. **Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume.** Applied Clay Science. 132–133, 675–684. 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.023.

GRANDE, Fernando Mazzeo. **Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-cimento por Prensagem Manual Com e Sem Adição de Sílica Ativa.** Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado. 2003.

GUINÉE, J.B. et al., **Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards**. LCA 6 (5) 255. 2001.

GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; de KONING, A.; van OERS, L.; WEGENER Sleeswijk, A.; SUH, S.; Udo de HAES, H.A.; de BRUIJN, H.; van DUIN, R.; HUIJBREGTS, M.A.J. **Handbook on Life Cycle Assessment Operational.** Kluwer Academic Publishers – Dordrecht, 2002. https://doi.org/10.1007/BF02978784.

HANY, Engy; FOUAD, Nabil; WAHAB, Mona Abdel; SADEK, **Ehab. Investigating the mechanical and thermal properties of compressed earth bricks made by eco-friendly stabilization materials as partial or full replacement of cement.** Construction and Building Materials, n 281, paper: 122535, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122535

HERNANDEZ, J.F.M. e SCRIVENER, K. **Development and Introduction of a Low Clinker, Low Carbon, Ternary Blend Cement in Cuba.** *In:* Scrivener K., Favier A. (eds) Calcined Clays for Sustainable Concrete. RILEM Bookseries, Vol 10. Springer, Dordrecht. pp 323-329, 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_40

HEWLETT, Peter. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete.** 4ª Ed. Butterworth-Heinemann, 2004.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS**). https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2019.

INGLES, O.G. e METCALF, J.B. **Soil stabilization: Principles and Practice.** Melbourne: Butterworths, 366 p., 1972.

ISLAM, Mohammad Shariful; ELAHI, Tausif; SHAHRIAR, Azmayeen Rafat; MUMTAZ, Nashid. **Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction.** Construction and Building Materials, n 255, article 119392, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119392

ITAMBÉ. Fábrica de cimento. **Relatório de Ensaio.** 2021.

JAFER, Hassnen Mosa; MAHDI, Basil Obaid; MAJEED, Zaid Hameed; JAWAD, Ibtehaj Taha. **The Effect of Local Waste Aluminium Material on the Geotechnical**

Properties of Soft Soil. International Journal of Engineering Research & Technology. Vol. 10 Issue 06, June-2021.

JAMES, Jijo. **Strength benefit of sawdust/woodash amendment in cement stabilization of an expansive soil.** Revista Facultad de Ingeniería (Rev. Fac. Ing.) Vol. 28 (50), pp. 44-61, 2019. https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n50.2019.879

JORDAN, Rodrigo A.; COSTA, Matheus V.; MARTINS, Elton A.S.; ROSA, Maxer A.; PETRAUSKI, Alfredo. **Manufacture of soil-cement bricks with the addition of sugarcane bagasse ash.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.39, n.1, p.26-31, 2019. http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n1p26-31/2019

KANG, Xin; LEI, Hang; XIA, Zhao. **A comparative study of modified fall cone method and semi-adiabatic calorimetry for measurement of setting time of cement based materials**. Construction and Building Materials, Nº 248, paper 118634, 2020.

KATARE, V. D.; MADURWAR, M. V. **Design and investigation of sustainable pozzolanic material.** Journal of Cleaner Production, V. 242, paper 118431, 2020.

KERAMATIKERMAN, M.; CHEGENIZADEH, A.; TERZAGH, S. **Review on Effect of Sugarcane Bagasse Ash as an Additive in Construction Industry.** Ejge, V. 24, N. 2, pp. 453–470, 2019.

KESTLER, Maureen A. **Stabilization Selection Guide for Aggregate- and Native-Surfaced Low Volume Roads.** Forest Service – National Technology & Development Program. 2009.

KHANDAY, Suhail Ahmad; HUSSAIN, Monowar; DAS, Amit Kumar. **A Review on Chemical Stabilization of Peat.** Geotech Geol Eng. 2021. https://doi.org/10.1007/s10706-021-01857-1

KINUTHIA, John e KIRGIZ, Mehmet Serkan. **Ecology Based Green Composite Clay Brick Materials and its Usage in Construction Technology.** Journal of Advanced Composite Materials, Construction, Environment, and Nano Technology, 2020.

KONGKAJUN, Nuntaporn; LAITILA, Edward A.; INEURE, Pitcharat; PRAKAYPAN, Wichit; CHERDHIRUNKORN, Benya; CHAKARTNARODOM, Parinya. **Soil-cement bricks produced from local clay brick waste andsoft sludge from fiber cement production.** Case Studies in Construction Materials. Vol. 13, paper: e00448, 2020.

KRISHNAN, Sreejith & BISHNOI, Shashank. **A numerical approach for designing composite cements with calcined clay and limestone.** Cement and Concrete Research. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106232

KUMAR, Boddapati Ganesh; MUTHU, Murugan; CHAJEC, Adrian; SADOWSKI, Łukasz; GOVINDARAJ, V. **The effect of silica fume on the washout resistance of environmentally friendly underwater concrete with a high-volume of siliceous fly ash.** Construction and Building Materials. 327, paper 127058. 2022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127058

LEÃO, A.S.; ARAUJO, M.C.; de Jesus, T.B.; ALMEIDA, E.d.S. **Is the Soil-Cement Brick an Ecological Brick? An Analysis of the Life Cycle Environmental and Energy Performance of Masonry Walls**. Sustainability **2022**, 14, 12735. https://doi.org/10.3390/ su141912735

LEE, Ye-Eun; JO, Junho; KIM, Itae; YOO, Yeong-Seok. **Value-added performance and thermal decomposition characteristics of dumped food waste compost by pyrolysis.** Energies, V. 11, N. 5, pp. 1–14, 2018.

LEONEL, R. F.; FOLGUERAS, M. V.; DALLA VALENTINA, L. V. O.; PRIM, S. R.; PRATES, G. A.; CARASCHI, J. C. **Characterization of soil-cement bricks with incorporation of used foundry sand. Revista** Cerâmica, Vol. 63 pp. 329-335, 2017. http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633672131.

LIAO, Yishun; JIANG, Guoxi; WANG, Kejin; Al QUNAYNAH, Siraj; YUAN, Wenjie. **Effect of steel slag on the hydration and strength development of calcium sulfoaluminate cement.** Construction and Building Materials, Nº 265, paper 120301, 2020.

LIU, G.; SONG, H.; WU, J. **Thermogravimetric study, and kinetic analysis of dried industrial sludge pyrolysis.** Waste Management, V. 41, pp. 128–133, 2015.

LOPES, W. G. R. **Solo-Cimento Reforçado com Bambu: Características Físico-Mecânicas**. Tese de doutorado. Campinas - SP: Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI da UNICAMP, 2002.

LORENZI, Harri. **Flora brasileira: *Arecaceae* (palmeiras)**. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora. 1ª Edição. Editora plantarum. 2010.

LOURENÇO, A.; GOMINHO, J.; PEREIRA, H. **Chemical Characterization of Lignocellulosic Materials by Analytical Pyrolysis.** IntechOpen. N. 13, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80556.

LUCZYNSKI, M.; MACHADO, L. C. G. T.; PADILHA, J.; RENDEIRO, G.; MACÊDO, E. N. **Viabilidade econômica da utilização da semente de *Euterpe oleracea MART*. (Açaí) como recurso energético.** Biomassa & Energia (Viçosa), v. 4., p. 149- 162., 2011.

MACHADO, André Luiz; SCHNEIDER, Roselene Maria; AMARAL, Adriana Garcia do; ARRUDA, Rafael Soares; CRISPIM,Flávio Alessandro; OLIVEIRA, Karinna Pinheiro de; ONETTA, Jennifer de Souza; HOFFMANN, Letícia Tamara. **Soil- Cement Bricks as an Alternative for Glass Waste Disposal.** American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS). Volume 71, No 1, pp 123-135, 2020.

