INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DE TIJOLO SOLO CIMENTO COM APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE EMULSÃO ASFÁLTICA ELASTOMÉRICA

ERNANE DE MACEDO SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Kelson Silva de Almeida

TERESINA

2024

ERNANE DE MACEDO SANTOS

ESTUDO DE TIJOLO SOLO CIMENTO COM APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE EMULSÃO ASFÁLTICA ELASTOMÉRICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Materiais Cerâmicos

Orientador: Prof. Dr. Kelson Silva de Almeida

TERESINA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Santos, Ernane de Macedo

S237e Estudo de tijolo solo cimento com aplicação de resíduos de emulsão asfáltica elastomérica / Ernane de Macedo Santos. - 2024.
87 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2024.
Orientador : Prof Dr. Kelson Silva de Almeida.

1. Franco - argiloso. 2. Caulinila. 3. Resíduo betuminoso. I.Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

ERNANE DE MACEDO SANTOS

ESTUDO DE TIJOLO SOLO CIMENTO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE EMULSÃO ASFÁLTICA ELASTOMÉRICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 04 / 09 / 2024 .

BANCA EXAMINADORA

(assinado eletronicamente)
Prof. Dr. Kelson Silva de Almeida (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

(assinado eletronicamente)
Prof. Dr. Robson Vieira da Cunha
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

(assinado eletronicamente)
Prof. Dra. Naedja Vasconcelos Pontes
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

“Quanto maior o conhecimento, menor o ego, quanto maior o ego, menor o conhecimento.” *Albert Einstein*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir a realização desta pesquisa e por todas as conquistas proporcionadas por esta.

Agradeço ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí - IFPI, no qual tive a oportunidade de ampliar meus conhecimentos e me proporcionar um grande crescimento profissional e pessoal.

Agradeço a meus pais Raimundo Francisco dos Santos Neto e Tatiana Cardoso de Macedo Santos, pela educação e apoio que lutaram para me proporcionar e que posso por meio deste mostrar extrema gratidão e apreço a todos os valores e ensinamentos que levo para toda minha vida.

A minha digníssima noiva Dra. Patrícia e Silva Alves, por todo apoio oferecido a mim na vida acadêmica e por estar junto a mim nos momentos de dificuldades e de conquistas, especialmente durante o mestrado.

Agradeço ao IFPI, e a todos os meus professores e servidores, em especial, ao meu orientador Professor Dr. Kelson Silva de Almeida, por todos os ensinamentos e por confiar a mim como orientando, acreditando na minha capacidade de pesquisador.

Aos meus queridos irmãos e compadre, Murilo de Macedo Santos, Nayane de Macedo Santos e Elton Santos Dias Sales, bem como a toda minha família, pela compreenção e atenção que tiveram a mim, fundamentais para superação dos desafios que surgiram durante o curso.

Agradeço a todos os amigos da pós graduação em Engenharia de Materiais - IFPI, em especial, Ezequiel da Cruz Lima e Jean Pierre Castro Pinheiro de Sousa, meus amigos Antônio Aurelio Barbosa de Sousa, Florêncio Bittencourt e Paulo Henrique Damasceno, por me fornecerem apoio técnico cruciais para o sucesso da pesquisa.

Os meus colegas de trabalho, em especial, Dr. João de Deus Duarte Neto, Paulo Roberto da Rocha Nonato, Francisco José dos Santos e Lucas Chaves Fortes, pela paciência, compreensão e confiança que depositaram a mim, durante os periodos de dedicação ao curso.

Meu muito obrigada a todos que direto e indiretamente participaram da execução para esse trabalho.

A vida é como andar de bicicleta. Para manter o equilíbrio, você deve continuar se movendo.

Albert Einstein

RESUMO

A adição de substâncias químicas ao solo desencadeia reações que influenciam suas propriedades, como temperatura, evaporação e trocas iônicas. Os solos contaminados por hidrocarbonetos representam um desafio devido ao seu impacto ambiental e aos altos custos de remediação. A reciclagem de misturas asfálticas, tornou-se uma opção viável para a reutilização desses materiais. O tijolo de solo-cimento, resultante da mistura de solo, cimento Portland e água, é um material resistente e durável, com boa impermeabilidade. O estudo teve como objetivo selecionar amostra de solo ideal para produzir tijolos de solo cimento com a incorporação de resíduo de emulsão asfáltica elastomérica, que foi justificada por suas características físicas e químicas, destacando-se como solo franco arenoso, com altos teores de dióxido de silício e alumínio. Análises termogravimétricas e de difração de raio X confirmaram a composição mineralógica do solo, demonstrando a presença de quartzo e caulinita. A interação entre seus componentes, como óxidos de ferro e alumínio, afetou as propriedades elétricas do solo, influenciando a adsorção de resíduos betuminosos. O estudo incluiu ensaios de resistência à compressão e absorção de umidade nos tijolos. Os resultados mostraram uniformidade, boa resistência à compressão e baixa absorção de umidade, confirmando a eficácia da escolha do solo e do processo de fabricação. A interação entre o tijolo de solo-cimento e o resíduo betuminoso resultou em uma superfície repelente à água. Essa hidrofobicidade foi alcançada pela interação dos componentes do solo e do resíduo, criando uma superfície impermeável. Esses resultados destacam a interação do solo e a adição de resíduos na fabricação de tijolos de solo-cimento, alterando suas propriedades finais.

Palavras-chave: franco-argiloso; caulinita; resíduo betuminoso

ABSTRACT

The addition of chemical substances to the soil triggers reactions that influence its properties, such as temperature, evaporation and ionic exchange. Hydrocarbon-contaminated soils represent a challenge due to their environmental impact and high remediation costs. The recycling of asphalt mixtures has become a viable option for reusing these materials. Soil-cement brick, resulting from a mixture of soil, Portland cement and water, is a resistant and durable material, with good impermeability. The study aimed to select the ideal soil sample to produce cement soil bricks with the incorporation of elastomeric asphalt emulsion residue, which was justified by its physical and chemical characteristics, standing out as sandy loam soil, with high levels of carbon dioxide. silicon and aluminum. Thermogravimetric and X-ray diffraction analyzes confirmed the mineralogical composition of the soil, demonstrating the presence of quartz and kaolinite. The interaction between its components, such as iron and aluminum oxides, affected the electrical properties of the soil, influencing the adsorption of bituminous residues. The study included compressive strength and moisture absorption tests on the bricks. The results showed uniformity, good compressive strength and low moisture absorption, confirming the effectiveness of the soil choice and manufacturing process. The interaction between the soil-cement brick and the bituminous residue resulted in a water-repellent surface. This hydrophobicity was achieved by the interaction of soil and residue components, creating an impermeable surface. These results highlight the interaction of soil and the addition of waste in the manufacture of soil-cement bricks, altering their final properties.

Keywords: clay loam; kaolinite; bituminous residue

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Horizontes de alguns solos 23

Figura 2 – Mapa com a distribuição de solos no Brasil 26

Figura 3 – Solo com características coesivas 28

Figura 4 – Representação do triângulo textural 31

Figura 5 – Padrão mundial de cores expressa em carta de Munsell 32

Figura 6 – Estrutura de uma molécula de tensoativo 39

Figura 7 – Solo contaminado com resíduos de emulsão asfáltica 40

Figura 8 – Procedimento utilizado para obtenção dos corpos de prova incorporado com resíduo 42

Figura 9 – Imagem da jazida para coleta de amostra 43

Figura 10 – Ensaio de caracterização de solo 44

Figura 11 – Preparo da amostra para os ensaios de caracterização do solo 46

Figura 12 – Realização do Ensaio de Casagrande 48

Figura 13 – Tijolo solo-cimento preparado para ensaio de compressão uniaxial 49

Figura 14 – Analise dimensional 50

Figura 15 – (a) Corpos de prova com pasta de cimento; (b) Rompimento de tijolo solo-cimento em uma prensa hidráulica 51

Figura 16 – Tijolos padrão preparados para imersão em resíduos 52

Figura 17 – Tijolos padrão imersos em resíduo betuminoso 52

Figura 18 – Amostra de solo 1 coletada em campo 53

Figura 19 – Curva granulométrica da amostra 1 54

Figura 20 – Classificação da amostra 1 por carta de Munsell 55

Figura 21 – Classificação da amostra 1 por triângulo textural 55

Figura 22 – Tijolo solo-cimento conformado apenas com solo franco arenoso ... 57

Figura 23 – Análise de Difratometria de Raio X da Amostra 1 59

Figura 24 – Análise termogravimétrica da amostra selecionada 61

Figura 25 – Análise termogravimétrica do resíduo de emulsão asfáltica elastomérica 62

Figura 26 – Espectroscopia no infravermelho da Amostra 1 63

Figura 27 – Análise dimensional dos tijolos padrão 64

Figura 28 – Montagem dos corpos de prova para o ensaio de resistência a compressão 65

Figura 29 – Resistência a compressão de tijolo do lote padrão 66

Figura 30 – Verificação do teor de umidade absorvido dos tijolos padrão 67

Figura 31 – Hidro repelência obtida após contato com o resíduo betuminoso 71

Figura 32 – Efeitos do resíduo incorporado em tijolos padrão: a) Aspecto visual; b) hidrorepelência por incorporação de resíduos de emulsão asfáltica elastomérica nos tijolos 72

Figura 33 – Ensaio de compressão de tijolo após incorporação de resíduo: a) Corpos de prova preparados para ensaio de compressão. b) Gráfico tensão deformação de tijolo com resíduo incorporado 74

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Denominação geral utilizada na descrição da textura de um solo, de acordo com o nome das suas classes texturais 30

Quadro 2 – Classificação dos argilominerais 33

Tabela 1 – Tipo de cimento Portland fabricado no Brasil, utilizado no estudo 37

Tabela 2 – Limites de Atterberg do solo 56

Tabela 3 – Parâmetros de caracterização do solo segundo a ABNT NBR 10833. 56

Tabela 4 – Concentração dos constituintes da Amostra 1 por fluorescência de raios X 57

Tabela 5 – Dimensões médias dos tijolos 63

Tabela 6 – Resultados do ensaio de compressão de lote padrão 64

Tabela 7 – Resultado de absorção de umidade dos tijolos padrão 66

Tabela 8 – Resultado de absorção de umidade dos tijolos com resíduo asfáltico .. 72

Tabela 9 – Resultados do ensaio de compressão de tijolos com resíduo de emulsão asfáltica 74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de Água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CAH	Hidratos de Aluminato de Cálcio
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de Cálcio
Ca^{2+}	Íons de Cálcio
Cl^-	Íon cloro
C_3S	Silicato de Cálcio
C_3S_2Hx	Silicato de Cálcio Hidratado
CSH	Silicato de Cálcio Hidratado
DRX	Difração de raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
H_2O	Água
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
IP	Índice de plasticidade
NBR	Norma técnica brasileira
NH_3^+	Íon amônia
OH^-	Hidroxila
pH	Potencial Hidrogeniônico
PPGEM	Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais
RR-1C	Mistura de emulsão asfáltica de ruptura rápida

SiO_2	Óxido de Silício
TG	Termogravimetria
UFPI	Universidade Federal do Piauí

LISTA DE SÍMBOLOS

Å	Angström
λ	Comprimento de onda
ºC	Graus Celsius
g	Grama
h	Hora
mA	Miliampere
mm	Milímetro
min	Minutos
MPa	Mega Pascal
%	Porcentagem
kV	Quilovolt
kgf/cm²	Quilograma-força por centímetro quadrado

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO** ….....	19
1.1	**OBJETIVOS**	21
1.1.1	OBJETIVO GERAL	21
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2	**REFERENCIAL TEÓRICO**	22
2.1	A CIÊNCIA DO SOLO	22
2.1.1	**Granulometria do solo**	25
2.1.2	**Areia**	25
2.1.3	**Silte**	26
2.1.4	**A argila**	26
2.1.5	**Classe textural do solo**	28
2.1.6	**Carta de Munsell**	31
2.1.7	**Argilominerais**.....	33
2.1.8	**Cimento Portland**.....	35
2.2	ESTABILIDADE SOLO-CIMENTO.....	37
2.3	RESÍDUOS.....	38
2.3.1	**Emulsão asfáltica**	38
2.3.2	**Resíduos betuminosos**	39
2.4	TIJOLO SOLO-CIMENTO	40
3	**MATERIAIS E MÉTODOS**.....	42
3.1	COLETA DA MATÉRIA–PRIMA	42
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	43

3.2.1 **Ensaios Fluorescência de Raios X (FRX)** 45

3.2.2 **Ensaio Difração de raios X (DRX)** 46

3.2.3 **Ensaios de Termogravimetria (TG)** 46

3.2.4 **Espectroscopia de absorção molecular na região do infravermelho** 47

3.2.5 **Ensaio de plasticidade**..... 47

3.2.6 **Conformação dos corpos de prova** 48

3.2.7 **Análise tecnológica de lote padrão** 49

3.2.8 **Incorporação de resíduos de emulsão asfáltico elastomérico** 52

4 **ANÁLISE DOS RESULTADOS** 53

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO..... 53

4.2 ÍNDICE DE PLASTICIDADE (ANÁLISE TECNOLÓGICA DO SOLO) 56

4.3 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X - (FRX) 57

4.4 DIFRAÇÃO DE RAIO X – (DRX) 58

4.5 ANÁLISE TERMOGRAVIMETRIA – (TG) 60

4.5.1 **Análise termogravimétrica do resíduo (RR-1C)** 61

4.6 ANÁLISE DA ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO – (FTIR) 63

4.7 ANÁLISE DA CONFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 63

4.8 ANÁLISE DE LOTE PADRÃO 64

4.8.1 **Análise dimensional**..... 64

4.8.2 **Análise de resistência à compressão** 65

4.8.3 **Análise de absorção de água do lote padrão** 66

4.8.4 **Análise de compressão e absorção em tijolos com resíduo elastomérico**..... 67

5 **CONCLUSÕES** 75

REFERÊNCIAS..... 77

ANEXOS 87

1 INTRODUÇÃO

Os processos construtivos com a utilização de blocos estabilizados de solo cimento, que é uma tecnologia utilizada deste a antiguidade vem sendo amplamente empregados na construção civil (LI *et al*., 2022). Este destaque deve-se as características apresentadas por este elemento estrutural que, frente aos métodos convencionais, pode conferir uma menor demanda energética para sua fabricação, já que não há queima no seu processo de cura. A técnica para a utilização deste tijolo em alvenaria não requer uma mão de obra com treinamento específico, no entanto, profissionais com experiência neste método tendem a executar uma obra com maior expertise, possibilitando um resultado com mais qualidade de acabamento otimização de material e consequentemente a redução de entulho no canteiro de obras. Além do tijolo solo cimento, outras técnicas também utilizam o solo como material base para produção de elementos estruturais e de vedação, podendo destacar a taipa, o adobe o pau-a-pique e os pães de barro (CHAER *et al*., 2023).

O tijolo ecológico, como também é conhecido no meio comercial, pode apresentar algumas variações de dimensões, de acordo com a norma ABNT NBR 8491/12, 8492/12 e 10834/12, o que possibilita a sua aplicação em diversos tipos de obras. O bloco de solo cimento é um componente de alvenaria constituído de uma mistura homogênea de solo, cimento e água devidamente prensada. Os processos envolvendo a mistura de estabilização solo cimento, contemplam a proporção de água, cimento e solo, este último, podendo ser caracterizado como solo arenoso ou pedregoso, com teores de argila podendo varia de 10 a 35% e a areia de 65 a 90%. As proporções podem impactar diretamente no acabamento visual e em características térmicas acústicas e mecânicas (VIEIRA *et al*., 2007). Umas das maiores desvantagens apresentadas pelos tijolos solo-cimento é o alto teor de absorção de água. Esta característica pode ser responsável por diversas patologias físicas e químicas, dentre elas a eflorescência, que é a dissolução dos sais em água na superfície do tijolo.

Por permitir uma variação significativa nos percentuais dos constituintes do traço convencional, revela-se outra vantagem deste produto, que podem ser inseridos em sua composição, materiais provenientes de resíduos, com ou sem funções específicas de melhoramento de propriedades, podendo reduzir o uso de

materiais não-renováveis (METZKER *et al*., 2022). Um dos resíduos que mais apresentam riscos para o meio ambiente são as contaminações do solo por petroquímicos. A existência de solos contaminados com estes produtos bruto ou processado, implica em danos pela contaminação de veios de rios e lenções freáticos que de forma indireta atingindo também a flora e a fauna (MUSTAFA *et al*., 2021).

Dos derivados dos compostos pétreos temos as emulsões asfálticas, que são subprodutos do cimento asfáltico de petróleo (CAP) e são amplamente empregadas das etapas de preparo do solo para a aplicação de pavimentação flexível com asfalto. Para sua aplicação nominal, os riscos ambientais são muito reduzidos, visto que a cura da emulsão asfáltica ocorre em temperatura ambiente, por meio da evaporação dos solventes e tornando o composto estável diante das intempéries. Porém, para o transporte e armazenamento a emulsão encontra-se ativa, o que oferece um potencial risco de contaminação do solo durante as etapas de abastecimento e armazenamento do produto (PRIETO, 2013).

Embora haja dispositivos normatizados pelos órgãos de proteção e conservação do meio ambiente e da vigilância sanitária para manter as emulsões asfálticas confinadas em caso de vazamentos, os procedimentos e rotinas diárias de operações de refinarias ou usinas de asfalto, podem sofrer pequenos vazamentos e derramamentos dos dispositivos de contenção. A água pode levar o solo contaminado com o produto para rios, lagos ou até mesmo para lençóis freáticos por percolação contaminando todo um bioma.

O setor da construção civil está em constante evolução, impulsionado pela busca incessante por soluções mais eficientes, duráveis e sustentáveis. Nesse contexto, a impermeabilização de estruturas emerge como um desafio crucial, especialmente em regiões com alta pluviosidade ou solos úmidos. A falha na impermeabilização pode ocasionar diversos problemas, como infiltrações, umidade excessiva, deterioração da estrutura e proliferação de fungos, comprometendo a segurança e habitabilidade das construções. Nesse cenário, os tijolos de solo-cimento surgem como uma alternativa promissora para a construção civil. Fabricados a partir da mistura de solo, cimento e água, esses tijolos apresentam características que os tornam especialmente adequados para a incorporação de compostos que proporcionem a impermeabilização de estruturas.

Diante disso, essa pesquisa almeja desenvolver características atípicas nas

propriedades técnicas, com adição de resíduos de emulsão asfáltica, proporcionar efeito hidrofugante ao tijolo solo-cimento, bem como na melhoria da sua resistência mecânica. O desenvolvimento deste estudo visa a oferecer um apoio tecnológico e cientifico, direcionado para o setor industrial, destacando a importância de desenvolvimento de um bloco solo cimento que possa ser utilizado em fundações de edificações de modo a eliminar ou reduzir a utilização de produtos impermeabilizantes, além de proporcionar melhor ou igual resistência estrutural se comparado com o tijolo solo cimento convencional. Tendo em vista que a falta de conhecimento em torno desse produto e de seu sistema construtivo, acaba gerando preconceito e negação por parte da sociedade e empresários locais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Investigar as propriedades tecnológicas do tijolo solo cimento com adição de resíduos de emulsão asfáltica elastomérica.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

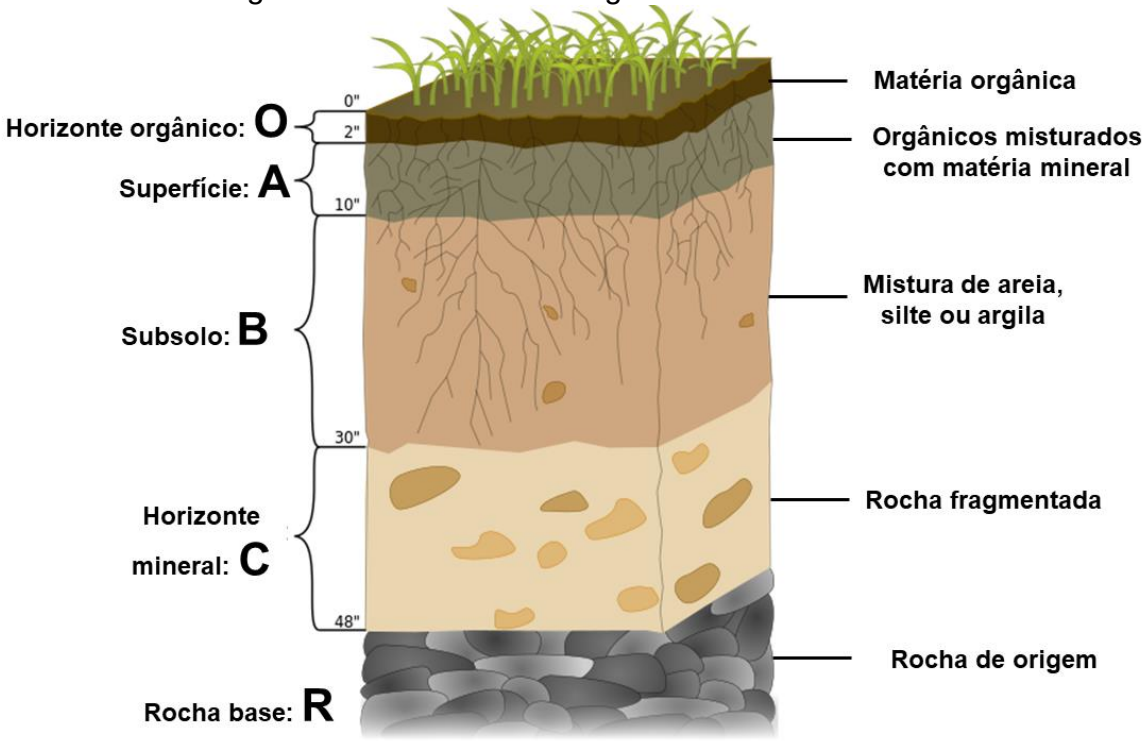
- Realizar as caracterizações físicas, químicas e mineralógicas do solo através de ensaios físicos, técnicas de difração de raios X e fluorescência de raio X;
- Conceber corpos de prova do tijolo solo cimento;
- Avaliar por meio de ensaios normatizados as propriedades físicas e mecânicas dos tijolos produzidos;
- Aferir efeito hidrofugante obtido por tijolos solo cimento com adição de resíduos de emulsão asfáltica elastomérica por comparação de resultados obtidos em tijolos solo cimento padronizados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A CIÊNCIA DO SOLO

Segundo Metzker *et al*. (2022), desde a antiguidade o solo vem sendo uma fonte essencial para a prosperidade e o progresso da vida e da ciência humana. O solo é um produto resultante de um lento trabalho executado pela natureza. Seu processo de formação é decorrente da pedogênese Chiapini *et al*. (2023), onde o material particulado contendo minerais e orgânicos foram sendo depositados em camadas por meio do Intemperismo que foram degradando as rochas. De acordo com Barbosa *et al*. (2022) um dos solos mais abundantes encontrados no Brasil são os latossolos, que ocorrem praticamente em todo o país e se desenvolvem em todos os tipos de rocha devido o intemperismo. Com o intemperismo, camadas no solo são formadas, onde estas são demoninadas como horizontes (Figura 1).

