



Universidade Federal De Pernambuco

Centro Acadêmico do Agreste - Núcleo de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

ANA CAROLINA PEREIRA DA SILVA GALINDO MOUSINHO

**ESTUDO DA IMOBILIZAÇÃO DE LODO TÊXTIL DE LAVANDERIAS DO APL DE
CONFECÇÕES DE PERNAMBUCO EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Caruaru

2024

ANA CAROLINA PEREIRA DA SILVA GALINDO MOUSINHO

**ESTUDO DA IMOBILIZAÇÃO DE LODO TÊXTIL DE LAVANDERIAS DO APL DE
CONFECÇÕES DE PERNAMBUCO EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Dissertação de Mestrado para a obtenção do título de Mestre, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste.

Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Linha de Pesquisa: Ciência dos Materiais.

Orientadora: Prof. Dr^a. Érika Pinto Marinho

Caruaru

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Mousinho, Ana Carolina Pereira da Silva Galindo.

Estudo da imobilização de lodo têxtil de lavanderias do APL de confecções de Pernambuco em tijolos de solo-cimento / Ana Carolina Pereira da Silva Galindo Mousinho. - Caruaru, 2024. 123f.: il.

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

Orientação: Érika Pinto Marinho.

Inclui referências.

1. Tijolos de solo-cimento; 2. Lodo têxtil; 3. Resíduos; 4. Materiais de construção. I. Marinho, Érika Pinto. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

ANA CAROLINA PEREIRA DA SILVA GALINDO MOUSINHO

**ESTUDO DA IMOBILIZAÇÃO DE LODO TÊXTIL DE LAVANDERIAS DO APL DE
CONFECÇÕES DE PERNAMBUCO EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Estruturas e materiais.

Aprovado em: 28/02/2024.

BANCA EXAMINADORA

ÉRIKA PINTO MARINHO – UFPE

(Presidente da banca)

ARNALDO MANOEL PEREIRA CARNEIRO – UFPE

(Examinador Externo)

ANA CECÍLIA VIEIRA DA NÓBREGA – UFRN

(Examinador Externo)

*Dedico este trabalho à Deus, pelos sonhos que Ele coloca
em meu coração e por me permitir vivê-los.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por se fazer sempre presente na minha vida e me permitir sentir seu cuidado, proteção e amor. E porque dele, por meio dele e para ele, são todas as coisas.

Ao meu esposo Fernando, por todo o esforço que dedica diariamente à nossa família. Por seu companheirismo na vida pessoal e acadêmica, por ser meu maior incentivador, por ter me mostrado meu potencial, por sempre me compreender e tornar os nossos dias mais leves. Por todos os sonhos que já realizamos e os que ainda iremos realizar, obrigada meu amor.

Aos meus pais Célio e Amparo, por todos os ensinamentos e apoio. Por sempre ter priorizado a nossa educação. Por terem me dado o maior exemplo de que com fé e perseverança, com trabalho e honestidade, somos capazes de alcançar nossos sonhos e objetivos.

A minhas irmãs Beatriz e Eduarda, por sonharem junto comigo, por todas as palavras de incentivo, pela nossa amizade, por sempre me tirarem boas risadas, pela leveza dos momentos em que estamos juntas. Deus sabia que eu precisaria de vocês, minhas meninas.

A minha avó, Maria José (*in memoriam*), por ter sido minha melhor companheira, por todas as histórias que eu adorava ouvir, por todas as orações que me ensinou, por tudo o que fez por mim, até depois de sua partida. Nunca te esquecerei, minha eterna gratidão.

A minha orientadora, Prof^a Dr^a Érika Pinto Marinho, por toda a dedicação em nossa pesquisa, por todos os ensinamentos e experiências compartilhadas. Pela sensibilidade, carinho e por todas as orientações e contribuições para o meu crescimento pessoal e profissional. Por ser uma inspiração para mim, de profissional e ser humano. Muito obrigada pelo seu apoio e incentivo.

A Prof^a Dr^a Ana Cecília Vieira da Nóbrega, que abriu minha mente e coração à pesquisa, quando tive o primeiro contato com a pós-graduação, ainda como aluna especial. Por ser fonte de admiração e inspiração. Por todas as contribuições e comentários pertinentes para a elaboração desse trabalho. Muito obrigada.

Ao Prof^o Dr^o Arnaldo Manoel Pereira Carneiro, por sua solicitude e colaboração, permitindo o uso do Laboratório de Construção Civil da UFPE/CTG, para a fabricação e ensaios tecnológicos dos tijolos.

Aos técnicos Cazuza, Rinaldo e Ezequiel do Laboratório de Construção Civil da UFPE/CTG, por serem sempre tão prestativos e atenciosos, minha gratidão. A doutoranda Priscilla Basto, pelos conhecimentos transmitidos com paciência e leveza. Ao Antônio Carlos, conhecido como Besouro, por sua colaboração na fabricação dos tijolos.

Aos técnicos dos Laboratórios de Construção Civil, Química e Geotecnia da UFPE/CAA, Ewerton, Henrique, e Valquíria, por seu auxílio e cooperação nas análises realizadas.

Ao Gutemberg, técnico do Laboratório de Geotecnia da UFPE/CTG por sua solidariedade e colaboração. Aos técnicos Danúbia, Iago, Ronaldo, Henrique e Agnes do Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) da UFPE/CTG e do Laboratório do Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (LITPEG), pelas colaborações prestadas.

A professora Nathalia, sua aluna de doutorado Heliana e a técnica de Laboratório Janaína, do Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM), pela colaboração com a pesquisa através da realização das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Aos amigos do curso de mestrado, Thaís, Márcia, Jéssica, Marco, Alessandra, Maryane e Gustavo por nossas pesquisas, trabalhos em grupo, pelos momentos de descontração, pelos conselhos e conversas, pelas aflições compartilhadas e pela torcida recíproca pelo sucesso.

Aos alunos da UFPE/CAA Kalil e Vanderlan pela disponibilização do lodo têxtil beneficiado.

A Construtora Unique, sobretudo ao Engº Thyago e ao Topógrafo Edmilson, pelo fornecimento do solo para a fabricação dos tijolos. Ao Sr. Grivaldo da Empresa Connect Eco, pela colaboração e instruções sobre tijolos de solo-cimento.

Ao Projeto Soluções tecnológicas sustentáveis para o APL de Confecções do Agreste Pernambucano (APLCAPE Sustentável), coordenado pela Profª Drª Sávia Gavazza que junto à FACEPE realizou o financiamento da Bolsa de Cooperação Técnica que propiciou o apoio financeiro para o desenvolvimento dessa pesquisa. E possibilitou o convênio com o Centro de Tecnologia e Estratégicas do Nordeste (CETENE) para a realização de análises microestruturais.

Ao PRONEX/ NUTREL III (Programa de Apoio a Núcleos de Excelência/ Núcleo de Tecnologia de Tratamento e Reuso de Efluentes e Lodos III), coordenado pelo Profº Drº Mario Kato, pela contribuição no desenvolvimento da pesquisa.

“A gravidade explica os movimentos dos planetas, mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento. Deus governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito.”

- Isaac Newton

RESUMO

Uma grande quantidade de lodo físico-químico, provenientes do processo de tratamento da água residuária do beneficiamento do jeans de lavanderias de confecções de jeans, é produzido diariamente, gerando grandes impactos ambientais. Por outro lado, muitos componentes de construção têm sido apontados pela literatura como forma adequada de solidificar e imobilizar contaminantes em resíduos sólidos. Entre eles, os tijolos de solo-cimento são interessantes por terem um processo de fabricação com menor gasto de energia e menor emissão de poluentes. Este trabalho apresenta um estudo acerca da fabricação e propriedades de tijolos de solo-cimento com incorporação de lodo têxtil (LT) provenientes de lavanderias de jeans do APL de confecções de Pernambuco, em taxas de 1% e 5% em relação à massa de solo. Foram avaliados os traços 1:10, 1:8 e 1:6 (cimento:solo) a fim de identificar a opção mais adequada para produzir os tijolos com solo local. Os tijolos produzidos foram caracterizados por ensaios físico-químicos, microestruturais, análise de desempenho tecnológico, durabilidade e lixiviação de contaminantes existentes no lodo têxtil. Os resultados obtidos mostram que, devido às características do solo da região, é necessário usar cimento CPV-ARI e traço 1:6, para obter tijolos com desempenho mecânico adequado. Os valores de resistência à compressão dos tijolos com 1% de LT foram maiores do que os tijolos de referência e apresentaram tendência de crescimento ao longo das idades estudadas (7, 14 e 28 dias), além disso se mostraram duráveis e sólidos com microestrutura homogênea. Os ensaios de lixiviação e solubilização, comprovam que não há arraste de metais contaminantes do LT. Dessa forma, a incorporação de 1% de lodo têxtil em tijolos de solo-cimento representa uma alternativa segura para uma melhor destinação deste resíduo.

Palavras-chave: Tijolos de solo-cimento; Lodo têxtil; Resíduos; Materiais de Construção.

ABSTRACT

A large amount of physical and chemical sludge from the process of treating the wastewater from jeans processing in jeans laundries is produced on a daily basis, generating major environmental impacts. On the other hand, many construction components have been identified in the literature as a suitable way of solidifying and immobilizing contaminants in solid waste. Among them, soil-cement bricks are interesting because they have a manufacturing process that uses less energy and emits fewer pollutants. This paper presents a study on the manufacture and properties of soil-cement bricks with the incorporation of textile sludge (TS) from jeans laundries in the Pernambuco clothing industry, at rates of 1% and 5% in relation to the soil mass. The 1:10, 1:8 and 1:6 (cement:soil) mixtures were evaluated in order to identify the most suitable option for producing bricks with local soil. The bricks produced were characterized by physical-chemical and microstructural tests, analysis of technological performance, durability and leaching of contaminants from the textile sludge. The results show that, due to the characteristics of the local soil, it is necessary to use CPV-ARI cement and a 1:6 mix in order to obtain bricks with adequate mechanical performance. The compressive strength values of the bricks with 1% LT were higher than the reference bricks and showed a tendency to increase over the ages studied (7, 14 and 28 days), as well as being durable and solid with a homogeneous microstructure. The leaching and solubilization tests show that there is no dragging of contaminating metals from the LT. Thus, incorporating 1% textile sludge into soil-cement bricks represents a safe alternative for better disposal of this waste.

Keywords: Soil-cement bricks; Textile sludge; Waste; Construction Materials.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tijolo de solo-cimento maciço.....	29
Figura 2 – Tijolo de solo-cimento vazado.....	29
Figura 3 – Fluxograma da metodologia adotada.	39
Figura 4 – Solo do município de Caruaru.	40
Figura 5 – Solo do município de Riacho das Almas.	41
Figura 6 – Leitões de secagem de lodo.	42
Figura 7 – Lodo ensacado para envio ao aterro sanitário.	42
Figura 8 – Lodo têxtil secando ao ar livre.....	43
Figura 9 – Lodo têxtil secando em estufa.....	43
Figura 10 – Lodo têxtil quando coletado, após a secagem e moído, sequencialmente.	43
Figura 11 – Curva granulométrica do lodo têxtil.	44
Figura 12 – Curva granulométrica por granulometria a laser do lodo têxtil.	45
Figura 13 – Solos secando ao ar livre.....	46
Figura 14 – Processo de destorroamento dos solos.	47
Figura 15 – Repartidor de amostras de solo.	47
Figura 16 – Amostra sendo preparada para o ensaio de Limite de Liquidez.	48
Figura 17 – Execução de ranhura com cinzel para o ensaio de LL.	48
Figura 18 – Cilindro de solo fragmentado em comprimento e diâmetro esperados.....	49
Figura 19 – Cápsulas com partes dos cilindros para a determinação da umidade.	50
Figura 20 – Peneiramento do solo grosso em peneira de abertura de 2,0 mm.	51
Figura 21 – Solo retido na peneira de 2,0 mm sendo lavado para retirada dos finos.....	51
Figura 22 – Solo preparado para peneiramento a abertura de 0,075 mm.	52
Figura 23 – Solo fino sendo lavado em peneira de abertura 0,075 mm.	52
Figura 24 – Solo retido após lavagem sendo retirado da peneira para secagem em estufa.....	53
Figura 25 – Peneiramento grosso em peneirador eletromecânico.	53
Figura 26 – Aferição de sedimentação com densímetro.....	54
Figura 27 – Material homogeneizado para ensaio de compactação.	55
Figura 28 – Processo de compactação do solo no cilindro.....	56
Figura 29 – Molde complementar e base do cilindro sendo removidos.....	56
Figura 30 – Rasamento do molde com régua biselada.	57
Figura 31 – Amostra sendo retirada do molde com extrator mecânico.....	57
Figura 32 – Molde na bandeja para retirada de amostras seguida do destorroamento.....	58

Figura 33 – Picnômetro vazio, solo adicionado com funil e adição de água destilada.	58
Figura 34 – Retirada do ar do interior da amostra com vacuômetro.	59
Figura 35 – Adição de água destilada no picnômetro após retirada de ar do material.	59
Figura 36 – Picnômetro limpo, cheio de água destilada para obtenção do peso 4.	59
Figura 37 – Mufla do LSA-UFPE utilizada no ensaio de perda ao fogo.....	61
Figura 38 – Espectrômetro utilizado na pesquisa para análise de FRX.	62
Figura 39 – Esquema ilustrativo do fenômeno de difração de raios-X.	63
Figura 40 – Difratorômetro utilizado na pesquisa para análise de DRX.	63
Figura 41 – Espectrofotômetro utilizado na pesquisa para análise de FTIR.	64
Figura 42 – Microscópio Eletrônico de varredura do INTM utilizado para a análise.....	65
Figura 43 – Ensaio de lixiviação das amostras de tijolo de solo-cimento com lodo têxtil.....	66
Figura 44 – Fluxograma de classificação e caracterização dos resíduos da NBR 10004.....	67
Figura 45 – Mistura em betoneira e peneiramento.	70
Figura 46 – Teste de umidade com as mãos, segundo ABCP.	71
Figura 47 – “Bolo” de mistura solo-cimento esfarelado, como descrito pela ABCP.....	71
Figura 48 – Prensa de tijolos de solo-cimento.....	72
Figura 49 – Tijolo de solo-cimento fabricado e suas medidas.	72
Figura 50 – Mistura de solo-cimento na prensa antes da compactação.....	73
Figura 51 – Tijolos recém fabricados.	73
Figura 52 – Armazenagem dos tijolos.....	74
Figura 53 – procedimento de cura dos tijolos.....	74
Figura 54 – Corte dos tijolos de solo-cimento.....	75
Figura 55 – Desmoldante aplicado em placa de vidro para receber pasta de cimento e tijolo.	76
Figura 56 – Tijolos cimentados ao meio e em uma das superfícies.	76
Figura 57 – Tijolos cimentados no meio e nas duas faces.....	77
Figura 58 – Corpos de prova identificados.....	77
Figura 59 – Corpos de prova imersos em água.	77
Figura 60 – Prensa de ensaio de resistência à compressão.....	78
Figura 61 – Tijolo disposto na prensa para início do ensaio de resistência à compressão.....	79
Figura 62 – Tijolo rompido sendo retirado da prensa.	79
Figura 63 – Tijolos dentro da estufa.....	80
Figura 64 – Estufa.	80
Figura 65 – Três grupos de corpos de prova cilíndricos a serem medidos com paquímetro....	81
Figura 66 – Curva granulométrica do solo de Caruaru-PE.	87

Figura 67 – Curva de compactação do solo de Caruaru-PE.	88
Figura 68 – Comparação da evolução da resistência à compressão em tijolos de solo-cimento e solo-cimento-lodo com inserção de lodo em percentuais de 1 e 5%.	94
Figura 69 – Comparação da evolução da absorção de água em tijolos de solo-cimento e solo-cimento-lodo com inserção em percentual de 1 e 5%.	97
Figura 70 – Difratoograma de raios-X do tijolo de solo-cimento sem lodo.	102
Figura 71 – Difratoograma de raios-X do tijolo de solo-cimento com 1% de lodo.	102
Figura 72 – Difratoograma de raios-X do tijolo de solo-cimento com 5% de lodo.	103
Figura 73 – Difratoograma de raios-X do lodo têxtil.	103
Figura 74 – Espectro infravermelho do tijolo de solo-cimento de referência.	104
Figura 75 – Espectro infravermelho do tijolo de solo-cimento com 1% de lodo têxtil.	104
Figura 76 – Espectro infravermelho do tijolo de solo-cimento com 5% de lodo têxtil.	105
Figura 77 – Espectro infravermelho do lodo têxtil.	105
Figura 78 – Fragmento de tijolo de solo-cimento sem lodo ampliado em 1000x (à esquerda) e em 5000x (à direita).	107
Figura 79 – Fragmento de tijolo de solo-cimento com 1% de lodo ampliado em 1000x (à esquerda) e em 5000x (à direita).	108
Figura 80 – Fragmento de tijolo de solo-cimento com 5% de lodo ampliado em 1000x (à esquerda) e em 5000x (à direita).	108
Figura 81 – Lodo têxtil ampliado em 1000x (à esquerda) e em 5000x (à direita).	109
Figura 82 – Espectros de absorção no UV-vis dos extratos lixiviados dos tijolos de solo-cimento, traço 1:6, produzidos com cimento CPV-ARI.	110
Figura 83 – Espectros de absorção no UV-vis dos extratos solubilizados dos tijolos de solo-cimento, traço 1:6, produzidos com cimento CPV-ARI.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação granulométrica simplificada dos grãos de solos.....	24
Tabela 2 – Tipos de tijolos e dimensões nominais.	30
Tabela 3 – Requisitos do solo para tijolos de solo-cimento, segundo NBR 10833.....	30
Tabela 4 – Composição de lodo têxtil do APL de confecções de Pernambuco.	36
Tabela 5 – Resumo de estudos com aplicação de lodos em tijolos de solo-cimento.	38
Tabela 6 – Caracterização do lodo têxtil.	44
Tabela 7 – Classificação do solo segundo a plasticidade.	50
Tabela 8 – Denominação e dosagem das misturas produzidas em argamassadeira (Lote 1). ..	68
Tabela 9 – Denominação e dosagem das misturas produzidas em betoneira (Lote 2).	69
Tabela 10 – Umidade higroscópica e Limites de Atteberg dos solos analisados.	84
Tabela 11 – Peneiramento grosso da amostra.	85
Tabela 12 – Peneiramento fino da amostra.	85
Tabela 13 – Sedimentação com defloculante.	85
Tabela 14 – Sedimentação sem defloculante.....	86
Tabela 15 – Dados do ensaio de densidade real dos grãos do solo.	88
Tabela 16 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L1A-0 aos 7 dias.	89
Tabela 17 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L1B-0 aos 7 dias.	89
Tabela 18 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2A-0 aos 7 dias.	90
Tabela 19 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2A-1 aos 7 dias.	90
Tabela 20 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2A-5 aos 7 dias.	91
Tabela 21 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-0 aos 7 dias.	91
Tabela 22 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-0 aos 14 dias.	92
Tabela 23 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-0 aos 28 dias.	92
Tabela 24 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-1 aos 7 dias.	92
Tabela 25 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-1 aos 14 dias.	93
Tabela 26 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-1 aos 28 dias.	93
Tabela 27 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-5 aos 7 dias.	93

Tabela 28 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-5 aos 14 dias.	94
Tabela 29 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-5 aos 28 dias.	94
Tabela 30 – Absorção de água média em tijolos de solo-cimento com e sem lodo têxtil.....	95
Tabela 31 – Absorção de água individual em tijolos de solo-cimento de traço 1:6 fabricados com cimento CPV-ARI.	96
Tabela 32 – Absorção de água média em tijolos de solo-cimento de traço 1:6 fabricados com cimento CPV-ARI.	96
Tabela 33 – Perda de massa nos ensaios de durabilidade de tijolos de solo-cimento (1:6) com 0, 1 e 5% de lodo têxtil.....	98
Tabela 34 – Dados do experimento e resultado do ensaio de perda ao fogo.....	99
Tabela 35 – Composições químicas do lodo têxtil por FRX.....	100
Tabela 36 – Concentrações de cátions presentes nos extratos lixiviados.....	111
Tabela 37 – Concentrações de cátions presentes nos extratos solubilizados.	112
Tabela 38 – Concentrações de ânions presentes nos extratos lixiviados.....	112
Tabela 39 – Concentrações de ânions presentes nos extratos solubilizados.	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

APL: Arranjo produtivo local

ASTM: American Society for Testing and Materials

CAA: Centro Acadêmico do Agreste

CETENE: Centro de Tecnologia e Estratégias do Nordeste

C-S-H: Silicatos de Cálcio Hidratados

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DRX: Difração de Raios-X

ETA: Estação de Tratamento de Águas

ETE: Estação de Tratamento de Esgotos

FRX: Fluorescência de Raios-X

FTIR: Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

GPEMAT: Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais da Universidade Federal de Pernambuco/Centro Acadêmico do Agreste - UFPE/CAA

ICDD: International Center for Diffraction Data

INTM: Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais

IP: Índice de Plasticidade

LITPEG: Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis

LL: Limite de Liquidez

LP: Limite de Plasticidade

ME: Método de Ensaio

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

NBR: Norma Brasileira

RCD: Resíduos de Construção e Demolição

SC: Solo-cimento

SCL: Solo-cimento-lodo

SCM: Materiais Cimentícios Suplementares

UFPE: Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	20
1.1	Objetivos	21
1.1.1	Objetivo geral	21
1.1.2	Objetivos específicos	21
1.2	Justificativa	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Tijolos de solo-cimento	23
2.1.2	Definição.....	23
2.1.3	Solo	23
2.1.4	Solo como material de construção	25
2.1.5	Estabilização dos solos	26
2.1.6	Cimento.....	27
2.1.7	Tipos de tijolos	29
2.1.8	Requisitos	30
2.1.8.1	<i>Solo</i>	<i>30</i>
2.1.8.2	<i>Cimento.....</i>	<i>31</i>
2.1.8.3	<i>Água.....</i>	<i>32</i>
2.1.8.4	<i>Aditivos</i>	<i>32</i>
2.1.8.5	<i>Fabricação e cura.....</i>	<i>32</i>
2.1.8.6	<i>Propriedades.....</i>	<i>33</i>
2.2	Destinação de resíduos industriais em tijolos de solo-cimento	33
2.3	Imobilização de resíduos	34
2.4	Lodo Têxtil	35
1.7.1	Aplicação na construção civil.....	36
2.5	Tijolos de solo-cimento com lodo.....	37
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Materiais	40
2.1.1	Solo	40
2.1.2	Cimento.....	41
2.1.3	Água.....	41
2.1.4	Lodo Têxtil (LT).....	41
3.2	Métodos.....	46

3.2.1	Caracterização do solo	46
3.2.1.1	<i>Preparação para os ensaios de caracterização e compactação</i>	46
3.2.1.2	<i>Determinação do Limite de Liquidez</i>	48
3.2.1.3	<i>Determinação do Limite de Plasticidade</i>	49
3.2.1.4	<i>Determinação do Índice de Plasticidade</i>	50
3.2.1.5	<i>Análise granulométrica</i>	50
3.2.1.6	<i>Ensaio de compactação</i>	55
3.2.1.7	<i>Densidade real dos grãos</i>	58
3.2.2	Caracterização do lodo	60
3.2.2.1	<i>Granulometria a Laser</i>	60
3.2.2.2	<i>Perda ao Fogo</i>	61
3.2.2.3	<i>FRX</i>	61
3.2.2.4	<i>DRX</i>	62
3.2.2.5	<i>FTIR</i>	64
3.2.2.6	<i>MEV</i>	64
3.2.2.7	<i>Lixiviação</i>	65
3.2.2.8	<i>Solubilização</i>	66
3.2.3	Dosagem dos tijolos de solo cimento	68
3.2.4	Confecção dos tijolos.....	69
3.2.5	Cura dos tijolos	74
3.2.6	Ensaio de resistência a compressão	75
3.2.7	Ensaio de absorção de água	80
3.2.8	Ensaio de durabilidade.....	81
3.2.9	Ensaio de solubilização e lixiviação dos tijolos.....	82
3.2.10	Análise microestrutural dos tijolos	82
3.2.11	Perda ao fogo	83
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
4.1	Ensaio de caracterização do solo	84
4.1.1	Umidade higroscópica e Limites de Atteberg	84
4.1.2	Determinação do Índice de Plasticidade.....	85
4.1.3	Análise Granulométrica	85
4.1.4	Ensaio de Compactação	87
4.1.5	Determinação da densidade real dos grãos.....	88

4.2	Ensaio tecnológico dos tijolos	89
4.2.1	Ensaio de resistência à compressão	89
4.2.2	Ensaio de absorção de água	95
4.2.3	Ensaio de durabilidade.....	98
4.3	Caracterização microestrutural do lodo têxtil e dos tijolos	99
4.3.1	Perda ao fogo	99
4.3.2	FRX	99
4.3.3	DRX.....	101
4.3.4	FTIR.....	104
4.3.5	MEV	107
4.4	Ensaio de solubilização e lixiviação	109
5.	CONCLUSÕES.....	114
REFERÊNCIAS		116

1. INTRODUÇÃO

A expansão do APL de Confeccões de Pernambuco desencadeou alguns problemas ambientais associados aos processos industriais para beneficiamento das peças de jeans. (Silva *et al.* (2012).

O beneficiamento do jeans é a etapa essencial desta cadeia produtiva, e visa o tingimento das peças a fim de produzir novas colorações e efeitos especiais nos tecidos, tornando-os comercialmente mais atrativos e lucrativos. Esse processo ocorre por via úmida e requer muitos insumos químicos. Com isso, observam-se vários impactos ambientais devido ao elevado consumo de água, biomassa para aquecimento das caldeiras e geração de efluentes sólidos, líquidos e gasosos. É gerado um volume expressivo de efluente a ser tratado adequadamente para fins de destinação ou reuso industrial, *in situ* (Silva Filho *et al.*, 2021).

As tecnologias de tratamento de efluentes advindos dos processos de beneficiamento do jeans, adotadas na região do APL de confecções empregam processos físico-químicos que floculam, coagulam e precipitam os contaminantes presentes na fase aquosa em uma forma de poluição sólida ou semissólida, denominada de lodo têxtil (Queiroga *et al.*, 2019).

Este lodo têxtil (LT) tem sido um importante poluente ambiental regional, uma vez que a sua destinação final, ainda consiste no seu descarte clandestino em terrenos abandonados ou lixões. Entretanto, em função da grande diversidade de corantes e outros produtos químicos, trata-se de um resíduo com grande potencial poluidor para solos e água (Santos, 2019).

De acordo com Silva Filho *et al.* (2021) após um levantamento de dados com os órgãos fiscalizadores, o Instituto de Tecnologia do Estado de Pernambuco (ITEP), a Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (CPRH), a Vigilância Sanitária Municipal de Caruaru-PE e a Promotoria de Justiça da Comarca de Caruaru, foram contabilizadas um total de 144 Lavanderias de jeans no município de Caruaru. Segundo os dados do Painel da Geração de Resíduos no Brasil (IBAMA, 2023), o município de Caruaru, gerou no ano de 2019 o volume de 108,4 toneladas de lodo têxtil, e embora esse volume seja bastante expressivo, representa um dado mascarado, uma vez que a inserção dos dados nesta ferramenta governamental é realizado pelas empresas que compõem o setor, e neste caso foram contabilizadas apenas 17 empresas. Por isso acredita-se que o lodo têxtil gerado por todas as lavanderias existentes é ainda maior.

Nesse contexto, o grupo de pesquisa GPEMAT (Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), do Campus Acadêmico do Agreste (CAA), tem desenvolvido pesquisas em valorização de resíduos de lavanderias de jeans com

lodo físico-químico em materiais de construção, já tendo abrangido materiais cimentícios (Leloup, 2013), cerâmica vermelha (Veiga, 2019), materiais asfálticos (Moura *et al.*, 2021) e geopolímeros. A valorização dos resíduos visa não só redução de custos e desenvolvimento de materiais de construção ambientalmente amigáveis, mas também a imobilização dos resíduos.

Tem-se observado que apesar de resultados promissores, sabe-se que quando se trata de materiais cimentícios, a incorporação de resíduos interfere em suas reações químicas de hidratação. Ao se voltar para materiais sinterizados, como a cerâmica vermelha ou a pirólise do lodo têxtil, por exemplo, se acaba por transferir o potencial poluidor das matrizes sólidos e líquidos para a emissões atmosféricas.

Segundo Fernandes *et al.* (2022), o tijolo de solo-cimento proporciona mais agilidade e resistência à obra, além de gerar uma economia de 20 a 40% em relação ao tijolo convencional. E em virtude de não possuir processo de queima em sua fabricação, reduz significativamente a emissão de gases poluentes, apresentando baixo índice de poluição. Diante disso, torna-se promissor investigar a incorporação do Lodo Têxtil, prioritário gerado no APL de Confecções Pernambucanos em matrizes de base terra crua.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver e avaliar o desempenho de tijolos de solo-cimento com lodo têxtil (LT) prensados e avaliar a capacidade de imobilização do lodo das estações de tratamento das lavanderias de jeans da região do APL de confecções, na matriz do tijolo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar os efeitos do lodo têxtil (LT) físico-químico das lavanderias de jeans nas propriedades dos tijolos de solo-cimento;
- Realizar ensaios de lixiviação e solubilização nos tijolos de solo-cimento produzidos a fim de investigar a segurança desta tecnologia para a imobilização dos contaminantes do lodo têxtil;
- Realizar ensaios microestruturais para compreender o mecanismo de interação do lodo têxtil na matriz do tijolo de solo-cimento.

1.2 Justificativa

A destinação final do lodo têxtil (LT) resultado do processo de tratamento de efluentes gerados pelas lavanderias, nos processos de confecção dos jeans, é complexa e dispendiosa. Quando os resíduos industriais apresentam componentes com potencial tóxico, a sua destinação deve garantir que os mesmos estejam estáveis e não possam ser arrastados para o solo ou aquíferos.