MACHADO, Nélio; CASTRO, Douglas; JORGE, Haroldo; FERREIRA, Caio; SANTOS, Wenderson; SANTOS, Marcelo; PEREIRA, Anderson. **Fractional Distillation of Bio-Oil Produced by Pyrolysis of Açaí (Euterpe oleracea) Seeds.** In: São Paulo: Blucher. p. 1360-1363, 2018.

MAKUSA, Gregory Paul. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice:** State of the art review. Sweden: Lulea University of Technology, 2013.

MANCINI, Paula Simoni. **Estabilização do chumbo por solidificação em cinzas de bagaço de cana incorporada em concreto.** Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Toledo. Dissertação de mestrado. 2020.

MANJUNATHA, M.; PREETHI, S.; MALINGARAYA; MOUNIKA, H.G.; NIVEDITHA, K.N.; RAVI. **Life cycle assessment (LCA) of concrete prepared with**

sustainable cement-based materials. Materials Today: Proceedings, 47, pp 3637–3644. 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.248

MARCAL, Luciana Maichaki; FRANCISCO, Antonio Carlos de; LUZ, Leila Mendes da; PIEKARSKI, Cassiano Moro. **Fundamentos da Análise do Ciclo de Vida**. XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, BA, Brasil, outubro de 2013.

MARINS, L.F.B.; FREITAS, M.C.; VIEIRA, J. H. A.; RABELO, A. A.; NETO, E. F.. **Incorporação da cinza do caroço de açaí em formulações de cerâmica estrutural.** 21º CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2014.

MARQUES, S. K. J.; CARVALHO, E. R.; AMARAL, E. F. S.; BARBOSA, J. D. **Study of Replacement of Cementby Lime in Manufacturing of Soil – Cement Brick.** International Journal of Engineering Research & Technology. Vol. 4, pp. 193-196, 2015.

MARTINS, Maria Alice; MATTOSO, Luiz Henrique Capparelli; PESSOA, José Dalton Cruz. **Comportamento térmico e caracterização morfológica das fibras de mesocarpo e caroço do açaí (Euterpe oleracea mart.).** Revista Brasileira de Fruticultura. V. 31, N. 4, p. 1150–1157, 2009.

MARTIRENA, F. e MONZÓ, J. **Vegetable ashes as Supplementary Cementitious Materials.** Cement and Concrete Research. Vol. 114, pp 57–64, 2018.

MARTIRENA-HERNANDEZ, Jose Fernando; ALUJAS-DÍAZ, Adrian; AMADOR-HERNANDEZ, Meylin. **Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete.** ICSPCC. RILEM Bookseries, 2019.

MEDEIROS, Rennan. **Estudo da influência das características da cinza volante nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido: proposta de método simplificado em argamassa.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de mestrado. 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais.** 2ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, Priscilla S.; SELANI, Miriam M.; GONÇALVES, Regina H.; PAULINO, Jennifer de O.; MASSARIOLI, Adna P.; ALENCAR, Severino M. de. **Açaí seeds: An unexplored agro-industrial residue as a potential source of lipids, fibers, and antioxidant phenolic compounds.** Industrial Crops & Products. Vol. 161, Paper 113204, 2021. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113204

MENDES, Natalia Crespo; BUENO, Cristiane; OMETTO, Aldo Roberto. **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos.** Production, 26(1), 160-175, 2016. http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.153213

MENG, Fanrong; ZHANG, Xiaoxiao; YU, Wanfei; ZHANG, Yucang. **Kinetic analysis of cellulose extraction from banana pseudo-stem by liquefaction in polyhydric alcohols.** Industrial Crops and Products, V. 137, pp. 377–385, 2019.

MESQUITA, A. L.; G. BARRERO, N.; FIORELLI, J.; L. CHRISTOFORO, A.; FARIA, L. J.; R. LAHR, F. **Eco-particle board manufactured from chemical lytreated fibrous vascular tissue of acai (Euterpe oleracea Mart.) Fruit: A new alternative for the particle board industry with its potential application in civil construction and furniture.** Industrial Crops and Products, v. 12, p. 644-651, 2018.

MILANI, Ana Paula da Silva & DIAS, Flávia Gaspar Rangel. **Physical-mechanical performance criteria of cement-soil mortars for earth building coating.** Ambiente Construído, v. 18, n. 2, p. 133-142, 2018. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-862120180002002

MINNU, S.N.; BAHURUDEEN, A.; ATHIRA, G. **Comparison of sugarcane bagasse ash with fly ash and slag: An approach towards industrial acceptance of sugar industry waste in cleaner production of cement.** Journal of Cleaner Production, n 285, paper 124836, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.12483

MITTRI, S. H. M.; DEGEN, M. K.; VIEIRA, G. L.; VAZZOLER, J. S.; RODRIGUES, L. H. C. H. **Assessment of the pozzolanic activity of ornamental stone waste after heat treatment and its effect on the mechanical properties of concretes**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, V. 11, N. 6, pp. 1186–1207, 2018.

MONTEIRO, Alvaro Ferreira; MIGUEZ, Ingrid Santos; SILVA, João pedro R. Barros; SILVA, Ayla Sant'Ana da. **High concentration and yield production of mannose from açaí (Euterpe oleracea Mart.) seeds via mannanase-catalyzed hydrolysis.** Scientific Reports, 9:10939, 2019b. https://doi.org/10.1038/s41598-019-47401

MONTEIRO, Jeorge Lucas dos Santos; CRUZ, Thalysson Clementino da; CASTRO, Anderson de Oliveira. **Synthesis of Grafite From Amazonian Residual Biomass.** Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications. v. 5, n. 19, 2019a.

MOREIRA, Christian e REGO, João Henrique da Silva. **Efeito do teor de gipsita na resistência à compressão do cimento LC³.** Revista Matéria, Vol. 25, N. 01, artigo e-12575, 2020.

MOSTAFA, M.; SALAH, H.; SADDEK, A.B.; SHEHATA, N. **Optimization of nanostructured/nano sized rice husk ash preparation.** Baghdad Science Journal, V. 17, N. 3, pp. 953–960, 2020.

MOURA, Adriana da Silva; DEMORI, Renan; LEÃO, Rosineide Miranda; FRANKENBERG, Claudio Luis Crescente; SANTANA, Ruth Marlene Campomanes. **The influence of the coconut fiber treated as reinforcement in PHB (polyhydroxybutyrate) composites.** Materials Today Communications, V. 18, pp. 191–198, 2019.

MOURA, Elda Marra de; SALES, Joel Neto Bispo de; NASCIMENTO, Natalia Cristina do; SOUSA, Vitor Magalini Zago de; COSTA E SILVA, Danilo Duarte; LIBERA JUNIOR, Vilson Dalla. **Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-cimento.** Ambiente Construído, Porto Alegre, V. 21, N. 1, pp. 69-80, 2021. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100494

MOUSAVI, Seyed Esmaeil. **Utilization of Silica Fume to Maximize the Filler and Pozzolanic Effects of Stabilized Soil with Cement.** Geotech Geol Eng. Paper 36:77–87. 2018. https://doi.org/10.1007/s10706-017-0305-x

MUNERON, Letícia M.; HAMMAD, Ahmed WA.; NAJJAR, Mohammad K.; HADDAD, Assed; VAZQUEZ, Elaine G. **Comparison of the environmental performance of ceramic brick and concrete blocks in the vertical seals' subsystem in residential buildings using life cycle assessment.** Cleaner Engineering and Technology 5. Article 100243. 2021. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100243

NAIR, Nithya; HANEEFA, K. Mohammed; SANTHANAM, Manu; GETTU, Ravindra. **A study on fresh properties of limestone calcined clay blended cementitious systems.** Construction and Building Materials, nº 254, paper 119326. 2020.