Figura 1 – Horizontes de alguns solos.



Fonte: Adaptação (BLUM *et al*., 2018).

De acordo com Pereira *et al*. (2019), os horizontes do solo são camadas distintas que se formam no solo devido a processos de formação específicos. Cada

horizonte possui características físicas, químicas e biológicas particulares que refletem a história de formação do solo. Os principais horizontes dos solos são:

- Horizonte O (Orgânico): É composto em maiores proporções, por matéria orgânica em vários estágios de decomposição. Presente na superfície, especialmente em solos de florestas e prados. É dividido em sub-horizontes como Oi (material orgânico pouco decomposto), Oe (moderadamente decomposto) e Oa (altamente decomposto).
- Horizonte A (Superficial): Mistura de matéria orgânica com minerais. Cor escura devido ao alto teor de matéria orgânica. Rica em nutrientes e geralmente a camada mais fértil do solo.
- Horizonte E (Eluvial): Área de lixiviação, onde ocorre a remoção de materiais como argilas, ferro e alumínio. Apresenta cor mais clara devido à perda desses materiais. Não está presente em todos os solos.
- Horizonte B (Subsuperficial ou Iluvial): Zona de acúmulo (iluviação) de materiais lixiviados do horizonte E. Rica em minerais como argila, óxidos de ferro e alumínio. Pode ter cor mais avermelhada ou amarelada devido ao acúmulo de óxidos de ferro.
- Horizonte C (Material de origem): Composto por material não consolidado, pouco afetado pelos processos de formação do solo. Pode incluir fragmentos de rocha e minerais primários. Serve como a base para os horizontes superiores à medida que o solo se forma e se desenvolve.
- Horizonte R (Rocha matriz): Camada de rocha sólida, não alterada. Representa o material original a partir do qual os horizontes superiores se desenvolveram através de processos de intemperismo e pedogênese.

Esses horizontes se desenvolvem ao longo do tempo devido a uma combinação de fatores como clima, organismos vivos, relevo, material parental e tempo. O estudo dos horizontes do solo é essencial para a compreensão da sua fertilidade, capacidade de retenção de água, e adequação para diferentes usos (MAPBIOMAS, 2023).

O horizonte B é caracterizado pela acumulação de materiais lixiviados dos horizontes superiores, especialmente do horizonte E, se presente (SANTOS *et al*.,

2018).

Comumente acumula argilas, óxidos de ferro, alumínio e matéria orgânica dissolvida. Geralmente contém uma alta concentração de minerais secundários e uma estrutura mais compacta e coesa em comparação com os horizontes superiores devido ao acúmulo de argilas. As cores no horizonte B são frequentemente mais intensas e escuras do que nos horizontes acima, devido à concentração de óxidos de ferro e alumínio. A textura pode ser mais fina e argilosa devido à iluviação de argilas. A espessura e a composição do horizonte B podem variar amplamente dependendo do tipo de solo, clima e vegetação da área (MARTINS NETO, 2019).

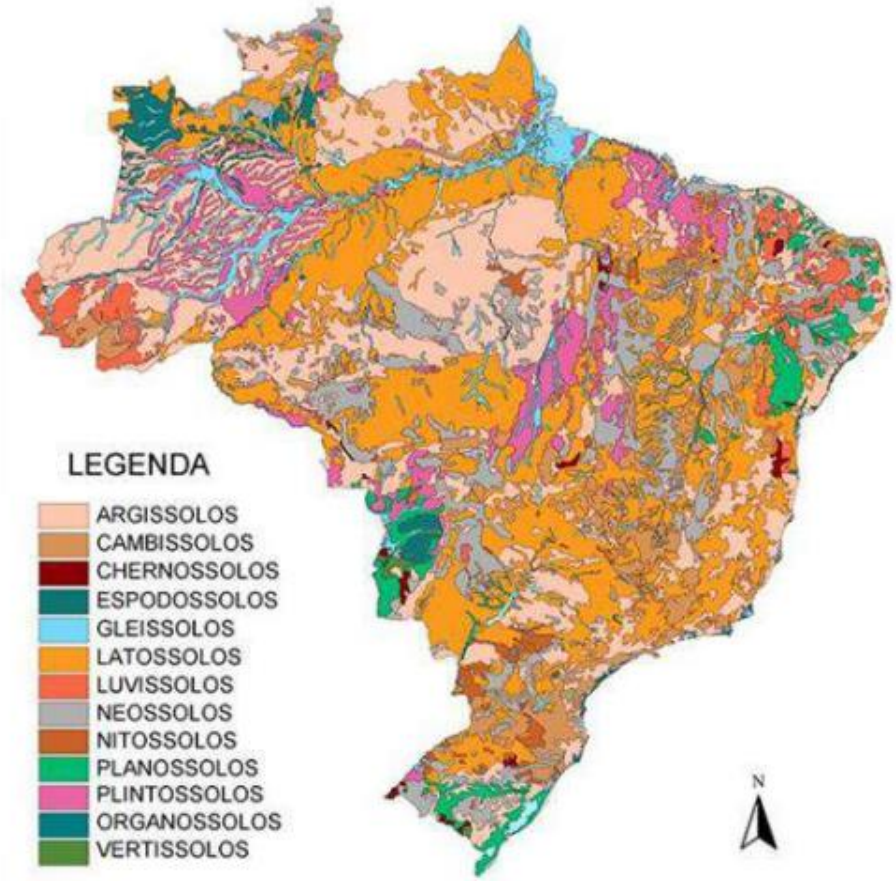
Em solos tropicais, o horizonte B pode ser bastante espesso devido à intensa lixiviação e formação de lateritas. O horizonte B desempenha um papel crucial no perfil do solo, afetando a sua fertilidade, estrutura e capacidade de suportar a vegetação. O entendimento detalhado do horizonte B é essencial para práticas de manejo do solo, agricultura sustentável e conservação ambiental (PEREIRA *et al*., 2019).

Predominantes em países tropicais, os latossolos se desenvolvem a partir de diversos materiais, onde sua formação é resultado da intensificação do intemperismo, processo que libera ferro e alumínio, concentrando-os no solo. O relevo, a vegetação e o tempo também influenciam suas características. Com textura argilosa e rica em óxidos de ferro e alumínio, os latossolos apresentam cor avermelhada, boa porosidade e acidez variável. Apesar da baixa fertilidade natural, podem ser altamente produtivos na agricultura com manejo adequado, como a correção da acidez e adição de matéria orgânica (MARQUES, 2009).

Latossolos, solos vermelhos que dominam paisagens tropicais, guardam em sua complexa mineralogia a história de sua formação. Influenciados por diferentes climas ao longo do tempo, esses solos desenvolveram características químicas, morfológicas e mineralógicas relativamente homogêneas. Na fração grossa dos Latossolos, o quartzo é acompanhado por menores teores de muscovita e feldspatos potássicos em solos derivados de rochas ácidas. A fração argilosa dos latossolos revela uma sinfonia mineral complexa. Caulinita, gibbsita, goethita e hematita se apresentam em proporções variadas, dependendo do material de origem, da intensidade do intemperismo e da drenagem do solo. Estes solos lateríticos podem ainda (Figura 2) possuir vermiculita, ilita, anatásio, rutilo, magnetita e haloisita. No

entanto, o destacam-se a combinação de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, que dominam a fração argilosa nestes solos (KER, 1998).

Figura 2 – Mapa com a distribuição de solos no Brasil



Fonte: Adaptação de (SANTOS *et al.*, 2013).

2.1.1 Granulometria do solo

Por meio da análise granulométrica é possível obter a quantificação em relação ao tamanho das partículas constituintes do solo. Os grãos são fragmentos de rocha que podem sofre ou não alterações, física e ou químicas, além de conter a presença de um ou mais minerais, concreções, nódulos e materiais similares cimentados e materiais que não podem ser desagregados senão por aplicação de elevada energia (DONAGEMMA *et al*., 2017).

2.1.2 Areia

As areias são partículas com diâmetro entre 0,05 mm e 2 mm. Podem ser arredondadas ou angulares, dependendo do grau de desgaste que foram

submetidas pelos processos abrasivos durante a formação do solo. Partículas arenosas grosseiras podem ser fragmentos de rocha com a presença de alguns minerais, no entanto é constituída por um só mineral, o quartzo (SiO_2), assim como outro silicato primário. A coloração marrom, amarela ou vermelha pode estar presente como resultado de camadas de óxidos de ferro ou alumínio (PEREIRA *et al*., 2019).

Por serem partículas grandes, os espaços entre elas também possuem um diâmetro relativamente grande, promovendo a drenagem livre da água e a entrada de ar no solo. Devido ao seu maior tamanho, partículas de areia têm superfície específica relativamente baixa, gerando uma pequena capacidade de retenção de água. Partículas de areia são consideradas não coesivas; isto é, não se mantêm unidas a outras (ELL *et al*., 2023).

2.1.3 Silte

Quando as partículas são menores que 0,05 mm e maiores que 0,002 mm de diâmetro são classificados como silte. Além de não visíveis a olho nu, possuem sensação de sedosidade ao tato. São micropartículas de areia, com o quartzo sendo, geralmente, o mineral dominante e consequentemente são mais propensas à ação do intemperismo. Os poros entre partículas de silte são menores que os poros presentes entre as partículas de areia e por este fato, retém mais água e permite uma menor taxa de drenagem. Já quando seco, o silte possui pouca plasticidade. Quando filme de argila adere a superfície das particulas de silte, pode apresentar baixa plasticidade, coesão e capacidade de adsorção (ARAÚJO *et al*., 2021b).

2.1.4 A argila

De acordo com Moreno-Maroto e Alonso-Azcárate (2018), a argila é definida como um sedimento composto por um material particulado por pequenas dimensões que estão em torno de 4 micrômetros de diâmetro. A sua estrutura é formada por formas fibrosas e lamelares denominadas filossilicatos, atribuindo para este material, aspectos de baixa dureza, uma baixa densidade e uma boa clivagem. A presença de minerais argiloso também são partes fundamentais para a definição de característica das argilas como a resistência a compressão e a plasticidade (LIU *et al*., 2022).

A argila, um material natural onipresente na crosta terrestre, ostenta uma história complexa e propriedades intrigantes que a tornam indispensável para

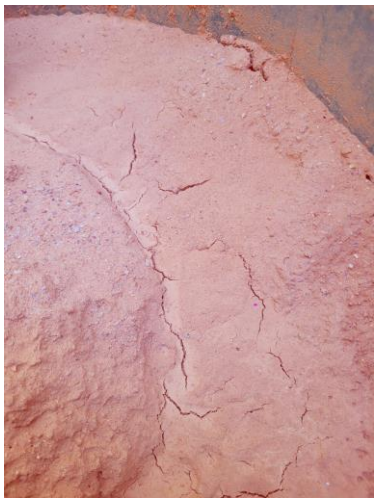
diversos setores da sociedade. Sua formação, um processo gradual e multifacetado, inicia-se com a decomposição física e química de rochas e minerais, principalmente feldspatos e micas (RODRIGUES, 2008).

Fatores como clima, tempo e ação de organismos moldam essa transformação, esculpindo partículas finas com características singulares. Sua formação ocorre com a decomposição de rochas, fragilizadas por intempéries e ação biológica, liberam minerais que, em contato com a água, se decompõem em partículas menores. A argila é o resultado final desse processo, composto por minerais argilosos como caulinita, montmorilonita e ilita (BRANCO; PEDROTTI, 2004). O tamanho e a forma dessas partículas, influenciados por fatores como pH, salinidade e temperatura, determinam as propriedades da argila. As propriedades Físicas e Químicas da argila se destacam por sua plasticidade, a capacidade de ser moldada em diversas formas e de manter a forma após a secagem (SKEMPTON, 1953).

Essa propriedade, fundamental para a produção de cerâmicas e outros objetos, é resultado da estrutura química da argila, composta por lâminas de minerais argilosos com íons hidratados entre elas. Dentre outras propriedades importantes da argila incluem a Impermeabilidade, onde a estrutura compacta e a porosidade mínima da argila impedem a passagem da água, tornando-a ideal para impermeabilizar construções e criar barreiras contra líquidos (COLLIS; MOON, 1968).

A coesão faz com que as partículas da argila se unem com força, formando uma massa homogênea e resistente, fundamental para a estabilidade de estruturas feitas com esse material (Figura 3).

Figura 3 – Solo com características coesivas.



Fonte: Autor (2023).

Outra característica relevante da argila é a retenção de água, que proporciona uma alta capacidade da argila de absorver e reter água e tornando essencial para a agricultura, pois garante a hidratação das plantas mesmo em períodos secos (VAN OLPHEN, 1977). Capacidade de troca catiônica: a superfície das partículas de argila possui carga negativa, o que permite a troca de catiônios entre a argila e a solução circundante. Essa propriedade é importante na agricultura para a fertilidade do solo e para a retenção de nutrientes pelas plantas.

Dentre outras aplicações da argila destacam se a versatilidade da argila se traduz em uma ampla gama de aplicações, desde a construção civil e cerâmica até a indústria e agricultura. Na construção civil, a argila é utilizada na produção de tijolos, telhas, blocos cerâmicos e outros materiais. Na cerâmica, a argila é a matéria-prima para a produção de louças, vasos, esculturas e outros objetos decorativos. Na indústria, a argila é utilizada em diversos processos, como na produção de papel, tintas, produtos farmacêuticos e cosméticos. Na agricultura, a argila é essencial para a fertilidade do solo, pois ajuda a reter água e nutrientes.

2.1.5 Classe textural do solo

A classificação textural é relacionada as quantidades de particulados fracionados em areia, silte e argila presentes no solo. Também é uma propriedade muito importante na diferenciação de horizontes, na avaliação das relações genéticas entre os horizontes A e B em gradiente textural e na estimativa da drenagem do perfil. A classe textural, no campo, é determinada por um processo expedito, caracterizado pela avaliação de sensações táteis como aspereza,

sedosidade e friabilidade. No tocante a consistência do solo úmido é o que representa a plasticidade e pegajosidade do mesmo.

Além disso, a textura do solo é um atributo físico pode indicar a influência e capacidade de reter e/ou drenar água. De acordo com as proporções relativas de areia, siltes e argilas é possivel realizar uma pré classificação do solo (FOSTER *et al*., 2013; NEMES, 2023). Um fato já constatado é que ao longo do tempo é que a textura do solo ao longo do tempo é uma propriedade física do solo que sofre pouca alteração. Condições que podem gerar alterações significativas na textura do solo seriam atividades extremas de erosão, decorentes de inundações ou temperaturas bastante elevadas (PORTA CASANELLAS *et al*., 2003). O diagrama de Triângulo Textural é utilizado para apresentar as classes texturais (USDA-SBCS).

O triângulo textural de solo é uma ferramenta usada na pedologia para classificar e interpretar a textura do solo com base na proporção de seus três componentes principais: areia, silte e argila. Cada lado do triângulo representa uma dessas frações, e a posição de um ponto dentro do triângulo indica a composição relativa desses componentes. A utilidade desta ferramenta é destacada na engenharia, cientistas do solo e agricultura, já que a textura do solo é uma caracteristica diretamente ligada a propriedades físicas e químicas do solo como a capacidade de retenção de água, aeração, permeabilidade e fertilidade (TERNIKAR *et al*., 2024). Há 12 classes texturais principais, como franco-arenoso, franco-argilo-arenoso, argiloso, entre outros, que são indicadas no triângulo.

No quadro 1, é mostrado uma progressão gradual na redução da granulometria, que ocorre da arenosa até a argilosa. Para as classes arenosa como a areia franca é característico um comportamento derivado diretamente das propriedades da areia, visto que a fração areia presente é usualmente mais de 70% do peso do material, enquanto a fração de argila é 15% ou menos. Convem ressaltar que grandde parte dos solos encontran-se caracterizados como alguma classe franco (REINERT; REICHERT, 2006).

Quadro 1 - Denominação geral utilizada na descrição da textura de um solo, de acordo com o nome das suas classes texturais.

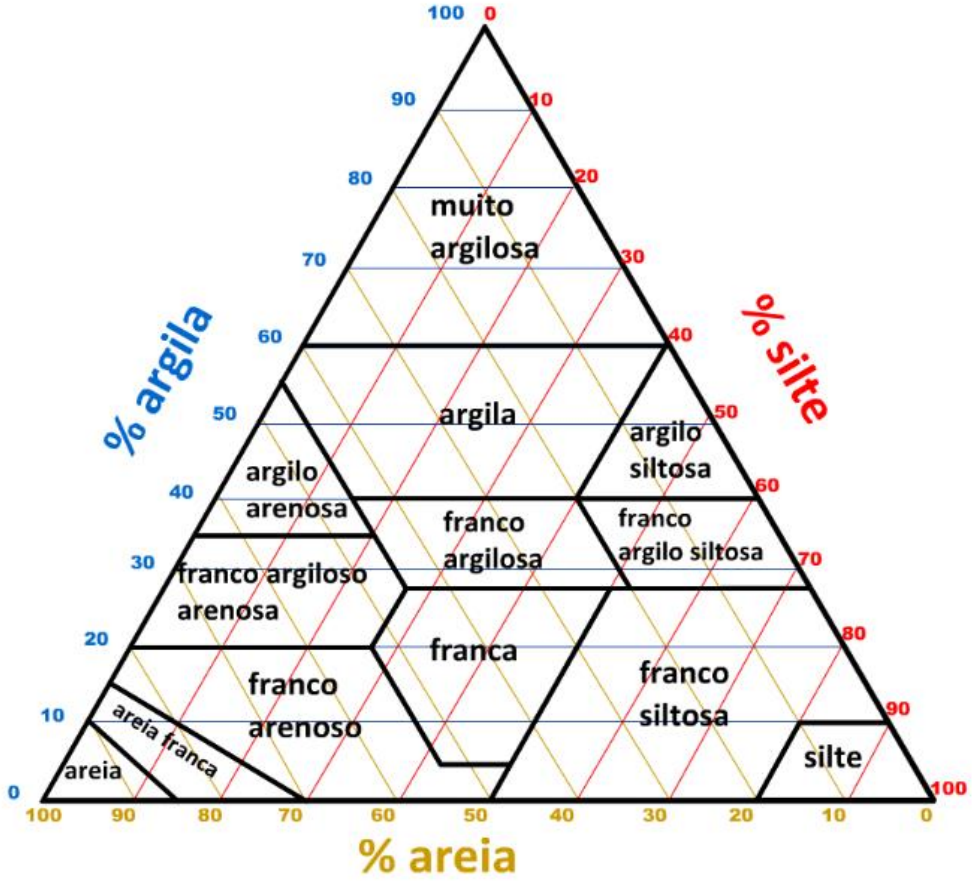
Termos Gerais		Classe Textural
Nomes Comuns	Textura	

Solos Arenosos	Grosseira	Arenosa
		Areia franca
Solos Siltosos	Moderadamente grosseira	Franco arenosa
	Média	Franca
		Franco siltosa
		Siltosa
	Moderadamente fina	Franco argilo-arenosa
		Franco argilo-siltosa
		Franco argilosa
Solos Argilosos	Fina	Argilosa arenosa
		Argilosa siltosa
		Argilosa

Fonte: Adaptação (COSTA, 1999).