O processo de destinação de resíduos em materiais de construção é uma tecnologia viável para resíduos industriais e visa sua imobilização numa matriz sólida com aplicação civil. A imobilização de resíduos tem como objetivos reduzir a mobilidade dos metais e compostos orgânicos através da imobilização físico-química, melhorar as características físicas por meio da solidificação do resíduo e diminuir a superfície de exposição para evitar a lixiviação dos constituintes do resíduo (Silva, 2007).

Alguns materiais de construção como produtos de cimento Portland e cerâmica vermelha têm sido apontados como formas adequadas para imobilizar resíduos industriais e lodos de Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), uma vez que os contaminantes podem ser fixados físico-quimicamente, e assim serem aproveitados como produtos de baixo custo (Mine *et al.*, 2019).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2000) o solo a ser utilizado na mistura do preparo de tijolos de solo-cimento pode ser extraído do próprio local da obra, logo os tijolos à base de terra estabilizada com cimento têm potencial para serem facilmente produzidos na própria lavanderia de jeans, bem como em parcerias com cooperativas para produção de casas em comunidades do entorno, espaços públicos, bem como espaços industriais. Assim, o uso de tijolos de solo-cimento pode compor um ciclo de destinação do lodo têxtil do APL para minimizar o problema de descarte incorreto deste resíduo que por muitas vezes são despejados em terrenos baldios e lixões, além de reduzir as dificuldades de moradia na região.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tijolos de solo-cimento

2.1.2 Definição

Os tijolos de solo-cimento são materiais produzidos por mistura de solo e cimento prensado, considerados crus, por não existir queima em seu processo de fabricação, diferenciando-os dos tijolos cerâmicos, e assim diminuindo o consumo de energia e consequentemente, evitando desmatamentos e poluição atmosférica. O assentamento desses tijolos não é realizado com argamassa como os tijolos convencionais, mas com uma cola especial (Sala, 2006).

A NBR 8491 define tijolos de solo-cimento como componente de alvenaria formado por uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água e, em algumas situações, aditivos e/ou pigmentos em proporções que permitam atender aos requisitos desta Norma, cuja altura (H) seja menor que sua largura (L), podendo ser maciço ou vazado (ABNT, 2017).

2.1.3 Solo

Toledo (2005) define solo como o produto do intemperismo (desagregação e decomposição) e da pedogênese (reorganização) e também da erosão, transporte e sedimentação de rochas. E que representam a relação entre a vida e a litosfera, uma vez que a vida se nutre dos elementos químicos liberados na água e nos solos por meio da decomposição das rochas. Os materiais gerados a partir dos processos de intemperismo e pedogênese, podem constituir recursos minerais, como concentrações de ferro e alumínio, muito comuns no clima tropical. Assim como, também podem constituir recursos para a agricultura e como material de construção.

No processo de decomposição química, a água atua como principal agente, podendo provocar oxidação, hidratação e carbonatação, além dos mecanismos de ataque dos efeitos químicos das vegetações, formando como produto do processo a argila. Já a decomposição mecânica ocorre por meio de agentes como água, temperatura e vegetação formando pedregulhos e areias, siltes e em algumas circunstâncias argila (CAPUTO, 1988).

Segundo Santos *et al.* (2018) o solo é um conjunto de corpos naturais, que ocupa a maior parte das superfícies continentais no Planeta, constituído de materiais minerais e orgânicos, com partes sólidas, líquidas e gasosas, são tridimensionais, contém matéria viva, podem apresentar vegetação e eventualmente podem ser modificados por interferências antrópicas.

De acordo com Toledo (2005), uma característica muito marcante do solo é a cor, que muda de acordo com sua composição. A matéria orgânica colore o solo em tons escuros de cinza, marrom e preto. Já os carbonatos de cálcio e outros sais, colore o solo de branco. Os produtos ferruginosos colore o solo de diversas tonalidades a depender do seu estado, da estrutura formada, e da hidratação, podendo apresentar cores como cinza, amarelo, laranja, marrom e vermelho. A cor preta é indicação de produtos de manganês em presença no solo.

Os solos também são caracterizados de acordo com sua textura e granulometria que dizem respeito as diferentes dimensões presentes no solo, argila (mais fino) e silte e areia (mais grosso). Essa diferença pode ser percebida facilmente pelo tato, ao esfrega-lo entre os dedos, se a sensação for um solo mais macio, a argila é predominante. Já se neste caso, a sensação for de aspereza, trata-se de um solo com silte e areia em maiores quantidades. Além disso, as partículas também são classificadas por seu tamanho ou granulometria, como indicado na Tabela 1 (TOLEDO, 2005).

Tabela 1 – Classificação granulométrica simplificada dos grãos de solos.

Fração granulométrica	Dimensão
Matacão	> 256 mm
Seixo	64 - 256 mm
Cascalho	4 - 64 mm
Grânulo	2 - 4 mm
Areia	0,062 - 2 mm
Silte	0,004 - 0,062 mm
Argila	< 0,004 mm

Fonte: Toledo (2005).

Segundo Pejon e Rodrigues (2015), existem diversos métodos para a obtenção da distribuição granulométrica dos solos, como atenuação de raios X, difração a laser, peneiramento e análise granulométrica conjunta. A última é a técnica mais utilizada no Brasil normatizada pela NBR 7181 (ABNT, 2018a).

O solo é constituído por três fases, sólida (partícula sólida), líquida (água) e gasosa (ar). A composição química dos solos é formada por minerais como silicatos (feldspato, mica,

quartzo, serpentina, clorita, talco), óxidos (hematita, magnetita, limonita), carbonatos (calcita, dolomita) e sulfatos (gesso, anidrita). Estes minerais consistem nos mesmos encontrados nas rochas de origem e os demais que são produto das decomposições (CAPUTO, 1988).

2.1.4 Solo como material de construção

De acordo com Santiago (2001), pelo menos um terço da população mundial atual vive em construções de base de terra crua como material principal. Dentre as tantas possíveis utilizações do solo em construções, pode-se citar os blocos compactados, taipa de pilão, paredes inteiriças de solo-cimento, piso de terra batida, adobe, rebocos e argamassas, como os mais usuais no Brasil.

Segundo Botinas (2017), a utilização de solo como material de construção pode trazer benefícios como bom comportamento térmico, bom isolante acústico, capacidade de regular a umidade do ar em virtude de sua porosidade e composição de argila, matéria prima abundante e geralmente disponível no local da obra, resistência ao fogo em a razão da terra ser um material incombustível, além de todos os benefícios sustentáveis como menor gasto energético e emissão de poluentes, assim como o reaproveitamento de resíduos do processo de construção.

Apesar de tantos benefícios, a utilização do solo como material de construção ainda abrange algumas limitações como a durabilidade e resistência mecânica prejudicadas em presença de água, considerável fragilidade a esforços de tração e flexão limitando as construções de edifícios a até dois pavimentos, retração durante o processo de secagem que pode causar fissuras, pouca regulamentação específica para o uso desse método construtivo (Botinas, 2017).

Apesar do solo ser utilizado pelo homem em suas construções desde os tempos mais antigos, hoje em dia com o aparecimento de novos materiais como o concreto e o aço que prometem mais resistência, qualidade e conforto, aliado ao crescimento desses novos métodos construtivos, as construções de terra acabaram sendo associadas a uma imagem de pobreza e deixando de serem usadas, além destes motivos, também por falta de informação sobre resistência e processos construtivos do solo. Em razão disso e visando uma ferramenta alternativa para mitigar os problemas ambientais de nível mundial, hoje tem sido elaborados trabalhos e pesquisas a fim de investigar e melhorar o desempenho de solos como material de construção em relação aos demais materiais mais comumente utilizados, visando atingir bons resultados de durabilidade, conforto, economia e sustentabilidade (Botinas, 2017).

Dentre as utilizações do solo como material de construção, Sabino *et al.* (2022) citam como uma técnica e material de baixo impacto ambiental, o tijolo de solo-cimento, por não necessitar de queima, evitando a liberação de gases prejudiciais ao meio ambiente, além de ter a vantagem de ter matéria prima abundante na natureza.

2.1.5 Estabilização dos solos

De acordo com a ABCP (2000), o tijolo de solo-cimento é uma alternativa de material para construção de alvenaria, de resistência a compressão similar a tijolos cerâmicos, que pode ser mais elevada quanto maior for a quantidade de cimento empregada na mistura. Para usos na construção civil, o solo precisa passar por critérios, necessitando de sua estabilização.

A estabilização do solo consiste em tratamentos no solo natural que propiciam maior resistência a deformação, diminuindo suas variações de volume e tornando-o apto a ser usado como material de construção (Presa, 2011).

Segundo Ingles e Metcalf (*apud* Grande, 2003), a estabilização do solo garante ao produto final, aumento da resistência à compressão, diminuição da permeabilidade e aumento da durabilidade do material. Esta estabilização pode ser mecânica, onde o solo é compactado através da aplicação de uma energia física, que consiste na correção da granulometria do solo, otimizando o empacotamento dos grãos e química, quando outros tipos de materiais são adicionados ao solo, causando reações que aglutinam os grãos.

Presa (2011) afirma que o cimento é um dos principais estabilizadores minerais para a utilização em solos e que quanto mais argiloso for o solo, maior será a quantidade de cimento necessário para a sua estabilização.

Nos tijolos de solo-cimento, os grãos do solo são envolvidos pelo cimento, que age como estabilizante no solo, formando agregados que aumentam de tamanho durante o processo de hidratação e cristalização do cimento. Aliado a este processo, há a estabilização mecânica por meio da compactação, que resulta em ganhos de resistência, menor permeabilidade e menor ação de agentes de intemperismo (Presa, 2011).

De acordo com Entheiche (*apud* Presa, 2011), a estabilização do solo pode ocorrer de quatro formas. A mecânica, também chamada de compactação, que é obtida por meio de equipamentos que proporcionam o rearranjo das partículas. A física que por meio da adição de fibras, mistura de grãos ou tratamento químico, alteram a textura do solo. A química, que pela adição e reação de produtos químicos, alteram as características do solo. E a mista consiste na combinação de uma ou mais formas de estabilizações.

Segundo Presa (2011), o tipo de prensa utilizada na fabricação de tijolos de solo-cimento interfere diretamente na compactação. No mercado existem as prensas manuais e hidráulicas, sendo as hidráulicas capazes de transferir pressão de conformação muito maior do que as manuais, produzindo tijolos mais resistentes.

De acordo com Silva (2005), uma das formas de controle da compactação e consequentemente da estabilização em tijolos de solo-cimento, é por meio do conhecimento da umidade ótima de compactação do solo, pois a quantidade de água adicionada a mistura interfere diretamente na resistência do tijolo de solo-cimento.

2.1.6 Cimento

A Norma Brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018b) define o cimento como um “ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos nesta Norma”.

O processo de fabricação do cimento de maneira simplificada pode ser descrito com o aquecimento a 1450°C do calcário e argila moídos, para a formação do clínquer, que em seguida é misturado ao sulfato de cálcio, e passados por moagem para a formação do cimento (TAYLOR, 1997).

O clínquer do cimento é composto por quatro fases principais, a alita, a belita, o aluminato tricálcico e o ferroaluminato tetracálcico, respectivamente C_3S ($3CaO.SiO_2$), C_2S ($2CaO.SiO_2$), C_3A ($3CaO.AlO_3$) e C_4AF ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) (Souza *et al.*, 2015). Sendo a alita o principal componente por apresentar-se em maior quantidade na mistura (em percentual de 50% a 70%), além de dominar o período inicial de hidratação do cimento sendo responsável por fornecer a resistência até os 28 dias de idade e ser o componente de principal importância na formação do Silicato de Cálcio Hidratado, o C-S-H (principal produto de hidratação) (Bullard *et al.*, 2011).

O período de três horas após o início da hidratação da alita (C_3S) é chamado de indução, que apresenta uma taxa de hidratação rápida nos primeiros minutos e que rapidamente baixa. Neste período há pouco crescimento de C-S-H. Após o final do período de indução ocorre o principal pico de evolução de calor, num período a partir de três horas do início da hidratação, até vinte e quatro horas. É nesse momento que o C-S-H e a portlandita começam a crescer rapidamente, quando as taxas de Ca e Si são elevadas, e o sistema se move para um equilíbrio mais dinâmico (Scrivener *et al.*, 2019).

Os SCM's (materiais cimentícios suplementares) têm sido amplamente utilizados nos compósitos cimentícios na engenharia civil, em razão de seus efeitos benéficos na microestrutura, propriedades e durabilidade (Phung *et al.*, 2021). Paris *et al.* (2016) apresentaram um compilado de trabalhos onde diversos resíduos como cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, cinzas de casca de arroz, cinzas de biomassa de resíduos de madeira, e resíduos de vidro tem potencial para serem empregados como SCM's.

Durante o período de aceleração, os SCM's aumentam a taxa de reação da alita. Após vinte e oito horas contadas a partir do início da hidratação o cimento, os SCM's começam a ter um benéfico efeito de preenchimento na mistura, por fornecer mais espaço no sistema para a formação de hidratos, e também por atuar como local para o crescimento destes compostos (Scrivener *et al.*, 2019).

Uma das preocupações ao se inserir resíduos em materiais de construção é o potencial de lixiviação (processo de arraste de elementos químicos em meio aquoso). Li e Wang (2006) estudaram os processos de encapsulamento de contaminantes radioativos de um resíduo no concreto. De acordo com os autores a lixiviação é determinada por propriedades como o teor de água, a estrutura dos poros a homogeneidade e a condutividade hidráulica. Portanto métodos como a redução da relação água-cimento, a moldagem por compressão e pintura de superfície, podem favorecer a minimização de poros podem ser eficazes para conter mecanicamente os resíduos sólidos.

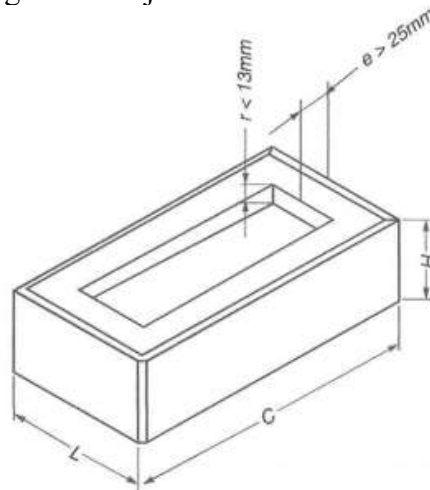
De acordo com (Heidarzadeh *et al.*, 2017) o cimento é um importante agente para a imobilização de contaminantes perigosos, gerando uma matriz sólida pode aprisionar diversos tipos de resíduos, como sedimentos, lodos, metais pesados e compostos orgânicos tóxicos. Mas atenta que há preocupações com a utilização de cimento para estes fins de imobilização em compostos orgânicos, uma vez os compostos podem lixiviar após o tratamento, além de poderem ocasionar efeitos adversos na cura e na estabilidade química do cimento.

De acordo com Zhou *et al.* (2006), o Cimento Portland é muito utilizado para a imobilização de uma grande variedade de resíduos, por agir como uma barreira para a migração de íons e conter baixa permeabilidade a líquidos e gases no estado endurecido.

2.1.7 Tipos de tijolos

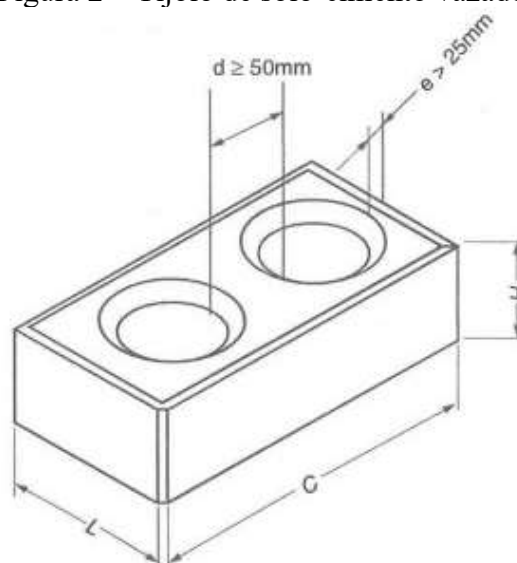
A NBR 8491, classifica os tijolos de solo-cimento maciço por “tijolo cujo volume seja igual ou superior a 85% do seu volume total aparente, podendo apresentar reentrâncias em uma das faces maiores” e no caso de apresentarem estas reentrâncias, estas devem ter profundidade de no máximo 13 mm e distância mínima de 25 mm das arestas, como representado na Figura 1. Já os tijolos vazados são descritos como portando com furos verticais e de volume total inferior a 85% do volume total aparente, devendo apresentar espessura mínima de 25 mm das paredes no seu entorno e espessura mínima entres os furos de 50 mm, este modelo de tijolo está representado na Figura 2 (ABNT, 2017).

Figura 1 – Tijolo de solo-cimento maciço.



Fonte: SAHARA (2021).

Figura 2 – Tijolo de solo-cimento vazado.



Fonte: SAHARA (2021).

Conforme NBR 8491 (ABNT, 2017) os tijolos de solo-cimento devem possuir formato externo de um paralelepípedo retangular. O comprimento do tijolo (C) é a maior dimensão da face de assentamento, a largura (L) é a menor dimensão da face de assentamento e a altura (H) condiz a distância das faces de assentamento, como é possível verificar nas Figuras 1 e 2.

A NBR 8491 (ABNT, 2017) também classifica estes tijolos por suas dimensões nominais, representadas na Tabela 2. Os tijolos podem apresentar dimensões diferentes das citadas na Tabela 2, desde que permaneça com a altura (H) menor do que a sua largura (L).

Tabela 2 – Tipos de tijolos e dimensões nominais.

Tipos	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
A	200	100	50
B	240	120	70

Fonte: ABNT (2017).

2.1.8 Requisitos

A NBR 10833 (ABNT, 2013a) e a NBR 8491 (ABNT, 2017) listam requisitos que vão desde os materiais até a produção de tijolos de solo-cimento.

2.1.8.1 Solo

A NBR 10833 (ABNT, 2017) determina alguns requisitos para o solo a ser utilizado para a produção de tijolos de solo-cimento. Sobre a granulometria, o solo deve passar 100% na peneira de abertura 4,75 mm (Nº 4) e de 10% a 50% na peneira com abertura de malha de 0,075 mm (Nº 200). O limite de liquidez deve ser menor ou igual a 45% e o limite de plasticidade menor ou igual a 18%. Também é relatado que o solo não deve conter matéria orgânica em valores que prejudique a hidratação do cimento. Estes requisitos estão compilados na Tabela 3.

Tabela 3 – Requisitos do solo para tijolos de solo-cimento, segundo NBR 10833.

Requisitos	NBR 10833
Porcentagem passante na peneira 4,8 mm (Nº4)	100%
Porcentagem passante na peneira 0,075 mm (Nº200)	10% a 50%
% Impurezas orgânicas	0%
Limite de Liquidez (LL)	≤ 45%
Limite de Plasticidade (LP)	≤ 18%
Índice de Plasticidade (IP=LL-LP)	≤ 27%

Fonte: Autora (2024)

As normas a serem utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização dos solos são as seguintes: NBR 6457 (ABNT, 2024), NBR 6459 (ABNT, 2016a), NBR 7180 (ABNT, 2016b) e NBR 7181 (ABNT, 2017b).

2.1.8.2 Cimento

De acordo com a NBR 10833, o cimento Portland utilizado para tijolos de solo-cimento pode ser de qualquer tipo, desde que atenda as especificações de suas respectivas normas (ABNT, 2017b).

Apesar da NBR 10833 (ABNT, 2013a) admitir os mais diversos tipos de cimento Portland para a fabricação de tijolos de solo-cimento, é visto que cada tipo desse material pode ocasionar propriedades distintas no produto final. No estudo de Grande (2003), dois tipos de cimento foram analisados em aplicação em tijolos de solo-cimento com adição de sílica ativa. O CP II-E-32 por apresentar maior disponibilidade local de realização da pesquisa (município de São Carlos – SP), além de apresentar ganho de resistência mais lento, podendo ser avaliado por maiores idades. E o cimento CP V-ARI, por ser mais alcalino, pode atacar a fração argilosa do solo, produzindo mais C-S-H, possibilitando uma maior compacidade do material, apesar de não ser um cimento ambientalmente correto.

Foram realizados estudos de resistência à compressão e absorção de água em tijolos produzidos com os dois tipos de cimento no traço 1:7. A resistência à compressão na idade de 7 dias, foi de 2,31 MPa e 5,25 MPa, para os cimentos CP II-E-32 e CP V-ARI, respectivamente. A absorção de água também apresentou melhoras quando da utilização do cimento CP V-ARI, num valor de 10,3% para 12,4% do cimento CP II-E-32, aos 7 dias. Na idade de 28 dias, o cimento CP V-ARI também apresentou melhores resultados de resistência à compressão e absorção de água comparado ao CP II-E-32. As propriedades estudadas no tijolo com cimento CP V-ARI aos 28 dias foram melhores do que os tijolos com cimento CP II-E-32 aos 91 dias. Nesta idade, a resistência à compressão apresentou um valor de cerca de 23% maior e a absorção de água teve um resultado 15% menor, nos tijolos com uso do cimento CP V-ARI (GRANDE, 2003).

Ainda sobre a utilização do cimento CP V-ARI em tijolos de solo-cimento, conclui-se:

A utilização de cimentos com elevada saturação de cal, além de neutralizar os efeitos nocivos da presença de matéria orgânica, pode promover um ambiente químico instável e alcalino (pH elevado) na interface dos grãos de solo com a pasta de cimento e acarretar, aliada a outros fatores como disponibilidade de água e altas temperaturas,

o ataque à sílica e à alumina da fração argilosa do solo, formando silicatos e aluminatos estáveis e de grande contribuição para o ganho de resistência do material. Essas reações ocorrem por longos períodos e a utilização desse tipo de cimento pode ser benéfica em solos argilosos (Grande, 2003).

2.1.8.3 Água

A água de amassamento para tijolos de solo-cimento “deve ser isenta de impurezas nocivas a hidratação do cimento” (ABNT, 2017b).

2.1.8.4 Aditivos

Sobre o uso de aditivos, a NBR 10833 ressalta que “É permitido o uso de aditivos, de acordo com a ABNT NBR 11768, e de pigmentos, desde que o produto final atenda aos requisitos físicos-mecânicos para os tijolos de solo-cimento prescritos nas premissas estabelecidas na ABNT NBR 8491 ou na ABNT NBR 10834” (ABNT, 2017b).

A NBR 11768 (ABNT, 2019) especifica os requisitos para a utilização de aditivos em concretos de cimento Portland. Há uma grande variedade de aditivos mencionados como possível utilização, onde cada um é capaz de proporcionar alguma característica específica desejada para o concreto em seu estado fresco ou endurecido. Esses aditivos, que também podem ser usados em tijolos de solo-cimento, são: redutores de água, controlador de hidratação, acelerador de pega, acelerador de resistência, compensador de retração, redutor de retração, incorporador de ar, redutor de corrosão, modificador de viscosidade, retentor de água, modificador de viscosidade antissegregante, redutor de absorção capilar, redutor de permeabilidade, aditivos para concreto vibro prensado.

2.1.8.5 Fabricação e cura

De acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2013a), a moldagem dos tijolos de solo-cimento a serem ensaiados por resistência à compressão e absorção de água, devem ser produzidos em num total de 20 unidades por traço, para cada idade que se deseja estudar e curados por 7 dias, onde devem ser umedecidos constantemente com regador para permanecer úmidos a fim de garantir a cura necessária, a (ABCP, 2000) ainda recomenda que sejam cobertos com lona para os casos onde não é possível a molhagem frequente dos tijolos. Destes 20 tijolos, 10 devem ser

escolhidos aleatoriamente, dos quais 7 serão avaliados por resistência a compressão e os 3 restantes, por absorção de água (ABNT, 2013a).

2.1.8.6 Propriedades

Segundo a NBR 8491 (ABNT, 2017), todos os tijolos ensaiados devem ser submetidos a análise de resistência a compressão com idade mínima de 7 dias, não podem obter média inferior a 2,0 MPa, nem valor individual inferior a 1,7 MPa. Para as amostras ensaiadas por absorção de água com idade mínima de 7 dias, a média dos valores deve ser menor do que 20% e os valores individuais não devem apresentar valores maiores do que 22%.

2.2 Destinação de resíduos industriais em tijolos de solo-cimento

Está se tornando cada vez maior a procura por materiais de construção que causem menor impacto ambiental, diminuindo a emissão de poluentes atmosféricos, que apresentem bom custo benefício e em que possam ser adicionados resíduos e ainda assim cumprindo os requisitos técnicos das Normas em vigor (Silva *et al.*, 2022).

Os mais diversos resíduos estão sendo estudados como inserção em materiais de construção, na busca de encontrar um potencial de utilização e descarte consciente. Os tijolos de solo-cimento estão sendo bem utilizados por serem de terra crua, o que diminui o extrativismo de matérias primas e reduz custos energéticos, reduzindo impactos na cadeia da construção civil.

Resíduos inorgânicos da indústria de celulose chamados *grits*, que provém de um processo de recuperação química foram adicionados em tijolos de solo-cimento em substituição em até 30% do cimento em várias porcentagens. Com isso foi verificado que este resíduo pode ser adicionado nos tijolos de forma segura, econômica e sustentável numa porcentagem de até 20% (SIQUEIRA; HOLANDA, 2013).

Resíduos poliméricos, de pneus e polietileno tereftalato (PET), foram adicionados em tijolos de solo-cimento numa porcentagem de 1,5% e 3%. Os resultados apontaram ganhos nas propriedades na inserção de 1,5%. Já na porcentagem de 3%, os resíduos provocaram uma redução da resistência a compressão e aumento na absorção de água (Metzker *et al.*, 2022).

Resíduos de construção e demolição (RCD) foram adicionados em tijolos cimento em porcentagens de até 100% em relação a massa de solo e variando-se as porcentagens de cimento em até 10%. Os melhores resultados foram obtidos para uma porcentagem de 4% de cimento e

com no mínimo 20% de RCD, uma vez que foi verificado que o aumento da inserção do resíduo ocasionou melhorias nas propriedades dos tijolos, podendo ser usado em até 100% (Segantini e Wada, 2011).

Silva *et al.* (2014) estudaram as propriedades de tijolos de solo-cimento com inserção de resíduos cerâmicos. Os melhores resultados foram obtidos com uma porcentagem de 4% do resíduo e 12% de cimento na mistura.

Rejeitos de mineração de quartzito foram utilizados para a confecção de tijolos de solo-cimento (Reis *et al.*, 2020). Verificou-se que este resíduo pode ser adicionado numa porcentagem de até 30% no solo, o que ocasionou perdas nas propriedades do material, mas ainda foram alcançados resultados que seguem os requisitos das normas, apresentando assim potencial de uso.

Embora que, em algumas pesquisas os resultados das propriedades dos tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduos, não atendam aos requisitos normativos, é importante salientar que alguns fatores podem influenciar nisto, por exemplo o tipo de resíduo, se orgânico ou inorgânico, a forma de incorporação de cada componente na mistura, seja por adição ou substituição parcial, ou os tipos de solo e cimento utilizados, ou a umidade da mistura no momento da moldagem, o tipo de prensa utilizada e a aplicação da força durante a prensagem em casos de prensas manuais, o método de mistura e a quantidade de água adicionada, dentre tantas outras fontes de variações, que exprimem a variedade e potencialidade do tijolo de solo-cimento (Silva *et al.*, 2022).

2.3 Imobilização de resíduos

Existem muitos tipos de resíduos já estudados em tijolos de solo-cimento, mas os resíduos com potencial contaminante requerem mais atenção. De acordo com Silva (2007), os resíduos podem ser orgânicos, inorgânicos, ou uma mistura deles.

Os resíduos inorgânicos são considerados perigosos porque podem conter em sua composição metais pesados, que devido a sua resistência à biodegradação podem se acumular na cadeia alimentar e acarretar problemas ambientais a diferentes ecossistemas e a vida humana Silva (2007). De acordo com Nakano e Avila-Campos (2023) os metais pesados como o chumbo, o arsênio, o mercúrio, e o cádmio podem manifestar efeitos tóxicos em todo o organismo, causando alterações nos processos bioquímicos.

Segundo Ramos *et al.* (2020) a presença de um alto teor de orgânicos de efluentes, podem acarretar em uma rápida multiplicação de bactéria heterotróficas, se despejados sem

tratamento em corpos hídricos, comprometendo a vida aquática. Além disso, os corantes presentes em efluentes têxteis também são preocupantes devido ao potencial de provocar câncer ou mutações e por também comprometerem a quantidade de oxigênio no ambiente aquático.

Após análises de resistência a compressão, absorção de água, lixiviação entre outras, para o resíduo de lodo têxtil em misturas de lodo-cimento, Pietrobon *et al.* (2004) concluíram que o cimento é capaz de imobilizar o lodo têxtil que continha um teor de 50% de matéria orgânica.

De acordo com Leloup (2013) metais pesados podem ser imobilizados com o cimento como agente ligante, seu estudo comprovou isso pelo não arraste destes elementos nos ensaios de lixiviação e solubilização em misturas de lodo têxtil em argamassas cimentícias.

As misturas de solo-cimento também são uma excelente forma de imobilização de contaminantes, uma vez que o cimento reage quimicamente tornando o ambiente alcalino, elevando o pH do composto e diminuindo a solubilidade dos contaminantes e fisicamente, com a cimentação das partículas que diminui a mobilidade do contaminante na mistura (Rojas, 2015).

A incorporação de resíduos em tijolos de solo-cimento, deve estar atrelada a preocupação acerca da imobilização, portanto, observa-se a importância das análises de lixiviação e solubilização nessas misturas.

2.4 Lodo Têxtil

Segundo Moura *et al.* (2021b), o lodo têxtil consiste no produto do tratamento físico-químico dos efluentes gerados por lavanderias têxteis. Este resíduo é amplamente gerado pelas lavanderias de jeans do APL do Agreste de Pernambuco que tem como principais membros os municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama.

O APL de confecções de Pernambuco se destaca por ser composto por micro e pequenas empresas que produzem variados tipos de confecção, que compõem lavanderias de beneficiamento de jeans, que em seu funcionamento são responsáveis pela geração de vários tipos de resíduos incluindo o lodo têxtil, que em muitas situações são descartados de forma inadequada (Duarte, A.; Silva, G.; Ferreira, M., 2021).