NAMBOONRUANG; WEERAPOL; RAWANGKUL, Rattanakorn and YODSUDJAI, Wanchai. **Strength Properties of Low Thermal Conductivity Fly Ash Bricks: Compressive and Flexural Strength Aspects.** AMM. 117–119, 1352–1357. 2011. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.117-119.1352

NASCIMENTO, Elvia S.S.; SOUZA, Patrícia C. de; OLIVEIRA, Herbet A. de; MELO JÚNIOR, Carlos M.; ALMEIDA, Vanessa G.O. MELO, Fernanda M.C. **Soil-cement brick with granite cutting residue reuse.** Journal of Cleaner Production, vol 321, article 129002, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129002

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NOBRE, Thiago Ricardo Santos; SANTOS, T. A.; ARGOLO, Raquel Arraes; RIBEIRO, Daniel Véras. **Estudo do efeito de altos teores de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) em pastas cimentícias: análise por DRX.** VIII Encontro científico de Física Aplicada, p. 49–55, 2018.

NSHIMIYIMANA, Philbert; MESSAN, Adamah; and COURARD, Luc. **Hydric and Durability Performances of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Product Binders: Calcium Carbide Residue and Rice Husk Ash.** J. Mater. Civ. Eng., 33(6): 04021121, 2021.

NOAMAN, M. A.; KARIM, M. R.; ISLAM, M. N. **Comparative study of pozzolanic and filler effect of rice husk ash on the mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete.** Heliyon, V. 5, N. 6, paper 01926, 2019.

OBIANYO, Ifeyinwa Ijeoma; FRANCIS, Esther Nneka Anosike; IHEKWEME, Gina Odochi; GENG, Yang; JIN, Ruoyu; ONWUALU, Azikiwe Peter; SOBOYEJO, Alfred B.O. **Multivariate regression models for predicting the compressive strength of bone ash stabilized lateritic soil for sustainable building.** Construction and Building Materials, n 263, article 120677, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120677

OGWANG, G.; OLUPOT, P.W.; KASEDDE, H.; MENYA, E.; STORZ, H.; KIROS, Y. **Experimental evaluation of rice husk ash for applications in geopolymer mortars. Journal of Bioresources and Bioproducts.** Volume 6, Issue 2, Pages 160-167, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.02.008

OLIVEIRA, Mateus Gonçalves; SOUSA, Diego Lucena de; SOUZA, Milleno Ramos; CORDEIRO, Luciana N. P.; TEIXEIRA, Marcelo Rassy; SILVA, Suanne Honorina Martins. **Análise bibliográfica da (re) utilização do caroço de açaí na indústria da construção civil.** In: Congresso araguaiense de ciências exata, tecnológica e social aplicada, p. 1-11, 2020. Anais...: II CONARA, 2020.

ONYELOWE, K.C.; EBID, A.M.; RIOFRIO, A.; SOLEYMANI, A.; BAYKARA, H.; KONTONI, D.; MAHDI, H.A.; JAHANGIR, H. **Global warming potential-based life cycle assessment and optimization of the compressive strength of fly ash-silica fume concrete; environmental impact consideration.** Frontiers in Built Environment. 8:992552. 2022. https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.992552

OSPINA, Dánika A.C.; LYRA, Gabriela Pitolli; MOTTA, Gabriela Azevedo; ANGELIN, Andressa Fernanda; ARGUELHO, Karoline; OMETTO, Aldo Roberto. **Estudo comparativo da avaliação do ciclo de vida do cimento Portland com substituição parcial de cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** Anais do VII Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida. 2021.

PASSUELLO, A. C. B.; OLIVEIRA, A. F. de; COSTA, E. B. da; KIRCHHEIM, A. P. **Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos.** Ambiente Construído. v. 14, n. 4, p. 7-20, 2014.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção.** Porto Alegre: Globo, 1978.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos,** 1ª ed. Oficina de Textos, São Paulo 2000. 247 p.

PIEKARSKI, Cassiano Moro; LUZ, Leila Mendes da; ZOCCHE, Lidiana; FRANCISCO, Antonio Carlos de. **Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras**. Revista Gestão Industrial. v. 08, n. 03: p. 222-240, 2012. http://10.3895/S1808-04482012000300011

PITTA, Pedro M. R. **Características tecnológicas dos solos estabilizados com cimento**. São Paulo: ABCP, 1980.

PITTA, Pedro M.R. **Dosagens das misturas de solo-cimento – Normas de dosagem e métodos de ensaio.** São Paulo: ABCP, 2004.

PONCE, Rafaela Oliva. **Avaliação do ciclo de vida dos sistemas de produção orgânico e convencional da cana-de-açúcar: um estudo comparativo.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Administração. UNESP. 2019.

PRUSTY, J. K.; PATRO, S. K.; BASARKAR, S. S. **Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review.** International Journal of Sustainable Built Environment, V. 5, N. 2, pp. 312–333, 2016.

QUEIROZ, Inácio Santiago de Oliveira. **Desenvolvimento de concretos de ultra-alta resistência com uso de materiais disponíveis na região do Norte de Minas Gerais.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Dissertação de mestrado. 2018.

QUEIROZ, Leandro S.; SOUZA, Luiz K.C. de; THOMAZ, Kelly Taise C.; LIMA, Erika Tallyta Leite; ROCHA FILHO, Geraldo N. da; NASCIMENTO, Luis Adriano S. do; PIRES, Luiza H. de Oliveira; FAIAL, Kelson do Carmo Freitas; COSTA, Carlos E.F. da. **Activated carbon obtained from amazonian biomass tailings (acai seed): Modification, characterization, and use for removal of metal ions from water.** Journal of Environmental Management, Nº 270, paper 110868, 2020.

RAHLA, Kamel Mohamed; MATEUS, Ricardo; BRAGANÇA, Luís. **Comparative sustainability assessment of binary blended concretes using Supplementary Cementitious Materials (SCMs) and Ordinary Portland Cement (OPC).** Journal of Cleaner Production, 220, p 445e459. 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.010

RAMOS, Santiago Linorio Ferreyra; DEQUIGIOVANNI, Gabriel; LOPES, Maria Teresa Gomes; AGUIAR, Ananda Virginia de; LOPES, Ricardo; VEASEY, Elizabeth Ann; MACÊDO, Jeferson Luis Vasconcelos de; PEREIRA, Alessandro Alves; FRAXE,

Therezinha de Jesus Pinto; WREGE, Marcos Silveira; GARCIA, José Nivaldo. **Genetic Structure in Populations of Euterpe precatoria Mart. in the Brazilian Amazon**. Frontiers in Ecology and Evolution. Volume 8 | Article 603448, 2020.

REDDY, V. Venkatarama e KUMAR, P. Prasanna. **Cement stabilised rammed earth. Part A: compactioncharacteristics and physical properties of compacted cementstabilised soils.** Materials and Structures Nº 44, pp 681–693, 2011.

RIVERA, Jhonathan Fernando; GUTIÉRREZ, Ruby Mejía; BENAVIDES, Sandra Ramirez; OROBIO, Armando. **Compressed and stabilized soil blocks with fly ash-based alkali-activated Cements.** Construction and Building Materials, n 264, paper: 120285, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120285

ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; ROSAS, Marialaura Herrera; CHILENO, Nahúm Gamalier Cayo; TAPIA, Giovana Silvia Cachaca. **Physical-mechanical assessment for soil-cement blocks including rice husk ash.** Case Studies in Construction Materials, n 14, paper e00548, 2021. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00548

ROSELLÓ, Josefa; SORIANO, Lourdes; SANTAMARINA, M. Pilar; AKASAKI, Jorge L.; MONZÓ, José; PAYÁ, Jordi. **Rice straw ashA potential pozzolanic supplementary material for cementing systems.** Industrial Crops and Products, V. 103, pp. 39–50, 2017.