A relação entre a análise granulométrica e a classe textural do solo é normalmente indicada por um triângulo de classe textural (Figura 4).

Figura 4 – Representação do triângulo textural.



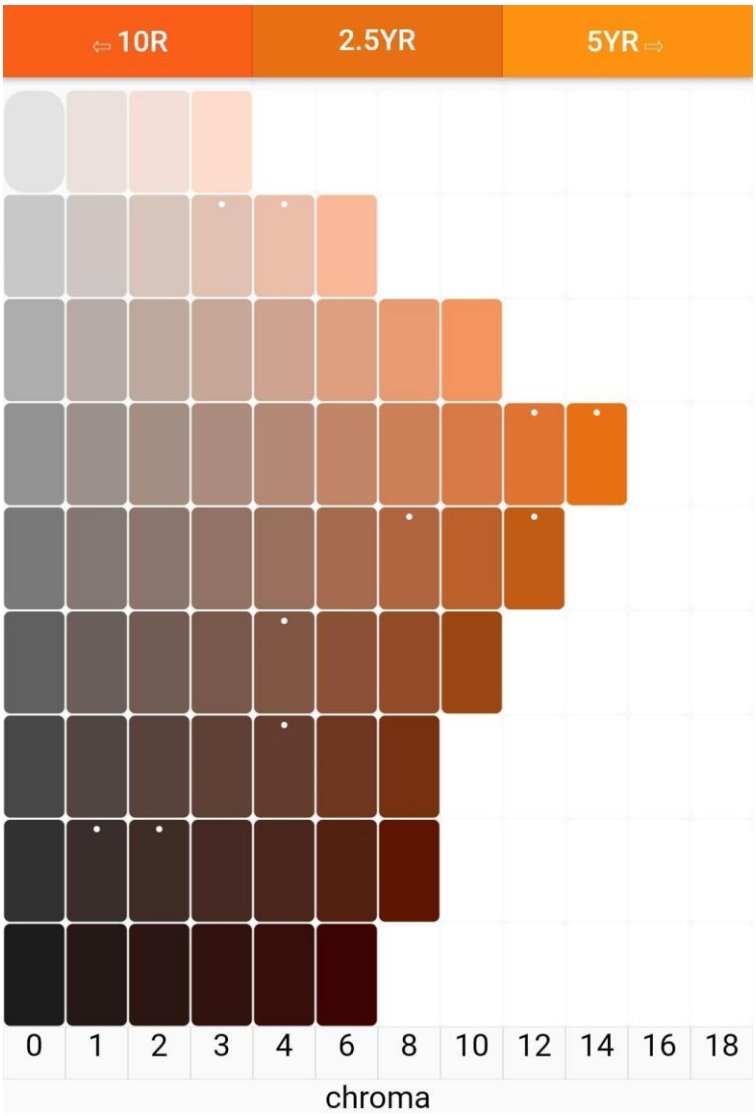
Fonte: Adaptação (QUOOS *et al*., 2011).

2.1.6 Carta de Munsell

Criado pelo professor Albert H. Munsell no início do século XX o sistema Munsell de cores classifica as cores em: Matiz, Valor e Croma. Juntamente com especialistas em ciência do solo, realizaram uma adaptação do sistema Munsell de cores para a caracterização da cor dos solos (MUNSELL SOIL COLOR COMPANY, 1950). A Carta de cores Munsell para Solos cotém diversos padrões de cores que são encontradas nos solos. Após a implementação no sistema no American Soil Survey Program no ano de 1949, passou a ser recomendado pela Sociedade Internacional de Ciência do Solo (ISSS) em 1960 (SIMONSON, 1993).

Os sistemas de cores proporcionam de maneira eficaz a organização gráfica de todas as percepções de cores, destacando de maneira quantitativa as relações dessas cores (Figura 5).

Figura 5 – Padrão mundial de cores expressa em carta de Munsell.



Fonte: (Munsell color chart2®, 2024).

Com os padrões deste sistema é possível realizar um diagnóstico preciso com a correspondência de cores na ciência e na elaboração de testes psicofísicos para avaliação de deficiências na visão de cores. A versão atual, a Renotation Munsell, contém 1928 pontos (COCHRANE, 2014).

De forma específica no sistema de Munsell, as cores são organizadas com as coordenadas descritas a seguir: possui no eixo vertical a representação do termo value (V), que é definida como uma dimensão atribuída ao brilho, com variação entre preto (V = 0) e branco (V = 10), para as cores localizadas respectivamente nos extremos – inferior e superior – do eixo vertical. Perpendicular ao eixo vertical estão posicionadas outras dimensões representando o ângulo polar e a distância, que representam o hue ou matiz (H) e o chroma (C), em que esta dimensão coresponte

variação da saturação. Analisando a matiz no sistema, está disposta em um círculo de cores do sistema que por sua vez, está particionado em 100 partes semelhantes, identificadas no círculo externo, onde ocorre a variação de H de 0 a 100. O afastamento em relação ao eixo vertical determina a saturação, em que, quanto mais distante do eixo vertical, maior o grau de saturação (GUIMARÃES, 2016).

2.1.7 Argilominerais

Caracteriza-se como argilominerais os compostos formados por alumino silicatos hidratados e quando estão incorporados ao ferro e magnésio que ocupam o lugar do alumínio, além destes, existem os elementos alcalinos e alcalinos terrosos. A sua formação ocorre pelo intemperismo das rochas, por sedimentação e diagênese, onde esta última sofre os efeitos diretos de processos de hidrólise e hidratação. Os argilominerais são fundamentais para classificar uma jazida mediante características específicas, como a plasticidade, modulo de elasticidade, porosidade, retração dentre outros (ELHASSAN *et al*., 2023). A relação com a cristalinidade tem muito a dizer sobre as características dos argilominerais, como é visto no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação dos argilominerais

Classificação	**Arranjo estrutural**	**Exemplos**
Nesossilicatos	Tetraedros independentes	Olivina
Inossilicatos	Cadeias contínuas, simples ou duplas de tetraedros	piroxenos, anfibólios
Sorossilicatos	Estruturas de tetraedros duplos	melilitas
Ciclosilicatos	Estruturas em anéis fechados	berílio, turmalina
Tectosilicatos	Arranjos tridimensionais especiais	quartzo, feldspatos
Filosilicatos	Lâminas contínuas de	micas, caulinita, esmectitas

	tetraedros	

Fonte: Adaptação (JUNIOR, 2023).

A composição estrutural dos complexos cristalinos é constituída de forma que a estrutura dos argilominerais cristalinos consiste em camadas ou folhas octaédricas e tetraédricas. A folha octaédrica é composta por empacotamento apertado de oxigênio e hidroxila (OH^-), juntamente com átomos de alumínio, ferro e magnésio. Enquanto a camada tetraédrica é formada por sílica e oxigênio ou hidroxila, arranjados na coordenação tetraédrica formando uma rede, conhecida como folha tetraédrica de sílica (LIU, 2022).

Os silicatos se distinguem pela presença do ânion SiO_4^{4-}, composto por um átomo de silício cercado por quatro átomos de oxigênio. Essa estrutura tetraédrica, altamente estável, permite a formação de diversos tipos de silicatos, com diferentes propriedades e composições. A química dos silicatos é complexa e envolve a combinação de diversos elementos, como alumínio, ferro, magnésio e cálcio, que influenciam diretamente suas características físicas e químicas (Deer *et a*l., 1992).

As propriedades físicas dos silicatos variam significativamente de acordo com sua composição química e estrutura cristalina. Alguns silicatos, como o quartzo, são duros e resistentes, enquanto outros, como as micas, são flexíveis e macios. A dureza dos silicatos é geralmente alta, devido à forte ligação entre os átomos de silício e oxigênio. A maioria dos silicatos também apresenta baixa condutividade térmica e elétrica, tornando-os bons isolantes (HURLBUT; KLEIN, 1985).

Os Filossilicatos representam um grupo de silicatos com estrutura lamelar singular. Essa estrutura, formada por folhas tetraédricas e octaédricas empilhadas, concede aos filossilicatos propriedades físicas e químicas únicas, tornando-os peças fundamentais para a vida na Terra (BRANCO *et al*., 2008).

Por serem majoritariamente constituídos por silício, oxigênio, alumínio e ferro, a proporção desses elementos, assim como a presença de outros cátions, como magnésio, potássio e cálcio, definem as características específicas de cada mineral. A natureza química dos filossilicatos influenciam diretamente sua capacidade de troca catiônica, crucial para a retenção de nutrientes e água no solo, além de determinarem suas propriedades físicas, como plasticidade e cor (DIXON; WEED, 1989).

Em termos de propriedades físicas, os filossilicatos geralmente apresentam

baixa dureza, alta capacidade de absorção de água e inchaço, além de serem bons isolantes térmicos e elétricos. Tais propriedades os tornam extremamente versáteis, com aplicações em diversas áreas, como na indústria cerâmica, na produção de cimento, na agricultura e na medicina (MURAD, 2009).

2.1.8 Cimento Portland

O Cimento Portland, um material aglomerante fundamental na construção civil moderna, possui uma história rica que remonta à Antiguidade. Evidências sugerem seu uso pelos egípcios em construções como as pirâmides, demonstrando a familiaridade da humanidade com suas propriedades desde eras remotas (ABCP, 2023). No entanto, o nome "Cimento Portland" só foi estabelecido no século XIX, devido à similaridade do material endurecido com as rochas calcárias da ilha britânica de Portland. Essa denominação se consolidou e perdura até os dias de hoje, representando um marco na história da construção civil (ABCP, 2002).

Em termos técnicos, o Cimento Portland se define como um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2019). Sua principal característica reside na capacidade de endurecer quando misturado com água, formando uma pasta que se transforma em uma pedra artificial resistente e versátil. Essa propriedade fundamental permite moldar o concreto em diversas formas e volumes, atendendo às necessidades específicas de cada projeto. A combinação de propriedades singulares, como resistência à compressão, durabilidade e versatilidade, elevou o concreto à posição de segundo material mais consumido pela humanidade, ficando atrás apenas da água (WBCSD, 2020). Essa onipresença na construção civil demonstra a importância do Cimento Portland para o desenvolvimento da infraestrutura moderna e para a sociedade como um todo.

A composição química do Cimento Portland é complexa e varia de acordo com a sua classificação e tipo. No entanto, os principais componentes são o calcário ($CaCO_3$), que fornece a fonte de óxido de cálcio (CaO), que é essencial para a formação dos compostos cimentícios, a argila ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) que é fonte de óxido de silício (SiO2), alumina (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3) e contribuem para as propriedades hidráulicas e a resistência do cimento além do gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), que regula o tempo de pega do cimento (NEVILLE, 2011)

O processo de produção do Cimento Portland envolve cinco etapas principais: A extração e moagem das matérias-primas, onde o calcário e a argila são extraídos

de minas e moídos finamente, seguindo para a mistura e homogeneização das matérias-primas, que são moídas e misturadas em proporções específicas para garantir a qualidade do cimento. Após estas etapas é realizada a calcinação, em que a mistura é aquecida em fornos a altas temperaturas (cerca de 1450 °C), promovendo reações químicas que formam os compostos cimentícios. por fim ocorres as etapas de resfriamento e moagem, sendo o clínquer (produto da calcinação), resfriado e moído finamente, junto com o gesso, para obter o cimento Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A NBR 16697 (ABNT, 2019) classifica os cimentos Portland em cinco tipos principais:

- Cimento Portland Comum (CP I): Cimento de uso geral, adequado para a maioria das aplicações em concreto.
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP II): Desenvolve alta resistência à compressão em um curto período de tempo.
- Cimento Portland de Alta Resistência (CP III): Desenvolve alta resistência à compressão aos 28 dias.
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (CP IV): Libera menos calor durante a hidratação, ideal para massas de concreto volumosas.
- Cimento Portland com Adição (CP V): Contém adições minerais que conferem propriedades específicas ao cimento.

O Cimento Portland (Tabela 1) é utilizado principalmente na produção de concreto, um material versátil utilizado na construção de edifícios residenciais, comerciais e industriais, pontes e viadutos, barragens, estradas e pavimentos (JOHNSTON, 1978; KHELIFA, 2020).

Tabela 1 - Tipo de cimento Portland fabricado no Brasil, utilizado no estudo.

Tipo	**Sigla**	**Classes (Mpa)**	**Norma**
Comum	CP	25, 32, 40	ABNT NBR 5732:1991
Composto	CP II	25, 32, 40	ABNT NBR 11578:1991
Alto – Forno	CP III	25, 32, 40	ABNT NBR 5735:1991
Pozolânico	CP IV	25, 32	ABNT NBR 5736:1991
Alta Resistência Inicial	CP V - AR	-	ABNT NBR 5733:1991

Resistente aos Sulfatos	RS	25, 32, 40	ABNT NBR 5737:1992
Baixo Calor de Hidratação	BC	25, 32, 40	ABNT NBR 13116:1994
Branco Estrutural	CPB	25, 32, 40	ABNT NBR 12989:1993

Fonte: Adaptação de (GIRARDI, 2014).

2.2 ESTABILIDADE SOLO-CIMENTO

Segundo Santos (2015), por meio de métodos mecânicos, físicos e/ou químicos podemos adquirir uma determinada estabilização do solo que irá depender do seu estado natural, pelos custos e pelas características e propriedade do solo em questão. De acordo com Liu *et al*. (2022), para que ocorra uma estabilização, uma determinada substância química deve ser adicionada ao solo, de modo a ocasionar uma reação química do aditivo com os minerais do solo, chamada fração coloidal ou o preenchimento dos poros pelo produto da reação química do aditivo com a água. Para as características relacionadas a esta reação, pode-se destacar a variação de temperatura, hidratação, evaporação, adsorção, ou químicas, tais como, troca catiônica, precipitação, polimerização, oxidação, solução e carbonatação, sendo que estas, não dependem somente da quantidade de material cimentante para definir o grau de cimentação de um solo estabilizado quimicamente, mas também fatores como a forma, a densidade, as condições de umidade e as quantidades existentes dos produtos reagentes (SANDRONI; CONSOLI, 2010).

De acordo com Ding *et al*. (2023), os solos granulares são considerados mais indicados que os argilosos, uma vez que conseguem atingir resistências mais elevadas com menores teores de cimento. Já os solos finos precisam de uma quantidade de aglomerantes mais elevada, sendo relevante que a mistura apresenta uma pulverização menos uniforme. O cimento diminui o limite de liquidez e incrementa o índice de plasticidade de solos argilosos.

Durante o processo de estabilização do solo com cimento, ocorre a hidratação do cimento Portland (Equação 1) e a liberação de argilominerais e da cal, durante a hidratação do cimento (Equação 2) (MEDINA, 2004).

Equação (1) Reações de hidratação do cimento:

$$C_3S + H_2O \rightarrow C_3S_2Hx \text{ (gel hidratado)} + Ca(OH)_2$$

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2(OH)^-$$

Se o pH da mistura abaixar: $C_3S_2Hx \rightarrow CSH$

Equação (2) Reações entre a cal gerada na hidratação e os argilominerais do solo:

$$Ca^{2+} + 2(OH)^- + SiO_2 \text{ (Sílica do solo)} \rightarrow CSH$$

$$Ca^{2+} + 2(OH)^- + Al_2O_3 \text{ (Alumina do solo)} \rightarrow CAH$$

Segundo Arulrajah *et al*. (2018), as reações finais do processo de cura do solo-cimento são denominadas pozolânicas e ocorrem em velocidade mais lenta. O CSH é um composto cimentante, semelhante ao C_3S_2Hx. O solo granular tem melhor estabilização com cimento, comparado com os argilosos, pois a reação da cal, gerada na hidratação, e os argilominerais geram uma queda no pH da mistura, influenciando diretamente no processo de hidratação e endurecimento do cimento.

2.3 RESÍDUOS

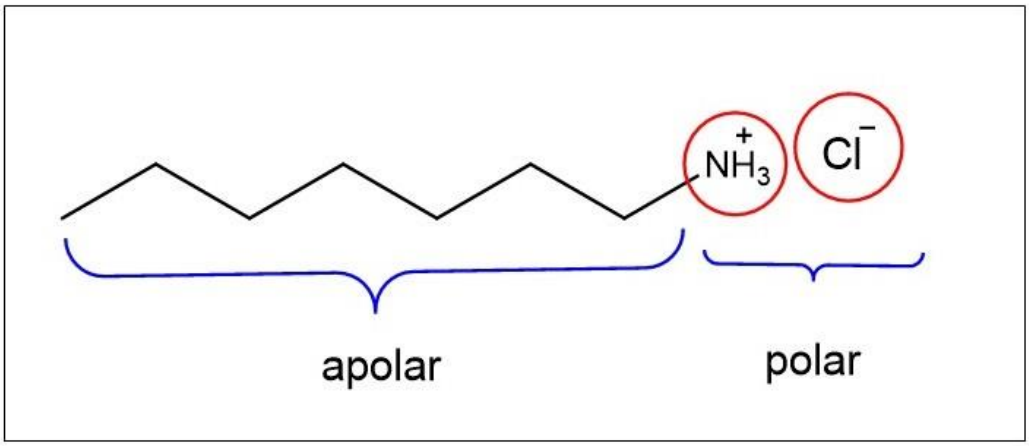
A estabilização de solos pode ser obtida com a correção da granulometria e plasticidade, com adição ou subtração de certas quantidades das frações constituintes, compactação e estabilização química, que consiste na mistura do solo com aditivos orgânicos ou inorgânicos – materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo, silicatos de sódio, cal, cimento Portland e em sequência a compactação da mistura. A combinação de materiais confere ao produto final uma elevada resistência a cargas, desgaste e à erosão, estando adequado para aplicações de engenharia (ZAINI *et al*., 2024).

2.3.1 Emulsão asfáltica

Segundo Torres (2013) define as Emulsões como pequenas gotículas de um líquido dispersas noutro líquido, na qual as fases são fluidos imiscíveis ou parcialmente miscíveis. Neste sistema tem-se uma fase líquida (descontínua ou interna) dispersa em outra fase líquida (contínua ou externa). Embora esses sistemas sejam cineticamente estáveis por longos períodos de tempo, eles apresentam instabilidade termodinâmica, o que reflete na separação de fases. Para reduzir a tendência de coalescência, usa-se tensoativos (Figura 6), que aumentam o tempo de estabilidade da emulsão. Uma emulsão asfáltica é uma mistura tipo dispersão composta de cerca de 50 a 70% de CAP, de 0,2 a 1% do agente

emulsificador e o restante de água. Uma emulsão asfáltica é líquida à temperatura ambiente.

Figura 6 – Estrutura de uma molécula de tensoativo.



Fonte: (Autor, 2023)

As emulsões asfálticas podem ser catiônicas aniônicas e não-aniônicas, em que as catiônicas são obtidas a partir da dispersão de asfalto em água na presença de sais de aminas, que fornecem cargas positivas aos glóbulos de betume. Estas emulsões apresentam maior facilidade de aplicação, flexibilidade e resistência. Possuem excelente adesividade para qualquer tipo de agregado, ácido ou alcalino, positivo ou negativo (ABEDA, 2001). O endurecimento das emulsões asfálticas dá-se devido à perda de água após a aplicação, resultando na deposição do asfalto sobre os agregados. As emulsões, durante a construção, devem permanecer fluidas para a adequada aplicação. Os glóbulos de asfalto são mantidos separados pelo agente emulsificante até que a emulsão se deposite na superfície da camada de solo, envolvendo as partículas de agregado. Para que o asfalto tenha função final de cimentar e impermeabilizar, a fase aquosa deve separar-se do asfalto (Rompimento), o que ocorre devido à neutralização das cargas eletrostáticas e a evaporação da água, fazendo com que ocorra a coalescência das gotículas de asfalto, formando uma película contínua sobre o agregado (FERNANDES *et al*., 2022).

2.3.2 Resíduos betuminosos

O problema com solos contaminados por hidrocarbonetos decorre do fato de que a contaminação ocorre com pouca frequência e em pequenas proporções,

porém, com grande impacto ambiental, particularmente no que diz respeito ao custo de remediação do local e os meios apropriados para tratar não apenas solo, mas revalorizar os resíduos (Figura 7).

Figura 7 – Solo contaminado com resíduos de emulsão asfáltica.

Fonte: (Autor, 2023)

Na América Latina, ainda existem muitos trabalhos a serem feitos, em que alguns países ainda carecem de legislação clara no que diz respeito ao tratamento e gestão de desperdício. Durante vários anos, as misturas asfálticas, compostas por agregados (areia e cascalho), um aglutinante ou ligante asfáltico (que podem ser de resíduos), e ar, têm sido usados como pavimento para rodovias de tráfego médio e pesado e tornaram-se uma opção viável para revalorização e reciclagem de resíduos industriais (LITTLE *et al*., 2018).

2.4 TIJOLO SOLO-CIMENTO

O tijolo solo-cimento, também conhecido como tijolo ecológico, é o resultado da mistura homogênea de solo, cimento Portland e água em proporções adequadas, após sofrer compactação ou moldagem e cura. É um material que possui boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade e boa durabilidade.