Um estudo realizado por (Souto, 2017) sobre as lavanderias de jeans do município de Caruaru, mostrou que é gerado 5 toneladas/mês de resíduos sólidos. Estes resíduos que compreendem, restos de tecidos, embalagens contaminadas e o lodo resultante do tratamento do efluente, são descartados em lixões, quando correto seria transportá-los a um aterro sanitário.

De acordo com Braile e Cavalcanti (*apud* DIAS, 2013), o lodo têxtil pode ser considerado em alguns casos um resíduo tóxico, devido aos processos de tinturaria e até no tratamento dos efluentes das lavanderias que utilizam uma variedade de corantes e produtos que podem conter elementos químicos como alumínio, cobre, ferro e chumbo que causam impactos ambientais, poluindo solos e águas superficiais, contaminando a vida aquática e indiretamente o ser humano.

Em um estudo sobre o lodo têxtil coletado em uma lavanderia do APL de confecções de Pernambuco, localizada em Toritama, Moura *et al.* (2021b) verificou sua composição química por meio do ensaio de Fluorescência de Raios-X, e seu teor de orgânicos por Análise Termogravimétrica (TGA) e Termogravimetria Derivada (DTG). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4. O autor ressalta que as composições podem variar entre as lavanderias, por questões dos insumos utilizados e dos processos de fabricação e de diferentes formas de tratamentos dos efluentes adotados.

Tabela 4 – Composição de lodo têxtil do APL de confecções de Pernambuco.

Componente/ Percentual (%)					
CaO	28,18	SO ₃	4,34	MnO	1,63
MgO	20,98	Al ₂ O ₃	3,62	Fe ₂ O ₃	1,44
SiO ₂	14,81	Cl	2,18	Orgânicos	20,00

Fonte: Moura *et al.* (2021b)

2.4.1 Aplicação na construção civil

Dias (2013) estudou a utilização de lodo têxtil na fabricação de tijolos cerâmicos, em porcentagens de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% de lodo, na massa de argila cerâmica. O lodo utilizado foi seco e peneirado e a mistura dos materiais foi feita de forma manual, utilizando-se uma bandeja metálica. Os resultados apontaram que a utilização do resíduo em tijolos cerâmicos queimados é satisfatória nas porcentagens de 5% e 10% de lodo incorporado, pois além de atender aos requisitos de resistência à compressão e absorção de água, este apresentou concentração de metais nos extratos lixiviado e solubilizado abaixo dos limites definidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004a). As demais porcentagens de lodos aplicadas nesse estudo, apresentaram resultados inferiores, e tiveram aspecto bastante quebradiço, que foi justificado em razão do alto teor de areia presente no solo utilizado aliado a quantidade de matéria orgânica do lodo que afetou a estabilidade dos tijolos.

A inserção de lodo têxtil em argamassas de cimento Portland foi avaliada por Anjos (2017). O resíduo foi adicionado em porcentagens de 5%, 10%, 15%, 20% para a avaliação de suas propriedades. A porcentagem de 10% de lodo apresentou potencial de uso na construção civil. O autor também relatou que a presença de lodo têxtil demandou menos água na mistura e que o teor de matéria orgânica presente no resíduo prejudicou as propriedades das argamassas que necessitam de resistência maiores do que as de blocos vazados, por exemplo.

Beg *et al.* (2022) utilizaram lodo têxtil na fabricação de concreto e argamassa, substituindo areia e cimento em 5 e 10%. Os resultados de resistência à compressão e à tração foram bem reduzidos com a inserção do lodo nas misturas. Além de ter ocasionado uma maior absorção de água. Apesar disso, as argamassas e os concreto preparados com tais substituições, ainda atenderam aos requisitos da ASTM (American Society for Testing and Materials), para materiais não-estruturais, podendo desta forma, serem utilizados em tijolos para alvenaria não estrutural, ladrilhos, blocos de pavimentação, dentre outros.

2.5 Tijolos de solo-cimento com lodo

Em Kongkajun *et al.* (2020), foi utilizado o resíduo de lodo de indústrias de fibrocimento, em percentuais de 5 a 10% do total de massa seca, para produzir tijolos de solo-cimento, com moldagem por prensa manual. Os resultados apontaram uma diminuição da resistência à compressão, comparado aos tijolos de referência, que não contém lodo, apesar disso, a resistência ainda excedeu os padrões exigidos pela norma. Além da diminuição na densidade e na condutividade térmica, o que torna o material ainda mais sustentável.

Em Anjum *et al.* (2017), foram produzidos tijolos de solo-cimento com incorporação de 10% (em massa) de lodo de ETA, onde obteve-se resultados de resistência à compressão acima de 2 MPa atendendo aos requisitos padrões, apesar do aumento na absorção de água. O resíduo também passou por análise de constituintes químicos, plasticidade, dimensão de partículas entre outros. Foi observado um composto rico em Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 e matéria orgânica.

Chávez Porras, Lima e Morita (2008), estudaram a inserção de resíduo de lodo de ETA, e resíduos da construção civil em tijolos de solo-cimento, onde foram elaborados oito traços distintos. Com os resultados obtidos, concluiu-se que a umidade do lodo incorporado em tijolos de solo-cimento, influencia diretamente em sua qualidade, sendo determinado um valor de até 50% de teor de umidade deste resíduo para ser possível a confecção dos tijolos. Ressaltou ao fim que nenhum dos traços estudados, atenderam simultaneamente aos requisitos de absorção de água e resistência a compressão da NBR 8491 (ABNT, 2017).

Resíduos de lodo de ETA foram adicionados em tijolos de solo-cimento numa percentagem de até 5% em peso em substituição ao solo. Os resultados apontaram que o solo pode ser substituído por este resíduo em até 1,25%. É observado que as limitações na inserção do resíduo na mistura se dão em razão do aumento da absorção de água (Rodrigues e Holanda, 2015).

A Tabela 5 apresenta um resumo das pesquisas em que houve a inserção de lodo em tijolos de solo-cimento, com os respectivos teores utilizados nesses estudos.

Tabela 5 – Resumo de estudos com aplicação de lodos em tijolos de solo-cimento.

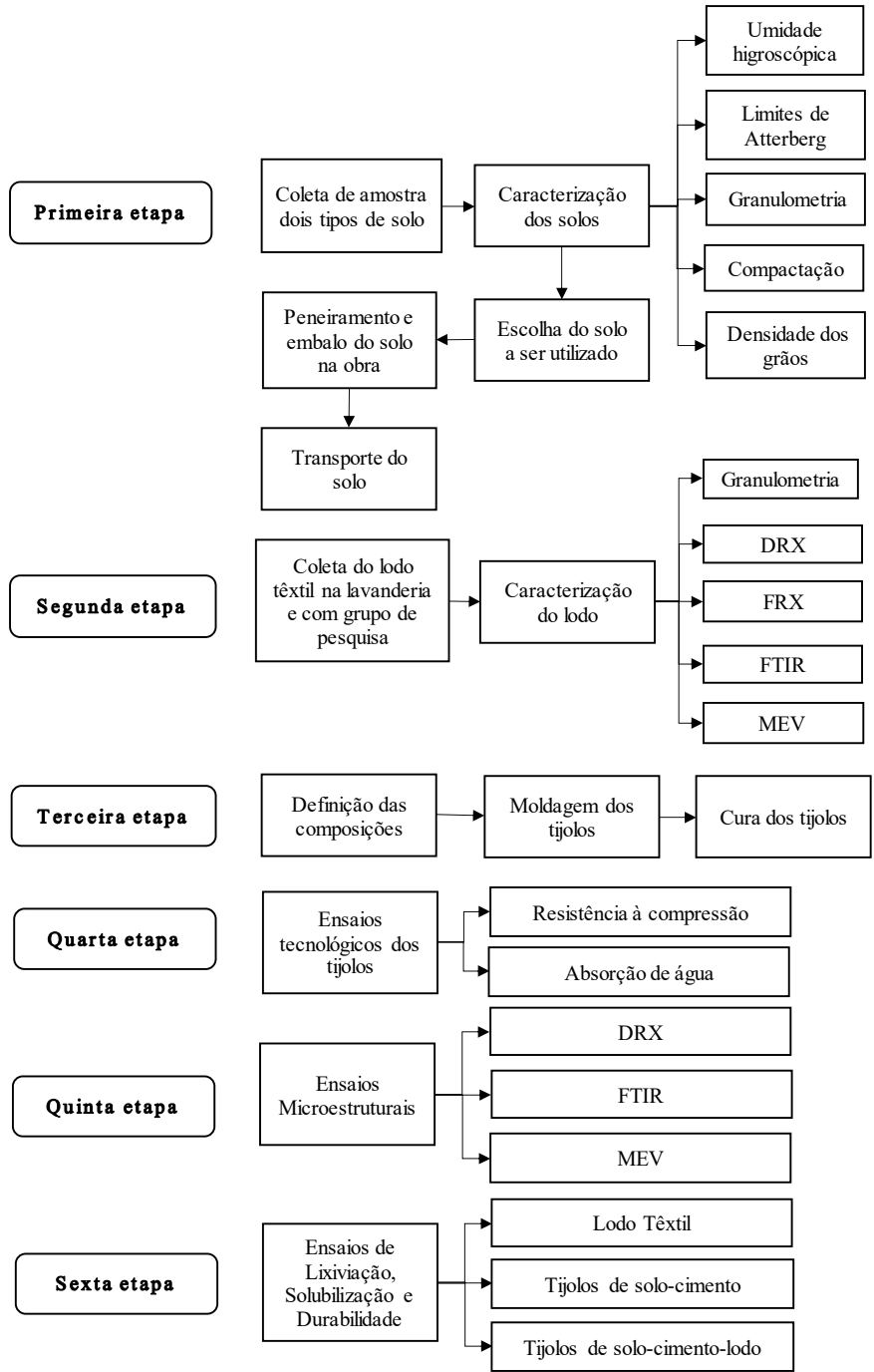
Autores	Tipo de lodo	Traço (cimento:solo)	Porcentagens de lodo estudadas	Porcentagem viável de incorporação de lodo
Anjum <i>et al.</i> (2017)	Lodo de ETA	4:1	0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%	10%
RODRIGUES e HOLANDA, 2015)	Lodo de ETA	10:1	0%, 1,25%, 2,5% e 5%	1,25%
Chávez Porras, Lima e Morita (2008)	Lodo de ETA	10:1	10%, 15%, 20% e 25%	-

Fonte: Autora (2024)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico, serão apresentados os materiais e métodos utilizados para a fabricação dos tijolos de solo-cimento e para a caracterização dos materiais e dos tijolos, de acordo com as especificações da NBR 10833 (ABNT, 2013a) e NBR 8492 (ABNT, 2012). O processo metodológico está representado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia adotada.



Fonte: Autora (2024).

Foram coletados dois solos da região para caracterização, a fim de escolher o que atendesse aos critérios tecnológicos para confecção de tijolos de solo-cimento. Para a realização desta etapa, foram realizados a análise granulométrica de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2018a), o ensaio de compactação pela NBR 7182 (ABNT, 2020), determinação do limite de liquidez segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016a), determinação do limite de plasticidade seguindo a NBR 7180 (ABNT, 2016b) e o ensaio de densidade real dos grãos pelo Método de Ensaio do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, a DNER – ME 093/94 (DNER/ME, 1994).

Após a escolha do solo, e a obtenção do lodo têxtil, foi iniciada a fabricação dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento-lodo nos traços de 1:10, 1:8 e 1:6 (cimento:solo). Foram realizados ensaios tecnológicos, de caracterização microestrutural e de lixiviação e solubilização. Depois foram preparados corpos de prova cilíndricos, que foram submetidos ao ensaio de durabilidade.

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

Dois tipos de solos da região do município de Caruaru foram cedidos pela Empresa Construtora Unique para a realização da caracterização e posterior escolha. A coleta do solo foi realizada numa obra em fase de terraplenam localizada ao lado do Campus da UFPE-CAA no município de Caruaru. Um dos solos coletados foi retirado do próprio local da obra, do município de Caruaru (Figura 4), e o outro solo do município vizinho, Riacho das Almas, foi adquirido pela empresa para a execução dos serviços de terraplenagem (Figura 5).

Figura 4 – Solo do município de Caruaru.



Fonte: Autora (2024).

Figura 5 – Solo do município de Riacho das Almas.



Fonte: Autora (2024).

3.1.2 Cimento

Foram utilizados dois cimentos para a confecção dos tijolos de solo-cimento inicialmente o CP II-Z-32, por se tratar da opção de maior disponibilidade no comércio local e posteriormente o CPV-ARI, que por possuir alta resistência inicial, colaborou para o atendimento dos requisitos da NBR 8491 (ABNT, 2017), que determina uma resistência inicial mínima aos 7 dias para tijolos de solo-cimento.

3.1.3 Água

A água de amassamento usada nos traços dos tijolos foi proveniente do abastecimento público da cidade do Recife/PE, fornecida pela Concessionária COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento).

3.1.4 Lodo Têxtil (LT)

O lodo têxtil (LT) utilizado na fabricação dos tijolos, foi fornecido já beneficiado, por pesquisadores da UFPE/CAA, que trabalharam anteriormente com este resíduo. Este lodo foi coletado na Lavanderia Mamute, localizada no município de Toritama-PE, cidade vizinha à Caruaru.

Esta lavanderia possui uma ETE e o lodo gerado ao final do processo são depositados em leitos de secagem (Figura 6) e posteriormente ensacados (Figura 7) e destinado a um aterro sanitário.

Figura 6 – Leitos de secagem de lodo.



Fonte: Autora (2024).

Figura 7 – Lodo ensacado para envio ao aterro sanitário.



Fonte: Autora (2024).

O beneficiamento do lodo foi realizado por processos de secagem ao ar livre por 24h e em estufa a $100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ por mesmo intervalo de tempo. Após a completa secagem, o lodo passou 2h no moinho de bolas a fim de garantir a finura necessária ao sistema, um material

passante na peneira de abertura 0,075mm (Nº 200) (VEIGA; SANTOS, 2017). Esta mesma fração beneficiada e passada na peneira de Nº 200, também foi utilizada nessa pesquisa. Alguns destes processos podem ser vistos nas Figuras 8, 9 e 10.

Figura 8 – Lodo têxtil secando ao ar livre.



Fonte: Veiga e Santos (2017).

Figura 9 – Lodo têxtil secando em estufa.



Fonte: Veiga e Santos (2017).

Figura 10 – Lodo têxtil quando coletado, após a secagem e moído, sequencialmente.



Fonte: Santos (2019)

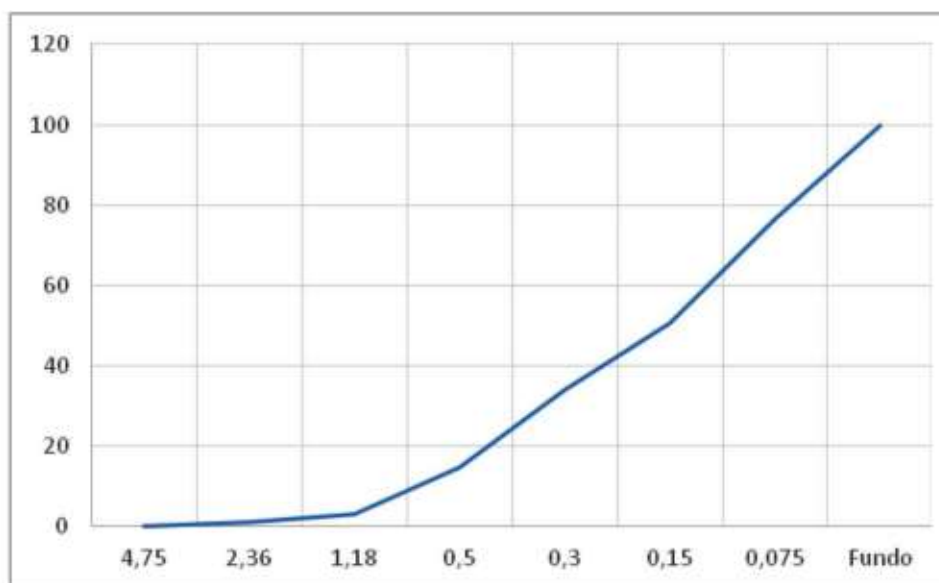
O lodo foi avaliado a partir da sua granulometria, onde foi possível perceber a grande presença de finos, podendo atuar como material de efeito filler. A Tabela 5 e a Figura 11 apresentam os resultados do ensaio granulométrico do lodo têxtil (VEIGA; SANTOS, 2017).

Tabela 6 – Caracterização do lodo têxtil.

Peneira (mm)	Massa de lodo têxtil (g)	% retida	% acumulada
4,75	0,6	0,075	0,075
2,36	7,6	0,955	1,03
1,18	16,6	2,085	3,115
0,5	92,7	11,646	14,761
0,3	153,9	19,334	34,095
0,15	130,7	16,419	50,515
0,075	206,5	25,942	76,457
Fundo	187,4	23,542	100

Fonte: Veiga e Santos (2017).

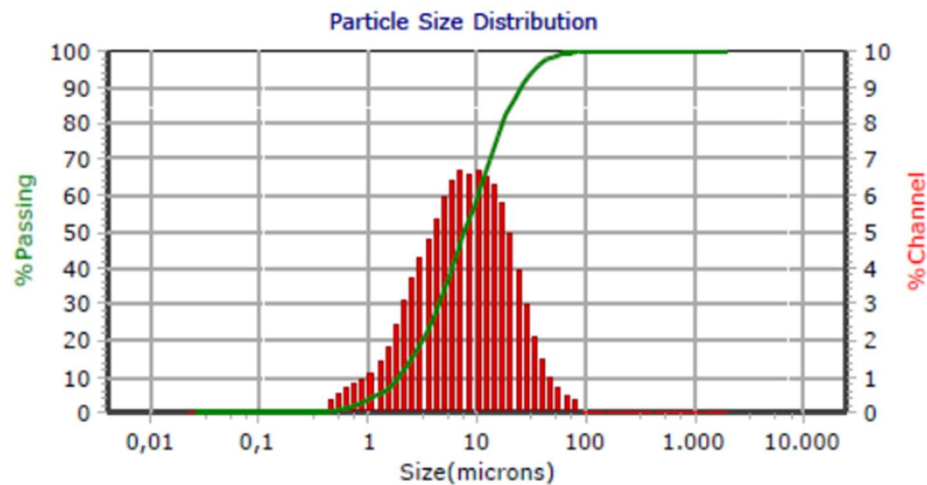
Figura 11 – Curva granulométrica do lodo têxtil.



Fonte: Veiga e Santos (2017).

Uma análise de granulometria a laser também foi realizada. Por meio dos resultados desta análise foi possível a elaboração de uma curva granulométrica (Figura 12), que permite a identificação dos tamanhos de partículas encontradas em diversas porcentagens do lodo têxtil.

Figura 12 – Curva granulométrica por granulometria a laser do lodo têxtil.



Fonte: Autora (2024).

Através da curva granulométrica da Figura 68 é possível identificar que 10% das partículas do lodo têxtil têm diâmetros menores ou igual a 1,944 μm , 50% das partículas têm diâmetros menor ou igual a 7,74 μm e 90% das partículas têm tamanhos de até 24,95 μm de diâmetro.

Estes resultados apontam que o lodo têxtil é considerado material com efeito filler, já que segundo Carvalho *et al.* (2023), são esses os materiais que apresentam granulometria média com valores próximos ou inferiores à do cimento. De acordo com a DNER-EM 367 (1997) para um material ser considerado de efeito filler, é necessário que contenham 65% de material passante na peneira de nº 200 que contém abertura de 0,075 mm ou 75 μm , reafirmando assim o efeito de empacotamento do lodo têxtil.

Em Ni *et al.* (2022), foram analisados a influência do tamanho de partículas na inserção dos resíduos de pó de tijolos cerâmicos e pó de concreto, para substituição parcial do cimento na solidificação de solo. Os corpos de prova de solo-cimento com resíduos foram analisados por resistência à compressão. O resíduo de pó de tijolo foi adicionado com tamanho de partículas de até 1 mm, enquanto o resíduo de pó de concreto, contava com partículas de até 0,045 mm de diâmetro. Quando o tamanho de partícula foi aumentado de 0,045 mm para 1 mm, houve uma perda na resistência em 19%. Portanto, os resultados apontaram que menores tamanhos de partículas provocam estruturas de solo-cimento mais densas portanto mais resistentes.

Portanto, é possível considerar que o lodo têxtil tem potencial de preenchimento de vazios nas misturas de solo-cimento, uma vez que o solo utilizado na pesquisa apresenta baixo percentual de partículas finas como argila e silte.

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização do solo

Todos os ensaios de caracterização dos solos foram realizados no Campus UFPE/CAA nos Laboratórios de Geotecnia e Construção Civil, exceto da granulometria da porção fina do solo que foi analisada no Laboratório de Solos do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da UFPE. Os solos foram caracterizados por umidade higroscópica, limites de Atterberg, granulometria, compactação e massa específica dos grãos.

3.2.1.1 Preparação para os ensaios de caracterização e compactação

A preparação do solo para os ensaios de caracterização e compactação seguiu as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 2024).

Inicialmente os solos foram espalhados em camada fina para secagem ao ar livre até umidade higroscópica (Figura 13). Após esta etapa, os solos foram destorroados com almofariz e mão de gral recoberta de borracha (Figura 14), quarteados com um repartidor de amostras para obter-se a homogeneização do material (Figura 15), peneirados para as granulometrias respectivas de cada análise posterior, e pesados nas quantidades necessárias para a realização dos ensaios.

Figura 13 – Solos secando ao ar livre.



Fonte: Autora (2024).

Figura 14 – Processo de destorroamento dos solos.



Fonte: Autora (2024).

Figura 15 – Repartidor de amostras de solo.



Fonte: Autora (2024).

3.2.1.2 Determinação do Limite de Liquidez

A determinação do Limite de Liquidez dos solos foi realizada seguindo a norma NBR 6459 (ABNT, 2016a). O ensaio consistiu na verificação da massa de solo (solo + água destilada) colocada sobre a concha do equipamento (Figura 16) e dividida em duas partes por uma ranhura feita com um cinzel deslocado perpendicularmente a superfície da concha (Figura 17). Essas duas partes de solo tendem a se unir em razão dos golpes da concha no aparelho que se dão em queda livre ao girar-se a manivela. Anotou-se o número de golpes necessário para as bordas se unirem ao longe em 13mm de comprimento, aproximadamente. Do material que se une foi retirado uma amostra para a determinação da umidade.

Figura 16 – Amostra sendo preparada para o ensaio de Limite de Liquidez.



Fonte: Autora (2024).

Figura 17 – Execução de ranhura com cinzel para o ensaio de LL.



Fonte: Autora (2024).

Este procedimento foi repetido por cinco vezes, sempre adicionando a mistura uma quantidade a mais de água destilada, para a elaboração do gráfico umidade *versus* número de golpes, que determinou o Limite de Liquidez (LL), como sendo o valor da umidade correspondente a 25 golpes.

3.2.1.3 Determinação do Limite de Plasticidade

A determinação do Limite de Plasticidade dos solos foi realizada seguindo a norma NBR 7180 (ABNT, 2016b). O solo foi misturado numa cápsula de porcelana à água destilada, até obter-se uma pasta homogênea e de consistência plástica. Tomou-se cerca de 10g dessa massa e com a palma das mãos formou-se uma pequena bola, que foi pressionada sobre uma placa de vidro, com pressão suficiente para tomar a forma de cilindro até uma espessura de 3mm e comprimento de 100mm (verificados com gabarito de comparação). Nos casos em que a amostra não atingiu o diâmetro e o comprimento desejados, retornou-a à cápsula, adicionou-se mais água destilada e repetiu-se o procedimento.

Quando o cilindro atingiu diâmetro e comprimentos desejados e se fragmentou (Figura 18), as partes da amostra foram transferidas para uma cápsula (Figura 19), para a determinação da umidade. O procedimento de formação do cilindro foi realizado por cinco vezes. No caso de impossibilidade de formação do cilindro, considera-se a amostra como não apresentando Limite de Plasticidade (NP).

Figura 18 – Cilindro de solo fragmentado em comprimento e diâmetro esperados.



Fonte: Autora (2024).

Figura 19 – Cápsulas com partes dos cilindros para a determinação da umidade.



Fonte: Autora (2024).

3.2.1.4 Determinação do Índice de Plasticidade

O Índice de Plasticidade determina o limite de água que pode ser adicionada a uma amostra de solo, para que este permaneça em estado plástico e não se torne líquido. A NBR 7180 (ABNT, 2016b), define o Índice de Plasticidade como a diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP), sendo representada pela Equação 1.

$$IP = LL - LP \quad \text{Eq. 1}$$

De acordo com Jenkins (*apud* Caputo, 1988), através do IP pode-se classificar o solo em função de sua plasticidade, como apresentado na Tabela 6.

Tabela 7 – Classificação do solo segundo a plasticidade.

Classificação	IP
Fracamente Plásticos	$1 < IP < 7$
Medianamente Plásticos	$7 < IP < 15$
Altamente Plásticos	$IP > 15$

Fonte: Jenkins (*apud* Caputo, 1988).

3.2.1.5 Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo foi realizada seguindo as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2018a). A análise granulométrica foi realizada pelo processo de peneiramento e

posteriormente por sedimentação. Inicialmente 1,5 kg do solo foi passado na peneira 2,0 mm (Nº 10), como pode ser observado na Figura 20. O material retido na peneira foi lavado para a retirada dos finos (Figura 21) e em seguida foi seco em estufa a 105°C, até constância de massa. Este material foi utilizado no peneiramento grosso.

Figura 20 – Peneiramento do solo grosso em peneira de abertura de 2,0 mm.



Fonte: Autora (2024).

Figura 21 – Solo retido na peneira de 2,0 mm sendo lavado para retirada dos finos.



Fonte: Autora (2024).

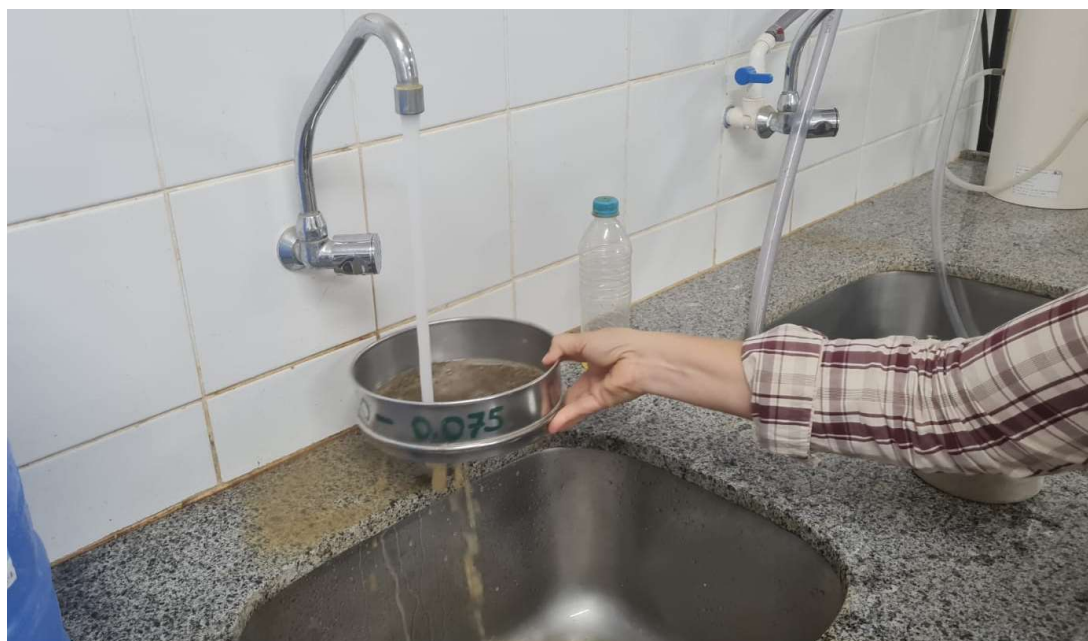
Para o peneiramento fino, retirou-se 120g do material passante na peneira 2,0 mm, pesando-o numa balança de resolução de 0,01g. Esse material peneirado (Figura 22), lavado numa peneira de abertura de malha de 0,075 mm (Nº 200) (Figura 23) e em seguida transferido para um recipiente, com o cuidado de transferir todos os grãos retidos (Figura 24), para ser seco em estufa a 105°C até constância de massa.

Figura 22 – Solo preparado para peneiramento a abertura de 0,075 mm.



Fonte: Autora (2024).

Figura 23 – Solo fino sendo lavado em peneira de abertura 0,075 mm.



Fonte: Autora (2024).

Figura 24 – Solo retido após lavagem sendo retirado da peneira para secagem em estufa.



Fonte: Autora (2024).

Após secagem, o material fino foi passado nas peneiras de 1,19 mm, 0,59 mm, 0,42 mm, 0,30 mm, 0,14 mm, 0,075 mm, utilizando-se um peneirador eletromecânico. As massas retidas acumuladas foram obtidas numa balança de resolução de 0,01g.

O material grosso, retido na peneira 2,0 mm, após secagem foi pesado e passado nas peneiras de 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,8 mm e 2,0 mm, utilizando-se um peneirador eletromecânico (Figura 25). Numa balança de mesma resolução da pesagem dos finos foi utilizada para a pesagem das massas retidas acumuladas.

Figura 25 – Peneiramento grosso em peneirador eletromecânico.



Fonte: Autora (2024).

Para a análise da fração fina do solo, de granulometria inferior a 0,075 mm, foi realizado o ensaio de sedimentação das partículas, normatizado pela NBR 7181 (ABNT, 2018a), que consiste em adicionar uma amostra de 120 g do solo em um Becker com 125 cm³ de defloculante hexametáfosfato de sódio com concentração de 45,7 g do sal por 1000 cm³ de solução. Após isto o Becker foi agitado até que todo o material ficasse em suspensão, e depois manteve-se em repouso por 12 horas.