RYBERG, M.W. et al. **Comparative life cycle assessment of four buildings in Greenland.** Building and Environment. v.204, 108130, 2021

SADABA, Sara M.; KINUTHIAB, John; OTI, Jonathan; MENESES Andres S. **Challenges in Life Cycle Assessment (LCA) of stabilised clay-based construction materials.** Applied Clay Science 144, 121–130. 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.012.

SANTOS, Vanuza O.; QUEIROZ, Leandro S.; ARAUJO, Rayanne O.; Flaviana RIBEIRO, C.P.; GUIMARAES, Mariana N.; COSTA, Carlos E.F. da; CHAAR, Jamal S.; SOUZA, Luiz K.C. de; **Pyrolysis of acai seed biomass: Kinetics and thermodynamic parameters using thermogravimetric analysis.** Bioresource Technology Reports, Nº 12, paper 100553, 2020.

SATO; Michel Keisuke; LIMA, Herdjania Veras de; COSTA, Aline Noronha; RODRIGUES, Sueli; PEDROSO, Augusto José Silva; MAIA, Claudia Maria Branco de Freitas. **Biochar from Acai agroindustry waste: Study of pyrolysis conditions.** Waste Management. Ed. 96, p. 158–167, 2019.

SCHULZ, Mayara; BORGES, Graciele da Silva Campelo; GONZAGA, Luciano Valdemiro; COSTA, Ana Carolina Oliveira; FETT, Roseane. **Juçara fruit (Euterpe edulis Mart.): Sustainable exploitation of a source of bioactive compounds.** Food Research International. Vol 89, pp. 14–26, 2016.

SCRIVENER, Karen L.; **Options for the future of cement.** The Indian Concrete Journal. Vol. 88, Issue 7, pp. 11-21. 2014.

SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry.** Cement and Concrete Research, Volume 114, Pages 2-26, 2018a.

SCRIVENER, Karen L.; MARTIRENA, Fernando; BISHNOI, Shashank; MAITY, Soumen. **Calcined clay limestone cements (LC^3).** Cement and Concrete Research, Vol. 114, pp 49–56, 2018b.

SEGANTINI, Antônio Anderson da Silva. **Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira-SP.** Tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. 2000.

SEGANTINI, Antônio Anderson da Silva e WADA, Patrycia Hanna. **Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição.** Maringá, V. 33, N. 2, pp. 179-183, 2011.

SETO, Karina E.; CHURCHILL, Cameron J.; PANESAR, Daman K. **Influence of fly ash allocation approaches on the life cycle assessment of cement-based materials.** Journal of Cleaner Production, 157, paper 65e75. 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.093

SHARMA, Kuldeep & KUMAR, Arvind. **Influence of rice husk ash, lime and cement on compaction and strength properties of copper slag.** Transportation Geotechnics, n 27, article 100464, 2021. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100464

SHARMA, Meenakshi; BISHNOI, Shashank; MARTIRENA, Fernando; SCRIVENER, Karen. **Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review.** Cement and Concrete Research. 149. Article 106564. 2021. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564

SILVA, Blaine Alves. **Estudo de misturas de solo cimento agregado reciclado de telhas cerâmicas para fabricação de blocos para alvenaria.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. 2015.

SILVA, Diego Aleixo da; YAMAJI, Fabio Minoru; BARROS, João Lúcio de; RÓZ, Alessandra Luzia da; NAKASHIMA, Gabriela Tamy. **Caracterização de biomassas para a briquetagem.** Floresta. V. 45, N. 4, pp. 713 - 722. 2015.

SILVA, F.B.; SAADE, M.R.M.; MORAGA, G.L.; YOSHIDA, O.S.; GOMES, V.; PASSUELLO, A.; OLIVEIRA, L.A.; SILVA, M.G.; JOHN, W. **Avaliação do ciclo de vida do concreto dosado em central com base em dados da indústria brasileira.** Concreto & Construções, Ed. 98, 2020. http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2020.98.0010

SILVA, Francisco W. Maciel; MUSSATTO, Solange I.; CARNEIRO, Tânia Forster. **Integration of subcritical water pretreatment and anaerobic digestion technologies for valorization of açai processing industries residues.** Journal of Cleaner Production, n 228, paper: 1131e1142, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.362

SILVA, G.H.M.J. Subashi; VISHVALINGAM, S.; ETAMPAWALA, T. **Effect of waste rice husk ash from rice husk fuelled brick kilns on strength, durability, and thermal performances of mortar.** Construction and Building Materials, Nº 268, paper 121794, 2021a.

SILVA, Ivete Teixeira da; ALMEIDA, Arthur da Costa; MONTEIRO, José Humberto Araújo; SILVA, Isa Maria Oliveira da; ROCHA, Brígida Ramati Pereira da. **Uso do caroço de açaí como possibilidade de desenvolvimento sustentável no meio rural, da**

agricultura familiar e de eletrificação rural no estado do Pará. Encontro de Energia no Meio Rural. Anais...2004.

SILVA, T.R.; CECCHIN, D.; AZEVEDO, A.F.G.; ALEXANDRE, J.; VALADÃO, I.C.R.P.; BERNARDINO, N.A.; CARMO, D.F.; FERRAZ, P.F.P. **Soil-cement blocks: a sustainable alternative for the reuse of industrial solid waste.** Revista Brasileira de Ciências Ambientais. v.56 | n.4 | 673-686. 2021b. https://doi.org/10.5327/Z21769478956

SINOH, Saznizam S.; IBRAHIM, Zainah; OTHMAN, Faridah; KUANG, Lee Meng; ZAKI, Ahmad. **Life Cycle Assessment of Sugarcane Bagasse Ash as Partial Cement Replacement in Concrete.** Proceedings of the 4th International Conference on Sustainable Innovation 2020 – Technology, Engineering and Agriculture. 2020.

SOARES, Silvete Mari. **Durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos.** Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos. Tese de doutorado. 2021.

SOUZA, Danielle Maia de; LAFONTAINE, Mia; CHARRON-DOUCET, François; CHAPPERT, Benoit; KICAK, Karine; DUARTE, Fernanda; LIMA, Luis. **Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick, and cast-in-place reinforced concrete exterior walls.** Journal of Cleaner Production 137. Article 70e82. 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.069.

SOUZA, J. M. de; RUDNICK, R. C.; LUKIANTCHUKI, J. A. **Evaluation of the incorporation of construction waste (CW) for thestabilization of soil-cement mixtures.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 261-280, 2020. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000400471

SOUZA, P.C.; NASCIMENTO, E.S.S.; MELO, L.; OLIVEIRA, H.A.; ALMEIDA, V.G.O.; MELO, F.M.C. **Study for the incorporation of wood ash in soil-cement brick.** Cerâmica 68, 38-45. 2022. http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132022683853052

SOUZA, Reginaldo José Queiroz de. **Validação tecnológica do caroço do fruto do açaí como material alternativo na pavimentação de baixo volume de tráfego.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia. Universidade Federal do Amazonas. Dissertação de Mestrado. 2013.

SREEJITH, Chenicheri Chandroth; MURALEEDHARAN, Chandrasekharan; ARUN, Palatel. **Life cycle assessment of producer gas derived from coconut shell and its comparison with coal gas: an Indian perspective.** International Journal of Energy and Environmental Engineering. 4:8. 2013. http://doi.org/10.1186/2251-6832-4-8

STON, Julien e SCRIVENER, Karen. **Basic creep of limestone–calcined clay cements: An experimental and numerical approach.** Theoretical and Applied Fracture Mechanics. V. 103, paper 102270. 2019.