Pode-se fabricar tijolos com encaixe, dispensando o uso de argamassa de assentamento e estes ainda podem possuir furos opcionalmente para a passagem de ferros, tubos e fios elétricos (FUNTAC, 2013). As vantagens da utilização dos tijolos de solo-cimento vão desde a fabricação e utilização até aspectos ecológicos, pois não passa pelo processo de queima, no qual se consome grandes quantidades de madeira ou de óleo combustível, como tijolos cerâmicos tradicionais.

Os fatores como a compactação, teor de umidade, homogeneização da mistura, tipo e teor de cimento, tipo de solo e cura influenciam diretamente nas caracteristicas do tijolo solo cimento (CAMPOS *et al*., 2019). Por encontrar-se em grande abundância e sem necessitar de processos industriais na fabricação, pode ser fabricado em loco, dispensando o processo de queima em sua produção e podendo minimizar a emissão de dióxido de carbono (CO_2), conseguindo uma resistência igual ou superior aos blocos estruturais tradicionais.

Os tijolos de solo-cimento podem proporcionar economia através de processo construtivo, pois, na alvenaria de tijolos de solo-cimento baixo volume de resíduos é gerado, além de permitir o encaixe entre os tijolos, gerando o uso de pouca ou nenhuma argamassa de assentamento e pode dispensar argamassa de revestimento. O tijolo de solo cimento quando aplicado em construções pode gerar uma economia de 20% a 40%, quando comparado com as alvenarias tradicionais de tijolos de barro ou cerâmicos (ARAÚJO *et al.*, 2021a).

Os tijolos de solo cimento Segundo a Norma ABNT/NBR 10833:2012, devem apresentar um solo para sua fabricação que atenda as seguintes características:

Passando na peneira ABNT 4,8 mm (Nº4) 100%

Passando na peneira ABNT 0,075 (Nº200).....10 a 50%

Limite de liquidez.....≤45%

Índice de plasticidade .....≤18%

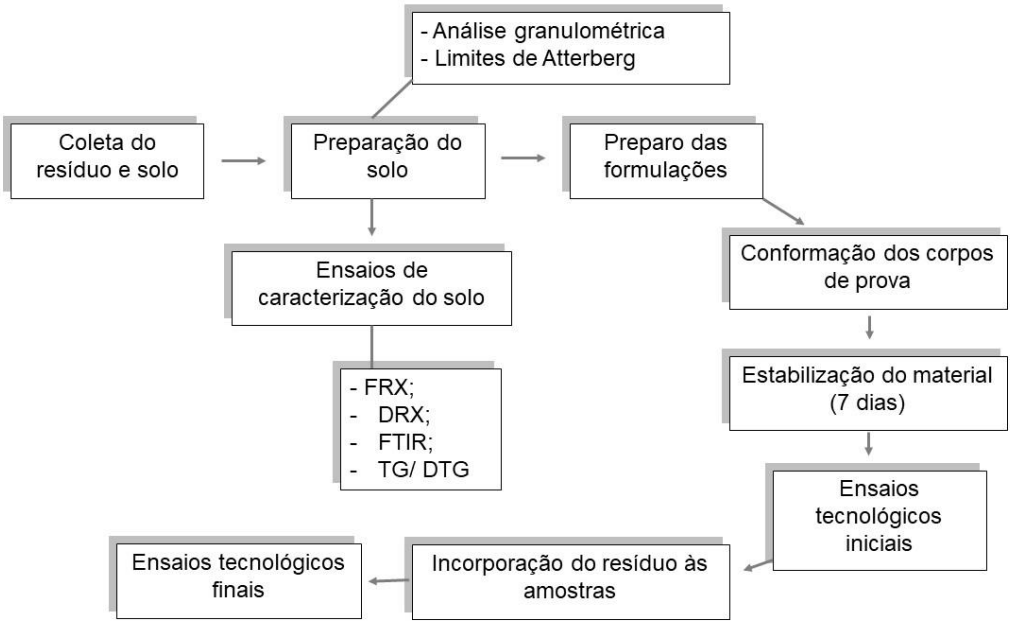
De acordo com CEBRACE (1981) e a ABCP (1985), o solo-cimento é constituído por mistura homogeneizada, compactada e curada de solo, cimento Portland e água em proporções adequadas de acordo com o uso. Apresenta baixa retração volumétrica, boa resistência à compressão, durabilidade e impermeabilidade. É composto de solo e uma fração de cimento que vaira de 5 a 10 % de cimento em peso, suficientes para estabilizar o solo. Uma curva granulométrica bem distribuída, isenção de matéria orgânica e teores consideráveis

de argilominerais, são características essenciais para um solo usado na produção de tijolo solo cimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido conforme a orientação ilustrada no fluxograma (Figura 8).

Figura 8 – Procedimento utilizado para obtenção dos corpos de prova incorporado com resíduo.



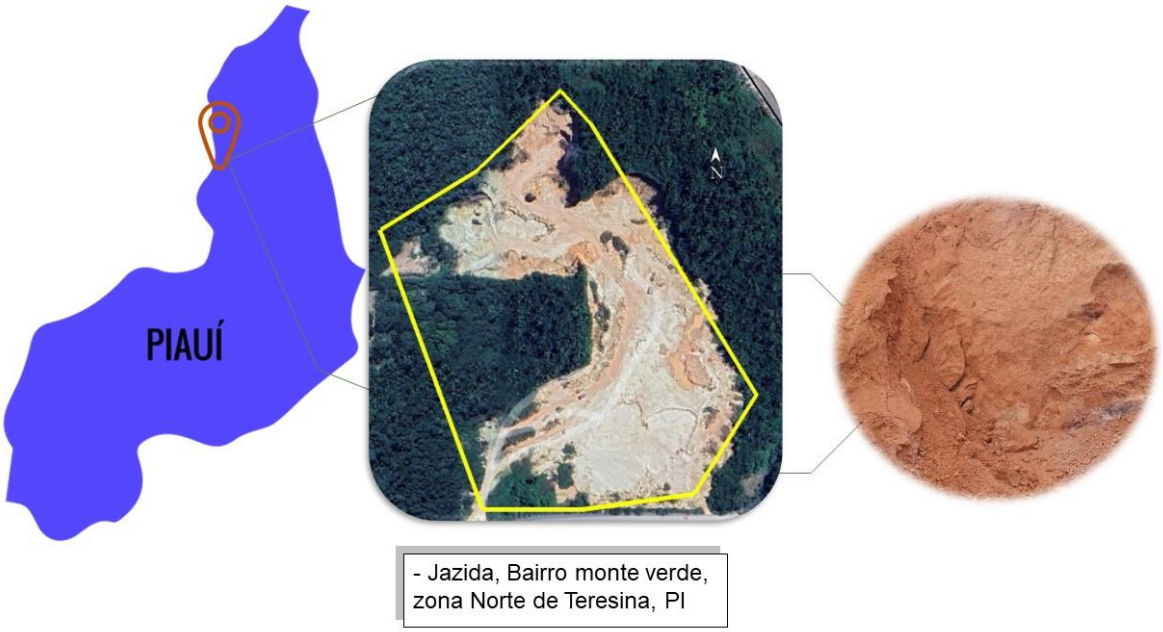
Fonte: (Autor, 2023)

3.1 COLETA DA MATÉRIA–PRIMA

Como matéria-prima, foi utilizado, o solo silte-arenoso, extraído de jazida localizada no bairro Monte Verde, zona norte do município de Teresina-PI (Figura 9), pois, foi encontrado nesta, potencial para extração de amostra de solo laterítico com boa distribuição granulométrica e percentuais de argilominerais. O resíduo betuminoso foi coletado em uma usina de asfalto localizada no povoado Alegria, zona sul do município de Teresina-PI. O resíduo é uma mistura de emulsão asfáltica de ruptura rápida (RR-1C) juntamente com solo e areia. A caracterização física e

química do solo, bem como, a produção dos corpos de prova, período de cura e ensaios tecnológicos foram desenvolvidos no laboratório do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), bem como na Universidade Federal do Piauí (UFPI). Como aglutinante, foi utilizado o cimento CP II, aquisição realizada no comércio local.

Figura 9 – Jazida localizada no bairro Monte Verde onde foi realizada a coleta do solo silte-arenoso.



Fonte: (Autor, 2023)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Após a coleta foi feito o destorroamento da amostra utilizando uma forrageira, que teve como função triturar grandes torrões de argila. Na sequência foi realizado o quarteamento que segundo Souza (2015), o processo em questão visou obter uma amostra homogênea.

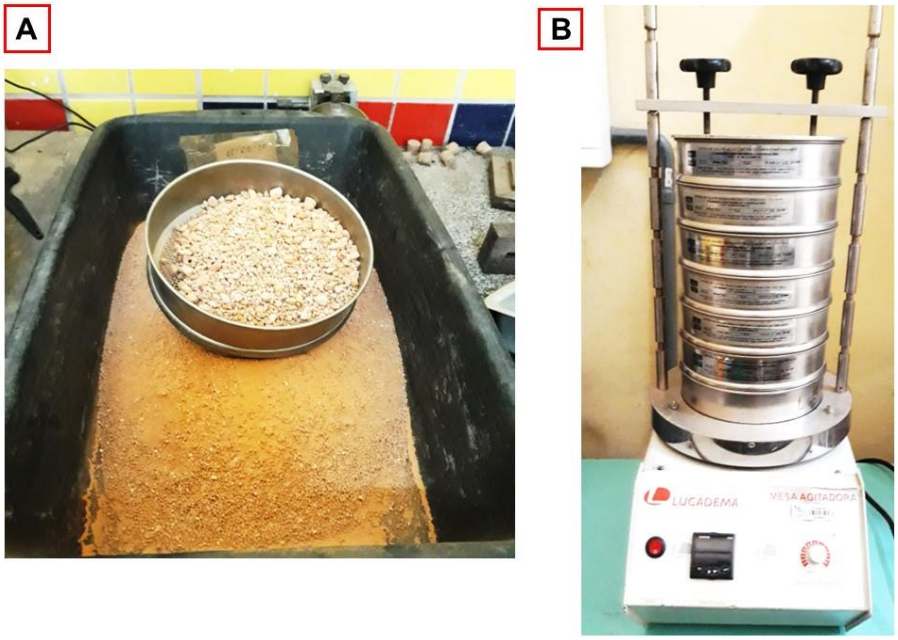
Para o ensaio de granulometria (Figura 10), realizado de acordo com a norma NBR-7181 fora pesado uma massa com cerca de 100,15 g do solo, em seguida, seca em estufa a temperatura de 110 ºC, para determinar a distribuição

granulométrica, onde este passou pelas peneiras de malha 10/20/40/60/80/100 e 200 mesh, com o auxílio de um agitador de peneira da marca Lucadema ®.

Em relação a análise de argila da amostra foi coletada 200 g da amostra, e foi levada para a estufa a 110 ºC por 24 h. Após a secagem, a argila foi triturada utilizando almofariz e pistilo de porcelana.

Depois da moagem a argila foi peneirada em peneira de malha:# 65\70\80 mesh para ensaio da determinação do índice de plasticidade (IP) e #200 mesh para análise química e mineralógica.

Figura 10 – Ensaio de caracterização de solo.



A – Preparo da amostra; B – Conjunto de peneiras e agitador mecânico
Fonte: (Autor, 2023)

Em paralelo ao ensaio de granulometria, foi executada análise textural do solo por meio da carta de Munsell e do triângulo textural.

Para análise textural em cores, uma porção levemente úmida da amostra 1 foi exposta em ambiente sob luz natural e difusa, sem incidência direta do sol, para que fosse evitado distorções na percepção das cores. Agregados maiores foram removidos para aferir uma leitura mais precisa. Posteriormente a mostra foi comparada com os padrões de cores da carta e por meio dos três padrões, matiz, valor e croma, o código da cor que mais se aproxima da amostra de solo foi encontrada.

Utilizando o triângulo textural, inicialmente as porcentagens de areia, silte e argila no solo foram definidas, mediante as etapas de localização do percentual de areia na base do triângulo, partindo-se em seguida para a localização do percentual de silte, linha reta paralela ao lado oposto do triângulo que representa 100% de silte até a linha correspondente à porcentagem de silte. Por fim para a localização da Argila partiu-se do ponto onde a linha de silte e areia se encontrava-se, movendo-se horizontalmente até a linha correspondente à porcentagem de argila. O ponto onde essas linhas se cruzaram dentro do triângulo determinou-se a classe textural do solo.

3.2.1 Ensaios Fluorescência de Raios X (FRX)

Para a fluorescência de raios X (FRX) foi executada através da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X. O equipamento utilizado foi o espectrômetro por Fluorescência de Raios modelo Epsilon 3 - XL da PANalytical, presente no laboratório de ensaios não destrutivos do Instituto Federal do Piauí – (IFPI). Para realização da análise, a matéria-prima empregada foi moída até a granulometria inferior a 325 mesh (Figura 11).

Os raios X gerados foram direcionados para a amostra 1. Quando os raios X atingiram a amostra, ocorreu a interação com os átomos na amostra e emitiu-se raios X característicos para cada elemento. O instrumento pode detectar e medir a energia dos raios X característicos que foram emitidos pela amostra. A intensidade desses raios X foram proporcionais à concentração dos elementos correspondentes na amostra. Os espectros de energia de raios X detectados foram analisados pelo software do instrumento.

O software comparou as energias de raios X características com uma base de dados conhecida de energias de raios X para diferentes elementos. E por meio desta comparação, o software obteve a composição e a concentração elementar na amostra. Posteriormente a quantificação pode revelar de forma precisa de moléculas específicas na amostra 1, em que a quantificação dos elementos foi obtida em valores de concentração.

Figura 11 – Preparo da amostra para os ensaios de caracterização do solo.

Fonte: (Autor, 2023)

3.2.2 Ensaio Difração de raios X (DRX)

A fim de garantir a uniformidade do solo e possibilitar o espaçamento entre as camadas dos átomos s serem submetidos a radiação, a amostra foi macerada na forma de pó, em seguida, prensada e fixada num porta amostras, sendo submetida a um feixe de raios-X. A análise foi executada sem a adição de padrão interno, realizada para as prováveis identificações das substâncias cristalinas através da comparação do difratograma com padrões difratométricos de fases individuais armazenados em bancos de dados, em que cada composto cristalino apresentou um padrão característico e permitiu sua identificação através das posições angulares e intensidades relativas de picos difratados.

O teste foi realizado no Laboratório de Materiais - (LABMAT) do Instituto Federal do Piauí – IFPI, com auxílio do equipamento XRD-600 Shimadzu, operando com uma tensão 40 Kv e 30 mA com radiação de Cu (λ = 1,54056 Å) e com o passo de 0,02º/passo. A varredura foi feita em uma faixa de 2 º a 80 º para um ângulo de 2 θ e velocidade de 2º/min. A análise e refinamento dos resultados foi executada utilizando software X’Pert High Score Plus Panalytical, utilizando banco de dados cristalográfico COD (Crystallography Open Database).

3.2.3 Ensaios de Termogravimetria (TG)

A análise foi realizada com um analisador termogravimétrico da SHIMADZU, modelo TGA-51H. Cerca de 6 mg de cada 3 amostras de solos distintos e 1 amostra de resíduo betuminoso, foram aquecidas da temperatura ambiente 23,78 °C até 1000 ºC, a uma taxa de aquecimento de 10º C/min, em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 mL/min em cadinho de platina.

Por meio desta técnica foi determinado a temperatura de fusão, temperatura de cristalização, temperatura de transição vítrea, cristalização, oxidação, decomposição da amostra 1.

3.2.4 Espectroscopia de absorção molecular na região do infravermelho

Visando obter informações sobre a identificação, quantificação e aspectos estruturais dos argilominerais, sejam eles cristalinos ou amorfos, foi realizado o ensaio não destrutivo de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) da amostra 1, destacando a possibilidade de ser distinto a identificação de argilominerais de composições químicas constantes, mas com estruturas cristalinas diferentes, como o quartzo SiO_2.

Os espectros de IV foram obtidos em ATR (refletância total atenuada) com cristal de diamante puro. Foi utilizado um espectrômetro FT-IR (FTIR Cary 630 da Agilent Technologies) sob as seguintes condições: porcentagem de transmitância (%T) com acúmulo de 64 scans, com resolução de 4 cm^{-1}, na faixa de absorção de 4000 – 650 cm^{-1}. Os ensaios foram realizados na UFPI - Campus Teresina.

3.2.5 Ensaio de plasticidade

O índice de plasticidade da mistura foi necessário para obter as propriedades do solo voltados à granulometria e a compressibilidade. Para a realização dessa análise foi utilizado o aparelho casa grande, conforme (Figura 12). Nesta pesquisa o índice de plasticidade, foi obtido conforme as normas técnicas NBR 6459/84 e NBR 7180/84 da ABNT. Para o tijolo solo cimento a norma estabelece que o índice de plasticidade deva ser menor ou igual a 18%.

O índice de plasticidade dos solos (ABNT NBR 7180), foi obtido utilizando-se a (Equação 3):

Equação (3) IP = LL – LP

Em que: IP é o índice de plasticidade;
LL é o limite de liquidez, determinado através da ABNT NBR 6459;
LP é o limite de plasticidade.

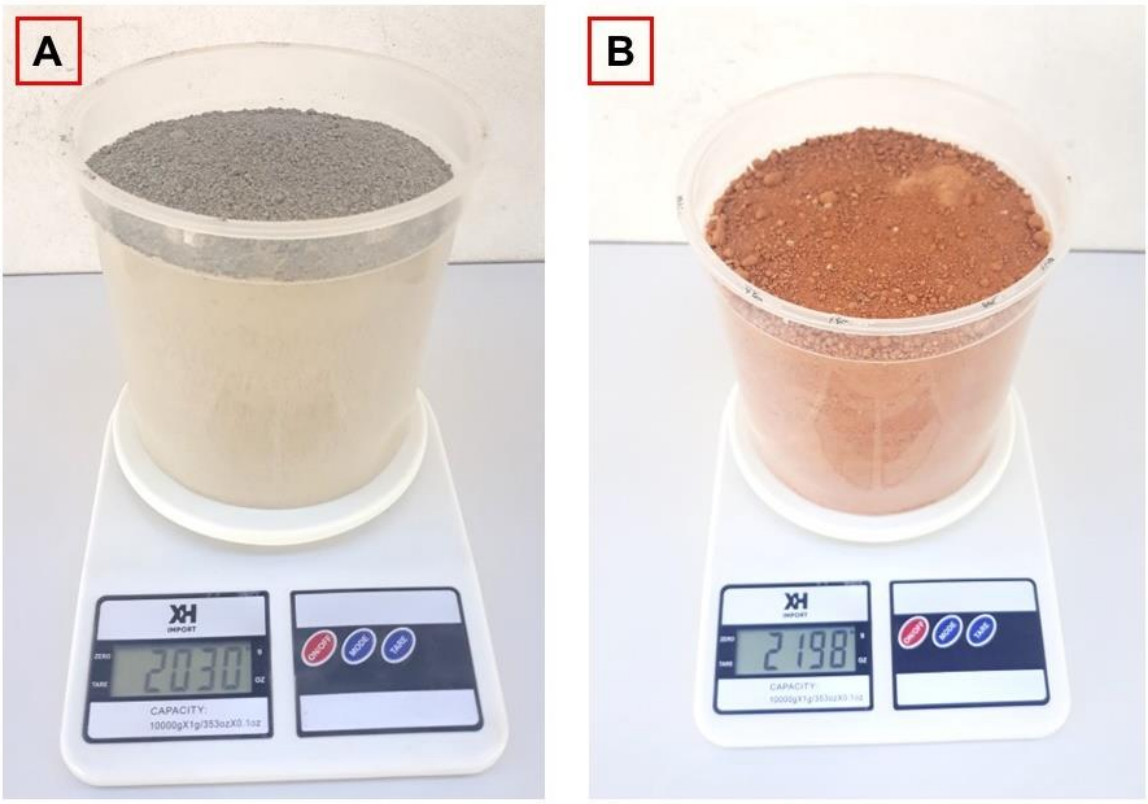
Figura 12 – Realização do Ensaio de Casagrande.

Fonte: (Autor, 2023).

3.2.6 Conformação dos corpos de prova

De acordo com as normas NBR 12023 (2012) e ABNT NBR 10833 (2012). Foram executadas a moldagem e fabricação dos corpos de prova conforme as formulações que definidas pesquisas para o aglutinante cimentício e para o solo (Figura 13). Após o processo de moldagem e durante os sete primeiros dias, os corpos de prova foram mantidos úmidos, com o intuito de garantir a cura necessária.

Figura 13 – Tijolo solo-cimento preparado para ensaio de compressão uniaxial.