Após as 12 horas, transferiu-se toda a amostra para o copo dispersor, removendo com água destilada todo o material do Becker, e submeteu-se a amostra à ação do aparelho de dispersão por 15 minutos. Depois deste período, todo o material foi transferido para uma proveta, também utilizando água destilada para total remoção do material e completou-se a proveta até atingir 1000 cm³. Com a palma da mão, tampou-se a proveta que foi agitada por 1 minuto, em um movimento de rotação em que a boca da proveta, passou de cima para baixo e vice-versa.

Imediatamente após a agitação, a proveta foi colocada na bancada, o cronômetro foi acionado e anotou-se a hora exata do início da sedimentação. Mergulhou-se cuidadosamente o densímetro na proveta e foram realizadas leituras para os tempos de sedimentação de 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas, 24 horas, contados a partir do início da sedimentação (Figura 26).

Figura 126 – Aferição de sedimentação com densímetro.



Fonte: Autora (2024).

O ensaio de sedimentação do solo também foi realizado sem o defloculante, neste caso apenas água destilada foi utilizada na dispersão da amostra de solo e todo o restante do processo se repetiu de igual maneira. Este método foi realizado a fim de comparar a dispersibilidade das partículas mediante o uso de defloculante. Segundo Mendonça (2022), o defloculante é utilizado para realizar a separação das partículas de uma porção que se encontra unida em seu estado natural e conclui que sem a utilização do defloculante no ensaio de sedimentação, as partículas tendem a sedimentar mais rapidamente, uma vez que seus diâmetros estão maiores, devido as agregações.

3.2.1.6 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com os critérios determinados pela NBR 7182 (ABNT, 2020). Inicialmente a amostra de 4kg de solo preparada para o ensaio foi depositado em uma bandeja metálica e utilizando-se uma proveta adicionou-se água destilada, sempre mexendo o material, até se obter um teor de umidade em torno de 5% e então anotou-se a quantidade de água usada neste primeiro momento. Após a completa homogeneização do material (Figura 27) foi iniciado o processo de colocação em três camadas no cilindro de compactação, já montado e preparado com uma folha de papel filtro no fundo do molde para evitar a aderência do solo no fundo do molde. A cada camada de solo adicionada foram aplicados perpendicularmente e distribuídos por toda a superfície da camada, 25 golpes de soquete em queda livre. A colocação de cada camada foi realizada após uma rápida escarificação da camada anterior. A Figura 28 apresenta o processo de compactação do solo.

Figura 137 – Material homogeneizado para ensaio de compactação.



Fonte: Autora (2024).

Figura 28 – Processo de compactação do solo no cilindro.



Fonte: Autora (2024).

Após a compactação da última camada, soltou-se o molde cilíndrico de sua base e em seguida foi desacoplado do molde o cilindro complementar (Figura 29) e o excesso de solo compactado acima do molde foi rasado com a utilização de uma régua biselada (Figura 30). Em seguida, e pesou-se o solo compactado com o molde numa balança de resolução de 1g. Com o auxílio de um extrator, a amostra foi retirada do molde (Figura 31), e em seguida duas amostras foram retiradas para a determinação da umidade.

Figura 29 – Molde complementar e base do cilindro sendo removidos.



Fonte: Autora (2024).

Figura 30 – Rasamento do molde com régua biselada.



Fonte: Autora (2024).

Figura 31 – Amostra sendo retirada do molde com extrator mecânico.



Fonte: Autora (2024).

O material do molde foi então colocado de volta na bandeja (Figura 32), destorreado e misturado ao material remanescente. Em seguida foi adicionada mais água destilada numa quantidade de incrementar o teor de umidade anterior em 2%. Esses processos foram realizados num total de cinco vezes de modo a possibilitar a elaboração de um gráfico de umidade *versus* peso específico.

Figura 32 – Molde na bandeja para retirada de amostras seguida do destorroamento.



Fonte: Autora (2024).

3.2.1.7 Densidade real dos grãos

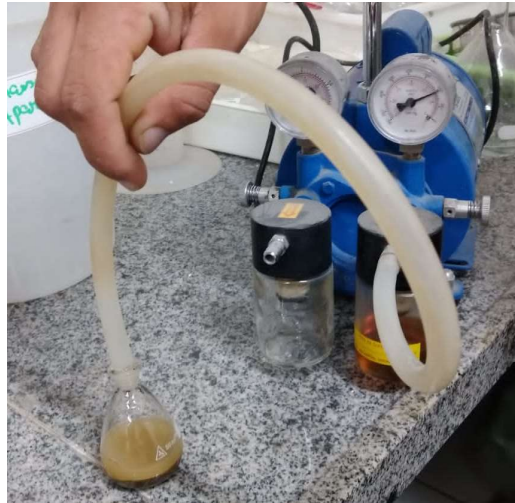
A determinação da densidade real dos grãos foi realizada seguindo os procedimentos do anexo B da NBR 6458 (ABNT, 2016c). Neste ensaio foi utilizado um picnômetro de 50 ml, portanto tomou-se uma amostra de 10g de solo seco por 24h em estufa a 105°C e passado na peneira de abertura 2,0 mm. Pesou-se o picnômetro vazio e seco e anotou-se o valor (P_1). A amostra foi adicionada no picnômetro com o auxílio de um funil de vidro, com o cuidado de não perder solo no processo e pesou o conjunto (P_2). Em seguida adicionou-se água destilada no picnômetro até cobrir com excesso a amostra. A Figura 33 apresenta o picnômetro nos passos anteriores. Executou-se a retirada de todo o ar do interior da amostra com a utilização de um vacuômetro por 10 minutos (Figura 34). Após esse procedimento adicionou-se mais água destilada, até a marca de referência do picnômetro, pesou-se (P_3) e aferiu-se a temperatura do ambiente (T_1). Em seguida todo o material é retirado do picnômetro, este é lavado, enxugado, novamente cheio com água destilada, até o traço de referência e por fim, pesado novamente, obtendo-se o peso 4 (P_4), estas etapas finais do procedimento descrito podem ser visualizadas nas Figuras 35 e 36.

Figura 33 – Picnômetro vazio, solo adicionado com funil e adição de água destilada.



Fonte: Autora (2024).

Figura 34 – Retirada do ar do interior da amostra com vacuômetro.



Fonte: Autora (2024).

Figura 35 – Adição de água destilada no picnômetro após retirada de ar do material.



Fonte: Autora (2024).

Figura 36 – Picnômetro limpo, cheio de água destilada para obtenção do peso 4.



Fonte: Autora (2024).

Com os dados obtidos por meio destes procedimentos, juntamente com a consulta de uma tabela que relaciona as densidades relativas da água nas diversas temperaturas, foi possível o cálculo da densidade real dos grãos.

3.2.2 Caracterização do lodo

O lodo têxtil beneficiado passou por caracterização físico-química e microestrutural, como, Granulometria a laser, Perda ao fogo, Fluorescência de Raios-X (FRX), Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), além dos ensaios de lixiviação e solubilização.

Por se tratar do uso de um resíduo industrial que podem conter pigmentos e outros insumos como produtos ácidos e alcalinos, desengomantes, umectantes, corantes, enzimas, sal, metabissulfito, peróxido, corantes, permanganato de potássio entre outros utilizados nos diversos banhos nas lavanderias com a finalidade de obter-se o acabamento desejado (Silva Filho *et al.*, 2021), suas estruturas podem apresentar alguma toxicidade ao meio ambiente, e portanto faz-se necessário investigar se as formas de imobilização adotadas são de fato confiáveis para aprisionar constituintes. Os ensaios foram realizados segundo as normas NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004c).

3.2.2.1 Granulometria a Laser

O ensaio de granulometria a laser é realizado para a determinação de tamanho de partículas de materiais de diversos tamanhos, sendo recomendada para amostras com tamanhos entre 0,1 a 3000 μm . Consiste na difração de um laser que atua sobre as partículas dispersas em um fluido em movimento com descontinuidades no fluxo que permite, a partir da detecção pelo laser, a correlação das partículas.

Essa análise de difração a laser para o lodo têxtil foi realizada no Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste – CETENE, e forneceu a distribuição do tamanho das partículas, por meio do equipamento da marca Microtrac e modelo S3500.

3.2.2.2 Perda ao Fogo

O ensaio de perda ao fogo é um tipo de análise térmica em que é realizado a combustão de orgânicos presentes em uma determinada amostra quando submetida a altas temperaturas. E foi realizado com a finalidade de conhecer o teor de orgânicos presentes no lodo têxtil.

Uma amostra de massa conhecida, moída, passada por peneira de malha número 200 e seca em estufa a 110 °C foi adicionada em um cadinho de porcelana de massa conhecida e levada à mufla que consiste em um forno especial (Figura 37) a uma temperatura de 550 °C por 1 hora. Após esse período a amostra foi retirada da mufla e foi obtida sua massa. O ensaio foi realizado no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) da UFPE.

Figura 37 – Mufla do LSA-UFPE utilizada no ensaio de perda ao fogo.



Fonte: Autora (2024).

O teor de orgânicos (expresso em porcentagem) presente na amostra foi obtido através da relação entre a massa inicial da amostra seca (m_i) após passar pela estufa e a massa final (m_f) após a combustão na mufla. A perda ao fogo (PF) é definida pela Equação 2.

$$PF (\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad \text{Eq. 2}$$

3.2.2.3 FRX

A partir do ensaio de FRX é possível determinar quantitativamente a composição química de uma amostra, a partir da emissão de raios X, por meio do equipamento de

Espectrômetro. Esta incidência que apresenta intensidade superior a emitida pelos elétrons do elemento, causa uma excitação nos elétrons que tendem a subir para níveis de maior energia e depois voltam ao seu estado fundamental emitindo raios X. Cada elemento emite uma energia (raios X) característica, e com isto é possível a qualificação e quantificação da composição química de determinada amostra (Pinto, 2013).

Para esta técnica, uma amostra do lodo têxtil foi passada em peneira de nº 200, seco em estufa por duas horas e encaminhado ao Laboratório de Química da UFPE-CAA para análise no espectrômetro de marca Rigaku e modelo Primini (Figura 38). O resultado possibilitou a identificação e quantificação da composição química do lodo têxtil.

Figura 38 – Espectrômetro utilizado na pesquisa para análise de FRX.



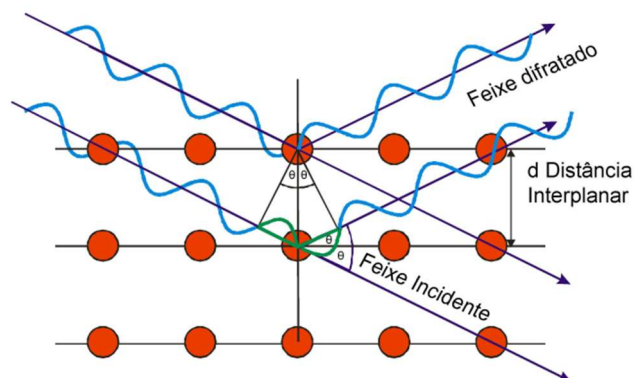
Fonte: Autora (2024).

3.2.2.4 DRX

A técnica de DRX consiste em incidir radiação sobre uma amostra e detectar os fótons difratados, que formam o feixe difratado. Ou seja, é a relação entre a incidência de raios X com angulações (θ) conhecidas num comprimento de onda (λ) conhecido e os elétrons que compõem o material ensaiado (Figura 39). A difração do feixe que incide sobre um conjunto de planos do cristal, de mesma distância entre os planos dos átomos, correspondem às intensidades obtidas em ângulos 2θ variados, que são obtidas por meio da análise no equipamento de Difratorômetro

de raios-X, possibilitando a detecção de minerais presentes na amostra por meio da análise do arranjo atômico da rede cristalina dos materiais (Gobbo, 2009).

Figura 39 – Esquema ilustrativo do fenômeno de difração de raios-X.



Fonte: (Gobbo, 2009).

Esta análise foi realizada no Laboratório de Química da UFPE-CAA, utilizando o Difratorômetro de marca Rigaku e modelo MiniFlex600 (Figura 40), com uma amostra do lodo têxtil peneirado na peneira de nº 200 e seco em estufa por duas horas. Com base nos resultados foram elaborados difratogramas, que consistem em gráficos das intensidades *versus* os ângulos (2θ). Para isso foi utilizado o software HighScore Plus que além de criar os difratogramas também apresenta a identificação dos picos difratados.

Figura 40 – Difratorômetro utilizado na pesquisa para análise de DRX.



Fonte: Autora (2024).

3.2.2.5 FTIR

O FTIR é uma técnica utilizada para a identificação de grupos funcionais de uma substância e compostos orgânicos e inorgânicos puros, além de identificar ligações químicas entre átomos através da interação da radiação eletromagnética com a matéria no intervalo de 12800 a 10 cm^{-1} (Souza *et al.*, 2022).

O ensaio é realizado por meio do equipamento de Espectrofotômetro que determina as posições e intensidades das absorções do infravermelho. O resultado da análise é um gráfico de Transmitância *versus* número de onda, chamado de espectro infravermelho. Através do espectro é possível realizar a identificação das bandas por meio da correlação entre frequências (Paiva *et al.*, 2010).

Para esta análise foi preparada uma amostra de lodo têxtil seco e peneirado em peneira de nº 200 e encaminhada ao Laboratório de Química da UFPE-CAA, onde foi realizado o ensaio por meio do equipamento de Espectrofotômetro da marca Shimadzu e modelo IRPrestige-21 (Figura 41). As amostras foram analisadas na forma de pastilha prensadas em KBr e analisadas na região espectral 4000 a 400 cm^{-1} .

Figura 41 – Espectrofotômetro utilizado na pesquisa para análise de FTIR.



Fonte: Autora (2024).

3.2.2.6 MEV

O Microscópio Eletrônico de Varredura utiliza um feixe de elétrons continuamente sobre uma amostra, realizando uma varredura de sua superfície, São aparelhos modernos que permitem a visualização com ampliações de 300.000 vezes ou mais em grande parte dos sólidos,

fornecendo rapidamente informações sobre a identificação de elementos químicos e morfologia e da amostra através de imagens tridimensionais (Dedavid *et al.*, 2007).

Uma amostra do lodo têxtil foi analisada no equipamento de MEV do Laboratório do Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) da marca Tescan e modelo Mira 3, apresentado na Figura 42.

Figura 42 – Microscópio Eletrônico de varredura do INTM utilizado para a análise.



Fonte: Autora (2024).

3.2.2.7 Lixiviação

O ensaio de lixiviação foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 10005 (ABNT, 2004b). Este ensaio foi realizado para o lodo têxtil e os tijolos de solo-cimento. Inicialmente, foi preparada a solução de extração nº 2 com 5,7 mL de ácido acético glacial (HOAc), 64,3 mL de Hidróxido de sódio (NaOH) 1,0 N e completado o volume com 1L de água deionizada, pois o pH das amostras a serem analisadas foi maior que 5,0. Foram pesados 100 g de amostra, passante na peneira de malha de 9,5 mm e colocados no frasco de lixiviação, onde foram então adicionadas 2000 g da solução de extração. Fechou-se o frasco e o manteve-o em agitação por 18 horas numa rotação de 30 ± 2 rpm no agitador rotatório e temperatura controlada, conforme ilustrado na Figura 43. Após o tempo decorrido, filtrou-se a amostra com

aparelho de filtração pressurizado, com filtro de fibra de vidro isento de resinas e com porosidade de 0,6 μm .

Os filtrados obtidos são denominados extratos lixiviados que foram analisados por Espectrofotometria na região do UV-vis em um espectrofotômetro UV-vis Spectroquant Prove 300 da marca Merck e por cromatografia de íons no Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis (LITPEG), UFPE.

Figura 43 – Ensaio de lixiviação das amostras de tijolo de solo-cimento com lodo têxtil.



Fonte: Autora (2024).

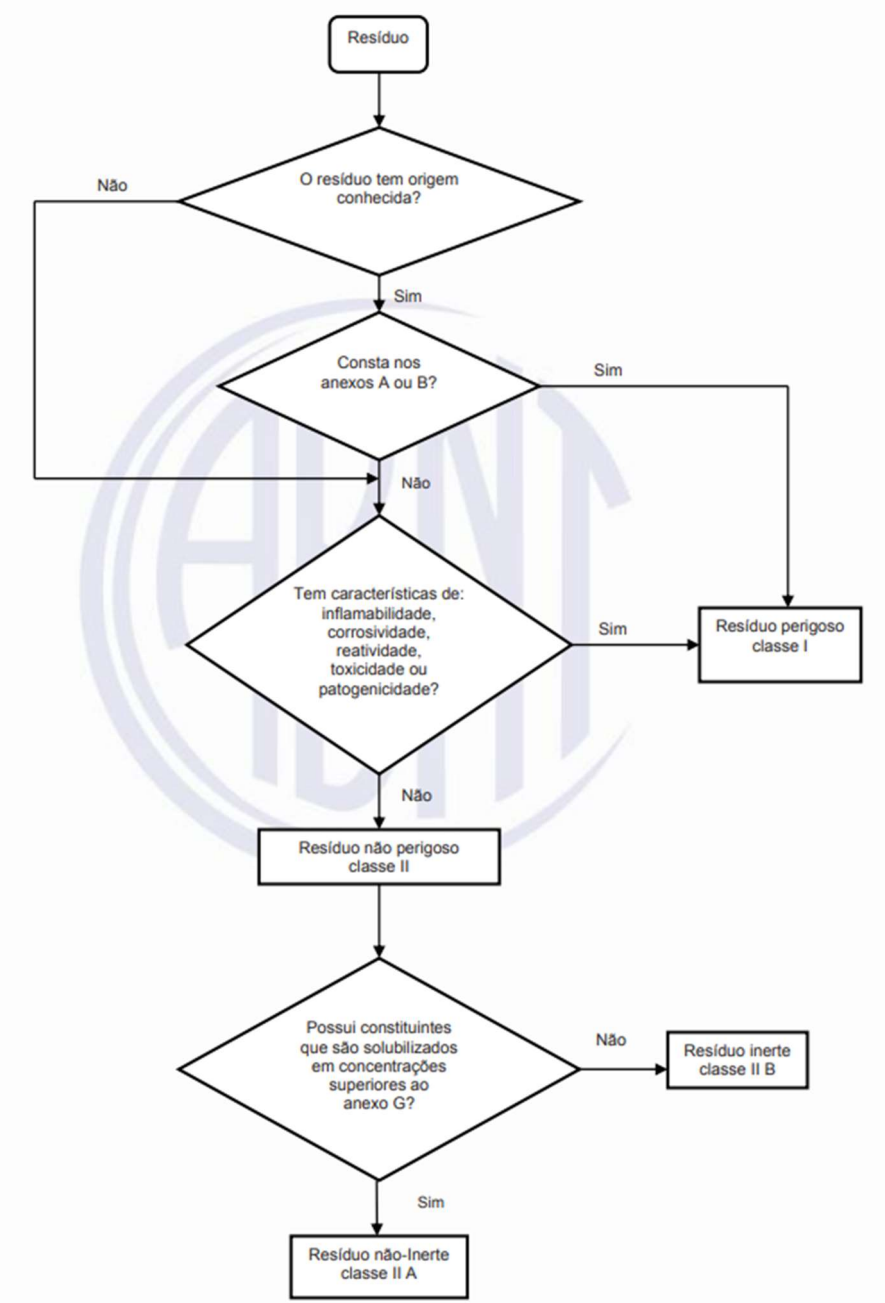
3.2.2.8 Solubilização

O ensaio de solubilização seguiu as diretrizes contidas na NBR 10006 (ABNT, 2004c), onde a amostra foi seca em estufa à temperatura de até 42°C. Em seguida, 250 g da amostra seca foi adicionada num recipiente de 1500 ml, onde foi então adicionada 1000 ml de água destilada e esta amostra é agitada em baixa velocidade por 5 minutos. Após isto, o frasco foi coberto com filme PVC e descansado por 7 dias em temperatura de até 25°C. Após esse período, filtrou-se a solução com aparelho de filtração guarnecido com membrana filtrante de 0,45 μm de porosidade. Definiu-se o filtrado obtido como sendo o extrato solubilizado.

Os parâmetros do extrato solubilizado foram analisados por Cromatografia de íons para detecção de possíveis cátions perigosos, e por Espectrofotometria na região do UV-vis (ultravioleta visível) com o objetivo de identificar arraste dos contaminantes do lodo têxtil que absorvem nessa região espectral.

A determinação do arraste de contaminantes é realizada por meio do fluxograma de classificação e caracterização dos resíduos (Figura 44) da NBR 10004 (ABNT, 2004a) e da análise dos anexos F e G da mesma norma, que definem as concentrações limites de resíduos tóxicos e perigosos dos extratos lixiviados e solubilizados.

Figura 44 – Fluxograma de classificação e caracterização dos resíduos da NBR 10004.



Fonte: (ABNT, 2004a).

3.2.3 Dosagem dos tijolos de solo cimento

A dosagem dos materiais para a confecção dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento-lodo foi determinada a partir de pesquisas bibliográficas e experimentações. Foram propostos inicialmente quatro traços, medidos em massa, produzidos com cimento CII-Z-32. O primeiro lote de tijolos de solo-cimento foi preparado usando o traço 1:10 (cimento:solo), por ser recomendação da ABCP para fabricação de tijolos de solo-cimento em que o solo atenda aos requisitos da NBR 10833 (ABNT, 2013a). Verificando-se que o solo não atendeu a todos os requisitos da norma citada, foi também proposto o estudo de mais dois traços mais ricos em cimento: 1:8 e 1:6 (cimento:solo). Primeiro executou-se o traço 1:8, que não atingiu as propriedades mínimas, seguiu-se com a execução do traço 1:6 que por sua vez, também não apresentou resultados satisfatórios. Por isso, produziu-se um novo lote de tijolos, desta vez com a utilização do cimento CPV-ARI e traço de 1:6.

A incorporação do lodo na mistura foi realizada em porcentagens de 1% e 5% em substituição à massa do solo, por ser uma média de porcentagens utilizadas nos estudos de tijolos com resíduo de lodo, pesquisados e analisados. E um outro traço sem inserção de lodo foi preparado como referência.

Na Tabela 7 são apresentadas as dosagens das misturas de solo-cimento produzidas com o cimento CII-Z-32 em argamassadeira (Lote 1), que contém três traços 1:10 (A) e 1:8 (B) e apenas tijolos de referência sem inserção de lodo (0% de lodo têxtil).

Os dados de composição dos tijolos produzidos em betoneira, com o traço 1:6 (Lote 2) e com os cimentos CII-Z-32 (A) e CPV-ARI (B) respectivamente, encontram-se na Tabela 8, em que a porcentagem de lodo adicionada corresponde ao último número da sigla, sendo 0, 1 e 5%.

A água adicionada nas misturas foi calculada como a subtração da umidade ótima de compactação do solo (11,8%) e sua umidade higroscópica (2,041%). A porcentagem resultante deste cálculo (9,76%), foi adicionada em relação a massa de solo da composição ou solo mais lodo.

Tabela 8 – Denominação e dosagem das misturas produzidas em argamassadeira (Lote 1).

Sigla	Cimento	Traço	Teor de solo	Teor de lodo
L1A-0	CII-Z-32	1:10	100%	0%
L1B-0	CII-Z-32	1:8	100%	0%

Fonte: Autora (2024).

Tabela 9 – Denominação e dosagem das misturas produzidas em betoneira (Lote 2).

Sigla	Cimento	Traço	Teor de solo	Teor de lodo
L2A-0	CPII-Z-32	1:6	100%	0%
L2A-1	CPII-Z-32	1:6	99%	1%
L2A-5	CPII-Z-32	1:6	95%	5%
L2B-0	CPV-ARI	1:6	100%	0%
L2B-1	CPV-ARI	1:6	99%	1%
L2B-5	CPV-ARI	1:6	95%	5%

Fonte: Autora (2024).

3.2.4 Confeção dos tijolos

Após a coleta do solo, procedeu-se com o processo de peneiramento e o destorroamento manual de possíveis torrões. Em seguida, todo o material necessário para a elaboração das misturas foi pesado e separado em sacos plásticos descartáveis. Os procedimentos adotados para a fabricação dos tijolos de solo-cimento foram os recomendados pela NBR 10833 (ABNT, 2013a). Foram fabricados um total de 40 tijolos para cada traço, para a realização dos ensaios de resistência a compressão e absorção de água em três idades, 7, 14 e 28 dias. Para cada idade, 10 tijolos foram escolhidos aleatoriamente para serem ensaiados, sobrando 10 tijolos ao final de todas as idades.

Todas as misturas do Lote 1 foram realizadas na argamassadeira elétrica e foram preparadas em duas etapas. A primeira foi a junção do cimento ao solo, e ao lodo nos devidos traços, num saco plástico firme e transparente para uma melhor homogeneidade dos materiais secos, uma vez que se misturados em suas porções, diretamente na argamassadeira, a hélice não alcançaria as áreas mais inferiores do recipiente, não incorporando todos os materiais e a água. A segunda etapa consistiu em adicionar os materiais secos, recém misturados na etapa anterior, em argamassadeira eletromecânica, da marca Amadio, de capacidade de 20L, na velocidade média, por 30 segundos para a completa mistura dos secos.

Após esse tempo de mistura, para que não se percam muitos finos da composição, a argamassadeira é desligada, para a inserção da água da mistura, e então é religada até total homogeneidade da mistura, que tem aspecto solto, numa média de 1,5 minutos. A quantidade de material adicionado a cada ciclo de mistura na argamassadeira, foi suficiente para a confecção de 4 tijolos.

Em razão da baixa produtividade na produção dos tijolos com a mistura realizada na argamassadeira, optou-se por substituí-la por uma betoneira, para a realização da mistura dos tijolos do Lote 2. Essa substituição além de proporcionar uma produção mais rápida de tijolos,

por conter um maior porte, também se torna mais pertinente em razão de ser de utilização comum em obras.

A betoneira utilizada foi da marca CSM Equipamentos, de capacidade de 250 litros e rotação do tambor de 28 rotações por minuto (rpm). A mistura foi executada em duas etapas, primeiro os materiais secos foram misturados por 30 segundos, após isso foi adicionada a água e continuou-se a mistura por mais 60 segundos. Após esse processo, a mistura foi peneirada em peneira de obra, de abertura de 4 mm para então ser realizada a moldagem, como ilustrado na Figura 45.

Figura 45 – Mistura em betoneira e peneiramento.



Fonte: Autora (2024).

Para a confirmação da umidade ideal da mistura, foi realizado um teste descrito no Boletim Técnico para fabricação de tijolos de solo-cimento da ABCP. O teste consiste em tomar um punhado da mistura e apertá-la energicamente entre os dedos e a palma da mão. Ao abrir a mão, a mistura deverá ter formado um “bolo” com as marcas dos dedos (Figura 46). Este bolo é solto ao chão numa distância de aproximadamente um metro e para que seja considerado em umidade ideal para moldagem dos tijolos, este deve esfarelar-se ao chocar-se com a superfície (Figura 47), caso contrário a amostra é considerada muito úmida (ABCP, 2000).

Figura 46 – Teste de umidade com as mãos, segundo ABCP.



Fonte: Autora (2024).

Figura 47 – “Bolo” de mistura solo-cimento esfarelado, como descrito pela ABCP.



Fonte: Autora (2024).

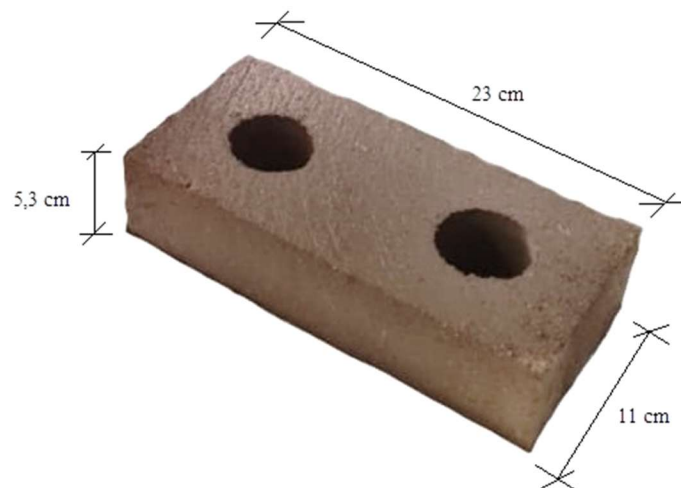
Para a moldagem dos tijolos de solo-cimento foi utilizada uma prensa manual, do Laboratório de Construção Civil da UFPE, Campus Recife (Figura 48). A cada prensagem realizada, são obtidos dois tijolos vazados com dimensões de 23 cm de comprimento (C), largura (L) de 11 cm e Altura (H) de aproximadamente 5,3 cm (Figura 49).

Figura 48 – Prensa de tijolos de solo-cimento.



Fonte: Autora (2024).

Figura 49 – Tijolo de solo-cimento fabricado e suas medidas.



Fonte: Autora (2024).

A mistura é adicionada na prensa (Figura 50) com o auxílio de uma pá pequena, a prensa é fechada, rasando o material excedente e a prensagem é executada com uma força manual no braço de alavanca e em seguida os tijolos desenformados (Figura 51) e cuidadosamente retirados da prensa com as mãos e despostos enfileirados e cobertos em prateleiras (cobertas

com plástico) de estante metálica à sombra (Figura 52), para serem submetidos ao procedimento de cura nos sete dias posteriores a sua fabricação.

Figura 50 – Mistura de solo-cimento na prensa antes da compactação.



Fonte: Autora (2024).

Figura 51 – Tijolos recém fabricados.



Fonte: Autora (2024).

Figura 142 – Armazenagem dos tijolos.



Fonte: Autora (2024).

3.2.5 Cura dos tijolos

Os tijolos de solo-cimento foram submetidos ao procedimento de cura, mantendo-os úmidos durante sete dias a partir de sua fabricação. A molhagem dos tijolos foi realizada uma vez ao dia, a partir de 24 horas de sua fabricação, com o auxílio de um borrifador, que garantiu uma molhagem homogênea e suficiente para a conservação da umidade presente nas amostras (Figura 53). Ao final de cada ciclo de molhagem, os tijolos foram novamente cobertos por plásticos, a fim de evitar-se uma maior perda de umidade.