SULAIMAN, T. A. and ALIYU, I. **Combined effect of rice husk ash and cement kiln dust as cement replacement materials in concrete.** FUDMA Journal of Sciences (FJS). Vol. 4 No. 1, pp 446-452, 2020.

TARASIEWICZ, S. & RADZISZEWSKI, P., **Comminution energetics part III: Bond's law and breakage energy, Mater. Chem. Phys.** n 25, pages 21-25. 1990. https://doi.org/10.1016/0254-0584(90)90004-T

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** Londres: Academic Press, 1990.

TEIXEIRA, Felipe Pinheiro; MACHADO, Thaís Guedes; JESUS JUNIOR, Neilton Paixão de; BORGES, Simone Pereira; RIBEIRO, Taguchi Rosinei Batista; BORGES JÚNIOR, Luiz Antônio. **Propriedades tecnológicas do tijolo solo-cimento vazado de 2 furos.** Tecnol Metal Mater Min. vol 18, article e2147, 2021. https://doi.org/10.4322/2176-1523.20212147

TIRONI, Alejandra; CASTELLANO, Claudia C.; BONAVETTI, Viviana L.; TREZZA, Mónica A.; SCIAN, Alberto N.; IRASSAR, Edgardo F. **Kaolinitic calcined clays – Portland cement system: hydration and properties.** Construtions Building Materials, v.64, n.8, pp.215–221, 2014.

TIRONI, Alejandra; SCIAN Alberto N.; IRASSAR Edgardo F. **Ternary Blended Cement with Limestone Filler and Kaolinitic Calcined Clay.** *In:* Scrivener K., Favier A. (eds) Calcined Clays for Sustainable Concrete. RILEM Bookseries, vol 10. Springer, Dordrecht. pp 195-201, 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3

VALDERRAMA, César; GRANADOS, Ricard; CORTINA, José Luis; GASOL, Carles M.; GUILLEM, Manel; JOSA, Alejandro. **Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study.** Journal of Cleaner Production, 25, paper 60e67. 2012. http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.055

VILELA, Alan P.; EUGÊNIO, Tony M.C.; OLIVEIRA, Fernando F. de; MENDES, Juliana F.; RIBEIRO, André G.C.; VAZ, Lívia E.V. de S. Brandão; MENDES, Rafael F. **Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste.** Construction and Building Materials. Vol. 262, paper. 120883, 2020.

VIZCAÍNO, Andrés L. M.; ANTONI, Mathieu Georges; ALUJAS, Diaz Adrian; HERNÁNDEZ, José F.M. and SCRIVENER, Karen Louise. **Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements.** Advances in Cement Research 27:9, pages 546-556, 2015.

WANG, Ping; WANG, Jinman; QIN, Qian; WANG, Hongdan. **Life cycle assessment of magnetized fly-ash compound fertilizer production: A case study in China.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73, pp 706–713. 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.005

WASKOW et al. **Environmental performance of construction and demolition waste management strategies for valorization of recycled coarse aggregate**. Journal of Environmental Management. v.295, 113094, 2021.

WEERASEKARA, N.S.; POWELL, M.S.; CLEARY, P.W.; TAVARES, L.M.; EVERTSSON, M.; MORRISON, R.D.; QUIST, J.; CARVALHO R.M. **The contribution of DEM to the science of comminution.** Powder Technol. n 248, pages 3-24. 2013. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.05.032.

WEIDEMA, B.P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C.O.; WERNET, G. **Overview and methodology - Data quality guideline for the ecoinvent database version 3.** Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen: The ecoinvent Centre. 2013.

XU, Weiting; LO, Tommy Y.; MEMON, Shazim Ali. **Microstructure and reactivity of rich husk ash.** Construction and Building Materials, n 29, pages 541–547, 2012. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.005

YADAV, Ankur Laxman; SAIRAM, V.; MURUGANANDAM, L.; SRINIVASAN, K. **An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material.** Journal of Cleaner Production, V. 245, paper 118854, 2020.

YATAWARA, Mangala & ATHUKORALA, Sachini. **Potential of replacing clay soil by rice husk ash (RHA) in enhancing the properties of compressed earth blocks (CEBs).** Environment, Development and Sustainability 23:3474–3486, 2021. https://doi.org/10.1007/s10668-020-00727-9

YEO, Jun Yi; CHIN, Bridgid Lai Fui; TAN, Jun Kit; LOH, Ying Sheng. **Comparative studies on the pyrolysis of cellulose, hemicellulose, and lignin based on combined kinetics.** Journal of the Energy Institute, V. 92, N. 1, pp. 27–37, 2019

ZAK, Philip; ASHOUR, Taha, KORJENIC, Azra; KORJENIC, Sinan; WU, Wei. (2016). **The influence of natural reinforcement fibers, gypsum, and cement on compressive strength of earth bricks materials.** Construction and Building Materials. Volume 106, Pages 179-188, 2016. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.031

ZAVARIZE, Danilo Gualberto; BRAUN, Heder; OLIVEIRA, Jorge Diniz de. **Methanolysis of low-FFA waste cooking oil with novel carbon-based heterogeneous acid catalyst derived from Amazon açaí berry seeds.** Renewable Energy, Nº 171, paper 621e634, 2021.

ZAVARIZE, Danilo Gualberto. **Insights on preparation and characteristics of KOH-doped carbons derived from an abundant agroindustrial waste in Brazil: Amazon açaí berry seeds.** Bioresource Technology Reports, Nº 13, paper 100611, 2021.

ZHANG, Duo; JAWORSKA, Beata; ZHU, He; DAHLQUIST, Kensey; LI, Victor C. **Engineered Cementitious Composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC^3).** Cement and Concrete Composites. 114. Article 103766. 2020. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103766

ZHANG, Ping; LIAO, Wenyu; KUMAR, Aditya; ZHANG, Qian; MA, Hongyan. **Characterization of sugarcane bagasse ash as a potential supplementary cementitious material: Comparison with coal combustion fly ash**. Journal of Cleaner Production. Vol. 277, paper 123834, 2020.

ZIMELE, Zinta; SINKA, Maris; KORJAKINS, Aleksandrs; BAJARE, Diana; SAHMENKO, **Genadijs. Life Cycle Assessment of Foam Concrete Production in Latvia.** Environmental and Climate Technologies vol. 23, no. 3, pp. 70–84. 2019. http://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0080

ZULKIFLEY, Mohamad T. M.; NG, Tham F.; RAJ, John Kuna; HASHIM, Roslan; BAKAR, Ahmad F. A.; PARAMANTHAN, S. & ASHRAF, Muhammad A. **A review of the stabilization of tropical lowland peats**. Bull Eng Geol Environ. 73, 733–746. 2014. https://doi.org/10.1007/s10064-013-0549-5.

ZUNINO, Franco and SCRIVENER, Karen. **Microstructural developments of limestone calcined clay cement (LC^3) pastes after long-term (3 years) hydration.** Cement and Concrete Research. 153 Article 106693. 2022. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106693

ANEXO 1 - Normas técnicas citadas na tese

M-CIENTEC. C-028: **Materiais cerâmicos - Determinação da perda ao fogo.** *Cientec* – Fundação de Ciência e Tecnologia, Porto Alegre – RS. 1995.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14044 de 21 de junho de 2009. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações.** Versão corrigida – Errata (28.11.2014). 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15895 de 28 de novembro de 2010. **Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado.** 2010.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8491 de 10 de dezembro de 2012. **Tijolo de Solo Cimento – Requisitos.** 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8492 de 11 de dezembro de 2012. **Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio.** 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12023 de 16 de agosto de 2012. **Solo Cimento – Ensaio de compactação.** 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10833 de 10 de janeiro de 2013. **Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento.** 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5752 de 27 de junho de 2014. **Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** 2014.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653:2014 Versão Corrigida em 25 de março de 2015. **Materiais pozolânicos — Requisitos.** 2014.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7214 de 16 de dezembro de 2015. **Areia normal para ensaio de cimento – Especificação.** 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180 de 30 de março de 2016. **Solo – Determinação do limite de plasticidade.** 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181 de 29 de setembro de 2016. **Solo – análise granulométrica.** 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459 de 24 de abril de 2017. **Solo – Determinação do limite de liquidez.** 2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14710 de 16 de maio de 2017. **Determinação do teor de cinzas.** 2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16697 de 3 de julho de 2018. **Cimento Portland - requisitos.** 2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16607 de 12 de dezembro de 2018. **Cimento Portland – determinação dos tempos de pega.** 2018.