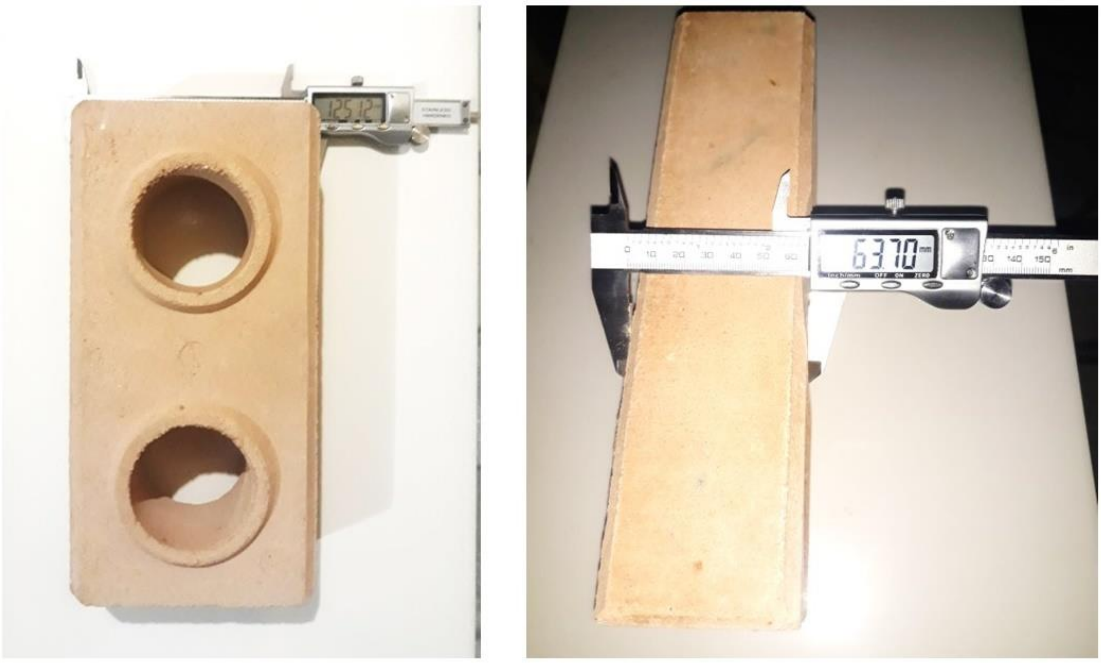


A – Cimento; B – Solo (amostra 3)
Fonte: (Autor, 2023)

3.2.7 Análise tecnológica de lote padrão

Para a análise dimensional (Figura 14), de acordo com a norma ABNT NBR 8491/12 após 24 h de moldados, foi utilizado um paquímetro digital da marca TUFFGRADE ®, com precisão 0,02 mm para a ferir as dimensões lineares, como largura, altura e comprimento, assim como diâmetros internos e externos dos tijolos. Verificado o estado do paquímetro e calibrado, durante todo o processo, foi tomado cuidado para garantir que o paquímetro estivesse perpendicular às superfícies do tijolo, evitando erros de paralaxe. Após aferir todas as dimensões foram registrados os valores obtidos.

Figura 14 – Analise dimensional.



Fonte: (Autor, 2023)

O teor de umidade foi analisado com o ensaio de absorção de água (AA), sendo necessários três corpos de prova, a serem secos em estufa a 110 ºC, até a constância da massa, de forma a se obter a massa M1 do corpo de prova seco, em gramas (g). A massa M2, foi obtida com a imersão dos corpos de prova em um tanque durante 24 h. Com os corpos de prova retirados da água, que foram enxugados com um pano umedecido e em seguida pesados, onde foi obtida M2, em gramas (g). Os valore individuais de absorção de água, expressos em porcentagem, foram aplicados na expressão (Equação 4):

Equação (4)

$$A = \frac{M2 - M1}{M1} \text{ x } 100$$

Onde:

A é a absorção de água, expressa em porcentagem (%).

M1 é a massa do corpo de prova seco em estufa, expressa em gramas (g).

M2 é a massa do corpo de prova saturado, expresso em gramas (g).

De acordo com a norma ABNT NBR 8491/12 a amostra ensaiada não deveria apresentar a média dos valores de absorção de água maior do que 20% nem valores individuais superiores a 22%, com idade mínima de sete dias.

Para que fosse aferida a resistência a compressão uniaxial do tijolo solo-cimento, a ABNT NBR 8492/12, sete corpos de prova, foram preparados, e foram cortados ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão. Em seguida foram sobrepostas, por suas faces maiores, as duas metades obtidas e as superfícies cortadas invertidas, ligando-as com uma camada fina de pasta de cimento Portland, pré contraída (repouso de aproximadamente 30 min), com 2 mm a 3 mm de espessura, e aguardar o endurecimento da pasta (Figura 15a).

Após o processo de cura do material utilizado, os corpos de prova foram identificados e imersos em água por 6 h. Antes do ensaio, os corpos de prova foram retirados da água e enxugados superficialmente com um pano levemente umedecido. O ensaio foi realizado com uma Prensa Hidráulica Digital 120/150 TON, modelo - I-3001-R CONTENCO. Foi aplicada uma carga uniforme e à razão de 500 N\s (50kgf/s), como ilustrado na (Figura 15b).

Figura 15 – (a) Corpos de prova com pasta de cimento; (b) Rompimento de tijolo solo-cimento em uma prensa hidráulica.

Fonte: (Autor, 2023)

3.2.8 Incorporação de resíduos de emulsão asfáltico elastomérico

Para este ensaio foi adotado a diluição do resíduo betuminoso na proporção de 5% para o volume de água destilada. Posteriormente, três corpos de prova (Figura 16), foram preparados conforme o ensaio de absorção de água presente na noma ABNT NBR 8492. E em seguida, imersos no resíduo diluído (Figura 17), estes retirados após 24 h.

Figura 16 – Tijolos padrão preparados para imersão em resíduos.

Fonte: (Autor, 2023)

Figura 17 – Tijolos padrão imersos em resíduo betuminoso.

Fonte: (Autor, 2023).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Para que fosse garantida a qualidade mínima na fabricação dos tijolos de solo cimento, foram seguidas todas as recomendações presentes nas normas ABNT 10833: 1989 (ABNT, 1989) no tocante a escolha do solo (Figura 18).

A amostra selecionada apresentou características como coloração, coesão por meio de análise manual, presença de matacões e grãos maiores e mediante compressão simples, onde ocorreu o cisalhamento da amostra sem o destorroamento, comprovando previamente a qualidade do solo para a produção de tijolos solo-cimento.

Figura 18 – Amostra de solo 1 coletada em campo.

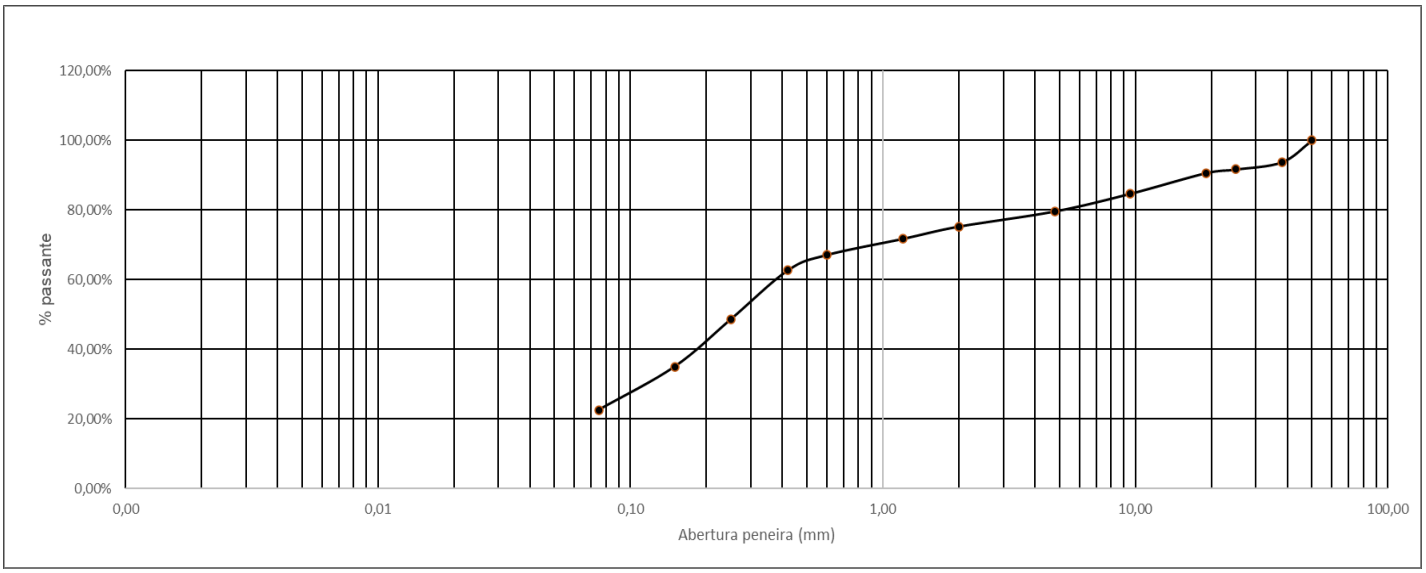
Fonte: (Autor, 2023)

A análise granulométrica para caracterização foi decisiva para a seleção de matéria-prima para a produção de tijolo solo-cimento, pois, as partículas de tamanho menor preencheram os vazios deixados pelas partículas maiores, reduzindo assim o volume de vazios, tendo obtido maior densidade e melhores propriedades mecânicas. Por meio do ensaio e peneiramento foram obtidos 53% no peneiramento fino e 47% por meio do peneiramento grosso. O percentual de solo passante na

peneira de nº 200 foi de 22% aproximadamente, em que a norma estabelece um valor dentre a variação de 10 a 50%, a fim de garantir um solo de boa qualidade granulométrica para a fabricação de tijolos de solo cimento (Figura 19).

Figura 19 – Curva granulométrica da amostra 1.

Fonte: (Autor, 2023)



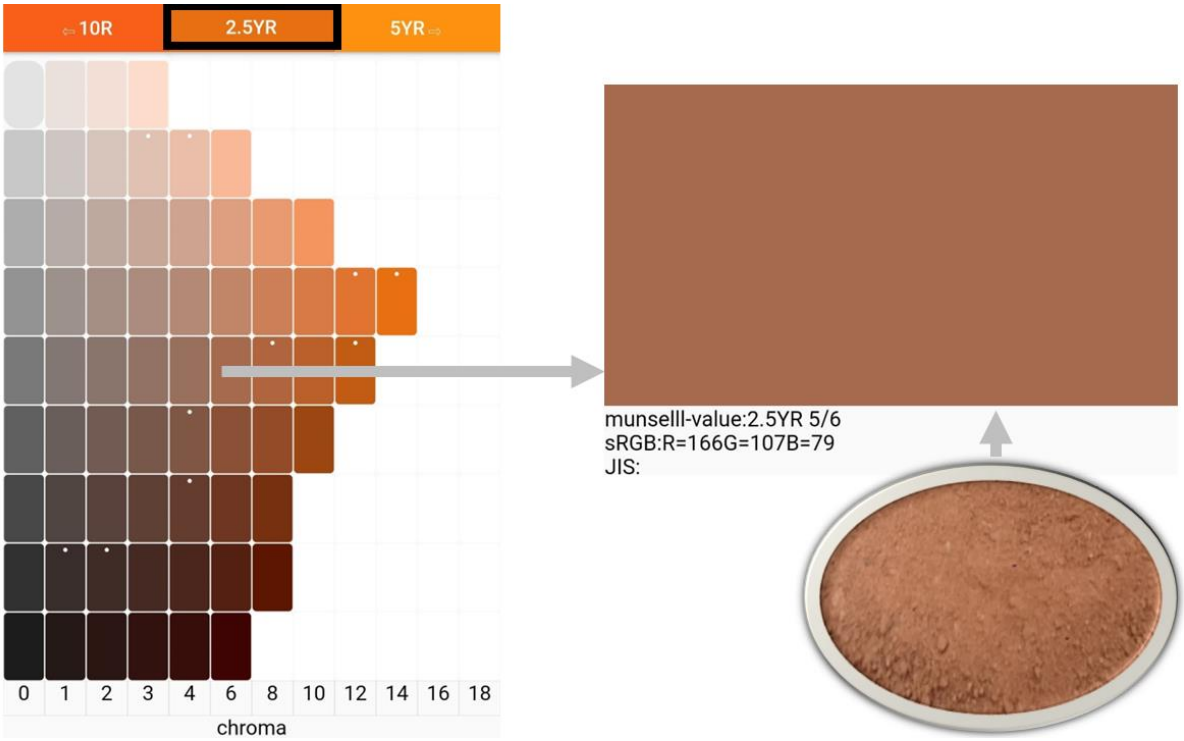
A qualidade final dos corpos de prova dependeram de outros fatores, mas que a granulometria do material foi importante. Durante as análises de solos, foi observado que quanto mais fino o solo, maior a superfície específica.

A ação do aglutinante cimentício concentrou-se no encontro das superfícies de contato das partículas do solo. O solo da amostra 1 apresentou-se com uma graduação que proporcionou condições adequadas para potencializar o efeito cimentante.

Na análise de cor, o solo apresentou o padrão 2.5YR 5/6 da carta de Munsell (Figura 20), que Ferreira (2023), trata-se de um solo franco arenoso.

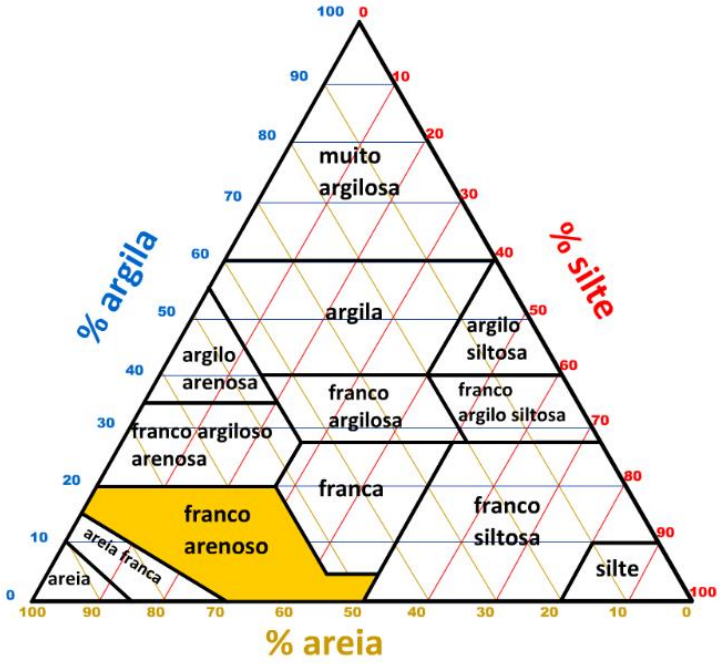
Das propriedades presentes na amostra 1 destacou-se a textura dos grãos ligeiramente ásperos e sedosos, rangido não claramente audível, em que os percentuais obtidos foram de 3% de argila, 22% de silte e 75% de areia o que caracterizou a amostra 1 também como solo franco-arenoso (Figura 21).

Figura 20 – Classificação da amostra 1 por carta de Munsell.



Fonte: Adaptação de (Munsell color chart2®, 2024).

Figura 21 – Classificação da amostra 1 por triângulo textural.



Fonte: Adaptação (QUOOS *et al*., 2011).

4.2 ÍNDICE DE PLASTICIDADE (ANÁLISE TECNOLÓGICA DO SOLO)

Os limites de Atterberg presentes na Tabela 2, foram obtidos de acordo com a ABNT 6457 e ABNT 7181, destacando a interpretação dos dados que foram confrontados com os requisitos da norma ABNT NBR 10833 para os limites de plasticidade e liquidez máximos estabelecidos e necessários para a fabricação dos tijolos de solo cimento (Tabela 3).

Tabela 2 - Limites de Atterberg do solo.

Matéria-prima	**Limite de Liquidez (%)**	**Limite de Plasticidade (%)**	**Índice de plasticidade (%)**
Solo	**22,09**	**11,96**	**10,13**

Fonte: (Autor, 2023)

Tabela 3 - Parâmetros de caracterização do solo segundo a ABNT NBR 10833.

NBR	**REQUISITO ABNT NBR 10833**	**CRITÉRIO**	**RESULTADO OBTIDO**
6459	Limite de liquidez	≤ 45%	22,09%
7180	Limite de plasticidade	≤ 18%	11,96%

Fonte: (Autor, 2023)

Com a plasticidade da amostra 1 de 11,96%, firmou-se as condições pré supostas no tocante a presença de grão finos que pudessem se suficientes para garantir a capacidade de modelagem do tijolo. Analisando o teor de umidade na amostra, foi revelado o valor de 22,09% para o limite de liquidez, sendo estes valores acima citados, aprovativos para a utilização do solo na modulação dos corpos de prova. A veracidade dos resultados foi confirmada quando foram conformados corpos de prova utilizando apenas a mistura de solo e umidade, onde o índice de plasticidade de 10,13% foi suficiente para manter a integridade do tijolo possibilitando não somente a conformação, como a retirada e mobilidade sem a fragmentação do mesmo (Figura 22).

Figura 22 – Tijolo solo-cimento conformado apenas com solo franco arenoso.

Fonte: (Autor, 2023)

4.3 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X – FRX

Os resultados desta análise evidenciaram que a amostra 1 apresentou constituintes que caracterizam como um solo franco arenoso, e isso se dar devido a sua alta quantidade de dióxido de silício, no qual é comprovado através da literatura de (CORINGA *et al*., 2014; MANFRON, 2020). Os óxidos predominantes do solo estudado são óxido de silício e alumínio correspondendo a 98,3% dos óxidos presentes. Estes óxidos estão associados a fração argilosa e ao quartzo identificados na análise mineralógica que será apresentada a seguir (Tabela 4).

Foi observado que o percentual de dióxido de silício encontrado na amostra 1 apresenta-se em quantidade 2 vezes maior que a alumina, que segundo Lima (2022), proporciona ao solo uma redução de capacidade drenante e uma baixa precipitação. O quartzo revelado pelo ensaio de fluorescência atua diretamente na formação do argilomineral caulinita (SOUSA, 2015). A classificação do solo da amostra 1 segundo Tech (2018) é de um solo franco arenoso, baseado nas concentrações de SiO_2 e Al_2O_3, que corrobora com os ensaios tecnológicos de caracterização do solo.

Tabela 4 – Concentração dos constituintes da Amostra 1 por fluorescência de raios X.

Matéria prima	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Outros**
Solo	69,401	28,044	2,555

Fonte: (Autor, 2023)

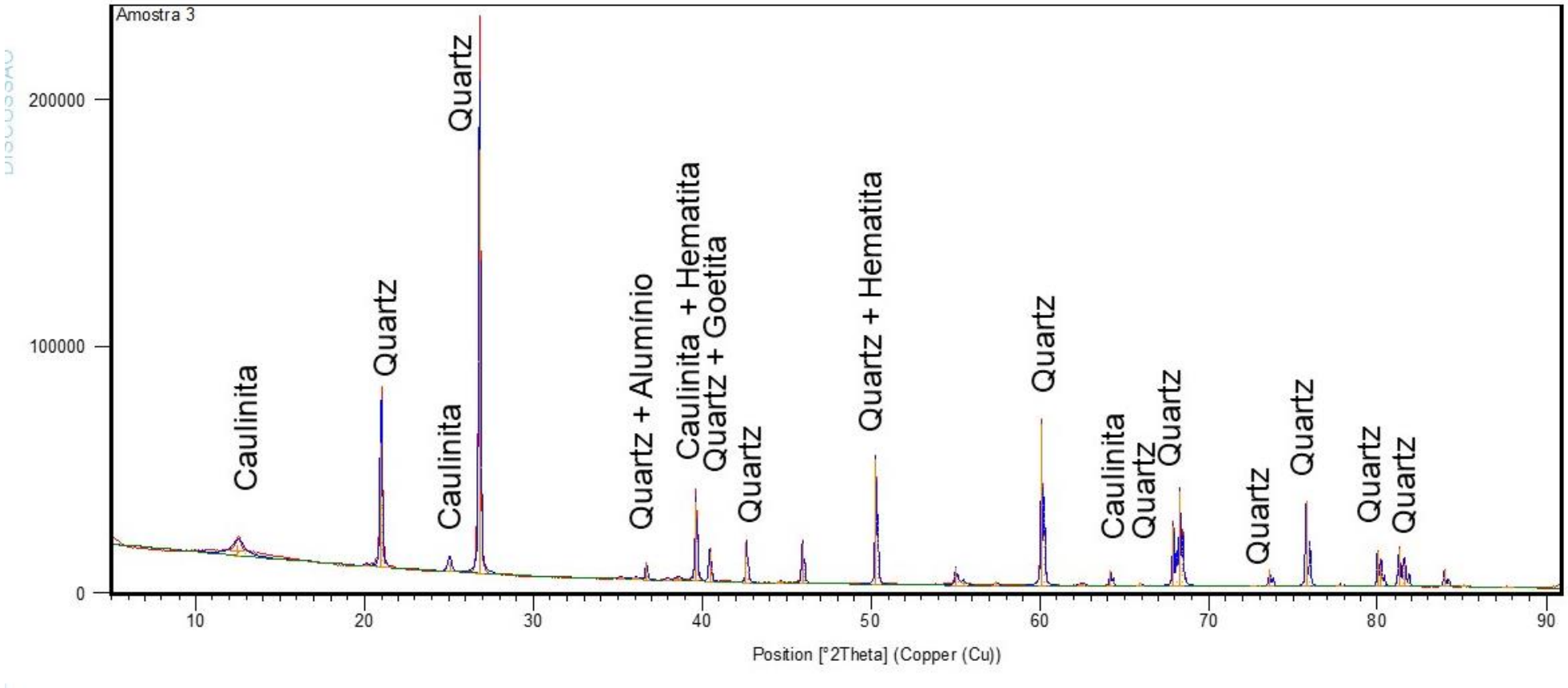
4.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X - (DRX)

Através do ensaio de difração de raio X, da amostra 1 (Figura 16), para a fabricação dos tijolos, apresenta uma alta concentração de óxido de silício, Brinatti *et al*. (2010); Oliveira e Rosa (2020), relatam que é proveniente do mineral quartzo, reforçando a confirmação obtida destinada do solo por meio da fluorescência de raios X e da análise visual e métodos simplificados de caracterização como do triângulo textural e de Munsell, onde foi caracterizado o solo como sendo franco arenoso.