Figura 53 – procedimento de cura dos tijolos.



Fonte: Autora (2024).

3.2.6 Ensaio de resistência a compressão

Para a realização do ensaio de resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento, foram seguidas as diretrizes da NBR 8492 (ABNT, 2012). São escolhidos aleatoriamente 7 tijolos para cada idade de realização deste ensaio. Inicialmente os tijolos foram cortados ao meio, perpendicularmente a sua maior dimensão, com o auxílio de uma serra mármore (Figura 54), que por conta de seu raio não alcançar o completo corte de sua seção do tijolo, foi necessário fazer um corte dos seus dois lados.

Em seguida superpõe-se as duas metades com os lados cortados em sentidos opostos, unindo-as com uma camada fina (2 a 3 mm de espessura) de pasta de cimento Portland pré-contraída (em repouso após preparo por 30 minutos) de relação água/cimento igual a 0,35.

Figura 154 – Corte dos tijolos de solo-cimento.



Fonte: Autora (2024).

Os lados superior e inferior dos tijolos também recebem uma camada fina de pasta de cimento Portland, que são aplicadas e sobre um tampo de vidro pincelado com desmoldante (Figura 55) e os tijolos são pressionados levemente sobre esta (Figura 56). No mínimo 12 horas depois do capeamento realizado em uma superfície do tijolo, este é solto da placa de vidro e procede-se para a realização do mesmo procedimento no lado contrário (Figura 57).

Figura 165 – Desmoldante aplicado em placa de vidro para receber pasta de cimento e tijolo.



Fonte: Autora (2024).

Figura 176 – Tijolos cimentados ao meio e em uma das superfícies.



Fonte: Autora (2024).

Figura 57 – Tijolos cimentados no meio e nas duas faces.



Fonte: Autora (2024).

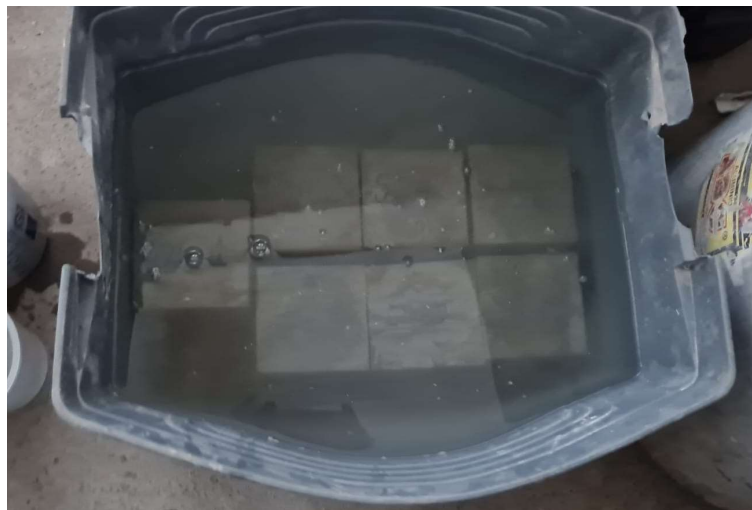
Após um período de no mínimo 12 horas do capeamento do segundo lado dos tijolos, e o completo endurecimento do material, os corpos de prova são identificados (Figura 58) e imersos em água por um período de 6 horas (Figura 59).

Figura 58 – Corpos de prova identificados.



Fonte: Autora (2024).

Figura 59 – Corpos de prova imersos em água.



Fonte: Autora (2024).

Após o tempo decorrido, os tijolos são retirados da água e enxugados superficialmente com um pano úmido, num tempo máximo de 3 minutos. Logo após o corpo de prova foi colocado diretamente e centralizado no prato inferior da prensa de resistência a compressão, da fabricante Shimadzu, modelo AGS-300kNX, de capacidade de 300 kN (Figura 60), com a aplicação de uma carga uniforme à razão de 500 N/s (kgf/s). Em razão de o prato superior da prensa não possuir diâmetro suficiente para a completa cobertura da face do corpo de prova, foram adicionadas acima da face do tijolo duas placas metálicas, que juntas apresentam espessura de 35 mm (Figura 61).

Figura 60 – Prensa de ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autora (2024).

Figura 61 – Tijolo disposto na prensa para início do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autora (2024).

Os resultados de resistência a compressão foram obtidos por meio do software TRAPEZIUM X. Ao final de cada ruptura (Figura 62) o ensaio foi interrompido e a máquina novamente preparada para o próximo corpo de prova.

Figura 62 – Tijolo rompido sendo retirado da prensa.



Fonte: Autora (2024).

3.2.7 Ensaio de absorção de água

Os ensaios de absorção de água foram realizados, seguindo as recomendações da NBR 8492 (ABNT, 2012). Foram escolhidos três tijolos aleatoriamente, estes foram secos em estufa numa temperatura de 105°C, até constância de massa e então pesados para obter-se a massa do tijolo seco em gramas (m_1) (Figura 63 e 64).

Figura 63 – Tijolos dentro da estufa.



Fonte: Autora (2024).

Figura 64 – Estufa.



Fonte: Autora (2024).

Após o completo esfriamento, os tijolos foram imersos na água por 24 horas. Após este período de tempo, os tijolos são retirados, enxugados com pano levemente umedecido e pesados antes de decorridos 3 minutos. Obtendo-se assim, a massa do tijolo saturado em gramas (m_2).

Os valores de absorção de água (A) de cada tijolo em porcentagem, podem ser então calculados através da Equação 3.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \quad \text{Eq. 3}$$

3.2.8 Ensaio de durabilidade

O ensaio de durabilidade foi realizado seguindo as recomendações da NBR 13554 (ABNT, 2013b). Onde corpos de prova cilíndricos de solo-cimento (Figura 65) são submetidos a ciclos de molhagem, secagem e desgaste com escova metálica, a fim de verificar sua durabilidade, através dos cálculos de variação de massa e volume

Figura 65 – Três grupos de corpos de prova cilíndricos a serem medidos com paquímetro.



Fonte: Autora (2024).

Esse ensaio foi realizado apenas com a mistura de solo-cimento de traço 1:6 com cimento CPV-ARI, por ser o lote em que os resultados de resistência a compressão atenderam aos requisitos. Foram separados três corpos de prova de cada tipo, o nº1 foi usado para obter a variação de volume durante o ensaio e os nº 2 e 3, para obter a perda de massa.

Os corpos de prova foram medidos imediatamente após a desmoldagem e curados assim como os tijolos, por sete dias. Após este período, os corpos de prova nº 1 foram medidos

novamente e depois todos foram imersos em água por 5 horas. Em seguida foi retirado o excesso de água com pano úmido, dos corpos de prova nº 1 que foram novamente medidos e então todos foram levados a estufa por 42 horas a uma temperatura de 71°C. Depois desse período, foram retirados da estufa e os corpos de prova nº 2 e 3 passaram por escovação com escova metálica em toda a superfície. Estes ciclos de molhagem, secagem, medições e escovação, foram repetidos mais cinco vezes.

3.2.9 Ensaios de solubilização e lixiviação dos tijolos

Assim como o lodo, os tijolos de solo-cimento e solo-cimento-lodo produzidos com cimento CPV-ARI com traço de 1:6 (cimento:solo), também passaram por ensaios de solubilização e lixiviação a fim de averiguar o possível arraste de contaminantes presentes na matriz do tijolo.

Para a realização dos ensaios foram retiradas amostras dos tijolos moldados, curados e com idade de 28 dias, que foram preparadas como orientado nas NBR 10006 (ABNT, 2004c) e NBR 10005 (ABNT, 2004b) e seguiu-se com os ensaios seguindo os mesmos procedimentos determinados pelas normas e descritos para a caracterização do lodo.

Os extratos lixiviados e solubilizados obtidos, também foram analisados por Espectrofotometria na região do UV-vis e Cromatografia de íons.

3.2.10 Análise microestrutural dos tijolos

A análise microestrutural dos tijolos de solo-cimento foi realizada por MEV, DRX, FRX e FTIR, seguindo os mesmos procedimentos e nos mesmos equipamentos descritos para estes ensaios com o lodo têxtil. Esta etapa foi fundamental para investigar o mecanismo de fixação do lodo na matriz do tijolo, analisar os constituintes presentes nos traços estudados e entender se houve mudança da microestrutura/poros consequentes à incorporação do lodo têxtil relacionáveis à imobilização do resíduo. Estes resultados foram relacionados com os dados de lixiviação para ter informações sobre a durabilidade dos tijolos. O grupo de tijolos caracterizado pelos ensaios microestruturais citados, foram os produzidos com o cimento CPV-ARI e com traço cimento:solo de 1:6, com porcentagens de 0% (referência), 1 e 5% de lodo têxtil.

3.2.11 Perda ao fogo

O procedimento utilizado para a execução do ensaio de perda ao fogo para os tijolos, foi o mesmo realizado para o lodo e relatado anteriormente. A preparação da amostra foi realizada inicialmente pela quebra de um tijolo de cada traço estudado e posterior, trituração, moagem e peneiramento a fim de obter-se o a finura dos grãos desejada de 0,075 mm, passando assim na peneira de número 200. A partir deste ensaio foi possível a obtenção dos teores de orgânicos presentes nos tijolos.

Para este ensaio também foram utilizados apenas os tijolos produzidos com traço 1:6 e cimento CPV-ARI.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaios de caracterização do solo

4.1.1 Umidade higroscópica e Limites de Atteberg

Os resultados das propriedades tecnológicas das amostras de solo coletadas, que foram determinantes para a escolha do solo a ser utilizado (Umidade Higroscópica e Limites de Atteberg), são apresentados na Tabela 9.

Tabela 10 – Umidade higroscópica e Limites de Atteberg dos solos analisados.

Propriedade tecnológica	Solo de Riacho das Almas	Solo de Caruaru
Umidade Higroscópica	0,28%	2,041%
Limite de Liquidez	-	24,50%
Limite de Plasticidade	-	19,50%

Fonte: Autora (2024).

O solo de Riacho das Almas apresentou umidade higroscópica de 0,28% e não apresentou Limite de Liquidez, uma vez que houve impossibilidade de se conseguir obter a abertura da ranhura com o cinzel. Além disso, este solo também não apresentou Limite de Plasticidade, pois não foi possível a realização do ensaio, já que o cilindro de massa de solo, não atingiu o diâmetro e comprimento exigidos pela norma, sem se partir.

A umidade higroscópica do solo de Caruaru foi de 2,041% e apresentou um Limite de Liquidez de 24,5%, que por ser menor do que 45%, atende aos requisitos da NBR 10833 (ABNT, 2013a). O Limite de Plasticidade foi de 19,6%, que foi obtido como a média entre três valores de umidade que não diferiram em no máximo 5% da média.

O resultado do limite de plasticidade do solo de Caruaru não atende ao limite exigido na NBR 10833 (ABNT, 2013a), por ser um valor maior do que 18%. Mas como apresenta-se em pequena diferença, optou-se por seguir com a utilização deste solo, para os demais ensaios de caracterização e a posterior confecção dos tijolos.

O solo de Riacho das Almas, apesar apresentar coloração mais avermelhada e por isso aparentar ser argiloso, não possui essa característica. E por não apresentar os limites de liquidez e plasticidade, sendo considerado pela NBR 10833 (ABNT, 2013a), como Não Plástico (NP), foi descartado como opção de uso para o seguimento desta pesquisa.

4.1.2 Determinação do Índice de Plasticidade

Seguindo as recomendações da NBR 7180 (ABNT, 2016b) para o cálculo do Índice de Plasticidade, sendo o limite de liquidez do solo de Caruaru igual a 24,5% e o limite de plasticidade igual a 19,6%, tem-se assim o índice de plasticidade igual a 4,9%, classificado por Jenkins (*apud* Caputo, 1988) como solo fracamente plástico, mas ainda atendendo ao requisito da NBR 10833 (ABNT, 2013a) para solos utilizados em tijolos de solo-cimento.

4.1.3 Análise Granulométrica

As Tabelas 10 e 11, apresentam os resultados dos peneiramentos grosso e fino da análise granulométrica realizada como o solo do município de Caruaru-PE, respectivamente.

Tabela 11 – Peneiramento grosso da amostra.

Peneira - Polegada	Peneira - mm	Massa Retida (g)	Massa que passa (g)	% que passa da amostra total
1 1/2"	38.10	0,00	439,01	100,00
1"	25.40	0,00	439,01	100,00
3/4"	19.10	0,00	439,01	100,00
3/8"	9.52	0,00	439,01	100,00
No. 4	4.76	0,28	438,73	99,94
No. 10	2.00	415,37	23,36	5,32

Fonte: Autora (2024).

Tabela 12 – Peneiramento fino da amostra.

Peneira		Peso retido	Massa que passa	% que passa da amostra total
Polegada	mm			
No. 16	1.190	16,86	78,90	4,38
No. 30	0.590	24,35	54,55	3,03
No. 40	0.420	14,60	39,95	2,22
No. 50	0.297	13,34	26,61	1,48
No. 100	0.149	15,65	10,96	0,61
No. 200	0.075	10,32	0,64	0,04

Fonte: Autora (2024).

Além do ensaio de peneiramento, foi realizado o ensaio de sedimentação com e sem defloculante para a análise dos finos (argila e silte) possivelmente presentes no solo. As leituras realizadas no densímetro constam nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 13 – Sedimentação com defloculante.

TEMPO DECORRIDO	LEITURA (L)	TEMP. (o C)	CORREC. DO TEMP.	LEITURA CORR. (LC)	ALT. DE QUEDA (cm)	LEIT.COR. FINAL	"d" DOS GRAOS (mm)	% <d AM. TOTAL (Q)
15	17,00	26,00	0,07	17,00	12,83	1,0151	0,0633	1,85
1 min.	15,00	26,00	0,07	15,00	13,13	1,0131	0,0453	1,60
2 min.	13,50	26,00	0,07	13,50	13,36	1,0116	0,0323	1,42
4 min.	13,00	26,00	0,07	13,00	12,73	1,0111	0,0223	1,36
8 min.	12,00	26,00	0,07	12,00	12,88	1,0101	0,0159	1,24
15 min.	12,00	26,00	0,07	12,00	12,88	1,0101	0,0116	1,24
30 min.	11,00	26,00	0,07	11,00	13,03	1,0091	0,0082	1,11
1 h	10,50	26,00	0,07	10,50	13,11	1,0086	0,0058	1,05
2 h	10,00	26,00	0,07	10,00	13,18	1,0081	0,0041	0,99
4 h	9,50	26,00	0,07	9,50	13,26	1,0076	0,0029	0,93
8 h	9,50	26,00	0,07	9,50	13,26	1,0076	0,0021	0,93
25 h	8,50	26,00	0,07	8,50	13,41	1,0066	0,0012	0,81

Fonte: Autora (2024).

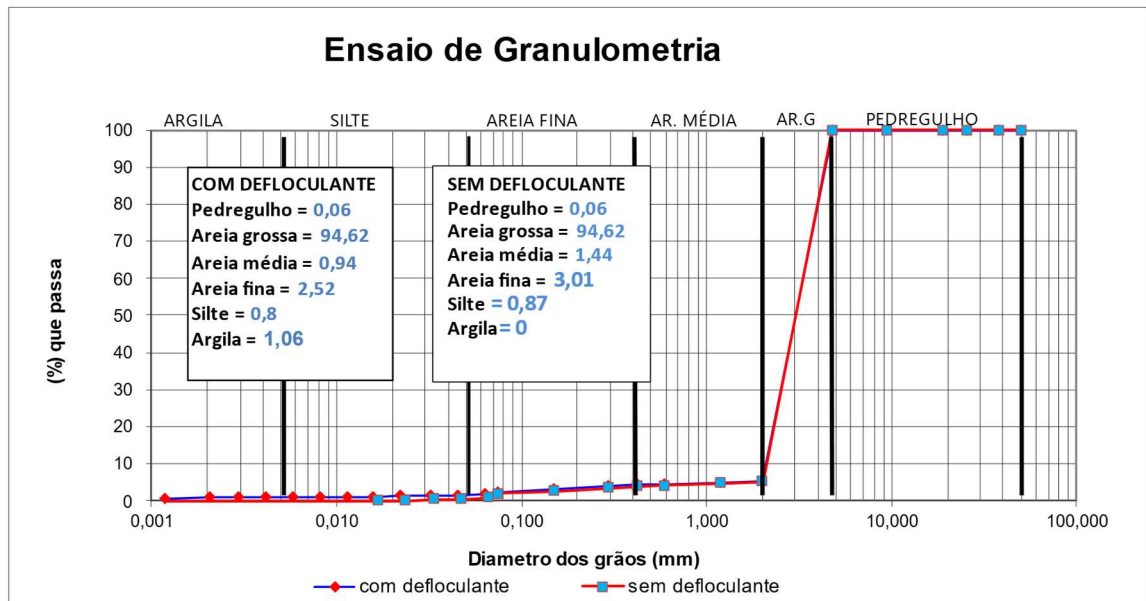
Tabela 14 – Sedimentação sem defloculante.

TEMPO DECORRIDO	LEITURA (L)	TEMP. (o C)	CORREC.DO TEMP.	LEITURA CORR.(LC)	ALT. DE QUEDA (cm)	LEIT.COR. FINAL	"d" DOS GRAOS (mm)	% <d AM. TOTAL(Q)
15	9,00	26,00	0,07	9,00	14,03	1,0071	0,0662	0,87
1 min.	7,00	26,00	0,07	7,00	14,33	1,0051	0,0473	0,62
2 min.	6,00	26,00	0,07	6,00	14,48	1,0041	0,0336	0,50
4 min.	3,00	26,00	0,07	3,00	14,23	1,0011	0,0236	0,13
8 min.	2,50	26,00	0,07	2,50	14,31	1,0006	0,0167	0,07
15 min.	1,00	26,00	0,07	1,00	14,53	0,9991	0,0123	-0,11
30 min.	1,00	26,00	0,07	1,00	14,53	0,9991	0,0087	-0,11
1 h	1,00	26,00	0,07	1,00	14,53	0,9991	0,0062	-0,11
2 h	1,00	26,00	0,07	1,00	14,53	0,9991	0,0043	-0,11
4 h	1,00	26,00	0,07	1,00	14,53	0,9991	0,0031	-0,11
8 h	1,00	26,00	0,07	1,00	14,53	0,9991	0,0022	-0,11
25 h	1,00	26,00	0,07	1,00	14,53	0,9991	0,0012	-0,11

Fonte: Autora (2024).

O gráfico representado na Figura 66 foi obtido por meio dos dados apresentados nas Tabelas 10, 11, 12 e 13 e representa a curva granulométrica do solo do município de Caruaru.

Figura 66 – Curva granulométrica do solo de Caruaru-PE.



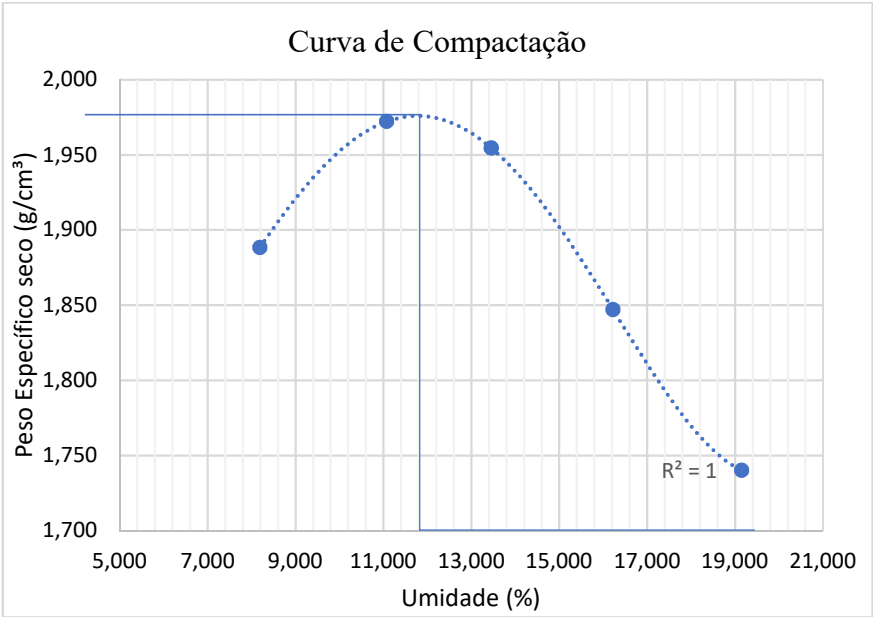
Fonte: Autora (2024).

Observa-se que o defloculante permitiu uma melhor verificação dos finos presentes no solo. Portanto, com as porcentagens de cada granulometria definida na análise, obtidas de acordo com as classificações de Toledo (2005), foi observada uma porcentagem de 0,06% de pedregulho, 94,62% de areia grossa, 0,94% de areia média, 2,52% de areia fina, 0,8% de silte e 1,06% de argila. É possível observar que quase 100% do material é passado na peneira 4,75 mm (Nº4), aproximando-se da recomendação da NBR 10833 (ABNT, 2013a).

4.1.4 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação do solo foi realizado com a finalidade de obter-se a umidade ótima de compactação, que seria a base da água a ser adicionada na mistura de solo-cimento. O ensaio foi realizado com um molde metálico de 1002,48 cm³ de volume, 10 cm de diâmetro e 12,764 cm de altura. Com dados obtidos no ensaio foi possível a elaboração do gráfico representado na Figura 67, que apresenta a curva de compactação do solo, onde o valor da umidade correspondente ao ponto de massa específica aparente seca máxima, condiz a umidade ótima de compactação solo de 11,8%.

Figura 67 – Curva de compactação do solo de Caruaru-PE.



Fonte: Autora (2024).

4.1.5 Determinação da densidade real dos grãos

A densidade real dos grãos do solo do município de Caruaru foi de 2,707 g/m³. Os dados obtidos no ensaio estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 15 – Dados do ensaio de densidade real dos grãos do solo.

Dados	Ensaio
Picnômetro No.	1
Temperatura (°C) = T1	23
Peso do Picnômetro (g) = P1	27,73
Peso do Picnômetro + Solo (g) = P2	37,4
Peso Picnômetro + Água + Solo (g) = P3	85,36
Peso Picnômetro + Água (g) = P4	79,26
Densidade real (g/m3)	2,709
Densidade Relativa Da Água Em T1 (Tabela)	0,9976
Densidade Relativa Da Água A 20°C (Tabela)	0,9982
Razão Da Densidade Relativa Da Água Em T1 e a 20°C	0,9994
Densidade a 20°C (g/m3)	2,707

Fonte: Autora (2024).

4.2 Ensaios tecnológicos dos tijolos

4.2.1 Ensaio de resistência à compressão

Foram estudados os traços cimento:solo 1:10, 1:8 e 1:6, tendo em vista a necessidade de se atender os requisitos de resistência à compressão e absorção de água exigidos para tijolos de solo cimento da NBR 8491 (ABNT, 2017).

O traço 1:10 de sigla L1A-0, produzido inicialmente por recomendação da ABCP, sem adição de resíduo e com cimento CII-Z-32, não apresentou resultados satisfatórios aos requisitos normativos de resistência média de 2,0 MPa para a idade de 7 dias, conforme apresentados na Tabela 15, e por isso foi descartado deste estudo.

Tabela 16 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L1A-0 aos 7 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	16305,35	1,348
2	16522,22	1,365
3	27190,69	2,247
4	18287,8	1,511
5	18560,93	1,534
6	16230,58	1,341
7	18134,88	1,499
Média Total		1,549
Desvio Padrão		0,3186

Fonte: Autora (2024).

Foram produzidos tijolos de traço 1:8 (L1B-0), também com cimento CII-Z-32, sem adição de resíduo, que também não atingiram os requisitos mínimos de resistência à compressão aos 7 dias, como pode ser observado na Tabela 16.

Tabela 17 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L1B-0 aos 7 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	24880,89	2,056
2	17136,1	1,416
3	26998,71	2,231
4	23913,91	1,976
5	21296,07	1,76
6	18530,42	1,531
7	18204,07	1,504
Média Total		1,782
Desvio Padrão		0,3133

Fonte: Autora (2024).

Um novo lote de tijolos foi confeccionado com o traço 1:6 ainda com o cimento CPII-Z-32, e desta vez foi produzido o traço de referência sem resíduo (L2A-0) e os demais com a incorporação de resíduos em 1% (L2A-1) e 5% (L2A-5), apresentados na Tabela 17, 18 e 19 respectivamente. É possível observar que este lote também não atendeu aos requisitos normativos definidos para resistência à compressão aos 7 dias, mas apesar disso é perceptível que a inserção de lodo na mistura, promoveu aumento na resistência, sobretudo com a incorporação de 1% do resíduo.

Tabela 18 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2A-0 aos 7 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	19423,25	1,605
2	18455,65	1,525
3	22539,43	1,863
4	15741,25	1,301
5	16969,63	1,402
6	21014,31	1,737
7	16323,38	1,349
Média Total		1,540
Desvio Padrão		0,2083

Fonte: Autora (2024).

Tabela 19 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2A-1 aos 7 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	24187,33	1,999
2	26219,04	2,167
3	19089,98	1,578
4	28377,48	2,345
5	23598,38	1,95
6	17326,21	1,432
7	26067,5	2,154
Média Total		1,946
Desvio Padrão		0,3301

Fonte: Autora (2024).

Tabela 20 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2A-5 aos 7 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	21114,25	1,745
2	20506,67	1,695
3	19719,93	1,63
4	25066,42	2,072
5	20753,05	1,715
6	19545,13	1,615
7	26218,13	2,167
Média Total		1,806
Desvio Padrão		0,2209

Fonte: Autora (2024).

A análise dos dados de resistência à compressão sugere que as características do solo da região comprometem a confecção de tijolos de solo-cimento, sendo necessário o uso de um cimento com melhor qualidade que permita alcançar melhor desempenho mecânico. Por esse motivo, visando atingir as resistências mínimas média de 2,0 MPa e unitária de 1,7 MPa, solicitadas pela NBR 8491 (ABNT, 2017) para tijolos de solo cimento aos 7 dias, e baseando-se nos estudos de Grande (2003), Fernandes Junior (2017) e Veiga e Santos (2017), optou-se pela produção de um novo grupo de tijolos agora empregando o cimento CP V – ARI que oferece alta resistência inicial, o que proporcionou ganhos na resistência nas primeiras idades dos tijolos, garantindo o alcance dos valores de resistências normativas.

Para este traço foram produzidos tijolos de solo-cimento de referência (L2B-0), com incorporação de 1% de lodo têxtil (L2B-1) e com 5% de lodo têxtil (L2B-5). Esta análise foi realizada para as idades de 7, 14 e 28 dias, a fim de observar a evolução da resistência até a idade recomendada ao uso dos tijolos.

Os resultados de resistência à compressão para os tijolos de referência estão dispostos nas Tabelas 20, 21 e 22 para as idades de 7, 14 e 28 dias respectivamente.

Tabela 21 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-0 aos 7 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	28932	2,391
2	25410,46	2,1
3	23274,9	1,924
4	20912,52	1,728
5	23599,2	1,95
6	26409,77	2,183
7	21703,2	1,794
Média Total		2,010
Desvio Padrão		0,2311

Fonte: Autora (2024).

Tabela 22 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-0 aos 14 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	30043,55	2,483
2	27490,19	2,272
3	22834,4	1,887
4	29857,92	2,468
5	27713,11	2,29
6	31996,06	2,644
7	27135,32	2,243
Média Total		2,327
Desvio Padrão		0,2414

Fonte: Autora (2024).

Tabela 23 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-0 aos 28 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	26198,96	2,165
2	34533,76	2,854
3	28532,10	2,358
4	29463,81	2,435
5	27527,79	2,275
6	28967,70	2,394
7	24030,85	1,986
Média Total		2,352
Desvio Padrão		0,2694

Fonte: Autora (2024).

Os resultados de resistência à compressão obtidos para os tijolos com incorporação de 1% de lodo têxtil (L2B-1) também alcançaram os requisitos determinados, e ainda com acréscimo nos valores de resistência à compressão como observado nas Tabelas 23, 24 e 25 para as idades de 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

Tabela 24 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-1 aos 7 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	27411,17	2,265
2	30671,6	2,535
3	23768,71	1,964
4	24144,13	1,995
5	27981,52	2,313
6	27147,82	2,244
7	23386,19	1,933
Média Total		2,178
Desvio Padrão		0,2225

Fonte: Autora (2024).

Tabela 25 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-1 aos 14 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	24171,16	1,998
2	27980,47	2,312
3	28246,93	2,334
4	23378,28	1,932
5	32559,35	2,691
6	26926,66	2,225
7	26937,48	2,226
Média Total		2,245
Desvio Padrão		0,2487

Fonte: Autora (2024).

Tabela 26 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-1 aos 28 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	31937,88	2,639
2	26372,77	2,18
3	23186,92	1,916
4	25199,32	2,083
5	31997,44	2,644
6	28072,83	2,32
7	30436,56	2,515
Média Total		2,328
Desvio Padrão		0,2838

Fonte: Autora (2024).

Os resultados de resistência à compressão para os tijolos produzidos com 5% de lodo têxtil também atenderam aos requisitos normativos e apresentaram valores superiores aos dos tijolos sem lodo e dos tijolos com 1% de lodo na idade de 7 dias. Porém, esses valores de resistências regrediram na idade de 14 dias e um pouco mais na idade de 28 dias. Isso pode ser observado nas Tabelas 26, 27 e 28.

Tabela 27 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-5 aos 7 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	33018,4	2,729
2	36122,61	2,985
3	34699,2	2,868
4	32414,67	2,679
5	27960,63	2,311
6	32054,76	2,649
7	25121,88	2,076
Média Total		2,614
Desvio Padrão		0,3168

Fonte: Autora (2024).

Tabela 28 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-5 aos 14 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	26898,29	2,223
2	27129,13	2,242
3	30700,4	2,537
4	26990,7	2,231
5	31253,62	2,583
6	30489,06	2,52
7	34009,93	2,811
Média Total		2,450
Desvio Padrão		0,2248

Fonte: Autora (2024).