APÊNDICE 1 – PARTE A

Base de cálculo para o inventário do ciclo de vida e citações bibliográficas

Fluxos	Base de cálculo	Referências
Transporte do solo (540 km):	0,00035 x 540 = 0,189 t.km	Valderrama et al., 2012.
Transporte do cimento (45 km):	0,0818 x 45 = 3,6531 t.km	Pilz, 2020.
Transporte do fíler e da metacaulinita (950 km):	0,000092 x 950 = 0,0874 t.km	Gettu et al., 2018; Pillai et al., 2019.
Transporte das matérias-primas incorporadas à matriz de solo-cimento (950 km):	0,0000924 x 950 = 0,08778 t.km	Gettu et al., 2018; Pillai et al., 2019.
Emissão de gases tóxicos na produção do cimento:	0,109 kg/t	Koroneos e Dompros (2006); Huntzinger e Eatmon (2008); John, 2011; Almeida 2014; Ferreira 2015.
Emissão de compostos voláteis na produção do cimento:	0,0502 kg/t	Koroneos e Dompros (2006); Huntzinger e Eatmon (2008); John, 2011; Almeida 2014; Ferreira 2015.
Emissão de particulados na produção do cimento:	23,796 kg/t	Koroneos e Dompros (2006); Huntzinger e Eatmon (2008); John, 2011; Almeida 2014; Ferreira 2015.
Emissão de monóxido de carbono (CO) na produção do cimento:	11,0 kg/t	Koroneos e Dompros (2006); Huntzinger e Eatmon (2008); John, 2011; Almeida 2014; Ferreira 2015.
Emissão de dióxido de carbono (CO_2) na produção do cimento:	639.389 kg/t	Bgs (british geologial survey, 2005); Borges et al., 2014.
Emissão de dióxido de enxofre (SO_2) na produção do cimento:	16,6 kg/t	Koroneos e Dompros (2006); Huntzinger e Eatmon (2008); John, 2011; Almeida 2014; Ferreira 2015.
Emissão de gases tóxicos na produção do fíler e da metacaulinita:	0,117 kg/t	Berriel et al., 2016; Bendouma et al., 2020.
Emissão de particulados na produção do fíler e da metacaulinita:	0,01788 kg/t	Berriel et al., 2016; Bendouma et al., 2020.
Emissão de dióxido de carbono (CO_2) na produção do fíler e da metacaulinita:	15,11502 kg/t	Berriel et al., 2016; Bendouma et al., 2020.
Emissão de gases tóxicos na produção da sílica ativa:	0,49 kg/t	Asadollahfardi et al., 2021; Onyelowe et al., 2022.

Emissão de dióxido de carbono (CO_2) na produção da sílica ativa:	1,247 kg/t	Shi et al., 2021.
Emissão de gases tóxicos na produção da cinza volante:	0,85 kg/t	Wang et al., 2017.
Emissão de particulados na produção da cinza volante:	0,628 kg/t	Wang et al., 2017.
Emissão de dióxido de carbono (CO_2) na produção da cinza volante:	94,1 kg/t	Wang et al., 2017.
Emissão de gases tóxicos na produção da cinza do bagaço de cana:	0,070 kg/t	Santos et al., 2014; Munagala et al., 2021.
Emissão de monóxido de carbono (CO) na produção da cinza do bagaço de cana:	0,0252 kg/t	Santos et al., 2014; Munagala et al., 2021.
Emissão de dióxido de carbono (CO_2) na produção da cinza do bagaço de cana:	1,056 kg/t	Santos et al., 2014; Munagala et al., 2021.
Emissão de monóxido de carbono (CO) na produção da cinza do caroço de açaí:	2,44 kg/t	Adaptado de: Floguiatti et al., 2014; Arena et al., 2016 e Glogic et al., 2022.
Emissão de particulados na produção da cinza do caroço de açaí:	0,003 kg/t	Adaptado de: Floguiatti et al., 2014; Arena et al., 2016 e Glogic et al., 2022.
Emissão de dióxido de carbono (CO_2) na produção da cinza do caroço de açaí:	0,00487 kg/t	Adaptado de: Floguiatti et al., 2014; Arena et al., 2016 e Glogic et al., 2022.

APÊNDICE 1 – PARTE B

Dados referentes aos fluxos de entradas, produção e saídas no inventário

1. Fluxos de entradas, produção e saídas para o tijolo de solo cimento com o cimento CP V (SC_1)

	Fluxo	Unid.	Quant.	Provedor	Notas Pedigree
Fluxos de entrada	Solo extraído de jazida	kg	2,250	*sand quarry operation, extraction from riverbed | sand | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;2;2)*
	Clínquer - cimento de alta resistência inicial	kg	0,250	*clinker production | clinker | Cutoff, U – BR*	*(2;1;1;3;2)*
	Transporte do solo e do cimento à indústria de tijolo	t*km	0,001338525	*transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified | transport, freight, lorry, unspecified | Cutoff, U – RoW*	*(2;2;1;3;2)*
	Energia de compactação da mistura	J	2,059396499	*Resource / in ground*	*(4;4;1;3;2)*
	Água	kg	0,03375	*market for tap water | tap water | Cutoff, U – BR*	*(1;2;1;1;2)*
Fluxos de saída	Emissão de gases tóxicos	kg	0,00062775	*waste, unspecified*	*(5;4;1;3;4)*
	Emissão de compostos voláteis	kg	0,00001255	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de particulados	kg	0,0059490	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de monóxido de carbono (CO)	kg	0,002750	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de carbono (CO_2)	kg	159,84725	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de enxofre (SO_2)	kg	0,004150	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*

Fonte: Própria autora

2. Fluxos de entradas, produção e saídas para o tijolo de solo cimento com o cimento LC^3 (SC_2)

	Fluxo	Unid.	Quant.	Provedor	Notas Pedigree
Fluxos de entrada	Solo extraído de jazida	kg	2,250	*sand quarry operation, extraction from riverbed | sand | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;2;2)*
	Clínquer - cimento de alta resistência inicial	kg	0,1375	*clinker production | clinker | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;1;2)*
	Metacaulinita produzida industrialmente	kg	0,075	*kaolin production | kaolin | Cutoff, U – Row*	*(3;2;1;3;2)*
	Fíler produzido industrialmente	kg	0,0375	*limestone production, crushed, washed | limestone, crushed, washed | Cutoff, U – Row*	*(3;2;1;3;2)*
	Energia de compactação da mistura	J	2,059396499	*Resource / in ground*	*(4;4;1;3;2)*
	Transporte do dos materiais (solo, clínquer, fíler e metacaulinita) à indústria de tijolo	t*km	0,000937384	*transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified | transport, freight, lorry, unspecified | Cutoff, U – RoW*	*(2;2;1;3;2)*
	Água	kg	0,03375	*market for tap water | tap water | Cutoff, U – BR*	*(1;2;1;1;2)*
Fluxos de saída	Emissão de gases tóxicos (*)	kg	0,000358425	*waste, unspecified*	*(5;4;1;3;4)*
	Emissão de compostos voláteis (*)	kg	0,0000069	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de particulados (*)	kg	0,0032739	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de monóxido de carbono (CO) (*)	kg	0,0015125	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de carbono (CO_2) (*)	kg	87,915989	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de enxofre (SO_2) (*)	kg	0,00170044	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*