Comprovando as propriedades fisicas constatadas no solo, como a plasticidade, o DRX (Figura 23), apresentou a presença de oxido de alumínio Al_2O_3, denominada como caulinita nos picos: 12, 25, 39 e 64, assim como detectado em (COBLINSKI *et al*., 2021). Em relação ao silício, o percentual a maior parte está transformado em cristais de quartzo, detectados nos picos: 21, 36, 40, 42, 50, 60, 66, 68, 73, 75, 80, 81. Os picos característicos dos argilominerais encontrados na amostra 1 reforçaram os resultados obtidos por meio da análise de fluorescência de raios X onde a caulinita juntamente com os óxidos de ferro proporcionaram a este solo, propriedades argilosas caracteristicos de latossolos Arab *et al*. (2015).

Percentuais do elemento ferro foram encontrados em forma de óxidos, destacando na hematita: picos 39 e 50 (Pereira *et al*., 2010), responsáveis pelas características do solo relacionados a coloração e possiveis interações iônicas com demais elementos presente na amostra. A coloração avermelhada da amostra 1 também tem relação com a presença do óxido de ferro (goetita) observada no pico 41, atribuídos ao processos pedogênicos sofridos pelo solo, e auxiliando na pigmentação do mesmo, como explica (MANOHARAN *et al*., 2012). O titânio foi encontrado na forma de rutilo: pico 55. As propriedades atribuídas aos solos podem ser relacionadas como uma soma dos comportamentos individuais de cada argilomineral, como resultado nas propriedades coesivas do solo.

Figura 23 – Análise de Difratometria de Raio X da Amostra 1.



Fonte: (Autor, 2023)

4.5 ANÁLISE TERMOGRAVIMETRIA – (TG)

Na investigação termogravimétrica da amostra 1 (Figura 24), procurou-se investigar inicialmente a presença de moléculas de água incorporadas que apresentou estabilidade térmica do material com suporte de quartzo e caulinita, componentes em maiores percentuais presentes no solo (REYES *et al*., 2013; PAIVA *et al*., 2016).

Uma pequena instabilidade inicial ocorreu pela reestruturação da camada octaédrica, possivelmente no grupo OH superficial. Foi adquirido a estabilidade no intervalo de 30 °C a 500 ºC sem perdas relevantes e caracterizando como desidratação da massa. Após esta faixa, ocorreu uma variação brusca de massa que se partiu de 500 °C e estendeu-se até 573,70 °C. Segundo Varga (2007), a desidroxilação da caulinita resultou na transformação para metacaulinita, que gerou distúrbios devido à ruptura de ligações instáveis. Como consequência, a ordem estrutural diminuiu em comparação com a caulinita à medida que a desidroxilação avançou. Não houve colapso da estrutura da metacaulinita, mas foi mantido uma camada estrutural. A decomposição progressiva da metacaulinita ocorreu com a perda de massa, com a transformação do metacaulim para fase amorfa até atingir 1000 °C.

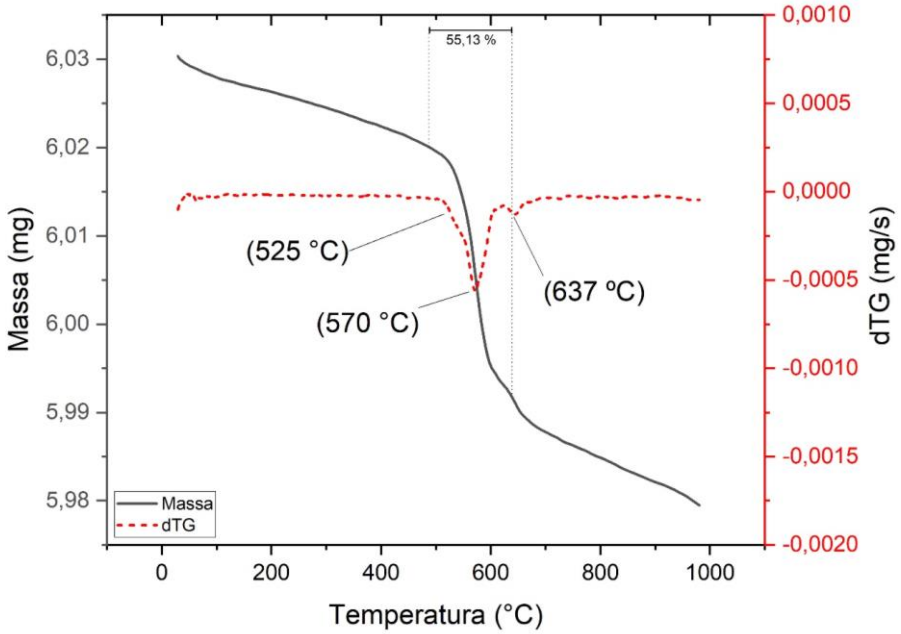
Para a avaliação da derivada termogravimétrica (DTG), foi observado apenas um grande pico endotérmico a 570 ºC, caracterizado este como uma boa definição do pico de desidroxilação e formação da metacaolinita (~550 ºC) (ALIYU *et al*., 2017).

Térmica diferencial e gravimétrica das argilas da amostra selecionada (Figura 24) observaram-se as seguintes transformações térmicas: um grande pico endotérmico com temperatura máxima em 143,9 ºC, característico da presença de água livre e da água adsorvida na superfície das partículas. Como a faixa inicial do gráfico de DTG manteve-se estável, pode-se relacionar este comportamento com a baixa presença de água na amostra, sendo este teor proporcionais à capacidade de adsorção de água da, quanto maior o conteúdo de água mais largo e profundo será este pico (WU *et al*., 2005). Outro pico endotérmico na faixa de temperaturas entre 530 a 650 ºC foi observado, relacionado à desidroxilação das argilas, onde essa temperatura depende dos íons que fazem parte da camada octaédrica da estrutura do argilomineral, em função das substituições do Al (WU *et al*., 2005). A perda de massa total foi de 55,13%.

A estrutura de a metacaulinita não entra em colapso, mas, em vez disso, retém uma camada estrutura. Uma decomposição progressiva da metacaulinita ocorre até 900 °C (PAIVA *et al*., 2016).

Comprovação de baixa ou inexistente material orgânica exibe, um padrão de comportamento intrínseco característico do argilomineral caulinítico, corroborando com a inferência obtida pela técnica de difratometria de raios X. Este solo manifesta uma nítida identificação dos picos referentes à desidroxilação e à formação da metacaulinita (~550 ºC) (CRUZ *et al*., 2012).

Figura 24 – Análise termogravimétrica da amostra selecionada.



Fonte: (Autor, 2023)

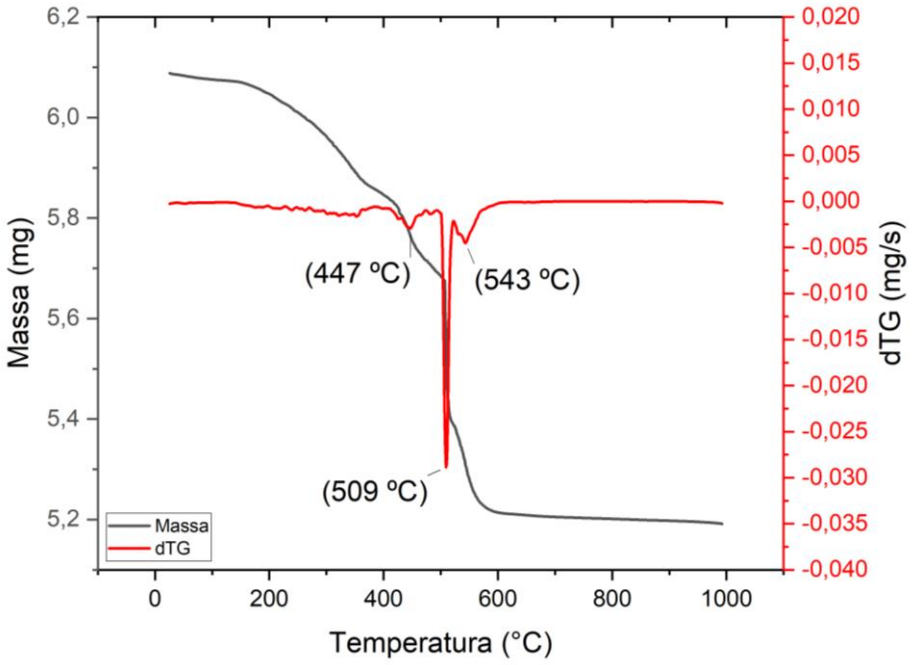
4.5.1 Análise termogravimétrica do resíduo (RR-1C)

As curvas TG na (Figura 25) mostra o comportamento do ligante elastomérico quanto a estabilidade térmica do resíduo de ligantes asfáltico. As curvas mostraram três regiões que se destacaram. A primeira faixa indicou uma perda pequena de massa, com a temperatura inicial de decomposição definida aqui como a temperatura em que a perda de massa atingiu 2%, possivelmente relativos à eliminação de alguns grupos funcionais insaturados (ELKASHEF *et al*., 2017; PEI *et al*., 2020; NIZAMUDDIN *et al*., 2020). A segunda região apresentou uma perda de

massa consistente, aumentando progressivamente, indicando a decomposição dos componentes do asfalto, que eram em maioria degradação da cadeia central de carbono. A taxa máxima de perda de massa ocorreu por volta de 500 °C. A perda de massa continuou, porém de forma decrescente, na terceira região da curva, atuando entre 509 a 600°C. Uma quarta região, iniciando por volta de 600 °C, mostrou um platô quase horizontal, indicando a ausência de mais perda de massa (LI *et al*., 2023; LIU *et al*., 2021).

O DTG mostrou uma faixa de mudança da perda de massa com a temperatura e permitiu identificar a temperatura na qual essa taxa atingiu o pico máximo. A região inicial na curva DTG, onde a taxa de perda de massa foi quase zero, correspondia à parte da curva TG em que ocorria uma perda de massa insignificante. A região de decomposição térmica demonstrou um aumento progressivo na taxa de perda de massa até atingir um máximo em 509 °C. Posteriormente, a partir dessa temperatura, a taxa de decomposição começou a diminuir até alcançar um valor próximo de zero por volta de 600 °C, indicando uma perda de massa mínima (NIZAMUDDIN *et al*., 2020; PEI *et al*., 2020).

Figura 25 - Análise termogravimétrica do resíduo de emulsão asfáltica elastomérica.



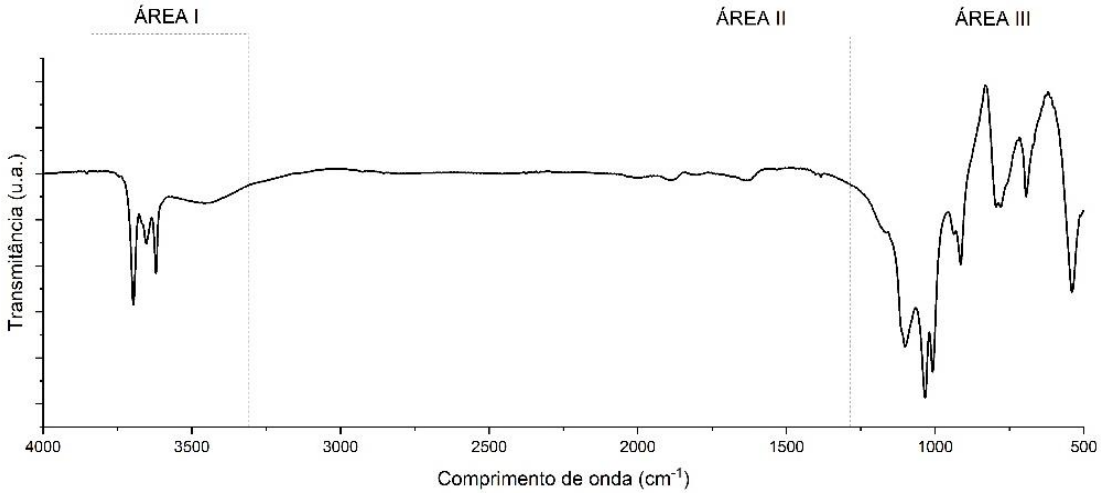
Fonte: (Autor, 2023)

4.6 ANÁLISE DA ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO – (FTIR)

Com a utilização da técnica da Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), foi possível se identificar componentes cristalinos, como caulinita, quartzo, além de tecidos inorgânicos e orgânicos não cristalinos (MANOHARAN *et al*., 2012) (Figura 26).

Por meio de comparação com resultados obtidos na literatura, foram detectados na faixa de banda baixa, a presença do quartzo em 700 cm^{-1}, sendo observado nesta faixa de frequência, a vibração em ligações entre Silício oxigênio e alumínio o que gerou a substituição do elemento silício por alumínio nos tetraedros. Ainda na faixa de banda fraca 1600 cm^{-1}, foi atribuída a variação na curva devido à água absorvida (SILVA, 2008). A amostra apresentou vibrações de estiramento do grupo hidroxila da caulinita desordenada em bandas de baixa intensidade em 3650 e 3600 cm^{-1} de acordo com Manoharan *et al*. (2012).

Figura 26 – Espectroscopia no infravermelho da Amostra 1.



Fonte: (Autor, 2023).

4.7 ANÁLISE DA CONFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Com base nos valores de liquidez e plasticidade obtidos além de, bem como a análise de granulometria do solo, foi definido como traço padrão sendo seis partes de solo para um de cimento. Realizada a pré mistura dos materiais, foi incorporado

9% de umidade obtendo-se uma consistência de solo tal que foi possível formar torrões e parti-los sem que houvesse a fragmentação do mesmo. Conforme a NBR 8491, os tijolos separados do lote foram preparados para realização dos ensaios de acordo com a NBR 8492. Durante a conformação dos corpos de prova não foram observadas dificuldades operacionais na prensagem tão como no processo de remoção do tijolo do molde, fato este que evidencia a adequada escolha do solo para a fabricação de tijolos de solo cimento compactado.

4.8 ANÁLISE DE LOTE PADRÃO

4.8.1 Análise dimensional

Aferidas as medidas de comprimento (C) altura (H) e largura (L) (Figura 27), foram obtidas como médias dos valores mostrados na (Tabela 5), que mostraram uniformidade e precisão da matriz e tornando aprovado o lote dos tijolos analisados diante das exigências em norma.

Figura 27 – Análise dimensional dos tijolos padrão.

Fonte: (Autor, 2023)

Tabela 5 – Dimensões médias dos tijolos.

LOTE	C (mm)	Desvio padrão	L (mm)	Desvio padrão	H (mm)	Desvio padrão
PADRÃO	166,39	0,19	83,43	0,11	42,69	0,8

C = comprimento; L= largura; H = altura;

Fonte: (Autor, 2023)

4.8.2 Análise de resistência à compressão

As amostras do lote padrão foram preparadas (Figura 28), e submetidas ao ensaio de compressão, onde foi obtida uma média de resistência de 2,5 Mpa (Figura 29) para 7 corpos de provas, dado o período de cura de 7 dias e representados na Tabela 6 juntamente com seu desvio padrão. A resistência obtida neste ensaio foi mais uma evidência concreta da correta escolha do solo, bem como da execução correta das etapas de preparação dos TSC.

De acordo com a norma ABNT NBR 8491/12 a amostra ensaiada não deveria apresentar a média dos valores de resistência a compressão menor do que 2,0 MPa (20 kgf/cm²), nem valor individual inferior a 1,7 MPa (17kgf/cm²), com idade mínima de sete dias.

Figura 28 - Montagem dos corpos de prova para o ensaio de resistência a compressão.

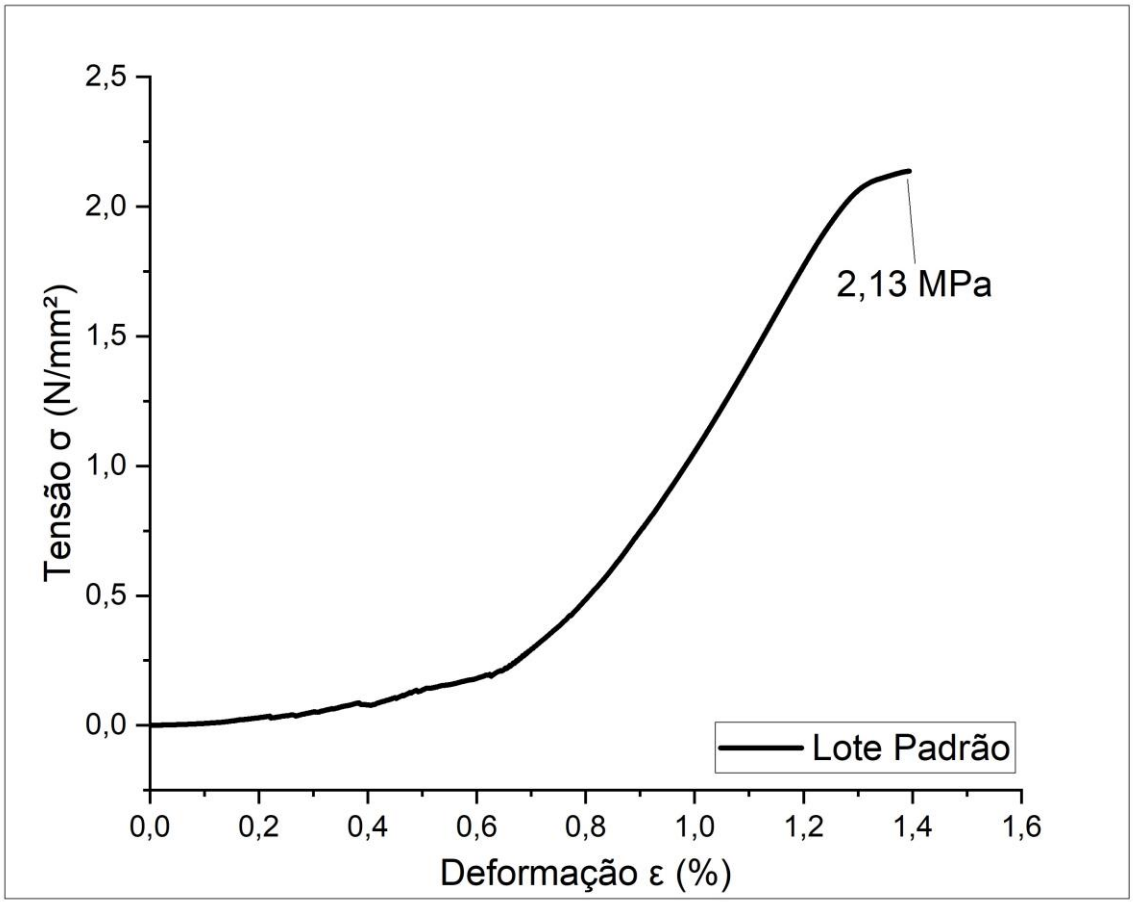
Fonte: (Autor, 2023)

Tabela 6 – Resultados do ensaio de compressão de lote padrão.

LOTE	RESISTÊNCIA Á COMPRESSÃO (Mpa)
PADRÃO	2,59 ± 0,30

Fonte: (Autor, 2023)

Figura 29 – Resistência a compressão de tijolo do lote padrão.



Fonte: (Autor, 2024)

4.8.3 Análise de absorção de água do lote padrão

Embora os resultados tenham conferido a aprovação dos TSC no tocante a resistência a compressão, a pesquisa foi voltada prioritariamente para a absorção de umidade dos corpos de prova, para a avaliação dos vazios presente na estrutura. Partidos 3 corpos (Figura 30) exigidos por norma, a Tabela 7 representa a média de umidade obtida no ensaio de umidade, ficando o valor abaixo dos 20% máximos permitidos.

Figura 30 – Verificação do teor de umidade absorvido dos tijolos padrão.

Fonte: (Autor, 2023)

Tabela 7 – Resultado de absorção de umidade dos tijolos padrão.

LOTE	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)
PADRÃO	0,15 ± 7,79

Fonte: (Autor, 2023)

A integridade dos corpos de prova após o ensaio, apresentaram resultados efetivos em relação a qualidade de conformação e degradação dos corpos de prova submersos, garantida a permeabilidade sem que houvesse a degradação destes. Este comportamento pode ter ocorrido por consequência das reações de hidratação do aglutinante, para que se tenha ocorrido nas fases inicias da cura, onde a ocorreu a reação com silicato tricálcico (C_3S) e o silicato dicálcico (C_2S), que produziram o silicato de cálcio hidratado (CSH) e o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$. Para que o TSC tenha apresentado os valores satisfatórios de estabilização quanto a absorção de água, o hidróxido de cálcio foi produzido em quantidade suficiente para ter preenchido os espaços vazios entre os grãos.