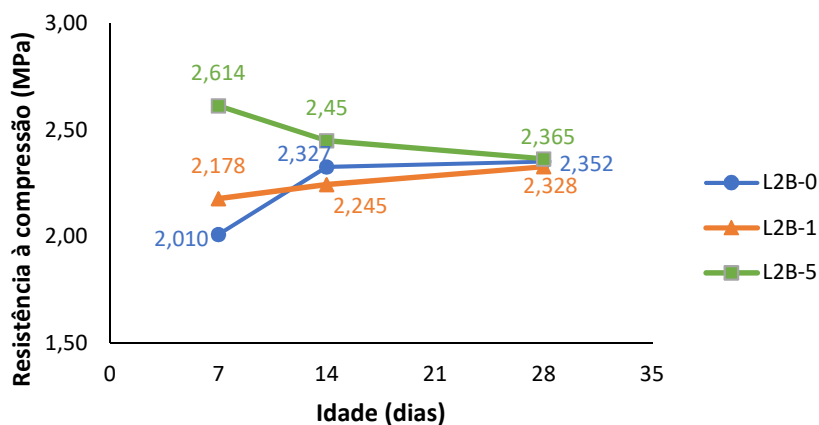
Tabela 29 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos tijolos L2B-5 aos 28 dias.

Corpo de prova	Tensão de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	26584,86	2,197
2	32943,63	2,723
3	27250,58	2,252
4	32116,65	2,654
5	22329,81	2,488
6	25861,98	2,137
7	25458,96	2,104
Média Total		2,365
Desvio Padrão		0,2543

Fonte: Autora (2024).

Na Figura 68 é possível observar a evolução da resistência à compressão (MPa) dos tijolos de solo-cimento produzidos no traço de 1:6 com o cimento CPV – ARI, nas porcentagens de 0, 1 e 5% de inserção de lodo têxtil, para as idades de 7, 14 e 28 dias.

Figura 68 – Comparação da evolução da resistência à compressão em tijolos de solo-cimento e solo-cimento-lodo com inserção de lodo em percentuais de 1 e 5%.



Fonte: Autora (2024).

É possível observar que a presença de lodo têxtil na mistura solo-cimento promoveu um discreto ganho na resistência à compressão dos tijolos aos 7 dias. Esta tendência ao aumento de resistência é observado apenas nas idades iniciais. Aos 14 dias e 28 dias, os resultados sugerem que o desempenho das amostras é o mesmo independente da incorporação do lodo na massa de solo-cimento, indicando que é possível produzir os tijolos de solo-cimento sem prejuízos mecânicos aos sistema. O beneficiamento do lodo têxtil produziu partículas finas (passantes na peneira de 200 mesh) o que favorece a dispersão deste resíduo na mistura e o preenchimento de vazios. Além disso, o lodo têxtil beneficiado parece possuir plasticidade em contado com a água, contribuindo para a homogeneidade da mistura.

4.2.2 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado para todos os lotes produzidos apenas para a idade de 7 dias. Os valores médios de absorção de água destes, estão dispostos na Tabela 29.

Tabela 30 – Absorção de água média em tijolos de solo-cimento com e sem lodo têxtil.

Cimento	Traço	Teor de cimento	Teor de solo	Teor de lodo	Absorção de água média aos 7 dias (MPa)
CP II-Z-32	1:10	10%	100%	0%	17,95
	1:8	12,5%	100%	0%	15,49
	1:6	16,7%	100%	0%	16,81
	1:6	16,7%	99%	1%	16,73
	1:6	16,7%	95%	5%	17,19
CPV - ARI	1:6	16,7%	100%	0%	17,42
	1:6	16,7%	99%	1%	16,67
	1:6	16,7%	95%	5%	18,29

Fonte: Autora (2024).

Para o lote de tijolos que obteve valores de resistência à compressão satisfatórios, o ensaio de absorção de água foi realizado nas idades de 7, 14 e 28 dias. Portanto, foram ensaiados por absorção de água em três idades, apenas os tijolos de traço 1:6, produzidos com cimento CPV-ARI. São os tijolos sem inserção de lodo (referência) e com inserção de lodo têxtil em percentuais de 1 e 5%, à idade de 7, 14 e 28 dias. Os resultados de absorção de água individuais de cada Corpo de Prova (CP) estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 31 – Absorção de água individual em tijolos de solo-cimento de traço 1:6 fabricados com cimento CPV-ARI.

Absorção de água individual dos tijolos de solo-cimento (%)										
Idades	NBR 8491	0%			1%			5%		
		CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3
7 dias	22 (máximo)	16,78	19,69	15,78	14,02	18,60	12,66	18,48	18,25	18,14
14 dias	-	16,90	19,15	16,51	15,25	14,74	15,34	18,89	15,23	16,90
28 dias	-	15,19	14,51	14,41	11,71	17,73	12,46	18,93	14,03	16,91

Fonte: Autora (2024).

Em todas as idades e para todas as porcentagens de incorporação de lodo têxtil, os tijolos de solo-cimento atenderam aos requisitos citados na NBR 8491 (ABNT, 2017), por apresentar valores de absorção de água individuais inferiores a 22% aos 7 dias.

Os resultados absorção de água médio para os tijolos de solo-cimento e solo-cimento-lodo, nas três idades estudadas também foram satisfatórios aos requisitos da NBR 8491 (ABNT, 2017), pois não excederam o percentual de 20% recomendado, como pode ser observado na Tabela 31.

Tabela 32 – Absorção de água média em tijolos de solo-cimento de traço 1:6 fabricados com cimento CPV-ARI.

Absorção de água média (%)				
Idades	NBR 8491	0%	1%	5%
7 dias	20 (máximo)	17,42	16,67	18,29
14 dias	-	17,52	15,11	17,01
28 dias	-	14,71	13,96	16,62

Fonte: Autora (2024).

Em Anjum *et al.* (2017), a absorção de água de tijolos de solo-cimento com resíduo de lodo de ETA, com percentuais de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%, aumentou à medida que era acrescido a quantidade de resíduo na mistura. Todas as amostras apresentaram absorção de água abaixo do limite de 20%, mas os resultados apresentados no estudo, são apenas para a idade de 28 dias, onde já se espera que a absorção de água seja menor, devido a melhor evolução nas reações de hidratação do cimento.

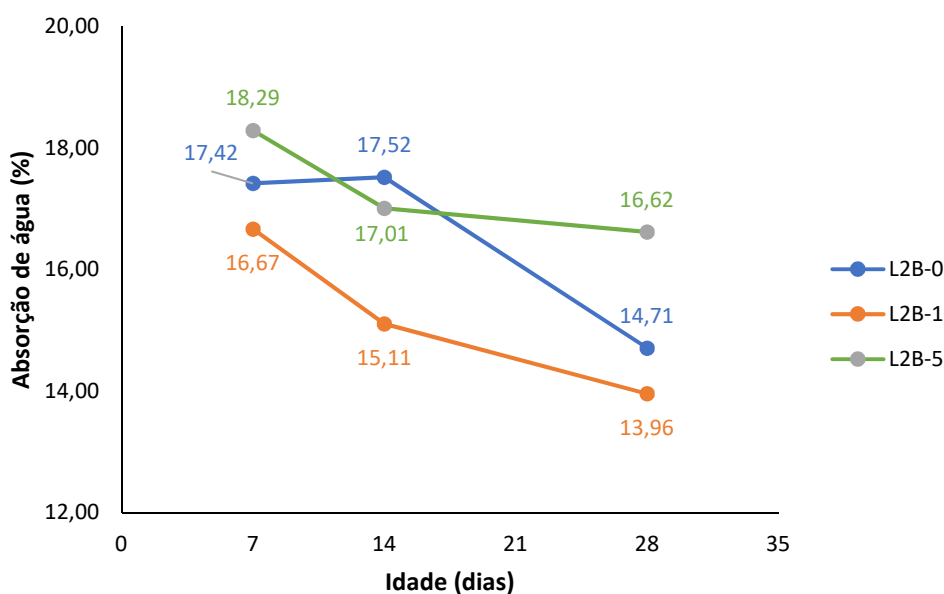
Rodrigues e Holanda (2015) também só relataram as porcentagens de absorção de água aos 28 dias. Mas apesar disso, é possível notar que a medida em que o resíduo foi acrescido na mistura, os percentuais de absorção de água também aumentaram. E mesmo estando em uma idade mais avançada, apenas a amostra de solo-cimento com 1,25% de lodo de ETA não

ultrapassou o teor de 20% de absorção de água definido pela NBR 8491 (ABNT, 2017) para a idade de 7 dias. As amostras com 2,5% e 5% já ultrapassaram esse limite.

No que se refere aos resultados do ensaio de absorção de água do presente estudo (Tabelas 31 a 39), todos os tijolos produzidos no traço 1:6 e cimento CPV-ARI apresentaram valores abaixo do valor máximo permitido em todas as idades com as duas concentrações de lodo têxtil investigadas.

É importante destacar o efeito do percentual de lodo têxtil no solo-cimento. Quando usado na concentração de 1%, a presença de lodo têxtil parece ter desempenhado efeito de preenchimento nos espaços da matriz de solo-cimento ou contribuído para melhor molhamento das partículas, e assim melhor compactação do material, e menor absorção de água. Entretanto, com 5% de substituição observa-se que o percentual de absorção de água tende a subir. Possivelmente, a quantidade de vazios com tamanhos semelhantes aos das partículas de lodo têxtil são saturadas quando 5% de lodo têxtil é incorporado à mistura, ou que com mais lodo no sistema sua dispersão tenha sido prejudicada, resultando em valores maiores de absorção de água. Essas observações também podem ser melhores visualizadas no gráfico da Figura 69.

Figura 69 – Comparação da evolução da absorção de água em tijolos de solo-cimento e solo-cimento-lodo com inserção em percentual de 1 e 5%.



Fonte: Autora (2024).

4.2.3 Ensaio de durabilidade

O resultado deste ensaio consiste na obtenção da perda de massa sofrida pela mistura solo-cimento e estão apresentados na Tabela 32. É possível perceber que as misturas de solo-cimento com resíduo de lodo têxtil não apresentaram diferenças significativas nos teores de perda de massa. Entretanto, a presença de lodo têxtil nos tijolos de solo-cimento resultou num aumento na perda de massa após ciclos sucessivos de molhagem, secagem e desgaste com escova metálica.

Tabela 33 – Perda de massa nos ensaios de durabilidade de tijolos de solo-cimento (1:6) com 0, 1 e 5% de lodo têxtil.

DURABILIDADE - ABNT NBR 13554:2012		
AMOSTRAS	TRAÇO	Perda de massa (%)
Solo cimento sem lodo	1:6	0,307
Solo cimento com 1% de lodo	1:6	0,973
Solo cimento com 5% de lodo	1:6	0,941

Fonte: Autora (2024).

As perdas de massa dos três traços estudados, se adequam aos requisitos do Estudo Técnico da ABCP (2004) sobre dosagens das misturas de solo cimento, que recomenda para solos do tipo A1, que a perda de massa após ciclos de molhagem e secagem sejam inferiores a 14%.

Fernandes Junior (2017) realizou o ensaio de durabilidade para tijolos de solo-cimento com resíduo de fabricação de papel, para o traço de 1:9 (cimento:solo) e incorporação de resíduo em teores de 5, 10 e 15% como substituição parcial do solo. Os resultados apontaram uma perda de massa de 4,5% para os tijolos de solo-cimento e de 6%, 8,5% e 11,8% para os tijolos de solo-cimento-sílica com 5, 10 e 15% respectivamente.

Souza (2013) também analisou quanto à durabilidade, os tijolos de solo-cimento com substituição parcial da água de mistura por manipueira (efluente proveniente da prensagem da mandioca na fabricação de farinha). Os teores de perda de massa não ultrapassaram 1% em nenhuma das amostras. De acordo com o autor, os teores de perda de massa podem estar relacionados à compactação, a forma de prensagem e até pela estabilização química proporcionada pelo cimento.

4.3 Caracterização microestrutural do lodo têxtil e dos tijolos

4.3.1 Perda ao fogo

Como produto do ensaio de perda ao fogo foram obtidos os teores de orgânicos presentes no lodo têxtil, nos tijolos de solo-cimento e no solo utilizado para a sua confecção. Os valores obtidos na execução do ensaio, junto ao resultado final através do cálculo do teor de orgânicos estão relacionados na Tabela 33.

Tabela 34 – Dados do experimento e resultado do ensaio de perda ao fogo.

Identificação	Massa do material depois da Estufa (g)	Massa do material depois da mufla (g)	Teor de orgânicos (%)
Tijolo referência	7,1366	6,9406	2,7464
Tijolo 1%	6,4135	6,2135	3,1184
Tijolo 5%	5,6932	5,4428	4,3982
Lodo têxtil	4,2053	3,2588	22,5073
Solo	8,4904	8,2543	2,7808

Fonte: Autora (2024).

É possível perceber um acréscimo no teor de orgânicos a medida em que é também acrescido o teor de lodo têxtil nas amostras de tijolos, como esperado.

Moura *et al.* (2021b) também analisaram o teor de orgânicos presentes no lodo têxtil de lavanderia de jeans do município de Toritama-PE, mas pelo método de TGA/DTG, onde foi obtido um teor de 20% de orgânicos, mostrando semelhança ao valor encontrado nessa pesquisa de 22%, que também foi encontrado por Anjum *et al.* (2017) para um lodo de ETA,.

Já o teor de orgânicos também obtido pelo método de TGA/DTG obtido por (Leloup, 2013), para o lodo têxtil de uma lavanderia de Caruaru foi de 12,82%. Isso comprova que diversos fatores podem influenciar na composição final do resíduo de lodo têxtil, como os processos da fabricação do jeans ou até do tratamento do efluente gerado.

4.3.2 FRX

Através dos resultados do ensaio de perda ao fogo e de FRX realizados com o lodo têxtil foi possível a elaboração da Tabela 34, onde as porcentagens de minerais presentes no resíduo foram corrigidas considerando o percentual de orgânicos presentes na amostra.

Tabela 35 – Composições químicas do lodo têxtil por FRX.

Composição	Percentual de componentes do Lodo têxtil (%)
Na ₂ O	1,0084
MgO	18,0176
Al ₂ O ₃	4,2588
SiO ₂	15,4416
P ₂ O ₅	0,4583
SO ₃	4,2739
Cl	2,286
K ₂ O	1,115
CaO	27,2551
MnO	1,4614
Fe ₂ O ₃	1,8081
SrO	0,1086
Orgânicos	22,5073

Fonte: Autora (2024).

Através do resultado foi possível realizar a comparação entre as composições químicas presentes no lodo têxtil aqui estudado e demais pesquisas. Em Moura *et al.* (2021b), que analisou um lodo gerado por uma outra lavanderia de jeans também localizada no município de Toritama - PE, foram encontrados os mesmos compostos e em concentrações próximas, levando a concluir que provavelmente as lavanderias utilizaram os mesmos insumos nos processos de tratamento de efluentes.

O lodo têxtil apresenta uma quantidade considerável de SiO₂, segundo Moura *et al.* (2021b) isso acontece em razão do processo de estonagem do jeans, que consiste no desgaste do tecido por razões estéticas, com utilização de pedras especiais como argila expandida, que apresenta o componente SiO₂ em maior quantidade.

O composto de CaO também apresenta teor expressivo no lodo têxtil, que pode estar associado a cal (CaO) utilizada para o ajuste de pH no processo de tratamento do efluente.

De acordo com Anjos (2017), o cálcio e magnésio presentes na amostra de lodo, podem ser provenientes do processo de lavagem do jeans, uma vez que a água utilizada pode apresentar alto teores destes metais.

O Al₂O₃, está relacionado a etapa de floculação do processo de tratamento do efluente têxtil, por meio da adição de sulfato ou policloreto de alumínio (Moura *et al.*, 2021b).

4.3.3 DRX

Os difratogramas obtidos por meio do ensaio de DRX realizados com as amostras de lodo e dos tijolos de solo-cimento com e sem lodo, estão relacionados nas Figuras , 70, 71, 72 e 73. As fases presentes nas amostras analisadas foram identificadas por meio da comparação entre os dados obtidos de posição e intensidade dos picos de difração, com o banco de dados fornecido pela International Center for Diffraction Data (ICDD) utilizado pelo software HighScore Plus.

Os dados obtidos não mostram modificações importantes entre as amostras de tijolo solo-cimento de referência (sem lodo) e as amostras com 1% e 5% de lodo têxtil.

Observa-se que o lodo tem fração ordenada semelhante ao tijolo de solo-cimento e que talvez por isso tenha sido bem incorporada à mistura. Esse fato já observado em outros trabalhos realizados por este grupo usando este resíduo na produção de outros componentes de construção.

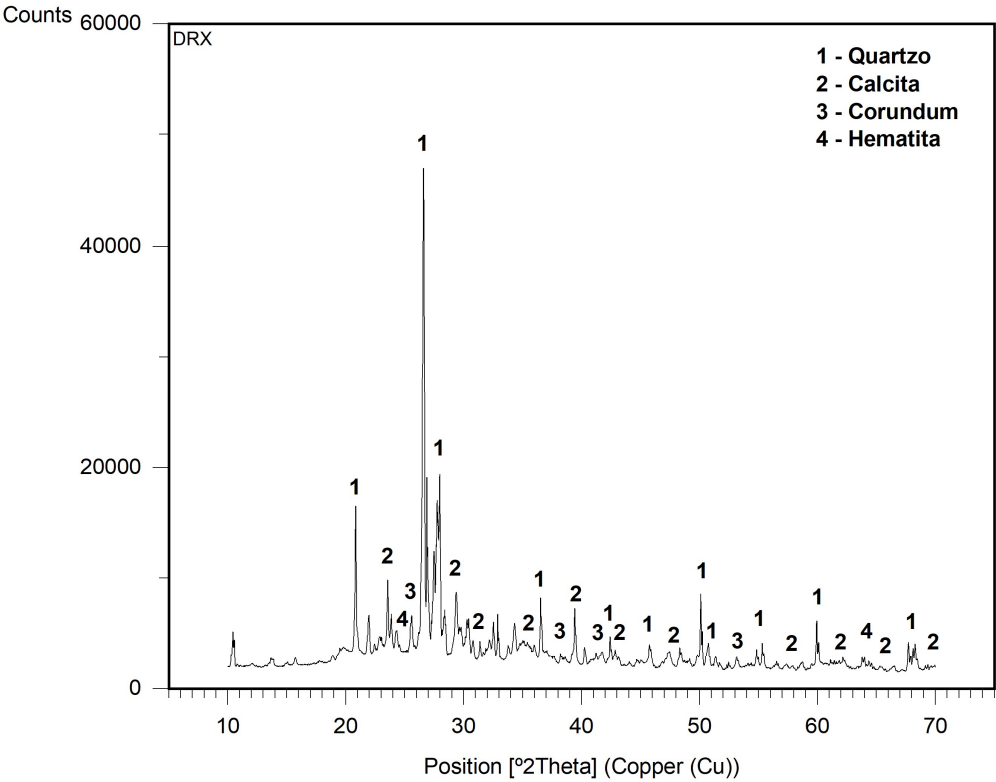
Por meio dos difratogramas foi possível a identificação das fases cristalinas e seus respectivos códigos de referência.

O quartzo se faz presente em todas as amostras analisadas, de acordo com a ficha ICDD 00-046-1045. Nos tijolos de solo-cimento essa fase é predominante e está atrelada ao solo, que possui areia em maior parte de sua composição. Já no lodo têxtil, como relatado nos resultados do FRX, o quartzo (SiO_2) está relacionado ao processo de desgaste do jeans, para fins estéticos. Além disso, na ETE, o lodo têxtil é disposto em tanques de areia, e possivelmente na coleta, parte dessa areia pode ser juntamente coletada.

Nos tijolos de solo-cimento a Calcita com a ficha ICDD 00-005-0586 está relacionado ao carbonato de cálcio presente no calcário do cimento. Já nas amostras de lodo têxtil, esse composto deve estar associado aos produtos utilizados no processo de tratamento do efluente, como a cal. Os demais minerais identificados em fases menores como o Corundum de ficha ICDD 00-010-0173 e a Hematita de ficha ICDD 00-024-0072 estão atribuídos aos minerais do solo, para os tijolos de solo-cimento e na amostra de lodo têxtil o corundum (Al_2O_3) pode estar relacionado ao materiais utilizados no tratamento do efluente.

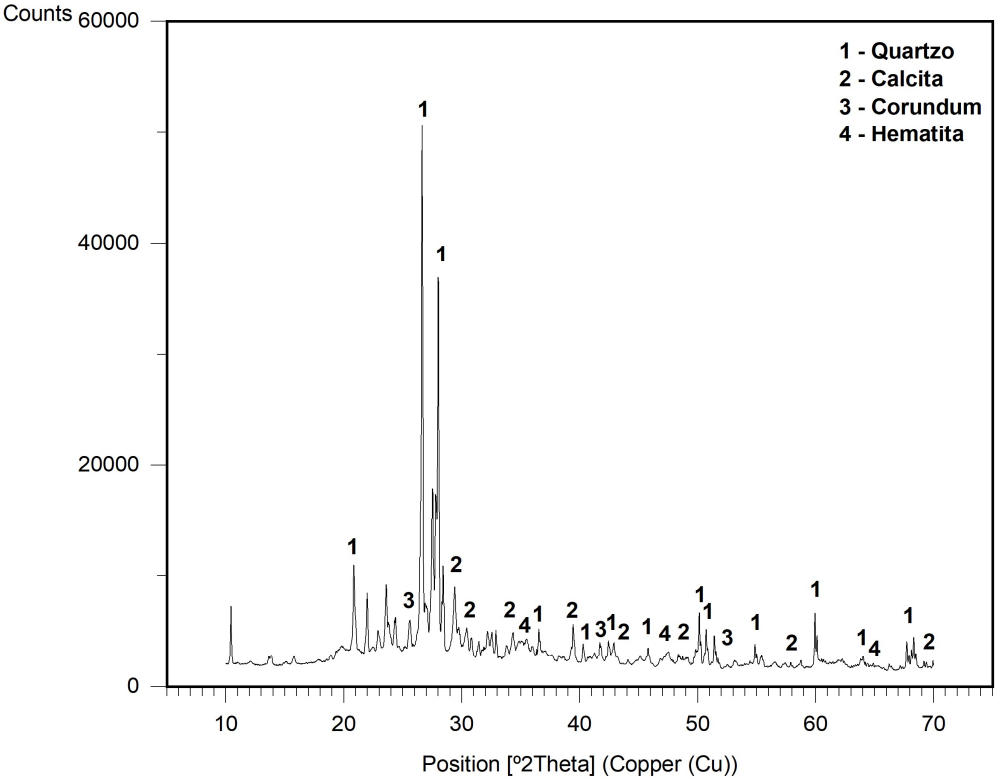
Na análise do lodo têxtil não foram identificadas fases referentes aos corantes tipo azo, por se tratarem de materiais amorfos, portanto não apresentando presença notória nos difratogramas. Apesar disso, estes foram detectados por espectroscopia no UV-vis.

Figura 70 – Difratoograma de raios-X do tijolo de solo-cimento sem lodo.



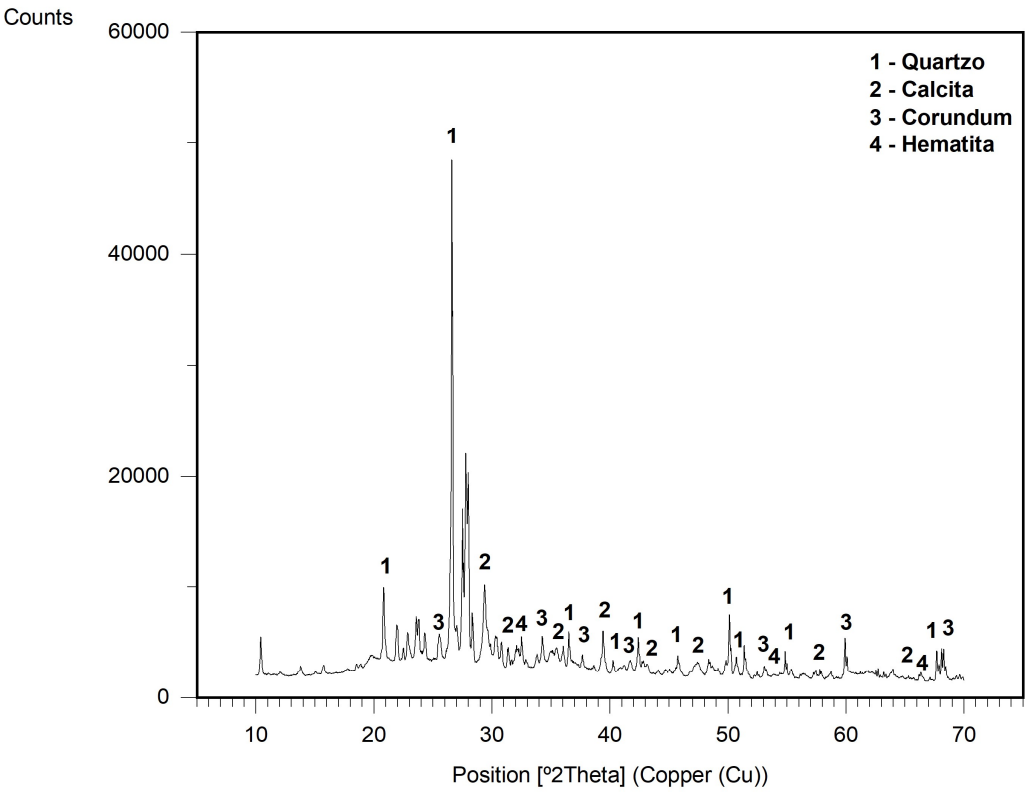
Fonte: Autora (2024).

Figura 71 – Difratoograma de raios-X do tijolo de solo-cimento com 1% de lodo.



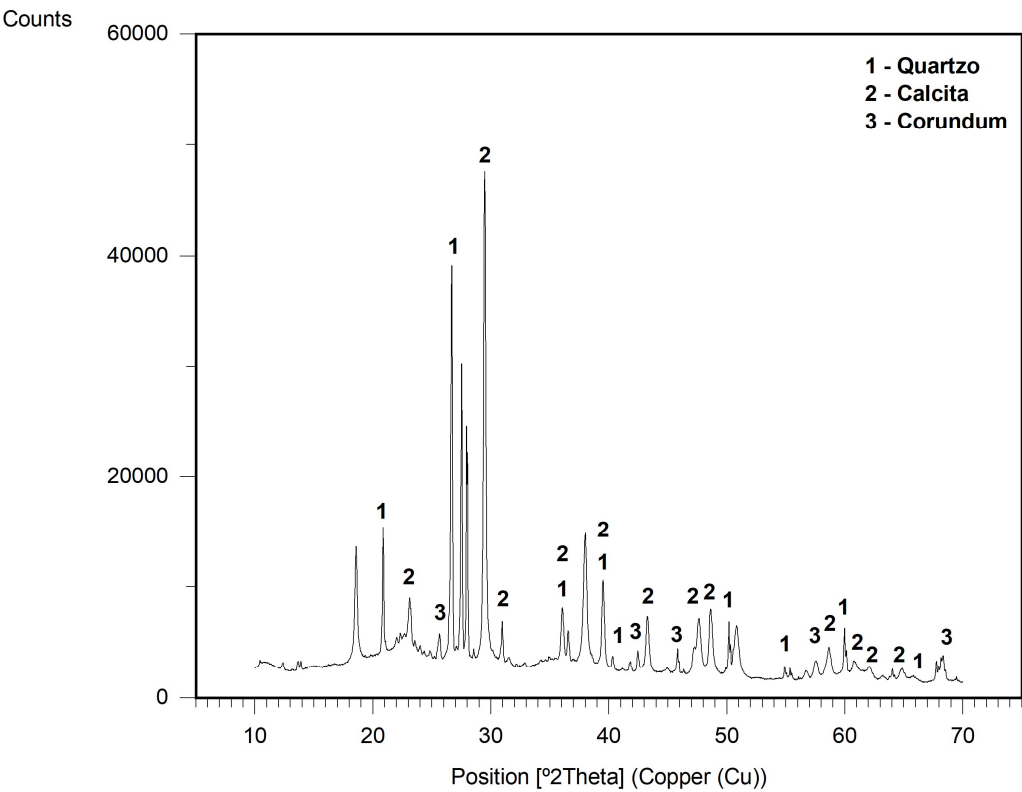
Fonte: Autora (2024).

Figura 72 – Difratoograma de raios-X do tijolo de solo-cimento com 5% de lodo.



Fonte: Autora (2024).

Figura 73 – Difratoograma de raios-X do lodo têxtil.

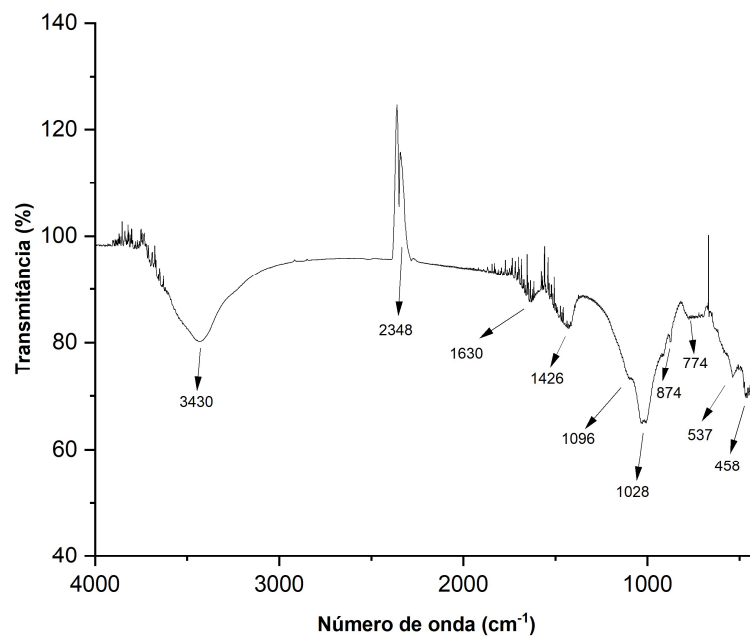


Fonte: Autora (2024).