(*) Clínquer + metacaulinita + fíler

Fonte: Própria autora

3. Fluxos de entradas, produção e saídas para o tijolo de solo cimento com o cimento CP V + incorporação da sílica ativa (SC_3)

	Fluxo	Unid.	Quant.	Provedor	Notas Pedigree
Fluxos de entrada	Solo extraído de jazida	kg	2,250	*sand quarry operation, extraction from riverbed | sand | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;2;2)*
	Clínquer - cimento de alta resistência inicial	kg	0,225	*clinker production | clinker | Cutoff, U – BR*	*(2;1;1;3;2)*
	Sílica ativa	kg	0,025	*activated silic production | Cutoff, U - GLO*	*(2;1;1;3;1)*
	Transporte dos materiais (solo, sílica e cimento) à indústria de tijolo	t*km	0,001249392	*transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified | transport, freight, lorry, unspecified | Cutoff, U – RoW*	*(2;2;1;3;2)*
	Energia de compactação da mistura	J	2,059396499	*Resource / in ground*	*(4;4;1;3;2)*
	Água	kg	0,03375	*market for tap water | tap water | Cutoff, U – BR*	*(1;2;1;1;2)*
Fluxos de saída	Emissão de gases tóxicos (*)	kg	0,000577225	*waste, unspecified*	*(5;4;1;3;4)*
	Emissão de compostos voláteis (*)	kg	0,000011295	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de particulados (*)	kg	0,0053541	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de monóxido de carbono (CO) (*)	kg	0,002475	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de carbono (CO_2) (*)	kg	143,8625562	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de enxofre (SO_2) (*)	kg	0,003735	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*

(*) CPV + Sílica ativa

Fonte: Própria autora

4. Fluxos de entradas, produção e saídas para o tijolo de solo cimento com o cimento LC^3 + incorporação da sílica (SC_4)

	Fluxo	Unid.	Quant.	Provedor	Notas Pedigree
Fluxos de entrada	Solo extraído de jazida	kg	2,250	*sand quarry operation, extraction from riverbed | sand | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;2;2)*
	Clínquer - cimento de alta resistência inicial	kg	0,12375	*clinker production | clinker | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;1;2)*
	Metacaulinita produzida industrialmente	kg	0,075	*kaolin production | kaolin | Cutoff, U – Row*	*(3;2;1;3;2)*
	Fíler produzido industrialmente	kg	0,0375	*limestone production, crushed, washed | limestone, crushed, washed | Cutoff, U – Row*	*(3;2;1;3;2)*
	Sílica ativa	kg	0,01375	*activated silic production | Cutoff, U - GLO*	*(2;1;1;3;1)*
	Energia de compactação da mistura	J	2,059396499	*Resource / in ground*	*(4;4;1;3;2)*
	Transporte do dos materiais (solo, clínquer, fíler, metacaulinita e sílica ativa) à indústria de tijolo	t*km	0,000888361	*transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified | transport, freight, lorry, unspecified | Cutoff, U – RoW*	*(2;2;1;3;2)*
	Água	kg	0,03375	*market for tap water | tap water | Cutoff, U – BR*	*(1;2;1;1;2)*
Fluxos de saída	Emissão de gases tóxicos (*)	kg	0,000330636	*waste, unspecified*	*(5;4;1;3;4)*
	Emissão de compostos voláteis (*)	kg	0,00000621	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de particulados (*)	kg	0,002946767	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de monóxido de carbono (CO) (*)	kg	0,00136125	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de carbono (CO_2) (*)	kg	79,12610634	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de enxofre (SO_2) (*)	kg	0,00205425	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*

(*) Clínquer + metacaulinita + fíler + sílica

Fonte: Própria autora

5. Fluxos de entradas, produção e saídas para o tijolo de solo cimento com o cimento CP V + incorporação da cinza volante (SC_5)

	Fluxo	Unid.	Quant.	Provedor	Notas Pedigree
Fluxos de entrada	Solo extraído de jazida	kg	2,250	*sand quarry operation, extraction from riverbed | sand | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;2;2)*
	Clínquer - cimento de alta resistência inicial	kg	0,225	*clinker production | clinker | Cutoff, U – BR*	*(2;1;1;3;2)*
	Cinza volante	kg	0,025	*market for fly ash and scrubber sludge | fly ash and scrubber sludge | Cutoff, U - RoW*	*(4;2;1;3;2)*
	Transporte dos materiais (solo, cinza volante e cimento) à indústria de tijolo	t*km	0,001247417	*transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified | transport, freight, lorry, unspecified | Cutoff, U – RoW*	*(2;2;1;3;2)*
	Energia de compactação da mistura	J	2,059396499	*Resource / in ground*	*(4;4;1;3;2)*
	Água	kg	0,03375	*market for tap water | tap water | Cutoff, U – BR*	*(1;2;1;1;2)*
Fluxos de saída	Emissão de gases tóxicos (*)	kg	0,00058623	*waste, unspecified*	*(5;4;1;3;4)*
	Emissão de compostos voláteis (*)	kg	0,0000123	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de particulados (*)	kg	0,0053698	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de monóxido de carbono (CO) (*)	kg	0,002475	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de carbono (CO_2) (*)	kg	143,864878	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de enxofre (SO_2) (*)	kg	0,003735	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*

(*) CPV + Cinza volante

Fonte: Própria autora

6. Fluxos de entradas, produção e saídas para o tijolo de solo cimento com o cimento LC^3 + incorporação da cinza volante (SC_6)

	Fluxo	Unid.	Quant.	Provedor	Notas Pedigree
Fluxos de entrada	Solo extraído de jazida	kg	2,250	*sand quarry operation, extraction from riverbed | sand | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;2;2)*
	Clínquer - cimento de alta resistência inicial	kg	0,12375	*clinker production | clinker | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;1;2)*
	Metacaulinita produzida industrialmente	kg	0,075	*kaolin production | kaolin | Cutoff, U – Row*	*(3;2;1;3;2)*
	Fíler produzido industrialmente	kg	0,0375	*limestone production, crushed, washed | limestone, crushed, washed | Cutoff, U – Row*	*(3;2;1;3;2)*
	Cinza volante	kg	0,01375	*market for fly ash and scrubber sludge | fly ash and scrubber sludge | Cutoff, U - RoW*	*(4;2;1;3;2)*
	Energia de compactação da mistura	J	2,059396499	*Resource / in ground*	*(4;4;1;3;2)*
	Transporte do dos materiais (solo, clínquer, fíler, metacaulinita e cinza volante) à indústria de tijolo	t*km	0,000888361	*transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified | transport, freight, lorry, unspecified | Cutoff, U – RoW*	*(2;2;1;3;2)*
	Água	kg	0,03375	*market for tap water | tap water | Cutoff, U – BR*	*(1;2;1;1;2)*
Fluxos de saída	Emissão de gases tóxicos (*)	kg	0,000323899	*waste, unspecified*	*(5;4;1;3;4)*
	Emissão de compostos voláteis (*)	kg	0,00000621	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de particulados (*)	kg	0,002955402	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de monóxido de carbono (CO) (*)	kg	0,0016312	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de carbono (CO_2) (*)	kg	79,12738306	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de enxofre (SO_2) (*)	kg	0,00205425	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*

(*) Clínquer + metacaulinita + fíler + cinza volante

Fonte: Própria autora

7. Fluxos de entradas, produção e saídas para o tijolo de solo cimento com o cimento CP V + incorporação da cinza do bagaço de cana (SC_7)