4.8.4 Análise de compressão e absorção em tijolos com resíduo elastomérico.

Foi observado que durante o preparo do resíduo para emissão dos corpos de provas, que a solução contendo resíduos de emulsão asfáltica apresentou um certo

grau de ativação química, mediante a coloração de espectro marrom, que é característica de emulsão catiônica, além do grau de adesividade presente no resíduo diluído segundo Silva e Matuti (2018).

Durante a realização deste ensaio, foi observado que houve uma aderência imediata de material betuminoso particulado que se depositou na superfície dos tijolos, destacando as regiões próxima à superfície do resíduo assim como nas regiões dos furos, como observado na (Figura 25), podendo caracterizar a presença dos glóbulos asfálticos segundo Prieto (2013), que em suspenção apresentaram-se estáveis até o contato com a superfície de aderência que no caso foram os tijolos de solo cimento.

Após o processo de evaporação da água, foi observada uma constituição de uma camada bem definida de resíduo que apresentou uniformidade definida principalmente nas áreas do tijolo com faces planas. O material uma vez depositado na superfície apresentou aderência instantânea ao solo cimento, em período até mesmo anterior ao de cura, onde foi possível manusear os corpos de prova sem afetar as superfícies de contato. Por meio de análise visual foi constatado que, mediante a perca de água para o ambiente, a camada de resíduo apresentou ancoragem mais consolidada a superfície além de proporcionar um efeito de hidro repelência na mesma (Figura 25).

Com base na adaptação de inspeção, pode-se verificar que a superfície exposta ao contato com o resíduo de emulsão asfáltica preencheu com sucesso mais de 80% da área de aplicação (LIMA, 2012).

O fenômeno de hidro repelência adquirida na superfície do tijolo foi justificada devida a interação direta do resíduo de emulsão asfáltica com a material laterítico do tijolo de solo cimento. A interação com este tipo de solo foi fundamental para o sucesso da pesquisa quanto ao desempenho na adsorção, evidenciado pelas capacidades de fixação das (macro) moléculas do resíduo e identificado pelas DNER-EM 369/97 que mostrou maior poder de conexão aos sítios adsortivos argilominerais e proporcionando características impermeabilizantes (BRAZETTI, 1998). Ainda sobre aspectos macroestruturais, a utilização de um solo franco arenoso favoreceu a adsorção do resíduo por apresentar uma baixa área superficial de preenchimento (LUNA, 2015).

Do ponto de vista micro estrutural, de acordo com Vargas (2014), a reação ocorrida da superfície do tijolo solo cimento pode ser descrita em decorrência do mecanismo de ruptura dos resíduos betuminosos presente na solução de água e

emulsão asfálticas. Em que Segundo Torres (2018), a água atuou como agente diluente de forma que alcançou uma diluição estável e, por sua vez, manteve a interação uniforme de água/resíduo asfáltico. Isto devido ao resíduo emulsionante ser composto por cadeias de hidrocarbonetos solúveis em meios orgânicos, como asfalto e outras partes carregadas eletricamente solúveis em meio aquoso que conferiu as propriedades principais para a emulsão, fornecendo estabilidade.

Em uma análise mais específica, ocorreu um mecanismo de ação do surfactante, onde ocorreu a repulsão entre os glóbulos asfálticos dispersos e permitiu o controle dos fenômenos de quebra de emulsão, que foi absorvido na superfície das gotas, com a parte lipofílica no asfalto e a parte do grupo polar na fase aquosa. Segundo Pinheiro (2023) durante esta fase inicial de estabilização, os íons dissociados permaneceram na fase aquosa próxima a gota, que resultou em gotas com carga superficial. Ocorrida a aproximação de duas gotas, foi produzida uma força de repulsão eletrostática que as mantiveram a uma certa distância. Paralelo a este mecanismo, conforme houve a aproximação das duas gotas, o filme entre elas foi drenado e com isto, permitindo que o fluido arraste os íons, o que gerou um desequilíbrio na eletroneutralidade do sistema.

De acordo com Fontes *et al*. (2001) e uma eletro viscosidade foi criada, devido a um intenso campo elétrico que retardou a coalescência das gotículas e contribuiu à para a estabilidade da emulsão, ocasionando um efeito repulsivo perante à drenagem da partícula, definindo este processo.

Para a interação inicial com a superfície do tijolo solo cimento, que, devido a sua natureza laterítica, possuía inicialmente uma carga negativa, oriunda da interação química dos argilominerais, principalmente pela presença de óxidos de ferro e alumínio, compostos como argilominerais como a caulinita e a goethita, que possuem grupos funcionais na estrutura molecular que puderam ser ionizados e resultaram em cargas elétricas negativas na superfície das partículas do tijolo (SUAREZ, 2008; LEITE *et al*., 2005, SANTOS, 2022).

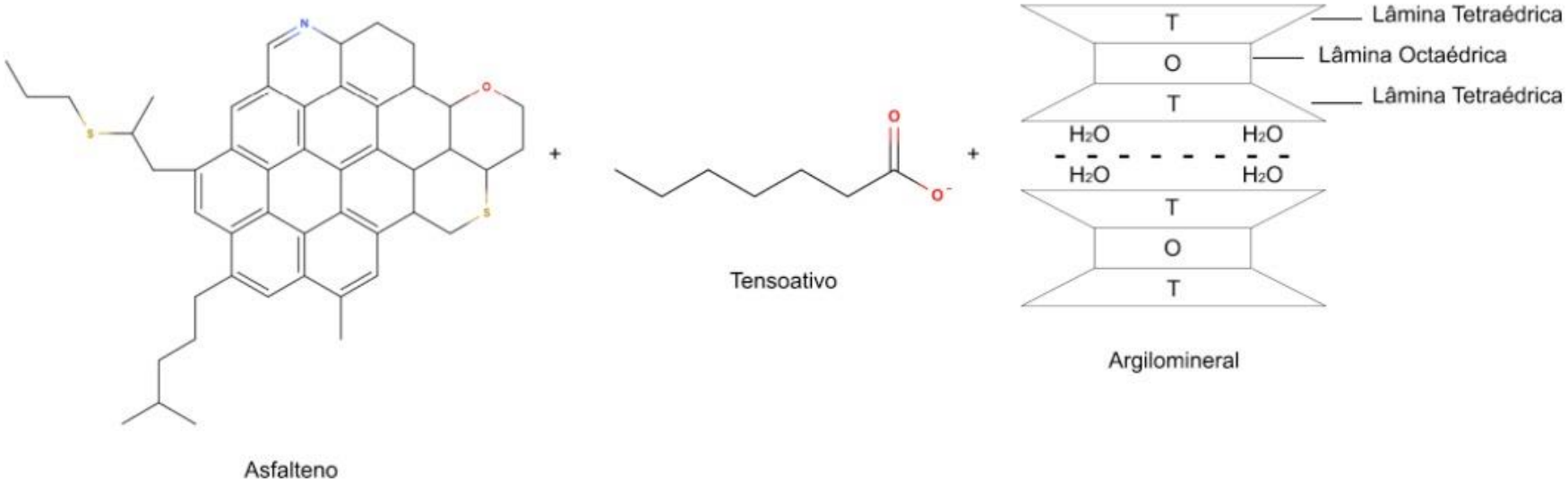
De acordo com Basso (2003) e Mangoni *et al*. (2015), também ocorreram interações iônicas, onde a presença de íons na solução do solo alterou a carga na superfície, porém, com menos impacto, diante do baixo teor de argila presente no solo, que justifica a baixa capacidade de troca catiônica e aniônica.

Devido ao silício ter sido um elemento encontrado em abundância no solo selecionado, possibilitou a adsorção de íons, quando estando em forma de cristais

de quartzo, entrou em contato com água ou íons dissolvidos no solo, permitindo a adsorção de íons na superfície do mineral. Dependendo da natureza desses íons, a superfície do quartzo pode adquirir uma carga líquida, mesmo com ausência de carga elétrica intrínseca na sua estrutura (FONTES *et al*., 2001). Além destes fatos, o silício pode ter interagido indiretamente na superfície do solo por meio dos argilominerais e ter influenciado na carga líquida (BAIA, 2019). No entanto, a geração de cargas elétricas negativas na superfície do solo teve maior relevância por meio da interação de outros elementos encontrados em consideráveis proporções foram o ferro e o alumínio, que são mais conhecidos cientificamente por influenciar a carga do solo (SILVA; SANTANA, 2013; AGUIAR; NOVAES, 2002). Portanto, a caulinita ser o argilomineral que obteve maiores interações com os cristais de quartzo.

Com a exposição do tijolo solo cimento ao resíduo betuminoso em temperatura e pressão ambiente, o processo de ruptura ocorreu pelo contato com um material agregado que tinha afinidade com o tipo de emulsão, que gerou a ruptura (LIMA; NETO, 2019). O mecanismo de quebra da emulsão asfáltica por esse processo é indicado na (Figura 31).

Figura 31 – Hidro repelência obtida após contato com o resíduo betuminoso.



Fonte: (Autor, 2023)

Segundo na presença do material granular, o emulsificante migrava da interface água/asfalto em direção à interface água/sólido, sendo absorvido no sólido, que resultou na diminuição da quantidade de agente emulsionante na interface água/asfalto que em consequência produziu uma diminuição da repulsão eletrostática entre as gotículas dispersas, iniciando a coalescência das gotículas e resultando na ruptura (PEREIRA, 2018). As moléculas do emulsificante cobriram o sólido com sua parte polar, deixando a parte alquila livre, resultando em uma superfície hidrofóbica. A hidrofobização do sólido melhorou a aderência das moléculas de betume à camada granular (Figura 32).

Figura 32 – Efeitos do resíduo incorporado em tijolos padrão: a) Aspecto visual; b) hidrorepelência por incorporação de resíduos de emulsão asfáltica elastomérica nos tijolos.

Fonte: (Autor, 2023)

Realizado a incorporação dos resíduos, três tijolos foram utilizados no ensaio de absorção de água, em que foi obtido o valor de 12,78% de umidade conforme Tabela 8. Quando comparado ao ensaio de absorção dos tijolos padrão, foi observado uma redução de 2% no teor de umidade obsorvido pelos tijolos quando submetidos a incorporação de resíduo de emulsão asfáltica elastomérica, comprovando a eficácia diante da utilização deste resíduo para obtenção de caracteristicas hidrofugantes nos tijolos de solo cimento.

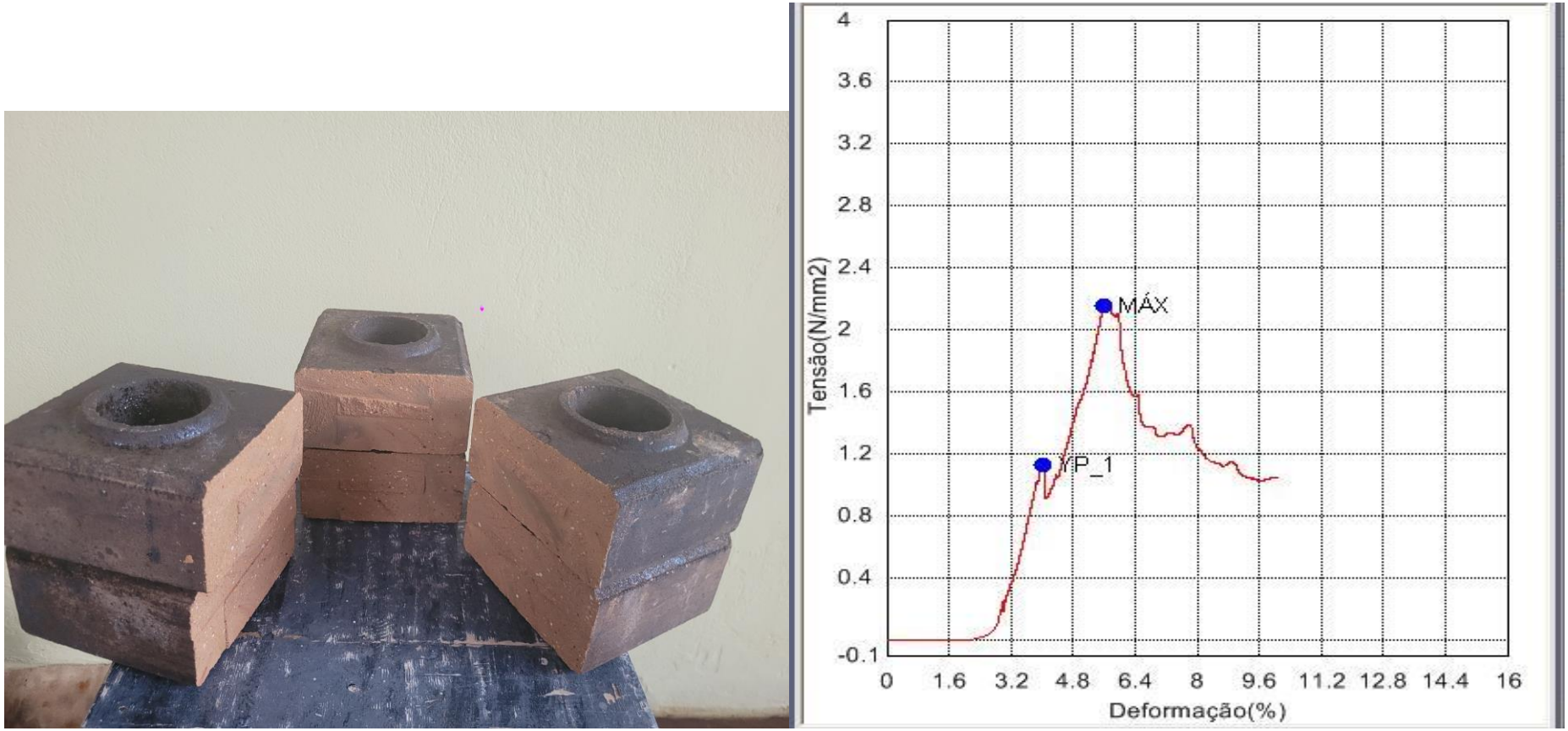
Tabela 8 – Resultado de absorção de umidade dos tijolos com resíduo. asfáltico.

LOTE	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)		
PADRÃO	0,13	±	48,06

Fonte: (Autor, 2024)

Já com relação a resistência a compressão, mediante o rompimento dos três corpos de provas com incorporação do resíduo Figura 33, foram obtidos valores na faixa de 2Mpa conforme Tabela 9, demonstrando que embora alguns valores foram menores em relação aos resultados obtidos no lote padrão, o valor ainda permanece válido em aspecto construtivo, de acordo com a ABNT NBR 8491/12, o que torna o tijolo de solo cimento com resíduo de emulsão asfáltica elastomérica, apto para usos não estruturais.

Figura 33 – Ensaio de compressão de tijolo após incorporação de resíduo: a) Corpos de prova preparados para ensaio de compressão. b) Gráfico tensão deformação de tijolo com resíduo incorporado.



Fonte: (Autor, 2024)

Tabela 9 – Resultados do ensaio de compressão de tijolos com resíduo de emulsão asfáltica.

LOTE	RESISTÊNCIA Á COMPRESSÃO (Mpa)		
PADRÃO	2,01	±	0,11

Fonte: (Autor, 2024).

5 CONCLUSÕES

Mediante os fatos expostos a esta pesquisa pode-se destacar a importância do material base na produção de tijolos solo-cimento, enfatizando ainda a possibilidade de proporcionar comportamento hidro-repelente do mesmo. A análise granulométrica foi crucial para selecionar a matéria-prima adequada, permitindo obter uma granulometria contínua para maximizar a densidade e as propriedades mecânicas do tijolo, onde os resultados indicaram que a amostra 1 foi a mais indicada para a fabricação dos tijolos, devido às suas características físicas e químicas. Perante o uso da técnica de fluorescência de raios-X, a presença predominante de dióxido de silício e alumínio, juntamente com outros elementos como quartzo, caulinita e óxidos de ferro, que proporcionaram propriedades coesivas e determinou a classificação do solo como franco arenoso.

Foram ainda confirmadas as propriedades observadas no solo selecionado de acordo com as análises termogravimétricas e de difração de raios-X, que confirmaram a presença de componentes como quartzo

, caulinita e a transformação da caulinita em metacaulinita, evidenciando as mudanças estruturais durante o aquecimento do solo.

Para a formulação do solo-cimento foi determinada com base na plasticidade, granulometria e teor de umidade, alcançando uma mistura de seis partes de solo para uma parte de cimento, com 9% de umidade, mantendo a integridade do tijolo durante a conformação e permitindo sua remoção sem fragmentação. Os ensaios nos tijolos produzidos indicaram conformidade com os requisitos de resistência à compressão e absorção de água. A incorporação do resíduo de emulsão asfáltica revelou interações complexas, conferindo propriedades de impermeabilização e

aderência à superfície do tijolo.

Em relação as propriedades de resistência, foi observado uma baixa redução a resistência a tensões cisalhantes nos corpos de provas com resíduo asfáltico elastomérico, podendo este resultado não está relacionado diretamente com a incorporação do resíduo, mas com o processo de conformação dos corpos de prova, uma vez que foi realização de forma manual, o que possibilita maiores possibilidade de pontos de fragilidades na estrutura dos tijolos.

A análise microestrutural destacou os mecanismos de interações iônicas entre os elementos presentes no solo, explicando como a carga elétrica negativa na superfície das partículas do tijolo favoreceu a adsorção de íons e influenciou na estabilidade da emulsão asfáltica. Os resultados confirmam a adequação da amostra 3 na produção de tijolos solo-cimento e demonstram como a interação entre os componentes do solo, a formulação e a adição de resíduos influenciam nas propriedades finais do produto.

Para estudos futuros poderão ser realizados como intuito de averiguar o comportamento das caraterísticas de hidro repelência adquirida pelo tijolo de solo cimento, mediante a incorporação de outros produtos derivados do petróleo, como óleos lubrificantes contaminados, visando a aquisição de maiores propriedades de hidrorepelência para os tijolos de solo cimento e ampliando seu emprego na construção civil.

REFERÊNCIAS

ABEDA (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO). Manual Básico de Emulsões Asfálticas: soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT NBR 16697:2019 - Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia Básico de utilização de CP. 7.ed. São Paulo, 28 p., 2002 (BT-106). Disponível em www.abcp.org.br. Acessado em fevereiro de 2024.

AGUIAR, M.R.M.P.; NOVAES, A.C. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Química Nova**, v. 25, p. 1145-1154, 2002

ALIYU, A.; ABDULKAREEM, A.S.; KOVO, A.S.; ABUBAKRE, O.K.; TIJANI, J.O.; KARIIM, I. Synthesize multi-walled carbon nanotubes via catalytic chemical vapour deposition method on Fe-Ni bimetallic catalyst supported on kaolin. **Carbon Letters**, v. 21, p. 33-50, 2017.

ARAB, P.B.; ARAÚJO, T.P.; PEJON, O.J. Identification of clay minerals in mixtures subjected to differential thermal and thermogravimetry analyses and methylene blue adsorption tests. **Applied Clay Science**, v. 114, p. 133-140, 2015.

ARAÚJO, M.H.M.; JUNIOR, R.R.S.; SANTOS, L.C. Estudo comparativo entre os métodos do tijolo ecológico e do bloco cerâmico na construção sustentável de residências populares no brasil. **Revista da FAESF**, v. 5, p. 10-21. 2021a.

ARAÚJO, P.H.O.; SABOIA, A.V.; ALVES, E.M. Use of soil foundations**. Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, p. 105455-105472, 2021b.

ARULRAJAH, A.; YAGHOUBI, M.; DISFANI, M.M.; HORPIBULSUK, S.; BO, M. W.; LEONG, M. Evaluation of fly ash- and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing. **Soils and Foundations**, v. 58, p. 1358–1370, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Solo-cimento na habitação popular. São Paulo. 14 p. 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10834**: bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica – Procedimento, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo-Análise

Granulométrica, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023**: Solo-cimento – Ensaio de compactação – Método de ensaio, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Método de ensaio, São Paulo, 2016. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo-Determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491**: Tijolo maciço de solo-cimento, Rio de Janeiro, 1994.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual - Procedimento. Rio de Janeiro, 3 p. 2012.

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

BARBOSA, A.M.D.S.; FARIA, R.T.; SARAN, L.M.; SANTOS, G.O.; DANTAS, G.F.; COELHO, A.P. Impact of treated sewage effluent on soil fertility, salinization, and heavy metal content. **Bragantia**, v. 81, p. e0222, 2022.

BASSO, G.J.B. Transporte e retenção de K^{+}, Cu^{2+} e Cl^{-} em uma mistura compactada de solos lateríticos para uso em barreiras selantes: Procedimentos de homogeneização da mistura e adaptações em equipamentos de percolação em colunas. São Paulo. 2003. 215 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). São Carlos, São Paulo, Brasil.

BIRCH, J. Diagnosis of defective colour vision. Oxford: Butterworth Heinmann, p. 56, 2001.