4.3.4 FTIR

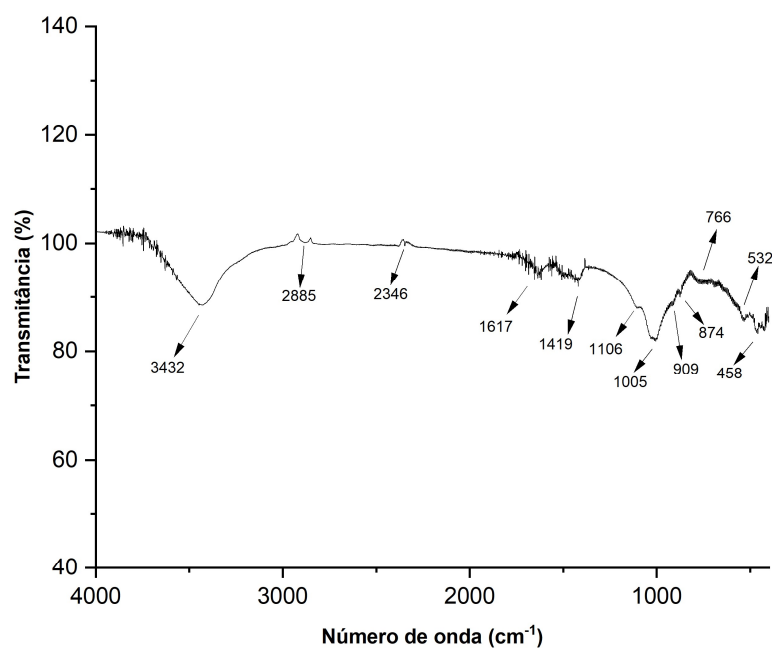
Os espectros infravermelhos referentes aos tijolos de solo-cimento e solo-cimento-lodo e ao lodo têxtil, estão apresentados nas Figuras 74, 75, 76 e 77.

Figura 74 – Espectro infravermelho do tijolo de solo-cimento de referência.



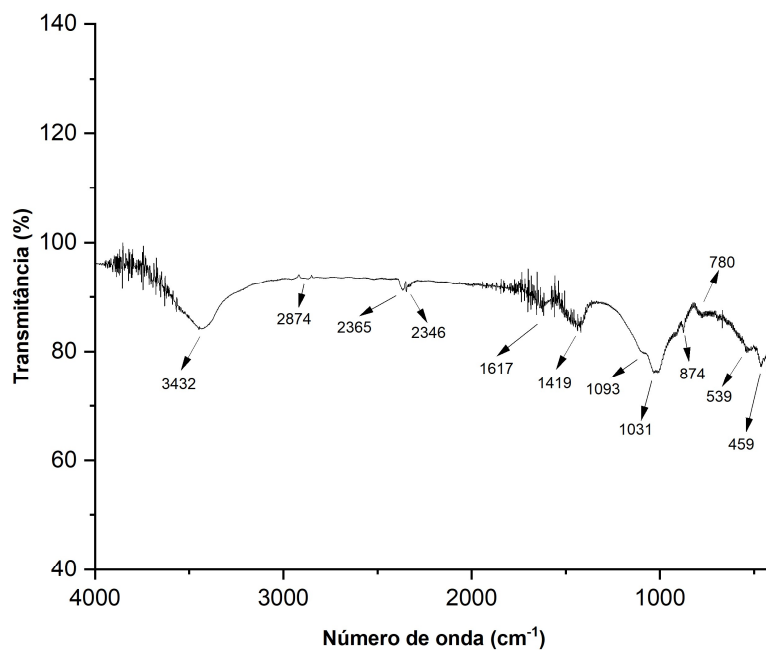
Fonte: Autora (2024).

Figura 75 – Espectro infravermelho do tijolo de solo-cimento com 1% de lodo têxtil.



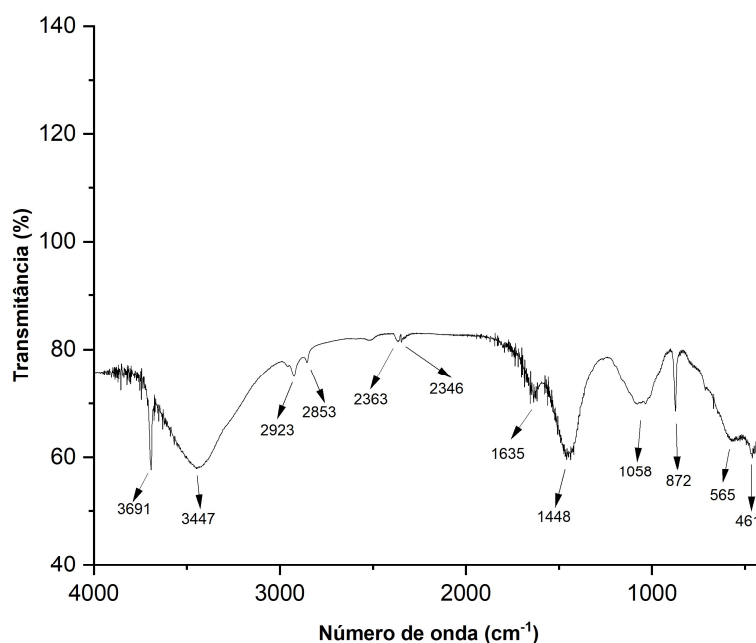
Fonte: Autora (2024).

Figura 76 – Espectro infravermelho do tijolo de solo-cimento com 5% de lodo têxtil.



Fonte: Autora (2024).

Figura 77 – Espectro infravermelho do lodo têxtil.



Fonte: Autora (2024).

Por meio da análise dos espectros é possível observar que apenas a amostra de lodo têxtil apresentou uma banda em 3691 cm^{-1} que por estar no intervalo de $3690 \pm 10\text{ cm}^{-1}$ e $3620 \pm 10\text{ cm}^{-1}$, apresenta absorção típica do argilomineral caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), estando estas bandas relacionadas às vibrações de estiramento Al-O-H (Azevedo *et al.*, 2015; Ribeiro

et al., 2020; Lira *et al.*, 2015), confirmando o resultado obtido na análise de DRX que apresenta estes compostos.

O lodo têxtil também apresentou duas bandas de regiões próximas, em 2923 cm^{-1} e 2853 cm^{-1} , que de acordo com Altidis (2014), são características da deformação axial de C-H e C-C identificadas na região de 3000 cm^{-1} e 2840 cm^{-1} , que aponta presença de matéria orgânica. Bandas da mesma região, mas de menores intensidade, também foram encontradas nas amostras de tijolos de solo-cimento-lodo, ratificando o resultado do ensaio de teor de orgânicos, em que o lodo têxtil apresentou um elevado valor de orgânicos, se comparado aos tijolos.

Todas as amostras analisadas também apresentaram bandas em torno de 3400 cm^{-1} e 2300 cm^{-1} , sendo a primeira banda uma característica da presença do grupo O-H, que remete a água adsorvida das amostras (Mariani *et al.*, 2013; Nascimento *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2013) e a segunda pode estar relacionada a vibração de adsorção do estiramento de CO_2 presente no ar atmosférico (Andrade, 2019; Nascimento *et al.*, 2019), isso pode justificar a banda de maior intensidade na amostra de tijolo sem resíduo de lodo, uma vez que por ser um material de menor granulometria, a substituição de parte do solo por lodo, ocasionou menos vazios (presença de gases).

Segundo Pereira *et al.* (2013), as bandas de 1625 cm^{-1} a 1650 cm^{-1} condizem a vibração de moléculas de água, essa informação é também observada por Mariani *et al.*, (2013), Almeida *et al.*, (2023), Lira *et al.* (2015) e Sá (2014). Já as bandas de 1400 cm^{-1} a 1480 cm^{-1} estão relacionadas ligação C-O de carbonatos, mais precisamente da presença de CaCO_3 , a calcita (Sá, 2014; Silva, 2016; Pereira *et al.*, 2013; Almeida *et al.*, 2023).

Todas as amostras apresentaram bandas na faixa de 900 cm^{-1} a 1100 cm^{-1} que segundo Altidis *et al.* (2011) estão relacionadas às vibrações de Si-O. Este resultado se confirma através dos ensaios de DRX e FRX, que resultaram em teores de SiO_2 consideráveis em todas as amostras estudadas.

De acordo com Rocha *et al.* (2017), bandas entre as faixas de 750 cm^{-1} e 960 cm^{-1} podem ser associadas a uma interação Al-Mg-OH, isso justifica as banda de menor intensidade dos tijolos em 874 cm^{-1} e o pico de maior intensidade para o lodo têxtil em 872 cm^{-1} , uma vez que por meio da análise de FRX é possível perceber que há maior presença de magnésio nas amostras de lodo têxtil.

As bandas em torno de 780 cm^{-1} estão associadas às vibrações das ligações de Si-O-Al e Si-O-Fe (Lira *et al.*, 2015). Todas as amostras de tijolos apresentaram esse pico, diferente do lodo têxtil que não obteve banda por volta desse valor. Esse resultado confirma o ensaio de

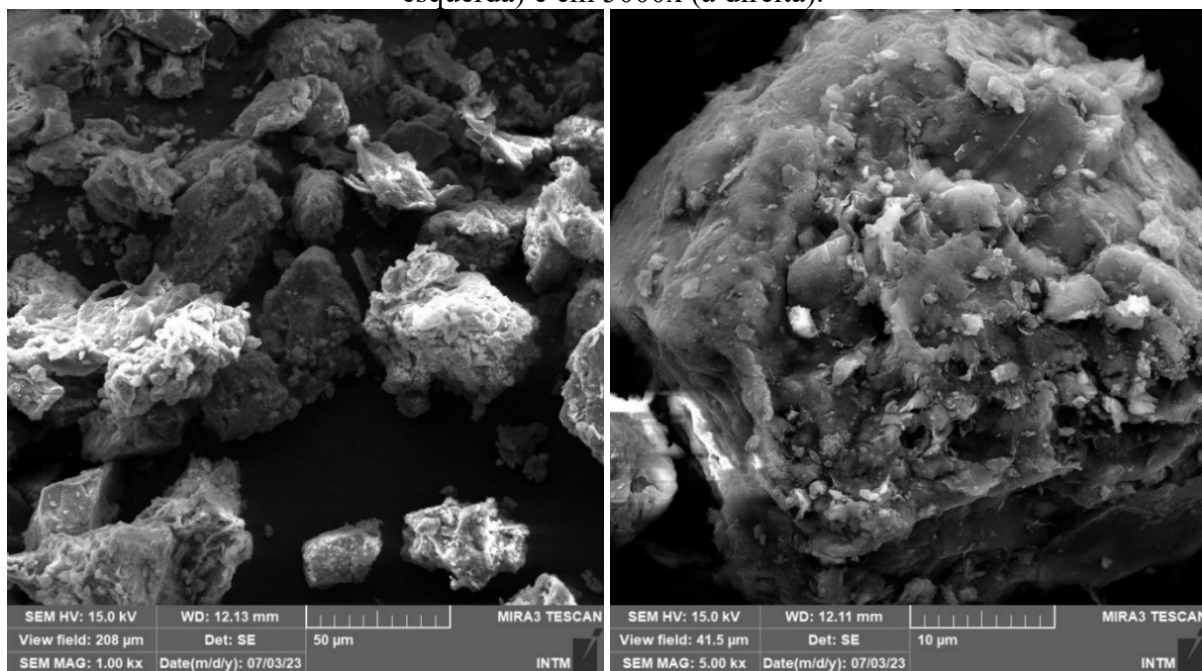
FRX, onde é possível observar que o lodo têxtil apresentou baixos teores de Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , diferente das amostras de tijolos, que apontaram teores considerados destes compostos.

Nos espectros de infravermelho de todas as amostras estudadas, também foram observadas bandas em torno de 540 cm^{-1} ou 545 cm^{-1} que de acordo com Andrade (2019) e Sá (2014) estão associadas às ligações Al-O-Si e bandas por volta de 450 cm^{-1} e 464 cm^{-1} que representam vibrações de Si-O-Si (Mariani *et al.*, 2013; Rocha *et al.*, 2017).

4.3.5 MEV

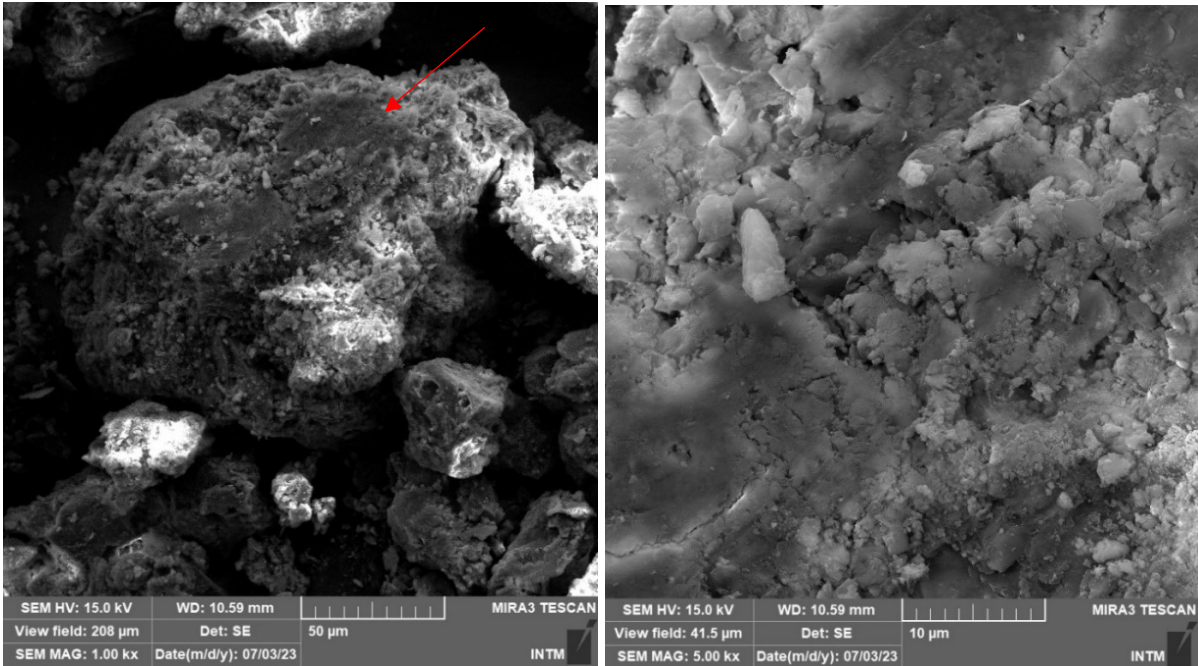
Os resultados de MEV (Figuras 78, 79, 80 e 81) mostram que as partículas de lodo têxtil apresentam vários tamanhos de partículas e formatos irregulares. As micrografias dos tijolos de solo-cimento sugerem que a incorporação de 1% de lodo têxtil na produção de tijolo solo-cimento promove a formação de uma matriz sólida compacta, com pouca porosidade e homogênea. As imagens obtidas com 5% de lodo têxtil mostram uma matriz mais porosa, o que pode explicar os resultados de desempenho mecânico mais baixo e absorção de água mais alta em comparação ao traço com 1% de lodo.

Figura 78 – Fragmento de tijolo de solo-cimento com 0% de lodo ampliado em 1000x (à esquerda) e em 5000x (à direita).



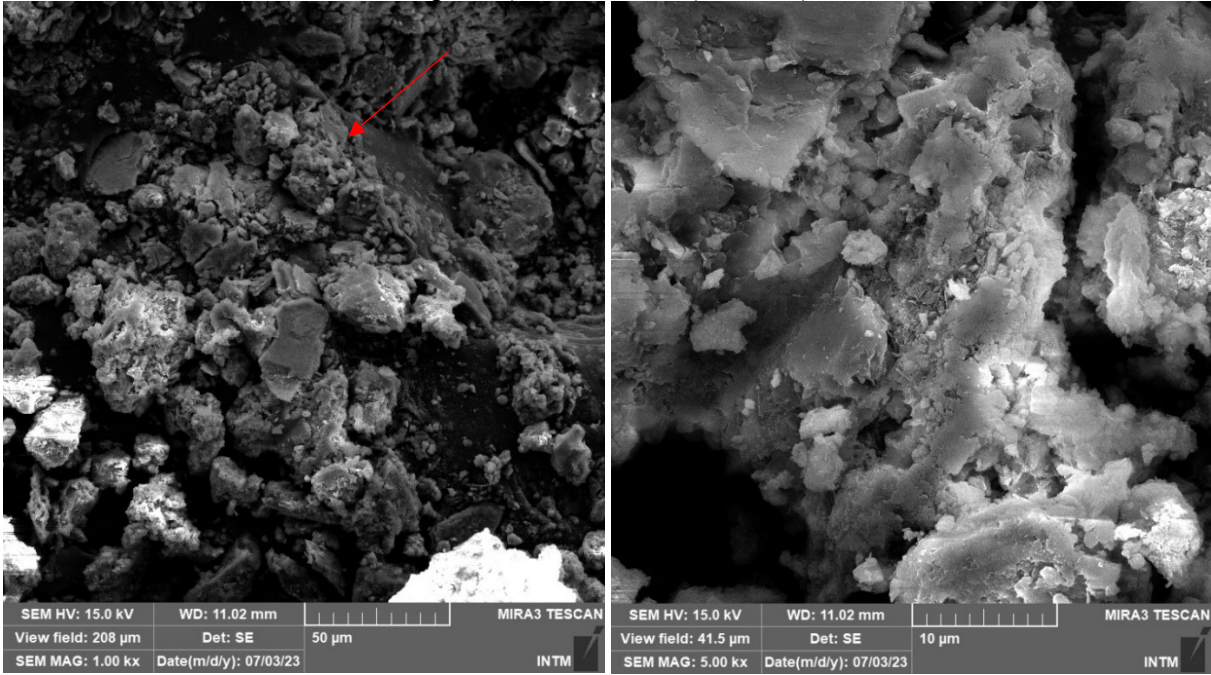
Fonte: Autora (2024).

Figura 79 – Fragmento de tijolo de solo-cimento com 1% de lodo ampliado em 1000x (à esquerda) e em 5000x (à direita).



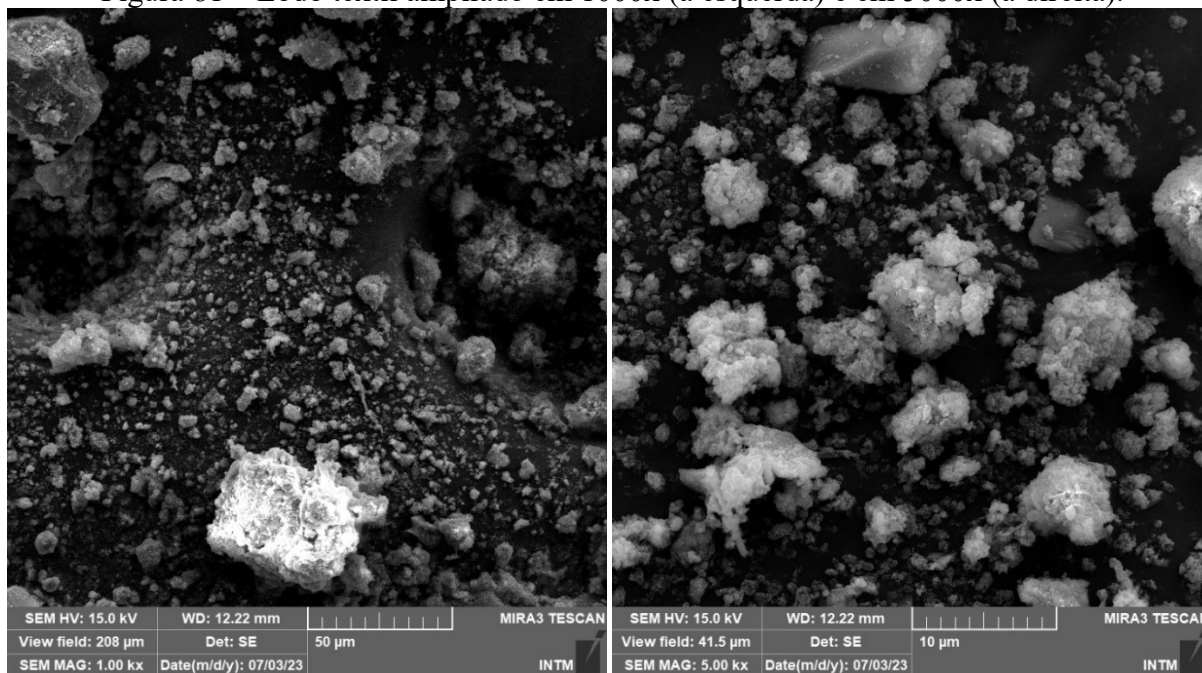
Fonte: Autora (2024).

Figura 80 – Fragmento de tijolo de solo-cimento com 5% de lodo ampliado em 1000x (à esquerda) e em 5000x (à direita).



Fonte: Autora (2024).

Figura 81 – Lodo têxtil ampliado em 1000x (à esquerda) e em 5000x (à direita).



Fonte: Autora (2024).

4.4 Ensaios de solubilização e lixiviação

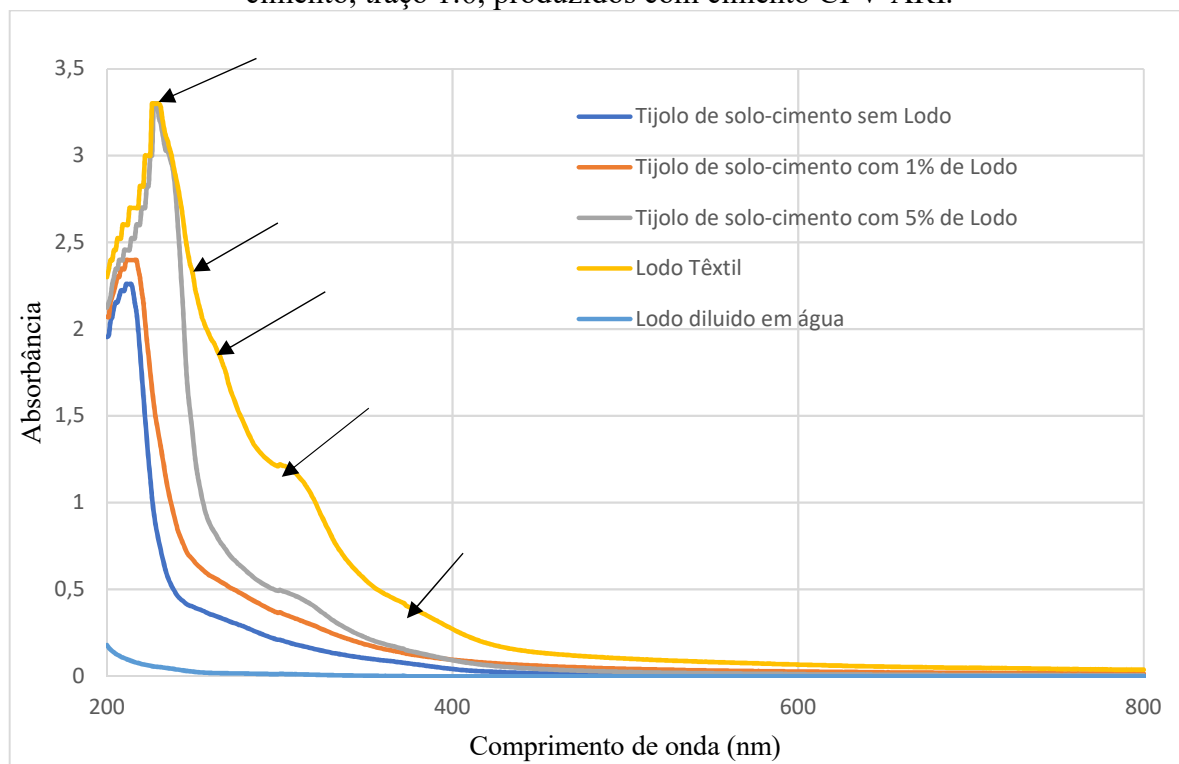
Os extratos obtidos após 18h de lixiviação em ácido acético foram analisados na região do UV-vis com o objetivo de identificar arraste dos contaminantes do lodo têxtil (Figura 82) que absorvem nessa região espectral.

Foi observado que o lodo têxtil tem intensidade de absorção máxima no comprimento de onda de 230 nm, provavelmente associada à presença de aminas aromáticas que fazem parte do processo de tingimento de jeans. Além desta absorção máxima, observa-se algumas absorções de menor intensidade nos comprimentos de onda de 250, 264, 304 e 376 nm.

Nos tijolos de solo-cimento com 0% e 1% de lodo têxtil, observa-se espectros semelhantes apresentando uma absorção máxima no ultravioleta em comprimento de onda de 220 nm, possivelmente relacionada aos componentes presentes no solo.

Já o espectro da amostra de tijolo com 5% de lodo têxtil possui a absorção máxima no mesmo comprimento de onda da amostra de lodo lixiviado, em 230 nm. Estes dados sugerem que tijolos de solo-cimento fabricados com maior concentração de lodo têxtil tendem a liberar concentrações semelhantes de contaminantes que absorvem nesta região espectral. Dessa forma, o resultado obtido sugere maior segurança quando a concentração de lodo têxtil é 1%.

Figura 82 – Espectros de absorção no UV-vis dos extratos lixiviados dos tijolos de solo-cimento, traço 1:6, produzidos com cimento CPV-ARI.

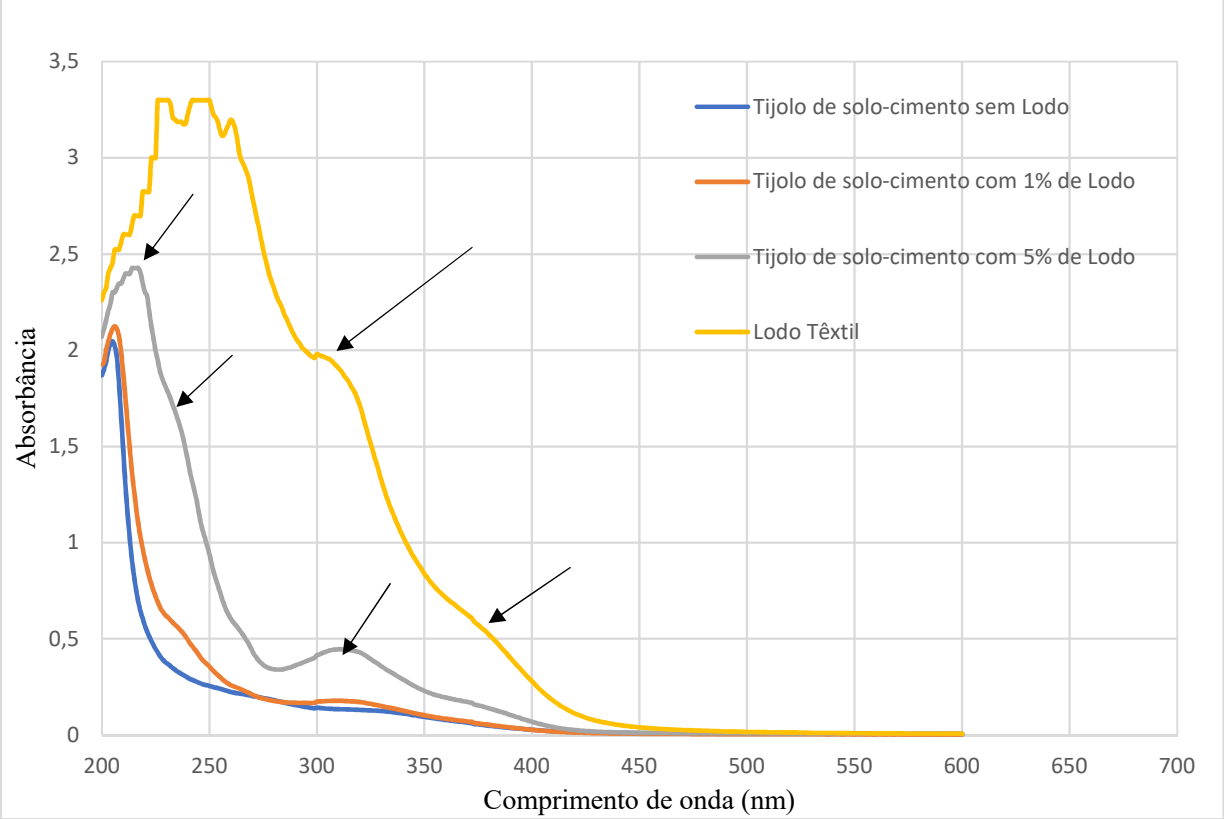


Fonte: Autora (2024).

Os espectros de absorção no UV-vis dos solubilizados em água destilada dos tijolos de solo-cimento com lodo têxtil são apresentados na Figura 83. Também em contato com água, observa-se que há uma semelhança entre os espectros da amostra de tijolo de solo-cimento sem lodo e com 1% de lodo têxtil. Isso sugere que o contato prolongado com a água não arrasta os componentes do lodo têxtil em concentrações detectáveis de insumos químicos usados na indústria têxtil que absorvem neste intervalo espectral.

Já nas amostras de tijolo de solo-cimento produzidas com 5% de lodo têxtil foi possível detectar compostos solúveis em água que absorvem intensamente em 210 nm e algumas absorções de menor intensidade em 234, 312 e 364 nm. Este resultado está em concordância com os dados obtidos no ensaio de lixiviação que sugerem maior segurança na imobilização de componentes quando a concentração de lodo têxtil no tijolo de solo-cimento é 1%.

Figura 83 – Espectros de absorção no UV-vis dos extratos solubilizados dos tijolos de solo-cimento, traço 1:6, produzidos com cimento CPV-ARI.



Fonte: Autora (2024).

A análise do íons por cromatografia nos lixiviados e solubilizados dos tijolos de solo-cimento com lodo têxtil são apresentados nas Tabelas 35 e 36 (cátions) e nas Tabelas 37 e 38 (ânions).