	Fluxo	Unid.	Quant.	Provedor	Notas Pedigree
Fluxos de entrada	Solo extraído de jazida	kg	2,250	*sand quarry operation, extraction from riverbed | sand | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;2;2)*
	Clínquer - cimento de alta resistência inicial	kg	0,225	*clinker production | clinker | Cutoff, U – BR*	*(2;1;1;3;2)*
	Cinza do bagaço de cana	kg	0,025	*ash, from combustion of bagasse from sugarcane, Recicled content cut-off | ash, from combustion of bagasse from sugarcane | Cutoff, U - GLO*	*(2;1;1;2;2)*
	Transporte dos materiais (solo, cinza do bagaço de cana e cimento) à indústria de tijolo	t*km	0,001247417	*transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified | transport, freight, lorry, unspecified | Cutoff, U – RoW*	*(2;2;1;3;2)*
	Energia de compactação da mistura	J	2,059396499	*Resource / in ground*	*(4;4;1;3;2)*
	Água	kg	0,03375	*market for tap water | tap water | Cutoff, U – BR*	*(1;2;1;1;2)*
Fluxos de saída	Emissão de gases tóxicos (*)	kg	0,000566725	*waste, unspecified*	*(5;4;1;3;4)*
	Emissão de compostos voláteis (*)	kg	0,000011295	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de particulados (*)	kg	0,00535473	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de monóxido de carbono (CO) (*)	kg	0,002475	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de carbono (CO_2) (*)	kg	143,8625514	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de enxofre (SO_2) (*)	kg	0,003735	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*

(*) CPV + Cinza do bagaço de cana

Fonte: Própria autora

8. Fluxos de entradas, produção e saídas para o tijolo de solo cimento com o cimento LC^3 + incorporação da cinza do bagaço de cana (SC_8)

	Fluxo	Unid.	Quant.	Provedor	Notas Pedigree
Fluxos de entrada	Solo extraído de jazida	kg	2,250	*sand quarry operation, extraction from riverbed | sand | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;2;2)*
	Clínquer - cimento de alta resistência inicial	kg	0,12375	*clinker production | clinker | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;1;2)*
	Metacaulinita produzida industrialmente	kg	0,075	*kaolin production | kaolin | Cutoff, U – Row*	*(3;2;1;3;2)*
	Fíler produzido industrialmente	kg	0,0375	*limestone production, crushed, washed | limestone, crushed, washed | Cutoff, U – Row*	*(3;2;1;3;2)*
	Cinza do bagaço de cana	kg	0,01375	*ash, from combustion of bagasse from sugarcane, Recicled content cut-off | ash, from combustion of bagasse from sugarcane | Cutoff, U - GLO*	*(2;1;1;2;2)*
	Energia de compactação da mistura	J	2,059396499	*Resource / in ground*	*(4;4;1;3;2)*
	Transporte do dos materiais (solo, clínquer, fíler, metacaulinita e cinza do bagaço de cana) à indústria de tijolo	t*km	0,000888361	*transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified | transport, freight, lorry, unspecified | Cutoff, U – RoW*	*(2;2;1;3;2)*
	Água	kg	0,03375	*market for tap water | tap water | Cutoff, U – BR*	*(1;2;1;1;2)*
Fluxos de saída	Emissão de gases tóxicos (*)	kg	0,000324861	*waste, unspecified*	*(5;4;1;3;4)*
	Emissão de compostos voláteis (*)	kg	0,00000621	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de particulados (*)	kg	0,002946767	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de monóxido de carbono (CO) (*)	kg	0,001631597	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de carbono (CO_2) (*)	kg	79,12610371	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de enxofre (SO_2) (*)	kg	0,00205425	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*

(*) Clínquer + metacaulinita + fíler + cinza do bagaço de cana

Fonte: Própria autora

9. Fluxos de entradas, produção e saídas para o tijolo de solo cimento com o cimento CP V + incorporação da cinza do caroço de açaí (SC_9)

	Fluxo	Unid.	Quant.	Provedor	Notas Pedigree
Fluxos de entrada	Solo extraído de jazida	kg	2,250	*sand quarry operation, extraction from riverbed | sand | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;2;2)*
	Clínquer - cimento de alta resistência inicial	kg	0,225	*clinker production | clinker | Cutoff, U – BR*	*(2;1;1;3;2)*
	Cinza do caroço de açaí	kg	0,025	*esterquat production, from coconut oil and palm kernel oil | esterquat | Cutoff, U - Row*	*(5;4;1;3;4)*
	Transporte dos materiais (solo, cinza do caroço de açaí e cimento) à indústria de tijolo	t*km	0,001249392	*transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified | transport, freight, lorry, unspecified | Cutoff, U – RoW*	*(2;2;1;3;2)*
	Energia de compactação da mistura	J	2,059396499	*Resource / in ground*	*(4;4;1;3;2)*
	Água	kg	0,03375	*market for tap water | tap water | Cutoff, U – BR*	*(1;2;1;1;2)*
Fluxos de saída	Emissão de gases tóxicos (*)	kg	0,000564975	*waste, unspecified*	*(5;4;1;3;4)*
	Emissão de compostos voláteis (*)	kg	0,000011295	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de particulados (*)	kg	0,005354175	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de monóxido de carbono (CO) (*)	kg	0,002563	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de carbono (CO_2) (*)	kg	143,8625251	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de enxofre (SO_2) (*)	kg	0,003735	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*

(*) CPV + Cinza do caroço de açaí

Fonte: Própria autora

10. Fluxos de entradas, produção e saídas para o tijolo de solo cimento com o cimento LC^3 + incorporação da cinza do caroço de açaí (SC_{10})

	Fluxo	Unid.	Quant.	Provedor	Notas Pedigree
Fluxos de entrada	Solo extraído de jazida	kg	2,250	*sand quarry operation, extraction from riverbed | sand | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;2;2)*
	Clínquer - cimento de alta resistência inicial	kg	0,12375	*clinker production | clinker | Cutoff, U – BR*	*(2;2;1;1;2)*
	Metacaulinita produzida industrialmente	kg	0,075	*kaolin production | kaolin | Cutoff, U – Row*	*(3;2;1;3;2)*
	Fíler produzido industrialmente	kg	0,0375	*limestone production, crushed, washed | limestone, crushed, washed | Cutoff, U – Row*	*(3;2;1;3;2)*
	Cinza do caroço de açaí	kg	0,01375	*esterquat production, from coconut oil and palm kernel oil | esterquat | Cutoff, U - Row*	*(5;4;1;3;4)*
	Energia de compactação da mistura	J	2,059396499	*Resource / in ground*	*(4;4;1;3;2)*
	Transporte do dos materiais (solo, clínquer, fíler, metacaulinita e cinza do caroço de açaí) à indústria de tijolo	t*km	0,000885083	*transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified | transport, freight, lorry, unspecified | Cutoff, U – RoW*	*(2;2;1;3;2)*
	Água	kg	0,03375	*market for tap water | tap water | Cutoff, U – BR*	*(1;2;1;1;2)*
Fluxos de saída	Emissão de gases tóxicos (*)	kg	0,000323899	*waste, unspecified*	*(5;4;1;3;4)*
	Emissão de compostos voláteis (*)	kg	0,00000621	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de particulados (*)	kg	0,002946808	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*
	Emissão de monóxido de carbono (CO) (*)	kg	0,0013948	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de carbono (CO_2) (*)	kg	79,12608926	*emission to air/high population density*	*(2;1;1;2;1)*
	Emissão de dióxido de enxofre (SO_2) (*)	kg	0,002054525	*emission to air/high population density*	*(4;2;1;3;2)*

(*) Clínquer + metacaulinita + fíler + cinza do caroço de açaí

Fonte: Própria autora