BLUM, W.E.H.; SCHAD, P. NORTCLIFF, S. Essentials of soil science. Stuttgart: Borntraeger Science Publishers, p.75, 2018.

BRAINARD, D. Color appearance and color difference specifi cation. In S. Shevell (Ed.), The science of color Oxford: Optical Society of America, p. 191-216, 2003.

BRANCO, A. P. G. et al. Mineralogia e Geoquímica de Solos. Viçosa: UFV, 2008.

BRANCO, A. P. G.; PEDROTTI, L.C. Ciência e tecnologia de argilas. Rio de Janeiro: ABRAF, p. 34, 2004.

BRAZETTI, R. Considerações sobre a influência de distintos aditivos orgânicos nas características micromorfológicas, mineralógicas, físicas, mecânicas e hidráulicas de um solo laterítico. São Paulo. 201 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química).

BRINATTI, A.M.; MASCARENHAS, Y.P.; PEREIRA, V.P.; DE MOYA PARTITI, C.S.; MACEDO, A. Mineralogical characterization of a highly-weathered soil by the Rietveld Method. **Scientia Agricola,** v. 67, p. 454-464, 2010.

CAMPOS, Al.; NASCIMENTO JUNIOR, J.B.; BRITO, L.T. Comportamento estrutural de tijolos de solo-cimento utilizando diferentes fontes de água e métodos de cura. **Interações (campo Grande)**, v. 20, p. 283-296, 2019.

CEBRACE - Centro Brasileiro de Construções e Equipamentos Escolares. Solocimento na construção de escolas – SC01. 2ª ed. Rio de Janeiro, MEC/CEBRACE, 39 p. il. (sistemas construtivos 2), 1981.

CHAER, G.M.; MENDES, I.C.; DANTAS, O.D.; MALAQUIAS, J.V.; JUNIOR, F.B. R.; OLIVEIRA, M.I.L. Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β-glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, v. 183, p.104742, 2023.

CHIAPINI, M.; SCHELLEKENS, J.; OLIVEIRA JUNIOR, J.C.; CALEGARI, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Pedogenesis in very deep autochthonous Ferralsols of the Paraná Igneous Province (Brazil). **Catena**, v. 224, p. 106981, 2023.

COBLINSKI, J.A.; INDA, A.V.; DEMATTÊ, J.A.M.; DOTTO, A.C.; GHOLIZADEH, A.; GIASSON, É. Identification of minerals in subtropical soils with different textural classes by VIS–NIR–SWIR reflectance spectroscopy. **Catena**, v. 203, p. 105334, 2021.

COCHRANE, S. The Munsell Color System: a scientific compromise from the world of art. **Studies In History And Philosophy Of Science Part A**, v. 47, p. 26-41, 2014.

COLLIS, A.G.; MOON, C.P. The pore structure and surface area of clays. **Soil Science**, v. 106, p. 283-290, 1968.

CORINGA, E.A.O.; COUTO, E.G.; TORRADO, P.V. Geoquímica de solos do Pantanal Norte, Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1784-1793, 2014.

COSTA, J.B. Caracterização e Constituição do Solo. Fundação Calouste Gulbenkian, p. 22, 1999.

CRUZ, R.T.; BERGMANN, C.P.; BRAGANÇA, S.R. Technical characterization of plastic clay from Pantano Grande, RS, Brazil. **Cerâmica, v.** 58, p. 66-70, 2012.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 2nd ed. Harlow: Longman Scientific & Technical, p. 32, 1992.

DING, H.; HAN, Z.; LI, Y.; XIE, W.; FU, B.; LI, C.; ZHAO, L. Particle breakage and its mechanical response in granular soils: a review and prospect. **Construction And Building Materials**, v. 409, p. 133948, 2023.

DIXON, J.B.; WEED, S.B. Minerals in Soil Environments. 2nd ed. Madison: SSSA, p. 24, 1989.

DNER-ME 369/97 – Material betuminoso – emulsão asfáltica catiônica, material betuminoso, 1997.

DONAGEMMA, G.K.; VIANA, J.H.M.; DE ALMEIDA, B.G.; RUIZ, H.A.; KLEIN, V.A.; DECHEN, S.C.F.; FERNANDES, R.B.A. Manual de métodos de análise de solo/ Paulo César Teixeira, editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, p. 96, 2017.

ELHASSAN, A.A.M.; MNZOOL, M.; SMAOUI, H.; JENDOUBI, A.; ELNAIM, B.M.E.; ALOTAIBI, M.F. Effect of clay mineral content on soil strength parameters. **Alexandria Engineering Journal**, v. 63, p. 475-485, 2023.

ELKASHEF, M.; WILLIAMS, R.C.; COCHRAN, E. Thermal stability and evolved gas analysis of rejuvenated reclaimed asphalt pavement (RAP) bitumen using thermogravimetric analysis–Fourier transform infrared (TG–FTIR). **Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry**, v. 131, p. 865-871, 2017.

ELL, S.M.; DA SILVA, A.M.; TSUCHIYA, L.H. Análise granulométrica do horizonte superficial e horizonte subsuperficial do solo de Sorocaba-SP: subsídios para o planejamento geoambiental. **20º Congresso Nacional de Meio ambiente**, p. 1-11, 2023.

FERREIRA, B.A. Efeito da temperatura nas propriedades dos solos: estudo laboratorial. Dissertação de Mestrado Engenharia em Geotécnica e Geoambiente. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Geotécnica, p. 37, 2023.

FERNANDES, L. F..; SOUZA, B.M.M.; FREITAS NETO, O.; FRANÇA, F.A.N.; SANTOS JÚNIOR, O.F. Sandy soil stabilization with asphalt emulsion for paving purposes. **Research, Society and Development**, v. 11, p. e0711124274, 2022.

FONTES, M.P.F.; CAMARGO, O.A.; SPOSITO, G. Electrochemistry of colloidal particles and its relationship with the mineralogy of highly weathered soils. **Scientia Agricola**, v. 58, p. 627-646, 2001.

FOSTER, S.; SCHULTZ, B.; MCCUIN, G.; NEIBLING, H.; SHWMAKER, G. Soil Properties, Part 1 of 3: Physical Characteristics. University of Nevada, Reno Extension, 2013. Disponível em: https://extension.unr.edu/publication.aspx?PubID=2161.

FUNTAC – Fundação de Tecnologia do Estado do Acre. Departamento técnico e de produção. Cartilha para a produção de tijolo solo-cimento. Rio Branco.

Disponível em:< http://201.67.42.66:8051/web/apps/upload/arq_1162996746.pdf>.

GIRARDI, R. Estudo da variabilidade do cimento portland que abasteceu o mercado do Rio Grande do Sul no período de 1992 a 2012. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2014.

GRIM, R.E. Clay Mineralogy. McGraw-Hill Book Co. 2ª ed. New York (Geological Science Series), 1968, 596 p.

GUIMARÃES, T.L.B. Determinação da cor do solo pela Carta de Munsell e por colorimetria. Monografia de Engenharia Agrônoma, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília-UnB, Brasil, p. 30, 2016.

HURLBUT, C. S.; KLEIN, C. Manual of Mineralogy. 20th ed. New York: John Wiley & Sons, p. 45, 1985.

INDOW, T. Psychophysical scaling: Scientifi c and practical applications. In R. D. Luce, M. D. D'Zmura, D. Hoffman, G. J. Iverson & A. K. Romney (Eds.), Geometric representations of perceptual phenomena Mahwah, NJ: Erlbaum, p. 1-34, 1995.

JOHNSTON, D. C. The Cement Industry: A History. London: The Cement Industry Federation, p.34, 1978.

JUNIOR, R.L. Análise mineralógica das argilas refratárias da Bacia Alto Tietê – SP. São Paulo. 2023. 8 p. Dissertação (Mestrado em Ciências: Mineralogia e Petrologia), São Paulo, Brasil.

KER, J.C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. Geonomos, 5, p.17-40, 1998.

KHELIFA, R., et al. Cement Production Technology: A Review. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 14, p. 1-17, 2020.

LEITE, F.L.; ZEIMATH, E.C.; HERMANN JR, P.S.P. Análise de Minerais do Solo por Espectroscopia de Força Atômica. Comunicado Técnico. ISSN 1517-4786, São Carlos, SP, 2005.

LIMA, C.K.M. Obtenção de emulsões asfálticas modificadas utilizando resíduos industriais. Natal. 2012. 56 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

LIMA, F.C.; NETO, S.A.D. Study of the Compaction Mechanism in Mixtures of Sandy Soil and High Asphalt Emulsion Contents. **Sociedade Portuguesa de Geotecnia,** v. 125, p. 61-80, 2019.

LIMA, R.H. Caracterização de perfis de regolito e formação de carbonatos em saprolitos derivados de gnaisse no semiárido de Pernambuco. Recife. 2022. 32 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil.

LIU, Q.; WANG, C.; ZHANG, Z.; DU, C.; LIU, P.; OESER, M. Influence of preparation methods on the performance of cold-mixed epoxy bitumen. **Materials and Structures**, v. 54, p. 74, 2021.

LI, Z.; WANG, H.; WAN, P.; LIU, Q.; XU, S.; JIANG, J.; FAN, L.; TU, L. Healing Evaluation of Asphalt Mixtures with Polymer Capsules Containing Rejuvenator under Different Water Solutions. **Sustainability**, v. 15, p. 15258, 2023.

LI, Y.; EYLEY, S.; THIELEMANS, W.; YUAN, Q.; LI, J. Valorization of deep soil mixing residue in cement-based materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 187, p. 106597, 2022.

LITTLE, D.N.; ALLEN, D.H.; BHASIN, A. Asphalt mixtures. In: Modeling and design of flexible pavements and materials. Springer, **Berlin**, p. 261–281, 2018.

LIU, B., KONG, L., SUN, Z., ZHOU, Z. Undrained dynamic response of naturally high-strength sensitive clay to bidirectional cyclic loadings under the plane strain condition. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 163, p. 107517, 2022.

LUNA, S. Remediação de solo contaminado com petróleo utilizando extrato vegetal de uma espécie da família das araceae. Salvador. 2015. 45 p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente), Bahia, Brasil.

MANFRON, S. Nanorremediação em diferentes solos contaminados com pentaclorofenol (PCP). Passo fundo. 2020. 28 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil.

MANGONI, A.P.; DIAS, P.M.; CONSTANTINO, V.R.L. A versatilidade das argilas e as propriedades dos sítios superficiais de interação. **Eclética Química**, v. 40, p. 192-203, 2015.

MANOHARAN, C.; SUTHARSAN, P.; DHANAPANDIAN, S.; VENKATACHALAPATHY, R. Characteristics of some clay materials from Tamilnadu, India, and their possible ceramic uses. **Cerâmica**, v. 58, p. 412-418, 2012.

MAPBIOMAS. "Annual mapping of soil organic carbon stock in Brazil 1985-2021 (beta collection). Algorithm theoretical basis document and results", p. 22, 2023. https://doi.org/10.58053/MapBiomas/3KXXVV, MapBiomas Data.

MARQUES, F.V. Matéria orgânica de latossolos com horizonte a húmico. Tese de Doutorado em Ciências. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Área de concentração: Solos e nutrição de química, p. 17, 2009.

MARTINS NETO, F.F. Ciência do solo: classificação / Francisco Ferreira Martins Neto, Carla Samara dos Santos Ferreira, Léo Adriano Chig. – Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., p. 51, 2019.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. Apostila de estabilização de solos. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Applications. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

METZKER, S.L.O.; SABINO, T.P.F.; MENDES, J.F.; RIBEIRO, A.G.C., MENDES, R.F. Soil-Cement Bricks Development Using Polymeric Waste. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 14, p. 21034-21048, 2022.

MORENO-MAROTO, J.M.; ALONSO-AZCÁRATE, J. What is clay? A new definition of "clay" based on plasticity and its impact on the most widespread soil classification systems. **Applied Clay Science**, v. 161, p. 57-63, 2018.

MURAD, E. Ciência do Solo. 3. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, p. 23, 2009.

MUNSELL SOIL COLOR COMPANY, Munsell soil color chats, Munsell color, Macbeth Division of Kollmorgen Corporation, Baltimore, Maryland, USA. 1950, revised 1975.

MUSTAFA, Y.M.H.; AL-AMOUDI, O.S.B.; AHMAD, S.; MASLEHUDDIN, M.; AL-MALACK, M.H. Utilization of Portland cement with limestone powder and cement kiln dust for stabilization/solidification of oil-contaminated marl soil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 3, p. 3196-3216, 2021.

NEMES, A. Encyclopedia of soils in the environment. 2nd edition, Volume 5, 2023. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780123485304/encyclopedia-of-soils-in-the-environment>.

NEVILLE, A. M. Properties of Concrete. 5th ed. Harlow: Pearson, 2011.

NIZAMUDDIN, S.; JAMAL, M.; GRAVINA, R.; GIUSTOZZI, F. Recycled plastic as bitumen modifier: the role of recycled linear low-density polyethylene in the modification of physical, chemical and rheological properties of bitumen. **Journal Of Cleaner Production**, v. 266, p. 121988, 2020.

OLIVEIRA, P.J.V.; ROSA, J.A.O. Confined and unconfined behavior of a silty sand improved by the enzymatic biocementation method. **Transportation Geotechnics**, v. 24, p. 100400, 2020.

PAIVA, S.C.; LIMA, M.A.A.; FERREIRA, M.G.V.X.; FERREIRA, S.R.M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, p. 437-449, 2016.

PEI, X.; FAN, W.; LIU, Y.; QIAN, C.; WANG, Y.; JIANG, Y.; CHEN, S.; WANG, Z.; HAN, L. The effect of oil sands de-oiled asphalt on rheological properties, compatibility and stability of asphalt binder. **Construction And Building**

Materials, v. 263, p. 120594, 2020.

PEREIRA, C.G.F. Avaliação do comportamento hidráulico e da resistência ao cisalhamento de misturas entre solo arenoso e elevados teores de emulsão asfáltica para aplicações em barragens. 2018. 137 p. Monografia (Dissertação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.
PEREIRA, M.G.; DOS ANJOS, L.H.C.; JUNIOR, C.R.P.; PINTO, L.A.S.R.; DA SILVA NETO, E.C.; FONTANA, A. Formação e caracterização de solos. **Ciência do Solo 1**, p. 1-20, 2019.

PEREIRA, T.T.C.; KER, J.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; ALMEIDA, C.C. Gênese de latossolos e cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo Bambuí - Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1283-1295, 2010.

PINEIRO, C.S. Estabilização de um solo arenoso fino com emulsão asfáltica visando futura utilização em estradas não-pavimentadas. 2023. 56 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil.

PORTA CASANELLAS, J.; LÓPEZ-ACEVEDO REGUERÍN, M.; ROQUERO DE LABURU, C. Edafología: para la agricultura y el medio ambiente, p. 830, 2003.

PRIETO, C.P.L. Estado de la práctica de las mezclas asfálticas en frío para capas estructurales usando materiales nuevos. Universidad de Los Andes, Colombia, 2013.

QUOOS, J.H.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; CATEN, A.T. Gerador de Triângulo Textural, p. 20, 2011.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Propriedades físicas do solo. Departamento de Solos, UFSM. p. 1–18, 2006.

REYES, C.A.R.; WILLIAMS, C.; ALARCÓN, O.M.C. Nucleation and growth process of sodalite and cancrinite from kaolinite-rich clay under low-temperature hydrothermal conditions. **Materials Research**, v. 16, p. 424-438, 2013.

RODRIGUES, L. A. Argilas: propriedades, caracterização e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, p. 53, 2008.

SANDRONI, S.S.; CONSOLI, N.C. Sobre a prática da engenharia geotécnica com dois solos difíceis: os extremamente moles e os expansivos. COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Gramado, Brasil, 2010.

SANTOS, G.F. Estudo da viabilidade técnica de emprego de cimento e emulsão asfáltica para estabilização de bases granulares. Santa Maria. 2022. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, p. 353, 2013.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. Sistema brasileiro de classificação de solos. [s.l: s.n.], 5. ed. rev. e ampl, p. 24, 2018.

SANTOS, S.H.T. Análise do comportamento de misturas de solos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e cinzas de casca de arroz. Rio de Janeiro. 2015. 17 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.

SKEMPTON, A.W. The colloidal "activity" of clays. Soil Science, v. 75, p. 1-15, 1953.

SILVA, F.J.R.; MATUTI, B.B. Study of waterproofing of pathologies using betuminous materials on mansories. **Revista Científica Semana Acadêmica**, v. 1, p. 1-26, 2018.

SILVA, M.S.; SANTANA, G.P. Caulinita: estrutura cristalina técnicas físicas de estudo e adsorção. **Scientia Amazonia**, v. 2, p. 54-70, 2013

SILVA, S.A.B. Estudos para a utilização dos argilominerais das jazidas de gipsita do Araripe PE para produção de pigmentos naturais. **Dissertação de Mestrado em Química**. Universidade Federal do Pernambuco, Recife, Brasil, 2008.

SIMONSON, R.W. Soil color standards and terms for field use—history of their development. Soil Color, n. soilcolor, p. 1-20, 1993.

SOUSA, C.S. caracterização física, química e mineralógica dos solos de encostas sob diferentes sistemas de uso. **Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo**. Universidade Federal da Paraíba, Areia, Brasil, 2015.

SOUSA, R.M.L. Estudo da viabilidade da utilização de resíduo de poliestireno Expandido em formulações de tijolo ecológico. **Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais**. IFPI Teresina, 2022.

SOUZA, R. B. Apostila de ensaios preliminares – Cerâmica Vermelha. Teresina-PI, 2015.

SUAREZ, D.A.A. Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica. São Carlos. 2008. 144 p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Carlos, Brasil.

TECH, L. Propriedades de atenuação da radiação: influência da textura e do

tamanho de agregado do solo. 2017. 25 p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná, Brasil.
TERNIKAR, C.R.; GOMEZ, C.; KUMAR, D.N. Visible and infrared lab spectroscopy for soil texture classification: Analysis of entire spectra v/s reduced spectra. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 35, p. 101242, 2024.

TORRES, J. C. D. L. Obtenção de emulsões asfálticas convencionais e modificadas com argilas e nanoargilas. 2013. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

TORRES, R.A.P. Evaluación de una emulsión asfáltica modificada para su utilización en caminos no pavimentados como método supresor de polvo. 2018. 33 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil). Universidad del Bío-Bío, Chile.

VAN OLPHEN, H. An introduction to clay colloid chemistry. New York: Wiley, p. 30, 1977.

VARGA, G. The structure of kaolinite and metakaolinite. **Építoanyag**, v. 59, p. 4-8, 2007.

VARGAS, K.M.C. Processo de Deslocamento de Óleo em Micro Modelos de Meios Porosos por Injeção de Emulsão de Óleo em Água. 2014. 10 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

WBCSD (World Business Council for Sustainable Development). Cement Sustainability Initiative, 2020.

WU, P.; WU, H.; LI, R. Spectrochim. **Acta - Part A**, v. 61, p. 3020-3025, 2005.

ZAINI, M.S.I.; HASAN, M.; ALMUAYTHIR, S.; HYODO, M. Investigações experimentais sobre propriedades físico-mecânicas de solo argiloso de caulinita estabilizado com teor ótimo de sílica ativa usando cinza de concha e cal. **Scientifc Reports**, v. 14, p. 10995, 2024.

ANEXOS

Tabela 1: Umidade - Método Estufa

A	Nº da Cápsula	1	**2**	**3**
B	Massa da cápsula (g)	19,61	19,02	18,89
C	Cápsula + solo úmido (g)	119,61	119,02	118,89
D	Cápsula + solo seco (g)	118,88	118,87	118,86
E	Massa da água (g)	0,73	0,15	0,03
F	Massa de solo seco (g)	99,27	99,85	99,97
	Teor de Umidade (%)	0,74%	0,15%	0,03%
	Umidade média (%)		0,31%	

Fonte: (Autor, 2023)

Tabela 2: Determinação do Limite de liquidez - LL.

Pontos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Média**
Peso solo úmido + Tara Cápsula	g	9,05	10,14	10,14	9,59	8,55	-
Peso solo seco + Tara Cápsula	g	8,36	9,24	9,22	8,74	7,9	-
Tara Cápsula	g	5,04	5,09	5,06	5,05	5,05	-
Peso Água	g	0,69	0,9	0,92	0,85	0,65	-
Peso Solo Seco	g	3,32	4,15	4,16	3,69	2,85	-
Teor de Umidade	%	20,78%	21,69%	22,12%	23,04%	22,81%	22,09%
Número de Golpes	Num	26	22	21	20	20	21,80

Fonte: (Autor, 2023)

Tabela 3: Determinação do Limite de plasticidade - LP.

Pontos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Peso solo úmido + Tara Cápsula	g	5,43	5,44	5,33	5,44	5,37
Peso solo seco + Tara Cápsula	g	5,37	5,37	5,26	5,35	5,31
Tara Cápsula	g	4,69	4,78	4,74	4,74	4,76
Peso Água	g	0,06	0,07	0,07	0,09	0,06
Peso Solo Seco	g	0,68	0,59	0,52	0,61	0,55
Teor de Umidade	%	8,82%	11,86%	13,46%	14,75%	10,91%
Média do teor de Umidade				11,96%		

Fonte: (Autor, 2023)