Tabela 36 – Concentrações de cátions presentes nos extratos lixiviados.

CONCENTRAÇÕES EXTRATOS LIXIVIADOS (mg/L)				
AMOSTRAS	Na	K	Mg	Ca
Tijolo de solo-cimento sem lodo	47,151	62,395	37,923	1711,895
Tijolo de solo-cimento com 1% de lodo	-	-	-	-
Tijolo de solo-cimento com 5% de lodo	-	-	-	-
Lodo	256,765	-	998,515	100,679
Lodo água	1,422	-	16,882	3,385

Fonte: Autora (2024).

Tabela 37 – Concentrações de cátions presentes nos extratos solubilizados.

CONCENTRAÇÕES EXTRATOS SOLUBILIZADOS (mg/L)				
AMOSTRAS	Na	K	Mg	Ca
Tijolo de solo-cimento sem lodo	118,9684	55,3705	-	2,158
Tijolo de solo-cimento com 1% de lodo	109,115	76,85637	-	3,574
Tijolo de solo-cimento com 5% de lodo	138,0915	71,398	-	48,691
Lodo	1143,768	121,4982	413,066	12,997

Fonte: Autora (2024).

Tabela 38 – Concentrações de ânions presentes nos extratos lixiviados.

CONCENTRAÇÕES EXTRATOS LIXIVIADOS (mg/L)				
AMOSTRAS	Cloreto	Nitrito	Nitrato	Sulfato
Tijolo de solo-cimento sem lodo	124,424	-	99,654	477,167
Tijolo de solo-cimento com 1% de lodo	144,076	-	97,369	741,006
Tijolo de solo-cimento com 5% de lodo	385,133	78,139	99,662	519,526
Lodo	916,336	76,051	102,996	1176,864

Fonte: Autora (2024).

Tabela 39 – Concentrações de ânions presentes nos extratos solubilizados.

CONCENTRAÇÕES EXTRATOS SOLUBILIZADOS (mg/L)				
AMOSTRAS	Cloreto	Nitrito	Nitrato	Sulfato
Tijolo de solo-cimento sem lodo	78,827	0,3605	1,1295	56,057
Tijolo de solo-cimento com 1% de lodo	77,6915	0,353	0,843	49,062
Tijolo de solo-cimento com 5% de lodo	154,6565	0,3825	0,6475	35,909
Lodo Têxtil	-	-	0,6765	1789,198

Fonte: Autora (2024).

Não foram detectados cátions perigosos, como os citados pelos Anexo F (Limite máximo de concentrações presentes no extrato lixiviado) e Anexo G (Limite máximo de concentrações presentes no extrato solubilizado) da NBR 10004 (ABNT, 2004a), detectáveis por cromatografia de íons nos extratos lixiviados e solubilizados do lodo têxtil, nos tijolos de solo-cimento que continham este resíduo.

Foram encontrados ânions considerados perigosos, que constam no Anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004a). Mas, como pode ser observado nas Tabelas 38 e 39, as concentrações das amostras de tijolos com e sem lodo têxtil, não excederam os limites recomendados pela Norma para cloreto, nitrato e sulfato em 250, 10 e 250 mg/L, respectivamente, para os extratos solubilizados. Sendo assim, as amostras de tijolos com lodo têxtil não são classificadas como perigosas.

Portanto, os tijolos com incorporação de 1% e 5% de lodo têxtil podem ser classificados como Resíduo inerte classe II B. Já o lodo têxtil, apesar de também não apresentar toxicidade, mostrou uma concentração de sulfato nos extratos solubilizados, acima do permitido, sendo assim considerado através da NBR 10004 (ABNT, 2004a), Resíduo não inerte classe II A. Este resultado ratifica a importância de destinação adequada e segura do lodo têxtil das lavanderias de jeans do APL de confecções de Pernambuco, a fim de evitar impactos ao meio ambiente.

Apesar do lodo têxtil ser considerado um resíduo perigoso, nas porcentagens adicionadas nos tijolos de solo-cimento, este não apresentou perigo. Portanto, o processo de arraste parece envolver apenas frações de compostos orgânicos que foram detectados nos dados de absorção no Uv-vis.

5. CONCLUSÕES

Foi possível produzir tijolos de solo-cimento com desempenho mecânico, absorção de água e durabilidade dentro dos limites estabelecidos por norma, usando solo coletado em Caruaru, cimento CPV-ARI e incorporando lodo têxtil em substituição ao solo, com concentração de 1% e 5%. A adequabilidade do solo local para a fabricação de tijolos de solo-cimento não satisfaz todos os padrões normativos, mas ainda assim, tornou esta tecnologia possível do ponto de vista do custo-benefício, desde que seja utilizado cimento com alta resistência inicial e traços ricos em aglomerantes, como 1:6. A escolha do cimento CPV-ARI foi realizada por se tratar de um cimento de maior alcalinidade que contribuiria no fator de aprisionamento de possíveis contaminantes presentes no resíduo e apesar de ele não ter uma fácil e comum disponibilidade comercial, o seu custo não sobressaiu o do cimento Portland comum.

A utilização de betoneira no processo de fabricação dos tijolos apresentou maior produtividade e melhor mistura dos componentes, apesar da produção de grumos durante a mistura, que foi contornado com o peneiramento antecedendo a fabricação dos tijolos.

É importante ressaltar que diversos fatores podem influenciar no produto final do tijolo de solo-cimento e solo-cimento-lodo. A umidade de compactação é importante para a firmeza e solidez do tijolo. A temperatura no dia de fabricação, que se muito elevada pode causar uma aceleração na secagem da mistura. O tipo de cimento utilizado, como comprovado com os resultados, pode aumentar ou diminuir a resistência dos tijolos. As condições de cura, que idealmente deve ser realizada em câmara úmida, mas que pode ser adaptada para a molhagem diária como realizada na presente pesquisa. Além disso, a preparação dos tijolos para os ensaios de resistência a compressão, pode causar grandes discrepâncias nos resultados de tijolos do mesmo tipo, em virtude do processo de capeamento, que exige alinhamento das superfícies, mas que não apresenta método normalizado para isso.

A análise dos lixiviados em ácido acético e solubilizados em água destilada sugerem que é possível arrastar componentes em concentração detectável nas amostras de tijolo de solo-cimento com 5% de lodo têxtil, mas não é possível detectar a presença de componentes nos lixiviados e solubilizados de tijolos produzidos com 1% de lodo têxtil, sugerindo que esta concentração é segura para a aplicação. No entanto, os componentes que são arrastados não são cátions ou ânions perigosos, possivelmente trata-se de moléculas orgânicas que são usadas no tingimento e demais processos de beneficiamento do jeans nas lavanderias. A segurança quanto

os riscos deste efluente em organismos vivos não foi avaliada nos extratos de lixiviados e solubilizados dos corpos de prova dos tijolos de solo-cimento produzidos nesta pesquisa.

A incorporação de 1% de lodo têxtil à massa de solo-cimento resultou na formação de um material sólido de microestrutura mais homogênea e menos porosa do que a amostra sem lodo têxtil, sugerindo que o lodo colabora com o preenchimento de vazios e melhora a compactação dos tijolos. No entanto, o aumento da concentração de lodo têxtil não é acompanhado de mais homogeneização, e tende a formar uma microestrutura mais porosa, o que pode explicar perda de desempenho em algumas idades avaliadas, e maior facilidade de arraste frente a intempéries.

Como sugestão para trabalhos futuros, a fim de refinar os conhecimentos a cerca da utilização do lodo têxtil em tijolos de solo-cimento recomenda-se as seguintes pesquisas: Substituição de lodo têxtil por solo em porcentagens entre 1% e 5% utilizando os mesmos materiais e traço estudado no atual trabalho; Analisar a variabilidade da composição do lodo têxtil de acordo com as estações (época) do ano; Adicionar à mistura de solo-cimento-lodo têxtil aditivos que contribuam para uma melhor homogeneidade dos materiais; Comparar resultados de resistência mecânica e absorção de água com a utilização de prensa hidráulica e prensa manual para a conformação dos tijolos.

REFERÊNCIAS

ABCP, A.B.D.C.P., 2004. Associação Brasileira De Cimento Portland. **Dosagem Das Misturas De Solo-Cimento.**

ABCP, A.B.D.C.P., 2000. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais.** Abcp 16.

ABNT, 2020. NBR 7182: **Solo — Ensaio de compactação.** Assoc. Bras. Normas Técnicas.

ABNT, 2019. NBR11768-1: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland.pdf.** Assoc. Bras. Normas Técnicas 1.

ABNT, 2018a. NBR 7181: **Solo - Análise granulométrica.** Assoc. Bras. Normas Técnicas.

ABNT, 2018b. NBR 16697: **Cimento Portland - Requisitos.** Assoc. Bras. Normas Técnicas.

ABNT, 2017. Abnt NBR 8491: **Tijolo de solo-cimento — Requisitos 0–8.**

ABNT, 2016a. NBR 6459: **Solo - Determinação do Limite de Liquidez.** ABNT 209.

ABNT, 2016b. NBR 7180: **Solo - Determinação do limite de plasticidade.** ABNT.

ABNT, 2016c. NBR 6458 (Anexo B): **Grãos de solos que passam na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica.** Assoc. Bras. Normas Técnicas.

ABNT, 2013a. NBR 10833: **Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento.** Assoc. Bras. Normas Técnicas 3–9.

ABNT, 2013b. NBR 13554: **Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio.** Assoc. Bras. Normas Técnicas.

ABNT, 2012. NBR 8492: **Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio.**

ABNT, 2004a. NBR 10004: **Resíduos sólidos - Classificação.**

ABNT, 2004b. NBR 10005: **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Assoc. Bras. Normas Técnicas.

ABNT, 2004c. NBR 10006: **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Assoc. Bras. Normas Técnicas.

ABNT, 1986. NBR 6457/86: **Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro.

Almeida, H.D. De, Silva, H. de J.B.D.S., Santos, V.B. Dos, Matos, J.M.E., 2023. Avaliação Da Substituição Parcial Do Cimento Portland Por Cinzas Da Folha De Bambu Em Tijolos Solo-Cimento. **Rev. Educ. Ciênc. Tecnol. Ifam.** ISSN-E: 2238-4286 Vol. 17, Nº 1, Junho 2023

Altidis, M.E.D., 2014. **Desenvolvimento de compósitos utilizando lodo da indústria têxtil na produção de concreto não estrutural**. Tese Doutorado, Pós-Graduação em Ciências e Eng. dos Mater. UFCG, Camp. Gd. - PB 110.

Altidis, M.E.D., Moraes, C.R.S., Guedes, B.F.R., Magalhães, H.L.F., Rodrigues, A., P., 2011. Caracterização de resíduos de lodo da indústria têxtil para uso em materiais de construção: comportamento térmico e espectroscópico. **An. do 55º Congr. Bras. Cerâmica**, Porto Galinhas, PE, Bras. d, 1695–1707.

Andrade, B.D., 2019. **Estudo Da Obtenção De Geopolímero a Partir De Aluminossilicato Sintetizado Via Sol-Gel**. Diss. mestrado, Esc. Eng. da Univ. Fed. Minas Gerais - UFMG, Belo Horiz. - MG. 75.

ANJOS, D.C. DOS, 2017. **Estudo sobre a influência do lodo têxtil gerado por uma lavanderia industrial, aplicado em argamassa de Cimento Portland composto de fíler**. Trab. Conclusão Curso, Eng. Infraestrutura da Univ. Fed. St. Catarina, Joinville.

Anjum, T., Haq Khan, H.I.-U., Tariq, W., Farooq, U., Shauket, I., 2017. Production of soil cement bricks using sludge as a partial substitute. **Earth Sci. Malaysia** 1, 10–12. <https://doi.org/10.26480/esmy.02.2017.10.12>

Azevedo, T., Malheiros, K., Silva, A.S.B., Mar, I.C., Pontes, T.A., Silva, M.L.S., Figueira, B.A.M., 2015. Caracterização por drx e ftir de rejeitos da indústria mineral do mn localizados na bacia do azul (Carajás, Pará). **55º Congr. Bras. Quím.**, Goiânia, GO, Brasil, ISBN 978-85-85905-15-6

Beg, T., Siddiqui, M.O.R., Butto, M.A., Iqbal, K., Sun, D., 2022. Utilization of textile denim sludge waste in high load-bearing structural applications. **Polimery/Polymers** 67, 298–307. <https://doi.org/10.14314/polimery.2022.7.2>

Botinas, R. de A., 2017. **Estudo Do Solo Como Material De Construção Sustentável**. Diss. Mestrado. Univ. Coimbra, Dep. Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. . Coimbra. Port. 80.

Bullard, J.W., Jennings, H.M., Livingston, R.A., Nonat, A., Scherer, G.W., Schweitzer, J.S., Scrivener, K.L., Thomas, J.J., 2011. Mechanisms of cement hydration. **Cem. Concr. Res.** 41, 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>

Caputo, H.P., 1988. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**, Ltc.

Carvalho, A.R. de, Silva Júnior, G. da, Fontes, W.C., Silva, G.J.B., Pedroti, L.G., Oliveira, T.M. de, 2023. Influência do efeito fíler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. **Ambient. Construído** 23, 217–239. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000400700>

Chávez Porras, Álvaro; Lima Isaac, Ricardo de; Morita, D., 2008. Incorporação do Lodo das Estações de Tratamento de Água e Agregado Reutilizador de Tratamento da Construção Civil em Elementos de Altura - Tijolos Estabili-zados com cimento. **Cienc. e Ing. Neogranadina** 18. <https://doi.org/10.18359/rcin.1486>

Da Silva, V.M., Góis, L.C., Duarte, J.B., Da Silva, J.B., Acchar, W., 2014. Incorporation of ceramic waste into binary and ternary soil-cement formulations for the production of solid bricks. **Mater. Res.** 17, 326–331. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000014>

Dedavid, B.A., Gomes, C.I., Machado, G., 2007. Microscopia Eletrônica De Varredura - Aplicações e preparação de amostras - Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores, **CEMM-Cen.** ed, Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP). Porto Alegre - RS.

Dias, M.L.D., 2013. **Incorporação de lodo têxtil em blocos cerâmicos.** Trab. Conclusão Curso Grad. Univ. Tecnológica Fed. do Paraná– UTFPR 1–89.

DNER-EM 367, 1997. **Material de enchimento para misturas betuminosas 3.**

DNER/ME, D.N. de E. de R., 1994. **Solos - determinação da densidade real.**

Duarte, Armando Dias; Silva, Gilson Lima; Ferreira, M. de O., 2021. Os Desafios de Compatibilização entre o APL de Confecções do Agreste Pernambucano e a Sustentabilidade Ambiental. **Obs. Econômico**, CORECON-PE. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23841.02402>

FERNANDES JUNIOR, W., 2017. **Avaliação das propriedades tecnológicas de tijolo ecológico modular de solo-cimento com incorporação de resíduo da fabricação de papel.** Diss. Mestr. em Eng. Civil., Cent. Ciência e Tecnol. da Univ. Estadual do Norte Flum. Darcy Ribeiro, CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ.

FERNANDES, S.D.O.S.S., BASSO, N.C.F., TEIXEIRA, C.A.M.B., CARVALHO, I.R., 2022. Construções Sustentáveis Pelo Uso De Tijolos Ecológicos. **Salão do Conhecimento** 8, 1–5.

Gobbo, L, D., 2009. **Aplicação da difração de raios X e método de Rietveld no estudo do cimento Portland.** Univ. São Paulo, Usp, 2009. 41p. Tese Doutorado, Univ. São Paulo, Inst. Geociências, Programa Pós Grad. em Recur. Minerais e hidrogeologia, São Paulo. 273.

Grande, F.M., 2003. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa.** Univ. São Paulo, Usp, 2003. Diss. mestrado, Univ. São Paulo, Esc. Eng. São Carlos, PDepartamento Arquitetura e Urban. São Paulo. 148.

Heidarzadeh, N., Jebeli, M.T., Taslimi, T., 2017. Cement-based solidification/stabilization of phenol-contaminated soil by bentonite and organophilic clay. **Remediation** 28, 87–96. <https://doi.org/10.1002/rem.21545>

IBAMA, 2023. **Painel de geração de resíduos no Brasil** [WWW Document]. URL <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNmViNTNiMWQtYjAxOC00YzAzLTg3NDctMjM4NmYyNjk1ZDA2IiwidCI6IjZhZTNmNWU3LTU0MTktNDJhNy04MDc1LTJhMTQ5MGM3MmIyNSJ9> (accessed 1.1.23).

Kongkajun, N., Laitila, E.A., Ineure, P., Prakaypan, W., Cherdhirunkorn, B., Chakartnarodom, P., 2020. Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production. Case Stud. **Constr. Mater.** 13, e00448. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00448>

- Leloup, W. de A., 2013. **Efeito da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland**. Diss. – Univ. Fed. Pernambuco, CAA. Programa Pós-Graduação em Eng. Civ. e Ambient. Caruaru, p. 110. 2013.
- Li, J., Wang, J., 2006. Advances in cement solidification technology for waste radioactive ion exchange resins: A review. **J. Hazard. Mater.** 135, 443–448. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.053>
- Lira, E.C. De, Sousa, S., Gomes, K.C., Dias, B.D.O., 2015. Caracterização Mineralógica e estrutural de Solos Sob Diferentes. **XXXV Congr. Bras. Ciência do Solo** 1–4.
- Mariani, F., Villalba, J., Anaissi, F., 2013. Caracterização Estrutural de Argilas Utilizando DRX com Luz Síncrotron, MEV, FTIR e TG-DTG-DTA. **Orbital-The Electron. J. ...** 5. <https://doi.org/10.17807/orbital.v5i4.508>
- MENDONÇA, A.N.M.D.S., 2022. **Avaliação do ensaio de granulometria em diferentes meios aquosos**. Trab. Conclusão Curso Grad. Eng. Civil, Univ. Católica Goiás 29.
- Metzker, S.L.O., Sabino, T.P.F., Mendes, J.F., Ribeiro, A.G.C., Mendes, R.F., 2022. Soil-Cement Bricks Development Using Polymeric Waste. **Environ. Sci. Pollut. Res.** 29, 21034–21048. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16769-z>
- Mine, J.H., Piazza, S.A.S.M., Pawlowsky, U., Mymrine, V., 2019. Reaproveitamento de lodos de saneamento de ETA, fossa e tanque séptico como matéria-prima na construção civil: uma revisão. **Congr. Nac. Saneam. e Meio Ambient.** 1–8.
- Moura, L.S. de, Reis, A.C. dos S., Silva, C.L., Bezerra, J.P.S., Nóbrega, A.C.V. da, Carneiro, A.M.P., 2021a. Evaluation of the adhesiveness of the asphalt binder modified with textile sludge by means of digital image processing Evaluación de la a. **Res. Soc. Dev.** v. 10, n. 4, e12110413975, 2021 2021, 1–10.
- Moura, L.S. de, Silva, C.L., Reis, A.C. dos S., Marinho, E.P., Nóbrega, A.C.V. da, Carneiro, A.M.P., 2021b. Caracterização de lodo produzido nas lavanderias têxteis da região Agreste de Pernambuco para uso em materiais de construção alternativos. **Res. Soc. Dev.** 10, e40910414078. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14078>
- Nakano, V., Avila-Campos, M.J., 2023. **Metais Pesados: Um Perigo Eminente** [WWW Document]. URL http://www.icb.usp.br/bmm/mariojac/index.php?option=com_content&view=article&id=33&Itemid=56&lang=br
- Nascimento, R. de S., Figueira, B.A.M., Fernandez, O.J.C., Costa, M.L. da, 2019. Síntese hidrotermal de maghemita de rejeito de lavagem de bauxita da região amazônica, in: **Meio Ambiente Inovação Com Sustentabilidade** 2. pp. 147–155.
- Ni, J., Hu, X., Liu, F.Y., Zhu, C., Feng, L.M., Jin, J., Gou, C., 2022. Cement replacement with brick powder and concrete powder in sludge solidification. **Mar. Georesources Geotechnol.** 40, 630–638. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/1064119X.2021.1930299>

Paiva, D.L., Lampman, G., Kriz, G., Vyvyan, J., 2010. **Introdução à Espectroscopia**, 4ª ed. ed, Introdução à espectroscopia.

Paris, J.M., Roessler, J.G., Ferraro, C.C., Deford, H.D., Townsend, T.G., 2016. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **J. Clean. Prod.** 121, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>

Pejon, O.J., Rodrigues, V.G.S., 2015. Fase Sólida: **Composição Mineral do Solo, in: Recurso Solo - Propriedades e Usos**. São Carlos - São Paulo, pp. 179–206.

Pereira, P.M., Lemos, V.P., Rodrigues, E., Faial, K.C.F., 2013. Adsorção de molibdato em minerais de argilas naturais e modifi cadas com ácido sulfúrico, ácido húmico e uréia. **Ceramica** 59, 170–180. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132013000100021>

Phung, Q.T., Ferreira, E., Seetharam, S., Nguyen, V.T., Govaerts, J., Valcke, E., 2021. Understanding hydration heat of mortars containing supplementary cementitious materials with potential to immobilize heavy metal containing waste. **Cem. Concr. Compos.** 115, 103859. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103859>

Pietrobon, C.L. da R., Andrade, C.M.G., Colanzi, J., Barros, I.B. de, Bergamasco, R., Pietrobon, C.E., 2004. Lixiviação de contaminantes de compostos de lodo-cimento. **Acta Sci. Technol.** 26, 45–52.

Pinto, H.P.F., 2013. **Três estratégias para análise quantitativa ou qualitativa por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva**. Diss. Mestrado. Univ. São Paulo, Eng. Química. São Paulo. SP. Bras. 139.

Presa, M.B., 2011. **Resistência à compressão e absorção de água em tijolos de solo cimento**. Univ. Brasília, UnB, 2011. 41p. Monogr. Grad. Univ. Brasília, Fac. Agron. e Med. Veterinária, Brasília.

Queiroga, G.M., de Castro Pessoa de Melo, D., Zanardi Lamardo, E., 2019. Desempenho De Etes De Lavanderias Têxteis Do Polo De Confecções Do Município De Caruaru, Agreste Pernambucano, Que Utilizam Processos Físico-Químicos. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**.13 (2), 55-71. 1982–5528. <https://doi.org/10.22411/rede2019.1302.04>

Ramos, M.D.N., Claudio, C.C., Rezende, P.H.V., Cabral, L.P., Santos, L.A., Costa, G.G., Mesquita, P.L., Aguiar, A., 2020. Critical analysis of the characteristics of industrial effluents from the textile sector in Brazil. **Rev. Virtual Quim.** 12, 913–929. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20200073>

Reis, F.M.D., Ribeiro, R.P., Reis, M.J., 2020. Physical-mechanical properties of soil-cement bricks with the addition of the fine fraction from the quartzite mining tailings (State of Minas Gerais – Brazil). **Bull. Eng. Geol. Environ.** 79, 3741–3750. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01765-3>

Ribeiro, F.G., Saltarelli, M., Rodrigues, L., Ribeiro, A., Neto, S., 2020. Caracterização do resíduo lodo primário de uma indústria de papel do município de Santo Antônio de Pádua - RJ. **V Congr. Flum. Pós-Graduação** 1.

Rocha, R.D.C., Zorel, H.E., Lando, T., 2017. Utilização de planejamento experimental no estudo para imobilização de lodo galvânico em cerâmica vermelha para minimização de impactos ambientais. **Cerâmica** 63, 1–10. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633651964>

Rodrigues, L.P., Holanda, J.N.F., 2015. Recycling of Water Treatment Plant Waste for Production of Soil-Cement Bricks. **Procedia Mater. Sci.** 8, 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.064>

Rojas, J.W.J., 2015. Estabilização de Solos, 1st ed. 2015, Caçapava do Sul - RS.

Sá, N.P., 2014. **Caracterização De Lodos E Efluentes Industriais Gerados Por Uma Empresa De Beneficiamento De Argilas Visando O Atendimento À Pnrs**. Diss. Mestr. em Saneam. Ambient. . Programa Pós-Graduação em Eng. Civ. e Ambient. Univ. Fed. da Paraíba - UFPB. João Pessoa - PB.

Sabino, T.P.F., Coelho, N.P.F., Andrade, N.C., Metzker, S.L.O., Viana, Q.S., Mendes, J.F., Mendes, R.F., 2022. Lignocellulosic materials as soil–cement brick reinforcement. **Environ. Sci. Pollut. Res.** 29, 21769–21788. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17351-3>

SAHARA, 2021. **Conheça A Norma Da ABNT Do Tijolo Ecológico** [WWW Document]. SAHARA. URL <https://www.sahara.com.br/normal-abnt-8491-tijolo-ecologico/> (accessed 4.12.22).

Santiago, C.C., 2001. **O Solo como Material de Construção**. 2ª edição. EDUFBA (Editora da UFBA). Salvador-Bahia 2001

SANTOS, H.G. dos;, JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C. dos;, OLIVEIRA, V.A. de;, LUMBRERAS, J.F., COELHO, M.R., ALMEIDA, J.A. de;, ARAUJO FILHO, J.C. de;, OLIVEIRA, J.B. de;, CUNHA, T.J.F., 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Empres. Bras. Pesqui. Agropecuária** - EMBRAPA 353.

Santos, V.V. dos., 2019. **Desenvolvimento de blocos intertravados de concreto com incorporação de lodo têxtil em substituição da areia e resíduo de cerâmica vermelha em substituição do cimento Portland**. Monogr. (Trabalho Conclusão Curso) – Univ. Fed. Pernambuco, CAA, Eng. Civil, 2019.

Scrivener, K., Ouzia, A., Juilland, P., Kunhi Mohamed, A., 2019. Advances in understanding cement hydration mechanisms. **Cem. Concr. Res.** 124, 105823. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105823>

Segantini, A.A. da S., Wada, P.H., 2011. Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição. **Acta Sci. - Technol.** 33, 179–183. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i2.9377>

Silva, C.I., 2016. **Interação físico-química das misturas de solo-cimento com aditivo superplastificante a base de policarboxilatos**. Mestr. Prof. Em Eficiência Energética E Sustentabilidade. Fundação Univ. Fed. Mato Grosso Do Sul, Fac. Eng. Arquitetura E Urban. E Geogr.

Silva, B.S. da, Gomes, N.T., Bahiense, A.V., Oliveira, R.P. de, Alexandre, J., 2022. Tijolo de

solo-cimento: incorporação de resíduos e viabilidade na construção civil no Brasil. **Res. Soc. Dev.** 11, e19011225605. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25605>

Silva Filho, A.R.A., Duarte, A.D., Pedrosa, T.D., Silva, G.L. da, Pessôa, S.G. dos S., 2021. Análise da importância do reuso da água em lavanderias de beneficiamento de jeans. **Res. Soc. Dev.** 10, e40710614402. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.14402>

Silva Filho, A.R.A. da, Duarte, A.D., Sinesio, E.P., Silva, G.L. da, Pessôa, S.G. dos S., 2021. Classificação, caracterização e diagnóstico das Lavanderias de Beneficiamento de Jeans na Cidade de Caruaru-PE, no Agreste Pernambucano. **Res. Soc. Dev.** 10, e57810112186. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.12186>

SILVA, Marcos André do Rego. **Solidificação e estabilização de resíduos inorgânicos industriais: estudo da eficiência do processo e evidência de mecanismos de imobilização.** 2007. 110f. Tese (Doutorado em Química). Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

Silva, M.V.A. e, Silva, A.L. da, Brito, D.J.M. de, Branco, D.K.S., Ferreira, M. de O., 2012. A questão ambiental no pólo de confecções de caruaru: um primeiro ensaio à luz dos instrumentos econômicos de proteção ambiental. **Rev. Estud. do CEPE**, St. Cruz do Sul, n35, p.108-132, jan./jun. 2012 108–132.

Silva, S.R., 2005. Tijolos de solo cimento reforçado com serragem de madeira 198. Siqueira, F.B., Holanda, J.N.F., 2013. Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks. **J. Environ. Manage.** 131, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.040>

SOUTO, T.J.M.P., 2017. **Estudo do comportamento químico e ambiental de efluentes industriais e resíduos sólidos oriundos de lavanderias do polo têxtil no Agreste Pernambucano.** Diss. Mestr. em Eng. Ambient. Usiversidade Fed. Rural Pernambuco - UFRPE. Programa Pós-Graduação em Eng. Ambient. Recife-PE. 114.

Souza, A. K. R., de Lima, D. M. V., & Oliveira, S. L. A. (2015). Técnica FTIR e suas aplicações em amostras orgânicas. **ANAIS DO ENIC**, (6).

Souza, H.M., Soares, A.P., Costa, E.F., Costa, A.O.S., 2015. Predição da composição do clínquer industrial utilizando minimização da energia livre de Gibbs. **Cerâmica** 61, 23–30. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613571845>

Souza, J.M., 2013. **Tijolos de solo-cimento produzidos com manipueira em substituição à água.** Diss. Mestr. em Eng. Civil. Programa Pós-graduação em Eng. Civil, Univ. Fed. do Rio Gd. do Norte. Natal - RN. 2.

Taylor, H.F.W., 1997. **Cement chemistry.** 2ª ed. ISBN: 0 7277 2592 0. Thomas Telford edition published 1997. <https://doi.org/10.1680/cc.25929>

Toledo, M.C.M. de, 2005. **Intemperismo e Pedogênese**, Tópico 7. pp. 134–157.

Veiga, K., Santos, V., 2017. Desenvolvimento de blocos intertravados de concreto com adição de lodo têxtil gerado no APL do agreste pernambucano. **Rev. FENEC** 1, 594–602.

Veiga, K.R.S. da., 2019. **Desenvolvimento de blocos intertravados de concreto com incorporação de lodo têxtil como adição e resíduo de cerâmica vermelha em substituição do cimento Portland.** Monogr. (Trabalho Conclusão Curso) – Univ. Fed. Pernambuco, CAA, Eng. Civil. Caruaru, p. 50. 2019. 2, 89.

Zhou, Q., Milestone, N.B., Hayes, M., 2006. An alternative to Portland Cement for waste encapsulation-The calcium sulfoaluminate cement system. **J. Hazard. Mater.** 136, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.038>